
Schriftenreihe **IWAR**

275



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

IWAR

Julian Mosbach

**Eine automatisierte Methodik zur Planungs-
unterstützung in der Entwicklungszusammenarbeit -
Generierung von Netzausbauvarianten zur Einführung
einer leitungsgebundenen Wasserversorgungs-
infrastruktur am Beispiel informeller Siedlungen in
Subsahara-Afrika**

Herausgeber:

Verein zur Förderung des Instituts **IWAR** der TU Darmstadt e. V.



**Eine automatisierte Methodik zur Planungsunter-
stützung in der Entwicklungszusammenarbeit -
Generierung von Netzausbauvarianten zur Einführung
einer leitungsgebundenen Wasserversorgungs-
infrastruktur am Beispiel informeller Siedlungen in
Subsahara-Afrika**

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr. -Ing.) genehmigte Dissertation

von

Julian Mosbach, M. Sc.
aus Frankfurt am Main

Erstgutachter: Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke

Darmstadt 2023

D 17

Julian Mosbach

Eine automatisierte Methodik zur Planungsunterstützung in der Entwicklungszusammenarbeit - Generierung von Netzausbauvarianten zur Einführung einer leitungsgebundenen Wasserversorgungsinfrastruktur am Beispiel informeller Siedlungen in Subsahara-Afrika

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts **IWAR** der TU Darmstadt e. V.

Darmstadt: Eigenverlag, 2023

(Schriftenreihe IWAR 275)

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2023

ISSN 0721-5282

ISBN 978-3-940897-76-3

Creative Commons Lizenz: CC BY-SA 4.0 International

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/24329>

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-243292

Referent: Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke

Tag der schriftlichen Einreichung: 19.04.2023

Tag der mündlichen Prüfung: 26.06.2023

Alle Rechte vorbehalten. Wiedergabe nur mit Genehmigung des Vereins zur Förderung des Instituts **IWAR** der Technischen Universität Darmstadt e. V., c/o Institut IWAR, Franziska-Braun-Str. 7, 64287 Darmstadt.

Herstellung: Druckerei Lokay e.K.
Königsberger Str. 3
64354 Reinheim

Vertrieb: Institut **IWAR**
TU Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt
Telefon: 06151 / 16 20301
Telefax: 06151 / 16 20305



Erklärung zur Dissertation

Hiermit erkläre ich, Julian Mosbach, geboren in Frankfurt/Main (Deutschland),

- dass ich in der Vergangenheit weder an der Technischen Universität Darmstadt noch an einer anderen Technischen Hochschule oder Universität an einer Promotion gearbeitet oder Ähnliches versucht habe
- dass meine Dissertation nur unter Einbeziehung der von mir genannten Hilfen von mir selbständig verfasst und angefertigt wurde und
- dass die elektronische Version der Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

Titel der Dissertation:

Eine automatisierte Methodik zur Planungsunterstützung in der Entwicklungszusammenarbeit - Generierung von Netzausbauvarianten zur Einführung einer leitungsgebundenen Wasserversorgungsinfrastruktur am Beispiel informeller Siedlungen in Subsahara-Afrika

(Julian Mosbach)

Ort, Datum

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz des Instituts IWAR der Technischen Universität Darmstadt. Wenn auch über Umwege ist sie das Resultat eines Auslandsaufenthaltes während des Grundstudiums im Rahmen eines Projektes in der Entwicklungszusammenarbeit. Hier wurde mein Interesse an der Wasserversorgung, speziell an Wasserverteilnetzen, geweckt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban, für die Möglichkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in seinem Team am Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz zu arbeiten und unter seiner Leitung Forschung zu betreiben. Vielen Dank für die Anregungen und den fachlichen Austausch bei der Erstellung dieser Arbeit sowie das Vertrauen und die mir gegebenen Freiheiten im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut IWAR. An dieser Stelle möchte ich auch Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Linke für die konstruktiven Rückmeldungen und Denkanstöße während der Bearbeitung der Dissertation danken.

Für die Einblicke in die Praxis der Entwicklungszusammenarbeit sowie für die Kontakte zu Behörden und Wasserversorgern in Subsahara-Afrika danke ich Herrn Thomas Wolf von der KfW-Entwicklungsbank. Durch diese Einblicke und den Austausch ist die Idee dieser Arbeit entstanden. Weiter möchte ich mich bei Dr.-Ing Alexander Sonnenburg für seine Hilfsbereitschaft, die aufbauenden Gespräche und Ratschläge bei der Erstellung dieser Dissertation bedanken.

Ein großes Dankeschön geht an das WV-Kollegium für das gute Arbeitsklima und die fachlichen Diskussionen im Rahmen unseres Jour-Fixe. Mein besonderer Dank gilt dabei meinem Kollegen Christian Eichhorn für die zahlreichen und unterhaltsamen Telefonate während der Pandemie und den daraus entstandenen Denkanstößen. In diesem Zuge möchte ich auch den wissenschaftlichen Hilfskräften Moritz Krämer und Gabriel Manthey danken.

Zuletzt möchte ich meinen Freunden und meiner gesamten Familie danke sagen. Hervorheben möchte ich Christopher Bickert von-Slatow und Dr.-Ing. Alexander Busse für die zahlreichen Gespräche, die eine große Motivation zur Erstellung dieser Arbeit waren sowie Thorsten Biela für die Zeit beim Korrekturlesen. Meinen Eltern und meinem Bruder danke ich ganz besonders für die bedingungslose Unterstützung und den Antrieb diese Arbeit fertigzustellen. Auch möchte ich mich bei meinen Schwiegereltern für die Hilfe bei der Betreuung unseres Sohnes während der Verschriftlichung dieser Arbeit bedanken.

Meiner Frau und besten Freundin Tina danke ich für die Unterstützung an jedem Tag, für die zahlreichen Stunden, die sie mir den Rücken freigehalten hat. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine automatisierte Methodik entwickelt, die unter Berücksichtigung der vorhandenen Siedlungsstruktur verschiedene Ausbauvarianten eines Trinkwassernetzes in informellen Siedlungen aus technischer Sicht generiert. Ziel ist es, die Planung durch automatisierte Prozesse bei der Einführung einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgungsstruktur zur Erreichung der Versorgungskategorien „basic access“ und „intermediate access“ nach Kriterien der WHO [1] zu unterstützen. Hierzu ist der gesamte Prozess in der Programmiersprache Python umgesetzt. Durch ein Zusammenspiel von Ansätzen der algorithmischen Geometrie, Graphentheorie, Logistik, Gebietsplanung, mathematischen Optimierung und Hydraulik können innerhalb kürzester Zeit potenzielle Haupt- und Versorgungsleitungstrassen identifiziert, verschiedene längen- und hydraulisch optimierte Wasserversorgungsnetze generiert sowie Auswirkungen auf diese durch Variation potenzieller Planungsaspekte verdeutlicht werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit große Siedlungsbereiche im Hinblick auf eine zukünftige sektorale Erschließung in kleinere Untereinheiten aufzuteilen sowie optimale Entnahmestandorte im Netz unter Berücksichtigung tatsächlicher Weglängen unter dem Kriterium einer gerechten Erreichbarkeit für die Bevölkerung festzulegen. Die Methodik ist modular aufgebaut und über eine Schnittstelle mit einem Geoinformationssystem (QGIS) gekoppelt, sodass sämtliche Schritte und Planungsentscheidungen visualisiert werden können. Die Generierung reproduzierbarer Ergebnisse trägt auf diese Weise zur Transparenz in der Entscheidungsfindung bei. Gleichzeitig besteht dadurch die Möglichkeit individuelle und ggf. nicht optimale, Planungsvorgaben in den Prozess zu integrieren, um dem Prinzip eines partizipativen Upgrading-Ansatzes zu folgen. Die Validierung anhand zweier realer Fallbeispiele aus Subsahara-Afrika zeigt, dass die Methodik flexibel auf andere Gebiete übertragbar ist und, integriert in einen umfassenden Stadtplanungsansatz, einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Lebensbedingungen der dort lebenden Bevölkerung leisten kann.

Abstract

In this work, an automated method is developed that generates different expansion variants of a drinking water supply network in informal settlements from a technical point of view, taking into account the existing settlement structure. The aim is to support the planning by automated processes in the introduction of a pipe based drinking water supply structure to achieve the supply categories "basic access" and "intermediate access" according to criteria of the WHO (World Health Organization 2020). For this purpose, the entire process is implemented in the Python programming language. Through an interaction of approaches from algorithmic geometry, graph theory, logistics, spatial planning, mathematical optimization and hydraulics, potential main and supply pipe routes can be identified within a very short time, various length- and hydraulically optimized water supply networks can be generated, and effects on these can be clarified by varying potential planning aspects. Furthermore, it is possible to divide large settlement areas into smaller sub-units with regard to a future sectoral development as well as to determine optimal withdrawal locations in the network considering actual path lengths under the criterion of a fair accessibility for the population. The methodology has a modular design and is coupled with a geographic information system (QGIS) via an interface so that all steps and planning decisions can be visualized. In this way, the generation of reproducible results contributes to transparency in the decision-making process. At the same time, it is possible to integrate individual and possibly non-optimal planning specifications into the process in order to follow the principle of a participatory upgrading approach. The validation based on two real case studies from sub-Saharan Africa shows that the methodology can be flexibly transferred to other areas and that, integrated into a comprehensive urban planning approach, it can make an important contribution to improving the living conditions of the population living there.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung zur Dissertation	i
Danksagung.....	iii
Kurzfassung.....	v
Abstract	vii
Inhaltsverzeichnis.....	ix
Abbildungsverzeichnis.....	xiii
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis.....	xix
1 Einführung und Motivation	1
1.1 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	3
1.2 Abgrenzung des Themas	4
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Informelle Siedlungen	7
2.1 Der Begriff „informelle Siedlung“	7
2.2 Siedlungsupgrade	8
2.2.1 Sektorale Siedlungsaufwertung	10
2.2.2 Nicht-technische Faktoren der Siedlungsaufwertung.....	11
2.3 Wasserversorgung in der Entwicklungszusammenarbeit.....	12
2.3.1 SDG 6.1: Gerechter Zugang zu einwandfreiem und bezahlbarem Trinkwasser	13
2.3.2 Ansätze zur Wasserbereitstellung	14
2.3.3 Intermittierende Wasserversorgung.....	15
2.4 Sanitärversorgung in informellen Siedlungen	18
3 Grundlagen der Wasserverteilungssysteme.....	23
3.1 Planung von Wasserverteilungssystemen	23
3.1.1 Netzarten.....	24
3.1.2 Hydraulische Mindestanforderungen: Fließgeschwindigkeit und Versorgungsdruck.....	25
3.1.3 Bemessungsgrundlagen	26
3.1.4 Druckzoneneinteilung	27
3.2 Grundlagen der Rohrhydraulik	28
3.2.1 Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung)	28
3.2.2 Energieerhaltung und hydraulische Druckverlustberechnung	28
3.3 Modellierung und Simulation eines Rohrleitungsnetzes	31
3.3.1 Modellerstellung.....	31

3.3.2	Rohrnetzberechnung mit EPANET 2	32
3.4	Optimierung von Wasserverteilnetzen	33
3.4.1	Topologieoptimierung.....	34
3.4.2	Durchmesseroptimierung	35
3.4.3	Genetische Algorithmen	36
3.5	Ansätze zur automatisierten Netzerstellung	38
4	Grundlagen aus Mathematik, Informatik und Logistik	41
4.1	Graphentheorie.....	41
4.1.1	Kürzeste-Wege-Problem	42
4.1.2	Minimaler Steinerbaum	43
4.2	Ganzzahlige- und Gemischt-ganzzahlige-Optimierung	44
4.3	Grundlagen der Standortplanung	45
4.3.1	p-Center-Problem.....	46
4.3.2	Location-Set-Covering-Problem.....	47
4.4	Grundlagen der Gebietsplanung	47
5	Entwicklung einer Methodik zur Planungsunterstützung	51
5.1	Hardware und Software	53
5.2	Informal Settlement Level: Untersuchungsgebiet, Datenimport und Maximalnetzerstellung.	54
5.2.1	Maximalnetzerstellung.....	55
5.2.2	Reduzierung des Maximalnetzes: Haupt- und Versorgungsleitungen.....	57
5.3	District level: Gebietseinteilung und Identifikation von Hauptleitungstrassen.....	61
5.3.1	Gebietseinteilung	61
5.3.2	Rekursiver Partitionierungsalgorithmus und Kompaktheitsmaße.....	63
5.4	Building level: Variantenentwicklung für ein Versorgungsnetz.....	66
5.4.1	Standortplanung für Wasserentnahmestellen und Verbrauchszuweisung	67
5.4.2	Topologieoptimierung.....	71
5.4.3	Durchmesseroptimierung	77
6	Ergebnisse	81
6.1	Aufwertungsziele und Datengrundlage.....	81
6.2	Fallbeispiel Windhoek (Namibia)	85
6.2.1	Informal Settlement Level.....	86
6.2.2	District level.....	87
6.2.3	Building level	93
6.3	Fallbeispiel Lusaka (Sambia)	113
6.3.1	Informal Settlement Level.....	113
6.3.2	District level.....	115
6.3.3	Building level	117
6.4	Übertragbarkeit der Methodik auf eine Siedlung im ländlichen Raum	130
7	Diskussion	133
7.1	Kritische Betrachtung der Methodik und Ergebnisse.....	133
7.2	Beantwortung der Forschungsfragen	137

8	Methodenerweiterung und Ausblick.....	141
8.1	Automatisierte Datengenerierung	141
8.2	Dynamik in den Gebieten und Unsicherheiten	141
8.3	Implementierung monetärer Kosten.....	142
8.4	Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Moduls der Standortplanung.....	143
9	Zusammenfassung	145
	Literaturverzeichnis.....	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Netzarten: Verästelungsnetz (a), Ringnetz (b), vermaschtes Ringnetz (c).....	25
Abbildung 3-2:	Bestandteile eines Individuums	37
Abbildung 5-1:	Aufbau der Methodik - Betrachtungsebenen und Module.....	52
Abbildung 5-2:	Gebäude, Stützpunkte und Voronoi-Polygone (a); Ableitung des Maximalnetzes in der Detailansicht (b)	56
Abbildung 5-3:	Leitungsattributtabelle.....	57
Abbildung 5-4:	Generierung potenzieller Distriktgrenzen und Ableitung der Basisgebiete	59
Abbildung 5-5:	Potenzielle Trassen mit Distanzpuffer (a); potenzielle Versorgungsleitungstrassen nach der Netzreduktion (b)	60
Abbildung 5-6:	District level – Prozess zur Gebietseinteilung und Ableitung der Hauptleitungstrassen	63
Abbildung 5-7:	Generierung der Anschlusswege	68
Abbildung 5-8:	Reduzierung des Versorgungsnetzes vor Beginn der Ringnetzoptimierung	74
Abbildung 5-9:	Aufbau des genetischen Algorithmus (links) und Einführung von Multiprocessing (rechts)	75
Abbildung 5-10:	GA zur DN-Optimierung - Pseudocode zur Evaluation.....	80
Abbildung 6-1:	Lage des Untersuchungsgebiets (cyan) in Windhoek (Namibia)	85
Abbildung 6-2:	Betrachtungsgebiet Windhoek und Input-Daten (a); topologische Karte des Untersuchungsgebiets (b)	86
Abbildung 6-3:	Maximalnetz (links) und Detailansicht Barriere (rechts)	87
Abbildung 6-4:	Das Betrachtungsgebiet (a); Basisgebietserstellung bei Mindestabstand >5m (b); Basisgebietserstellung bei Mindestabstand >10m (c).....	88
Abbildung 6-5:	Ergebnisse der Gebietseinteilung nach verschiedenen Kompaktheitsmaßen.....	90
Abbildung 6-6:	Gebietseinteilung nach gewichteten Kompaktheitsmaßen	91
Abbildung 6-7:	Manuelle Anpassungen nach automatisierter Gebietseinteilung	92
Abbildung 6-8:	Finale Gebietsaufteilung farblich gekennzeichnet (a); Gebietsaufteilung in Bezug auf geodätische Höhenkompaktheit (b); Darstellung des übergeordneten Hauptleitungsnetzes (c).....	93
Abbildung 6-9:	Informelles Siedlungsgebiet (links) und Abgrenzung einer Upgrading-Area (rechts)	94
Abbildung 6-10:	Potenzielle Versorgungsleitungstrassen in der Upgrading-Area	95
Abbildung 6-11:	Windhoek Verästelungsnetz - Anzahl der Entnahmestellen in Abhängigkeit der Erreichbarkeit	96
Abbildung 6-12:	Windhoek Ringnetz - Anzahl der Entnahmestellen in Abhängigkeit der Erreichbarkeit	96
Abbildung 6-13:	Ergebnis des p-Center-Problem zur Erreichung der Versorgungskategorie „basic access“	97
Abbildung 6-14:	Verästelungsnetz mit einer Entnahmestelle: ohne Differenzierung der Trassenart (a); mit Straßenfaktor $f_{street} = 0,5$ (b)	98
Abbildung 6-15:	Verlauf der Kosten der besten Lösung je Iteration - Verästelungsnetz bei Versorgungskategorie "basic access"	99
Abbildung 6-16:	Ergebnis DN-Optimierung - Verästelungsnetz bei Versorgungskategorie "basic access"	99

Abbildung 6-17:	Verästelungsnetz - Ergebnis des p-Center-Problem zur Erreichung der Versorgungskategorie „intermediate-access“	100
Abbildung 6-18:	Verästelungsnetz mit 17 Entnahmestellen: ohne Differenzierung der Trassenart (a); mit Straßenfaktor $f_{street} = 0,1$ (b)	101
Abbildung 6-19:	Verästelungsnetz bei Versorgungskategorie "intermediate access" - Zuweisung der Hütten zu den Entnahmeknoten	102
Abbildung 6-20:	Verlauf der Kosten der besten Lösung je Iteration: Verästelungsnetz bei Versorgungskategorie "intermediate access"	103
Abbildung 6-21:	Ergebnis DN-Optimierung - Verästelungsnetz der Versorgungskategorie "intermediate acces"	104
Abbildung 6-22:	Ringnetz - Ergebnis des p-Center-Problem zur Erreichung der Versorgungskategorie „intermediate access“	105
Abbildung 6-23:	Kostenverlauf der besten Lösung in Abhängigkeit der Iterationen: Trassenartfaktor $f_{street} = 1$ (a); Trassenartfaktor $f_{street} = 0,5$ (b)	106
Abbildung 6-24:	Ringnetz - Ergebnis Topologieoptimierung mit 12 Entnahmestellen ohne Differenzierung der Trassenart	106
Abbildung 6-25:	Ringnetz - Ergebnis Topologieoptimierung mit 12 Entnahmestellen mit Trassenartfaktor $f_{street} = 0,1$	107
Abbildung 6-26:	Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" - Zuweisung der Hütten zu den Entnahmeknoten.....	107
Abbildung 6-27:	Kostenverlauf der besten Lösung je Iteration - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access": ohne Redundanz (a); mit Redundanz (b)	108
Abbildung 6-28:	Ergebnis DN-Optimierung - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" ohne Redundanz	109
Abbildung 6-29:	Ergebnis DN-Optimierung - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" mit Redundanz	110
Abbildung 6-30:	Exkurs größeres Betrachtungsgebiet – Überblick.....	111
Abbildung 6-31:	Exkurs größeres Betrachtungsgebiet - Lokalisierung der Entnahmestellen.....	112
Abbildung 6-32:	Exkurs größeres Betrachtungsgebiet – Versorgungsnetz bei Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$	112
Abbildung 6-33:	Stadtgebiet Lusaka und gewählter informeller Siedlungsbereich	113
Abbildung 6-34:	Lusaka: Untersuchungsgebiet mit Bebauung und Barrieren (a), geodätische Höhen im Untersuchungsgebiet (b).....	114
Abbildung 6-35:	Potenzielle Versorgungsleitungstrassen und Detailansicht	115
Abbildung 6-36:	Lusaka district level – Basisgebiete	115
Abbildung 6-37:	Ergebnis Gebietseinteilung nach Polsby-Popper (links), finale Gebietseinteilung nach manueller Anpassung (rechts)	117
Abbildung 6-38:	Lage der Upgrading-Area im Betrachtungsgebiet und Detailansicht.....	117
Abbildung 6-39:	potenzielle Versorgungsleitungstrassen (links), Detailansicht manuelle Anpassung (rechts)	118
Abbildung 6-40:	Lusaka Verästelungsnetz - Anzahl der Entnahmestellen in Abhängigkeit der Erreichbarkeit.....	119

Abbildung 6-41: Lusaka Ringnetz - Anzahl der Entnahmestellen in Abhängigkeit der Erreichbarkeit	119
Abbildung 6-42: Versorgungskategorie "basic access" - Entnahmestellen und entferntester Abnehmer	120
Abbildung 6-43: Lusaka Verästelungsnetz „basic access“ - ohne Differenzierung der Trassenart (a); mit Straßenfaktor $f_{street} = 0,1$ (b).....	121
Abbildung 6-44: Lusaka Topologieoptimierung Kostenverlauf GA: Umgebungsfaktor $f_{street} = 1$ (a); Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ (b).....	121
Abbildung 6-45: Lusaka Topologieoptimierung Ringnetz mit 2 Entnahmestellen - Umgebungsfaktor $f_{street} = 1$ (a); Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ (b)	122
Abbildung 6-46: Lusaka Topologieoptimierung Verästelungsnetz mit 21 Entnahmestellen – Umgebungsfaktor $f_{street} = 1$ (a); Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ (b)	123
Abbildung 6-47: Kostenverlauf der besten Lösung je Iteration - Verästelungsnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"	124
Abbildung 6-48: Ergebnis DN-Optimierung Lusaka - Verästelungsnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"	125
Abbildung 6-49: Lusaka Kostenverlauf GA Ringnetz mit 8 Entnahmestellen - Umgebungsfaktor $f_{street} = 1$ (a); Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ (b)	125
Abbildung 6-50: Lusaka Topologieoptimierung Ringnetz mit 8 Entnahmestellen – Umgebungsfaktor $f_{street} = 1$ (a); Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ (b)	126
Abbildung 6-51: Kostenverlauf der besten Lösung je Iteration - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" mit Redundanz	127
Abbildung 6-52: Ergebnis DN-Optimierung - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" mit Redundanz	128
Abbildung 6-53: Luftbildaufnahme ländliche Siedlung Guani (Mali) (a); Luftbildaufnahme Guani und Inputdaten (b).....	130
Abbildung 6-54: Position der Entnahmestellen im potenziellen Netz (a); Topologieoptimierung Verästelungsnetz (b).....	131
Abbildung 7-1: Automatisiert generiertes Wasserversorgungsnetz mit NetworkX-approximate--steiner-tree-solver (links), manuelle Korrektur (rechts rot bzw. grau).....	136

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Stufen der Trinkwasserversorgung	13
Tabelle 2-2:	Wasserversorgungskategorien nach Verbrauch und Erreichbarkeit.....	14
Tabelle 2-3:	Sanitärversorgungsstufen	18
Tabelle 6-1:	Legende der Netzelemente und Hütten	84
Tabelle 6-2:	Ermittelte Rohrtypen und Leitungslängen für ein Verästelungsnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"	103
Tabelle 6-3:	Windhoek - Ermittelte Rohrtypen und Leitungslängen für ein Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"	108
Tabelle 6-4:	Windhoek - Berechnungsergebnisse Druck unter Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz	110
Tabelle 6-5:	Windhoek – Berechnungsergebnisse Fließgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz	111
Tabelle 6-6:	Lusaka - Ermittelte Rohrtypen und Leitungslängen für ein Verästelungsnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"	124
Tabelle 6-7:	Lusaka - Ermittelte Rohrtypen und Leitungslängen für ein Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"	127
Tabelle 6-8:	Lusaka - Berechnungsergebnisse Druck unter Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz	128
Tabelle 6-9:	Lusaka - Berechnungsergebnisse Fließgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz	129

Abkürzungsverzeichnis

ADB	Asian Development Bank
AfDB	African Development Bank
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CPU	Central Processing Unit
DEM	Digital Elevation Model (digitales Höhenmodell)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Diameter Nominal
DP	Design Pressure (Systembetriebsdruck)
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
engl.	englisch
EPA	(United States) Environmental Protection Agency
ff	nach einer Seitenzahl: und folgende Seiten
GA	Genetischer Algorithmus
ggf.	gegebenenfalls
GIS	Geoinformationssystem
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
d.h.	das heißt
Hrsg.	Herausgeber
ID	Identifikationsnummer
IDE	Integrated Development Environment
ILP	Integer Linear Programming (ganzzahlige lineare Programmierung)
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
LP	Linear Programming (lineare Programmierung)
m a.s.l.	meter above sea level
max.	maximal
MILP	Mixed Integer Linear Programming (gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung)
min.	minimal
MINLP	Mixed Integer Nonlinear Programming (gemischt-ganzzahlige nicht lineare Programmierung)
MIP	Mixed Integer Programming (gemischt-ganzzahlige Programmierung)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NLP	Nonlinear Programming (nicht lineare Programmierung)
o.g.	oben genannt
OHCHR	Office of the High Commissioner for Human Rights
OSM	Open-Street-Maps
PE	Polyethylen
PYPL-Index	PopularitY of Programming Language Index
QGIS	Quantum GIS
S.	Seite
SCIP	Solving Constraint Integer Programs
SDG	Sustainable Development Goals
SDR	Standard Dimension Ratio

s.o.	siehe oben
sog.	sogenannt
u.a.	unter anderem
u.s.w.	und so weiter
UN	United Nations (Vereinte Nationen)
UN-Habitat	United Nations Human Settlements Programme
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund
u.U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
WDS	Water Distribution System
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)
z.B.	zum Beispiel

1 Einführung und Motivation

Der Zugang zu sicherem und sauberem Trinkwasser ist seit dem Jahr 2010 ein Menschenrecht [2] und zudem als Nachhaltigkeitsziel in den United Nations „Sustainable Development Goals“ (SDG 6: Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all) verankert. Trotz großer Anstrengungen und Initiativen wurde das angestrebte Ziel speziell in Schwellen- und Entwicklungsländern bis heute jedoch vielerorts nicht erreicht [3]. Zwar konnte im Zeitraum 2015 bis 2020 der Anteil der Weltbevölkerung mit Zugang zu einer gesicherten Trinkwasserversorgung (engl. safely managed drinking water service) von 70% auf 74% erhöht werden, jedoch verfügen im Umkehrschluss weiterhin ca. 2 Milliarden Menschen über keinen solchen Zugang, wovon für wiederum 1,2 Milliarden nicht einmal die Grundversorgung gewährleistet ist [4]. Heutige Schätzungen gehen davon aus, dass zur Erreichung der Ziele bis in das Jahr 2030 die derzeitigen Fortschritte verdoppelt werden müssten [4]. Vom fehlenden oder mangelhaften Zugang sind vor allem ärmere Gesellschaftsschichten betroffen. Im städtischen Bereich von Schwellen- und Entwicklungsländern sind dies oftmals Bewohner informeller Siedlungen und Slums. Im Jahr 2020 lebten ca. 25% der weltweiten städtischen Bevölkerung in Slums oder informellen Siedlungen [4]. Dies ist auf den ersten Blick eine Verbesserung im Vergleich zu 46% im Jahr 1990, jedoch täuscht dieser vermeintliche Fortschritt, da er durch anhaltendes Bevölkerungswachstum und Urbanisierung bzw. der zugrundeliegenden Landflucht [5] weitestgehend ausgeglichen wird, sodass heute über 1 Milliarde Menschen in Slums oder informellen Siedlungen leben [6]. In den Ländern südlich der Sahara (im Folgenden *Subsahara-Staaten*) beträgt ihr Anteil an der städtischen Bevölkerung über 50% [7], was dem höchsten Anteil im weltweiten Vergleich entspricht [4]. Bereits seit den 1980er Jahren weist diese Region das weltweit höchste Bevölkerungswachstum auf. Heutige Schätzungen gehen davon aus, dass sich die in Subsahara-Staaten lebende Bevölkerung bis ins Jahr 2050 annähernd verdoppeln wird, was über der Hälfte des weltweiten Bevölkerungswachstums in diesem Zeitraum entspricht [8]. Neben dem starken Bevölkerungswachstum wird sich die Situation durch die anhaltende Landflucht bzw. Urbanisierung weiter verschärfen. Während im Jahr 2021 noch ca. 58% der dort lebenden Bevölkerung den ländlichen bzw. 42% den städtischen Raum besiedelten [9], gehen heutige Prognosen von einer annähernden Umkehr dieses Verhältnisses im Jahr 2050 aus (ca. 45% ländlicher bzw. 55% städtischer Raum) [10].

Der rasante Anstieg der Bevölkerungszahl in Verbindung mit einer anhaltenden Urbanisierung stellt insbesondere öffentliche Versorgungsunternehmen bei der Einführung von Infrastrukturen in informellen Siedlungen und Slums vor große Herausforderungen. Zum einen ist ihr Ausbau und die Bereitstellung von Dienstleistungen diesem Tempo nicht gewachsen [7], zum anderen vernachlässigt der seit etwa 150 Jahren bestehende und auf zentralisierten Wasserver- und Entsorgungskonzepten basierende Ansatz aufgrund finanzieller, ökologischer und sozialer Aspekte häufig informelle Siedlungen und Slums [11], [3]. Gleichzeitig sind die Trinkwasserver- sowie die Abwasserentsorgung Schlüsseldienstleistungen im Kampf gegen soziale Ausgrenzung und Armut [12]. Die Einführung einer Wasserversorgungsinfrastruktur bzw. die Bereitstellung von Basisdienstleistungen sind daher wichtige Schritte zur Verbesserung der Lebensbedingungen der in diesen Siedlungen lebenden Bevölkerung [13], [14]. Die UN fordert daher in der Resolution 64/292 (The human right to water and sanitation) Staaten und Organisationen dazu auf, Entwicklungsländer bei dieser Herausforderung in Form finanzieller Mittel, Kapazitäten und durch Technologietransfer zu unterstützen [2]).

Die Herausforderungen an die Planung einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung sind vielfältig. Informelle Siedlungen können nicht als homogene Einheiten behandelt werden [15], [13], [16], sodass

sich daraus unterschiedliche Anforderungen an die Trinkwasserversorgung ergeben. Während Bewohner in manchen Siedlungsgebieten seit Jahren über einen sicheren Zugang in unmittelbarer Umgebung verfügen, fehlt es in anderen Gebieten am Nötigsten, sodass Bewohner weite Strecken bis zur nächsten Bezugsmöglichkeit zurücklegen müssen. Eine weitere Herausforderung besteht darin, eine geeignete Trassierung in den bereits bebauten, meist nicht kartierten, dicht und unstrukturiert besiedelten Gebieten zu finden, die darüber hinaus einem ständigen Wandel (Erweiterung, Verdichtung, Umsiedlung, Zuzug) unterliegen. Rausch [17] und Satterthwaite et al. [18] stellen hierbei einen häufigen Mangel an für die Planung von Infrastrukturen bzw. die Bereitstellung von Dienstleistungen essentiellen Informationen fest, während die Fluktuation in den Gebieten gleichzeitig dazu führen kann, dass die der Planung zugrundeliegende Siedlungsstruktur bei Beginn der Baumaßnahme nicht mehr vorhanden ist. Erschwerend kommt hinzu, dass die Planung, der Bau und der Betrieb von Wasserverteilungssystemen komplex und mit hohen Kosten verbunden ist [19]. Wasserverteilungsanlagen machen mit 60-80% den größten Anteil am Anlagevermögen eines Wasserversorgungssystems aus [20]. Das oftmals geringe Einkommen der in diesen Gebieten lebenden Bevölkerung lässt wenig Spielraum für eine mögliche Refinanzierung der Maßnahme, sodass eine pragmatische und möglichst kostengünstige Lösung gefunden werden muss. Neben der strukturellen Heterogenität existieren innerhalb der Siedlungen auch soziale, kulturelle, ethnologische und wirtschaftliche Unterschiede sowie sozial-räumliche Beziehungen, die zusätzlich im Planungsprozess berücksichtigt werden müssen [21], [22]. Bereits seit Jahrzehnten existieren Debatten, welche Strategien für eine Aufwertung mit welchen Zielsetzungen am besten geeignet sind [23], [13]. Der Fokus heutiger Upgrading-Ansätze liegt auf einer schrittweise erfolgenden Entwicklungsstrategie, die auf Grundlage von physischen Plänen und unter Einbeziehung der Bevölkerung sowie Um- und Neugestaltung von Flächen erfolgt [24]. Hierfür wird das Siedlungsgebiet in sogenannte „Upgrading-Areas“ unterteilt. Bevor es jedoch zu einer Aufwertung einer Upgrading-Area kommt, muss sichergestellt sein, dass dieser Bereich später auch erschlossen und versorgt werden kann. Die Planung steht vor der Herausforderung, einerseits strukturelle und soziale Gegebenheiten bei der Einteilung der Upgrading-Areas individuell zu berücksichtigen, andererseits muss die Trassierung der Hauptleitungen einer leitungsgebundenen Wasserversorgungsinfrastruktur aus Kostengründen im Kontext des gesamten Betrachtungsgebiets gewählt und in ein übergeordnetes Netzlayout integriert werden. Für eine vorausschauende Planung großer informeller Siedlungsbereiche muss daher ein übergeordnetes Netzlayout von Hauptleitungen existieren, das die zukünftigen Upgrading-Areas mit einer Wasserquelle verbinden. Mit Wasserquelle ist hier der Ort des Wasserbezugs, d.h. ein Anschluss an ein bestehendes Netz, ein Reservoir, etc. gemeint.

Infolge der Heterogenität der Gebiete müssen anschließend in Kooperation mit der Bevölkerung sektorale Lösungen gefunden werden. Hierzu stehen meist mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, die es unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten, verschiedener Interessen und Zielsetzungen abzuwägen gilt. Die Entwicklung einer Planungsgrundlage ist daher langwierig und aufwendig und vor dem Hintergrund der Dynamik in den Gebieten mit Risiken verbunden. Die Planung steht dabei unter Druck, schnelle Ergebnisse liefern zu müssen und diese gleichzeitig mit langfristigen Visionen zu vereinbaren. Die Entwicklung von Planungsinstrumenten, die auf Basis einer Gebietsanalyse schnelle Ausbauvorschläge generieren, erlangen daher immer größere Bedeutung [25]. Auch der Einbezug der Bevölkerung in den Planungsprozess erfordert die Nutzung technischer Unterstützungssysteme, um die Auswirkungen verschiedener Entscheidungen zu verstehen [16]. Die Auswertung der für diese Arbeit relevanten Literatur zeigt, dass eine weitestgehend automatisierte Netzerstellung mit unterschiedlichen

Zielsetzungen bereits Teil der Forschung ist. Es handelt sich jedoch tendenziell um rein mathematische d.h. theoretische Ansätze sowie Ansätze zur Nachbildung bestehender Systeme für formale, heterogene, städtische Bereiche. Eine Methodik zur automatisierten Generierung einer leitungsgebundenen Wasserversorgungsstruktur in informellen Siedlungen und Slums, die sich an der tatsächlich vorherrschenden Siedlungstopologie bzw. einzelnen Objekten orientiert und auf die besonderen Anforderungen übertragbar ist, ist nicht bekannt. Diese Lücke wird im Rahmen dieser Arbeit geschlossen.

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit nicht zwischen weiblichen und männlichen Berufsbezeichnungen unterschieden, es sind immer beide Geschlechter gleichberechtigt angesprochen.

1.1 Zielsetzung und Forschungsfragen

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Herausforderungen besteht das Ziel dieser Arbeit in der Entwicklung einer Methodik zur Planungsunterstützung, die auf Grundlage georeferenzierter Gebietsdaten weitestgehend automatisiert, schnelle und hinsichtlich individueller Zielvorgaben optimale Ausbauvarianten zur Einführung einer leitungsgebundenen Wasserversorgungsinfrastruktur für informelle Siedlungsbereiche generiert. Im Fokus stehen hierbei informelle Siedlungen in Subsahara-Afrika. Die zugrundeliegende Methodik soll variabel auf informelle Siedlungen verschiedenster Städte übertragbar sowie auf verschiedene Betrachtungsebenen und Versorgungsziele anwendbar sein und dabei bestehende Strukturen berücksichtigen. Trotz einer weitgehenden Automatisierung muss zu jeder Zeit die Möglichkeit bestehen, manuell in den Planungsprozess einzugreifen, um individuelle Planungsvorgaben in den Prozess zu integrieren. Gleichzeitig soll der Prozess die Transparenz in der Entscheidungsfindung unterstützen, sodass das Werkzeug als Teil eines partizipativen Upgrading-Prozesses genutzt bzw. in einen partizipativen Ansatz integriert werden kann. Dies sind Voraussetzungen damit die Maßnahmen auch nachhaltig wirken. Zur Erreichung dieser Ziele und Anforderungen wird eine interdisziplinäre Methodik entwickelt, die Ansätze der algorithmischen Geometrie, Graphentheorie, Logistik, Gebietsplanung, mathematischen Optimierung und Hydraulik vereinigt und in der Programmiersprache Python umgesetzt ist.

Die Entwicklung einer solchen Methodik resultiert aus folgenden Forschungsfragen:

- Forschungsfrage 1: Wie können automatisiert Haupt- und Versorgungsleitungstrassen in den sehr heterogenen, unstrukturierten und dicht bebauten Gebieten identifiziert werden?
- Forschungsfrage 2: Wie kann eine Sektorierung großer informeller Siedlungsbereiche vorausschauend in die Planung integriert werden, sodass eine hohe Flexibilität in Bezug auf die Erschließung zukünftiger Upgrading-Areas mit einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung erhalten bleibt?
- Forschungsfrage 3: Wie können unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten automatisiert Ausbauvarianten generiert werden, die zudem die Transparenz in der Entscheidungsfindung sowie das Kriterium einer gerechten Erreichbarkeit einer öffentlichen Entnahmestelle unterstützen?

1.2 Abgrenzung des Themas

Ein ganzheitlicher Upgrading-Prozess in informellen Siedlungen ist sehr vielseitig und erfordert den Einbezug unterschiedlichster Disziplinen, sodass eine klare Abgrenzung des Themas nötig ist. Der Begriff Infrastruktur lässt sich in technische sowie soziale Infrastrukturen unterteilen. Während zu den technischen Infrastrukturen Verkehrswege, Energie-, Wasserversorgung sowie Entsorgungseinrichtungen gehören, werden Bildungseinrichtungen, ein Gesundheitssystem, die öffentliche Sicherheit, soziale Absicherung, Fürsorgedienstleistungen etc. als soziale Infrastruktur bezeichnet. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Planungsunterstützung soll in diesem Prozess einen Beitrag aus rein technischer Sicht in Bezug auf ein Wasserversorgungsnetz liefern. Dabei wird vorausgesetzt, dass ein entsprechendes Wasserdargebot vorhanden sowie die der Planung vorangestellte Frage des Grundbesitzes bzw. der Eigentumsverhältnisse geklärt ist. Der Fokus liegt auf der Entwicklung einer übertragbaren Methodik zur Einteilung großer Siedlungsflächen, zur Suche nach einer geeigneten Trassierung, Ermittlung optimaler öffentlicher Entnahmestellenstandorte für die Bevölkerung und Berechnung der optimalen Leitungsdimensionen aus hydraulischer Sicht. Die Lokalisierung und Auslegung von Armaturen und Pumpen sind darin nicht berücksichtigt. In jedem Schritt wird mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen nach der „kostengünstigsten“ Lösung für zuvor definierte Versorgungsziele gesucht, monetäre Wirtschaftlichkeits- sowie etwaige Refinanzierungsuntersuchungen finden nicht statt. Weitere nicht-technische Fragestellungen zu sozialen, sozialökonomischen, ethnologischen, kulturellen oder ökologischen Faktoren mit Auswirkungen auf die leitungsgebundene Wasserversorgung können durch manuelle Eingriffsmöglichkeiten in jedem Bearbeitungsschritt integriert werden. Bei ausschließlich automatisierter Verwendung der Methodik werden sie jedoch aufgrund ihrer diversen Natur nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich muss die Wasserver- und Abwasserentsorgung aufgrund ihrer direkten Abhängigkeit voneinander als ein System angesehen werden. Trotzdem ist die Abwasserentsorgung kein expliziter Bestandteil dieser Arbeit. Hintergrund sind die abweichenden Anforderungen von Versorgungsnetz und Kanalsystem an die Hydraulik bzw. den Transport, woraus unterschiedliche Planungsansätze resultieren. Im Hinblick auf die Abwasserentsorgung werden in Kapitel 2.4 bestehende technische Lösungen in informellen Siedlungen vorgestellt.

Des Weiteren beschäftigt sich die Methodik nicht mit Fragestellungen zu potenziellen Umsiedlungen. Die automatisierte Entwicklung von Planungsvarianten basiert auf den vorherrschenden Bedingungen. Einzelne Hütten können jedoch manuell vom Nutzer entfernt oder im Betrachtungsgebiet umgesiedelt werden, mit automatisierter Berücksichtigung der sich hieraus ergebenden Änderungen im weiteren Prozess.

Abschließend sei angemerkt, dass das Vorgehen keine Wertung der Varianten vornimmt und sich somit klar von Entscheidungsunterstützungssystemen (engl. *decision support systems*) abgrenzt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zur Beantwortung der Forschungsfragen ist die Arbeit in 9 Kapitel gegliedert.

In Kapitel 2 werden zunächst die Begriffe „informelle Siedlung“ sowie „Slum“ definiert und ein Einblick in Ansätze zur Siedlungsaufwertung und dabei zu berücksichtigende Faktoren gegeben. Im Rahmen des Unterkapitels 2.3 werden dann Ziele und Versorgungskategorien der Vereinten Nationen (UN) sowie der Weltgesundheitsorganisation (WHO) vorgestellt, die in den späteren Fallbeispielen (Kapitel 6) aufgegriffen werden. In diesem Zusammenhang werden technische Möglichkeiten der

Wasserbereitstellung sowie des intermittierenden Betriebs beschrieben. Anschließend folgt ein Einblick in technische Lösungen der Sanitärversorgung in informellen Siedlungen und Slums.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Grundlagen der Wasserverteilungssysteme, wobei der Fokus auf dem Rohrnetz liegt. Die Anforderungen an die Planung, hydraulische Bemessung, Modellierung und Optimierung werden beschrieben sowie bestehende Ansätze zur automatisierten Netzerstellung vorgestellt.

Kapitel 4 enthält die für die Methodik relevanten Grundlagen aus der Mathematik, Informatik, Logistik und Gebietsplanung. Zunächst wird auf die Graphentheorie bzw. graphentheoretische Ansätze eingegangen, die später bei der Modellierung und Optimierung des Wasserverteilungsnetzes zum Einsatz kommen. Anschließend erfolgt ein Einblick in die ganzzahlige- und gemischt-ganzzahlige Optimierung, die zur Lösung von Standortproblemen aus der Logistik in Form des p-Center-Problems und Location-Set-Covering-Problems genutzt wird. Das Kapitel schließt mit einem Einblick in die Gebietsplanung,

In Kapitel 5 wird die Methodik entwickelt. Ihr Aufbau ist modular und erlaubt eine Planungsunterstützung auf verschiedenen Betrachtungsebenen. Zunächst werden unterschiedliche Maximalnetze generiert, die zur Identifizierung potenzieller Hauptleitungs- sowie Versorgungsleitungstrassen herangezogen werden. Im Zusammenspiel mit einem rekursiven Partitionierungsalgorithmus aus der Gebietsplanung werden Distrikte identifiziert und ein Hauptleitungslayout zur Erschließung zukünftiger Upgrading-Areas abgeleitet. Die Ermittlung optimaler (Wasser-) Entnahmestellen in den jeweiligen Upgrading-Areas erfolgt durch mathematische Optimierung, wobei manuelle Eingriffe integriert werden können. Zur Ableitung des Netzlayouts werden Algorithmen auf Basis heuristischer Ansätze entwickelt, die zunächst eine optimale Trassierung identifizieren, auf der aufbauend eine hydraulisch optimierte Dimensionierung der einzelnen Rohrleitungen erfolgt. Hierbei kann gewählt werden, ob ein Ring- oder Verästelungsnetz entstehen soll.

In Kapitel 6 wird die entwickelte Methodik praxisnah anhand zweier informeller Siedlungen in Windhoek (Namibia) und Lusaka (Sambia) angewendet. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden detailliert beschrieben. Sämtliche Zwischenergebnisse werden hierbei über ein GIS (GeoInformationssystem) verbildlicht, sodass der gesamte Prozess reproduzierbar wird. Anschließend werden weitere Anwendungsmöglichkeiten der Methodik durch einen Übertrag auf eine Siedlung im ländlichen Raum in Mali aufgezeigt.

In Kapitel 7 folgt die Diskussion der Ergebnisse. Dabei werden auch Grenzen des Ansatzes herausgearbeitet. Das Kapitel schließt mit der Beantwortung der Forschungsfragen.

Kapitel 8 enthält Vorschläge und Ideen zur zukünftigen Erweiterung der Methodik. Aufgrund der komplexen Thematik sind diese vielseitig, sodass an dieser Stelle nur ein kurzer Einblick gegeben wird.

Abschließend folgt in Kapitel 9 die Zusammenfassung dieser Arbeit.

2 Informelle Siedlungen

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit der Aufwertung von informellen Siedlungen bzw. Slums. Zunächst werden die Begriffe „informelle Siedlung“ bzw. „Slum“ definiert bzw. abgegrenzt. In den darauffolgenden Unterkapiteln wird ein Einblick in aktuelle Upgrading-Ansätze und den Stand der Technik in Bezug auf die Wasserversorgung in diesen Gebieten gegeben. Herauszustellen ist der Einblick in technische Möglichkeiten zur Abwasserentsorgung in Kapitel 2.4, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur noch eine untergeordnete Rolle spielt.

Hinweis: Die folgenden Unterkapitel enthalten Auszüge in deutscher Übersetzung aus den Veröffentlichungen von Mosbach et al.:

- „Development of a New Method to Support a Participatory Planning for Piped Water Supply Infrastructure in Informal Settlements“ [26]
- „Combined Districting and Main Line Routing - A Method to Implement a Basic Drinking Water Supply Infrastructure in Informal Settlements“ [27]

2.1 Der Begriff „informelle Siedlung“

Der Begriff „informelle Siedlung“ besitzt keine einheitliche Definition. Die Vereinten Nationen [28] definierten den Begriff auf zwei verschiedene Weisen:

- „areas where groups of housing units have been constructed on land that the occupants have no legal claim to, or occupy illegally“
- „unplanned settlements and areas where housing is not in compliance with current planning and building regulations (unauthorized housing)“

Das Programm der Vereinten Nationen für menschliche Siedlungen (engl. United Nations Human Settlements Programme, im Folgenden „UN-Habitat“) beschreibt informelle Siedlungen als „residential areas where

- 1) inhabitants have no security of tenure vis-à-vis the land or dwellings they inhabit, with modalities ranging from squatting to informal rental housing,
- 2) the neighbourhoods usually lack, or are cut off from, basic services and city infrastructure and
- 3) the housing may not comply with current planning and building regulations, and is often situated in geographically and environmentally hazardous areas“ [29].

Damit ähnelt die Definition derer von Slums, die gemäß UN-Habitat [30] Siedlungen bezeichnet, auf die eine der folgenden Kriterien zutrifft:

- unsicherer Aufenthaltsstatus
- unzureichender Zugang zu sauberem Wasser
- unzureichender Zugang zu sanitären Einrichtungen und anderen Infrastrukturen
- schlechte bauliche Qualität der Wohnungen
- Überbevölkerung

Ein Unterschied ist, dass Slums im Gegensatz zu informellen Siedlungen auch in ursprünglich geplanten, formellen Gebieten entstehen können [31]. Trotzdem werden die beiden Begriffe oft, auch in dieser Arbeit, synonym verwendet [32], [17], wobei hier der Begriff „informelle Siedlung“ genutzt wird. Je nach Literatur findet man auch weitere synonyme Begriffe wie z.B. „Marginalsiedlungen“, „Elendsviertel“ oder seltener „illegale Siedlungen“. Je nach Kontext liegt der Fokus auf einer rechtlichen, gesellschaftlichen oder humanitären Betrachtungsweise.

Informelle Siedlungen entstehen, weil Städte nicht in der Lage sind ihr eigenes Wachstum in den formellen städtischen Rahmen zu integrieren [31]. Die Gründe hierfür sind vielfältig und oftmals ein Zusammenspiel verschiedener, miteinander verbundener Faktoren. UN-Habitat hebt dabei insbesondere rasches Bevölkerungswachstum, Landflucht bzw. Urbanisierung, ein Mangel an erschwinglichem Wohnraum, schwache Regierungsführung, fehlende städtebauliche Vorschriften, Diskriminierung und Marginalisierung sowie Vertreibung hervor [29], [33].

2.2 Siedlungsupgrade

Der Begriff „Upgrade“ (engl. für „Aufwertung“) bezeichnet im Zusammenhang mit informellen Siedlungen und Slums die Verbesserungen von Wohnraum und/oder Basisinfrastruktur [15]. Zum Upgrade zählen aber auch Verbesserungen wirtschaftlicher oder sozialer Natur, die selbst wiederum zu physischen Verbesserungen führen können [34]. Allgemeiner gefasst, bezeichnet der Begriff einen Prozess zur Verbesserung der Lebensbedingungen der in diesen Gebieten lebenden Menschen aus wirtschaftlicher, organisatorischer und/oder ökologischer Sicht. Zum Upgrade zählt auch die Klärung rechtlicher Fragestellungen (z.B. bezüglich Baugebieten, Eigentum von Grund und Boden). Nach UN-Habitat [15] umfassen typische Upgrading-Maßnahmen:

- die Einrichtung oder Verbesserung der Basisinfrastruktur wie Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Müllabfuhr, Straßennetze, Regenwasserableitung und Hochwasserschutz, Elektrizität, Sicherheitsbeleuchtung und öffentliche Telefone
- Regularisierung der Besitzverhältnisse
- Umsiedlung und Entschädigung der Bewohner, die durch die Verbesserungen umgesiedelt werden
- Verbesserung der Wohnverhältnisse
- Bau oder Sanierung von Gemeinschaftseinrichtungen wie Kindergärten, Gesundheitsstationen und gemeinschaftliche Freiflächen
- Verbesserung des Zugangs zu Gesundheitsfürsorge, Bildung und sozialen Hilfsprogrammen zur Bewältigung von Problemen wie Sicherheit, Gewalt, Drogenmissbrauch usw.
- Beseitigung oder Milderung von Umweltgefahren
- Verbesserung der Einkommensmöglichkeiten durch Ausbildung und Mikrokredite
- Aufbau von Sozialkapital und eines institutionellen Rahmens für nachhaltige Verbesserungen

Politisch wurde über die Jahrzehnte unterschiedlich auf informelle Siedlungen und Slums reagiert. UN-Habitat [15] ordnet die Ansätze verschiedenen Kategorien zu:

- Ignorieren von Slums und informellen Siedlungen
- Nutzung von Slums und informellen Siedlungen für politische Zwecke
- Beseitigung, Räumung und Vertreibung
- Umsiedlung von Slums und informellen Siedlungen
- Umsetzung öffentlicher Wohnungsbauprogramme
- Bereitstellung von Grundstücken und Dienstleistungen
- Aufwertungsmaßnahmen in Slums und informellen Siedlungen

Während früher – und vereinzelt bis heute – dem Problem mit Abriss- und Umsiedlungsmaßnahmen begegnet wurde [15] [35], [36], versuchen heutige Ansätze diese auf ein Minimum zu beschränken bzw. falls möglich zu vermeiden [37], [25]. Siedlungsaufwertung unter Einbezug der örtlichen Gegebenheiten und Möglichkeiten gelten mittlerweile als zielführender [1]. Der Fokus liegt auf schrittweise erfolgenden Entwicklungsstrategien zur Aufwertung, die auf Grundlage von physischen Plänen unter Einbeziehung der Bevölkerung sowie einer Um-/Neugestaltung von Flächen erfolgen [24]. UN-Habitat hebt dabei hervor, dass dieser bereits seit den 1970er Jahren bekannte Ansatz nach wie vor der finanziell und sozial am besten geeignete Ansatz ist, um den vielfältigen Herausforderungen im Zusammenhang mit Slums und informellen Siedlungen zu begegnen [15]. Das Vorgehen wird auch als „in situ upgrade“ bezeichnet, d.h. die schrittweise Aufwertung einzelner Siedlungsbereiche an Ort und Stelle unter Einbezug der Bevölkerung in die Planung und Umsetzung [37]. Umsiedlungsansätze (sog. „Relocation“-Ansätze) sollten nach UN-Habitat dagegen das letzte Mittel der Wahl sein [15], auch wenn sie gemeinsam mit Ansätzen zur Räumung/Abriss und Vertreibung bis heute in einigen Ländern fortgesetzt werden [35], [36].

Der Einbezug der Bevölkerung in die Planung, Entscheidungsfindung und Umsetzung wird als „partizipativer Ansatz“ bezeichnet. Partizipation und Transparenz bedeutet, dass soziale Interaktion, Kommunikation und Diskussion im Planungs- und Gestaltungsprozess berücksichtigt werden. Die Einbindung der Bevölkerung bzw. Gemeinde führt dazu, dass die tatsächlichen Bedürfnisse und Möglichkeiten erkannt und entsprechend in eine Strategie integriert werden. Des Weiteren können Prioritäten für Maßnahmen gesetzt und deren Umsetzung durch die Bevölkerung unterstützt werden. UN-Habitat bezeichnet die Beteiligung der Bevölkerung bzw. Gemeinden an dieser Stelle als entscheidend für den Erfolg einer Aufwertungsmaßnahme [15]. Partizipation bedeutet selbst einen Beitrag zur Verbesserung der eigenen Lebensbedingungen zu leisten [21]. Dies stärkt das Verantwortungsbewusstsein gegenüber der Infrastruktur bzw. Dienstleistung, was wiederum die Nachhaltigkeit einer Maßnahme begünstigt. Im Hinblick auf die Planung hebt Abbott [16] im Zusammenhang mit „community-based decision-making“-Prozessen die Verwendung von GIS-Systemen hervor. GIS-Systeme ermöglichen die Aufnahme und Verarbeitung von georeferenzierten Informationen bzw. ermöglichen den Projektbeteiligten einen Zugang zu diesen. Besonders die Visualisierungsmöglichkeiten von räumlichen Zusammenhängen über GIS ermöglichen es, eine gute Informationsbasis hinsichtlich Planungsgrundlagen, Aufwertungsmaßnahmen und ihrer Auswirkungen bereitzustellen. Damit wird die lokale Gemeinschaft in der Auseinandersetzung mit der Kommune bestärkt und eine Basis für die Interaktion der Beteiligten geschaffen. Dieses Vorgehen stärkt letztendlich

die Akzeptanz für einzelne Entscheidungen und trägt damit zum nachhaltigen Erfolg einer Upgrading-Maßnahme bei.

2.2.1 Sektorale Siedlungsaufwertung

Je nach Größe einer informellen Siedlung ist die Aufwertung des gesamten Gebiets aus personellen und finanziellen Gründen i.d.R. unmöglich. Eine vorab ermittelte, finale Planung für das gesamte Betrachtungsgebiet ist ebenfalls nicht zielführend, da es während der dafür nötigen mehrjährigen Bauphasen zu Strukturänderungen infolge einer hohen Fluktuation innerhalb der informellen Siedlung kommen kann. Je nach Arbeitsstandort, familiären Verhältnissen, etc. ist es nicht unüblich, dass Menschen innerhalb einer Siedlung an einen anderen Ort umziehen, die Siedlung verlassen oder die Siedlung infolge eines anhaltenden Zuzugs verdichtet wird. Die Folge ist, dass die der Planung zugrundeliegende Siedlungsstruktur u.U. schon bei Baubeginn nicht mehr existent ist. Auch aus diesem Grund werden große informelle Siedlungsflächen für die schrittweise Aufwertung zunächst in kleinere Sektoren, sogenannte „Upgrading-Areas“ oder auch „Upgrading-Blöcke“, unterteilt. Die blockweise Aufwertung von informellen Siedlungsbereichen ist ein bereits lange bekannter Ansatz [16], sodass die Gliederung eines Betrachtungsgebietes in einzelne Upgrading-Blöcke heute gängige Praxis in Upgrading-Projekten ist [38]. Die Betrachtung kleinerer Einheiten hat Vorteile für die Planung, da die Komplexität i.d.R. abnimmt und die Umsetzung der Maßnahme aus logistischer und finanzieller Sicht begünstigt wird. Individuelle Anforderungen innerhalb der Upgrading-Blöcke werden deutlicher und können in der Planung berücksichtigt werden. Vor dem Hintergrund eines partizipativen Upgrading-Ansatzes, wird auch die Entscheidungsfindung tendenziell erleichtert, je kleiner der Kreis der Stakeholder ist. Gleichzeitig ermöglicht das Vorgehen die Berücksichtigung wichtiger sozial-räumlicher Beziehungen und stärkt gemeinschaftliche Entscheidungsprozesse [16]. Darüber hinaus lassen sich durch dieses Vorgehen vorrangige Bereiche für Maßnahmen identifizieren, deren Aufwertung den schnellsten Mehrwert in Bezug auf die Gesundheit der Menschen bietet [1].

Ein Block beschreibt dabei eine Ansammlung benachbarter Hütten. Curdes [39] definiert einen Block als eine allseitig von Straßen umgebene Ansammlung von Parzellen. In einem von van Horen [40] beschriebenen Ansatz zur Aufwertung einer informellen Siedlung in Durban (Südafrika) werden die einzelnen Blocks durch bestehende Straßen/Fahrbahnen, Wege und Fußpfade voneinander abgegrenzt. In diesem Zusammenhang wird zwischen festen und flexiblen Elementen unterschieden. Als feste Elemente definiert er Straßen/Fahrbahnen, Wege, Fußpfade sowie öffentliche Einrichtungen. Als flexible Elemente werden Grundstücksgrenzen bezeichnet. Hintergrund dieser Unterscheidung ist, dass die Grundstücksgrenzen in den ersten Phasen der Aufwertung noch nicht verändert wurden, um später eine höhere Flexibilität bei der Grundstücksübertragung und Grenzanpassung zwischen Nachbarn zu gewährleisten. Das Vorgehen führte dazu, dass weniger als 1% der Haushalte im Zuge der Einführung von Basisdienstleistungen umgesiedelt werden mussten, sodass das Siedlungsmuster weitestgehend unverändert blieb [40].

Brelsford et al. [25] unterteilen den bebauten, städtischen Raum in zwei Kategorien: Zugangssystem (Straßen, Wege, Pfade) sowie Orte (Gebäude, öffentliche Räume). Sie stellen heraus, dass sich anhand der Zugangssysteme jede Stadt als eine zusammenhängende Menge von Blöcken beschreiben lässt. Die Blöcke sind dabei von einer Infrastruktur umgeben, die, im optimalen Fall, den Zugang zu jedem Ort innerhalb der Stadt vermitteln [25]. Im Falle informeller Siedlungen ist dieser Zugang oftmals nicht gegeben. Zur Lösung dieses Zugangsproblems entwickeln Brelsford et al. [25] ein mathematisches Tool, das dieses Zugangsproblem durch kostenminimale Umstrukturierungsmaßnahmen und Reblocking löst.

Aus technischer Sicht bezeichnet Reblocking die Änderung der Topologie einer Siedlung ohne dessen spezifische Geometrie zu verändern. Die entstehenden Räume ermöglichen einen Zugang zu Straßen und Infrastrukturen.

Die Stadt Kapstadt nutzt die Bildung von Blocks, um Dienstleistungen in dicht besiedelte Gebiete zu bringen, in denen eine individuelle Versorgung einzelner Haushalte nicht möglich ist. Die Blöcke sind durch Straßen, die auch als „Dienstleistungskorridore“ bezeichnet werden, voneinander getrennt. Die Straßen dienen als Feuerschutzstreifen und verfügen über Stromanschlüsse, Wasserentnahmestellen, sanitäre Einrichtungen und Hydranten zur Löschwasserbereitstellung [41].

2.2.2 Nicht-technische Faktoren der Siedlungsaufwertung

Informelle Siedlungen sind nicht nur im Hinblick auf die bauliche Struktur sehr heterogen, auch innerhalb der Siedlungen existieren große Unterschiede, mit Auswirkungen auf die Wahl der Aufwertungsmaßnahmen. Das bedeutet, dass neben technischen Faktoren auch soziale, kulturelle, ethnologische, ökonomische, ökologische und rechtliche Faktoren in den Entscheidungs- und Planungsprozess integriert werden müssen, damit die Maßnahmen nachhaltig wirken [42], [21], [13]. Während informelle Siedlungen auf den Betrachter von außen chaotisch wirken können, ist ihre innere Organisation meist durchdacht und funktional [13]. Es existieren informelle Prozesse (z.B. informelle Arbeitsstellen), Regeln und Werte, die es den Bewohnern überhaupt erst ermöglichen ohne staatliche Unterstützung in diesen Siedlungen zu leben [43], [13]. Die Berücksichtigung nichttechnischer Faktoren in den Aufwertungsmaßnahmen ist daher sehr wichtig, um diese für die Bewohner essenziellen Verbindungen aufrecht zu erhalten und sie nicht durch Eingriffe von außen zu zerstören [15].

Aus rechtlicher Sicht ist die Regularisierung von Grund und Boden nach Abbott [23] ein zentrales Element im Upgrading-Prozess. Sie ist jedoch als Grundsatz zu verstehen, sodass sie gleichzeitig kein thematischer Ansatz sein kann [23]. Bereits an dieser Stelle müssen auch sozialökonomische Faktoren im Hinblick auf die Erschwinglichkeit von Grund und Boden bzw. Mieten berücksichtigt werden. Insgesamt muss die Aufwertung der Siedlung im Einklang mit den finanziellen Möglichkeiten der Bewohner stehen. Wenn die aus den Aufwertungsmaßnahmen bzw. bereitgestellten Dienstleistungen resultierenden Kosten für die Bewohner langfristig nicht erschwinglich sind, führt dies zur Verdrängung der Bewohner in kostengünstigere Gebiete bzw. verbleibende, umliegende informelle Siedlungen [42], [15]. Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Berücksichtigung der oftmals stark ausgeprägten sozial-räumlichen Beziehungen und Nachbarschaften. Dies betrifft insbesondere die gemeinsame Nutzung von Dienstleistungsinfrastrukturen. Bereits bei der Einteilung der Upgrading-Areas sollten sozial-räumliche Beziehungen bedacht bzw. soziale Netzwerke erhalten werden, da eine willkürliche Einteilung die Nachbarschaftsbeziehungen und den Zusammenhalt der Gemeinschaft stören und später zu Konflikten zwischen den Bewohnern führen kann [13].

Um diese für einen außenstehenden Planer nicht zu erkennenden Faktoren angemessen zu berücksichtigen, ist ein Einbezug der Bevölkerung in die Planung und Umsetzung empfehlenswert. Grundsätzlich bietet die Aufwertung von Siedlungen an Ort und Stelle (in-situ upgrading) die Möglichkeit besser auf die Bedingungen vor Ort zu reagieren, während Umsiedlungsmaßnahmen mit einer sozioökonomischen Störung einhergehen, die das empfindliche Gleichgewicht vieler Existenzgrundlagen zerstört [42]. Die soziale Teilhabe wird durch partizipatorische Entscheidungsfindung im Rahmen der Raumplanung und bei der Bereitstellung von Basisdienstleistungen unterstützt [42]. Durch den Einbezug der Bevölkerung wird zudem oftmals ein

Verantwortungsbewusstsein für die technischen Einrichtungen geschaffen, mit Auswirkungen auf den Betrieb und die Instandhaltung auch nach Abschluss der Maßnahme.

2.3 Wasserversorgung in der Entwicklungszusammenarbeit

Seit 2010 erkennt die Generalversammlung der Vereinten Nationen „(...) das Recht auf einwandfreies und sauberes Trinkwasser und Sanitärversorgung als ein Menschenrecht an, das unverzichtbar für den vollen Genuss des Lebens und aller Menschenrechte ist (...)“ [2]. Das Recht auf Wasser ist durch verschiedene Dimensionen charakterisiert [44], [12], [45]. Wasser muss demnach:

- für jeden Menschen und Haushalt ausreichend und kontinuierlich vorhanden sein
- sicher hinsichtlich der Qualität, d.h. frei von Verunreinigungen, die eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen sowie akzeptabel hinsichtlich Farbe, Geruch und Geschmack sein
- für jeden Menschen physisch zugänglich und sicher erreichbar sein
- erschwinglich sein

Die daraus resultierenden Schlüsselbegriffe Quantität, Kontinuität, Qualität, Zugänglichkeit und Erschwinglichkeit werden auch als Basisdienstleistungsparameter (engl. „basic service parameter“) bezeichnet, anhand derer die Qualität von Wasserdienstleistungen bewertet werden kann [45]. Hinsichtlich der Quantität reicht eine Mindestmenge von 5,3 Liter Wasser pro Person und Tag nach heutiger Datengrundlage in den meisten Fällen für die tägliche Flüssigkeitszufuhr eines Menschen aus [45]. Erfahrungswerte aus der Vergangenheit (ohne empirischen Beleg) deuten darauf hin, dass 20 Liter pro Einwohner und Tag zum Trinken, der Zubereitung von Nahrung und der Hygiene (Waschen der Hände und des Gesichts) ausreichen [1], [45]. Die Kontinuität der Versorgung ist einerseits von der Verfügbarkeit der Ressource Wasser abhängig, andererseits können aber auch technische Probleme zu Versorgungsunterbrechungen führen. Versorgungsunterbrechungen haben negative Auswirkungen auf die Quantität als auch auf die Qualität des zur Verfügung stehenden Wassers. Des Weiteren können häufige Unterbrechungen der Trinkwasserversorgung dazu führen, dass die Abnehmer dazu gezwungen sind Wasser aus qualitativ minderwertigen Quellen zu beziehen während gleichzeitig die Zeit für die Wasserbeschaffung steigt. Ursachen und Auswirkungen, sowie Ansätze zur Modellierung einer intermittierenden Trinkwasserversorgung enthält Kapitel 2.3.3. Anforderungen an die Trinkwasserqualität werden i.d.R. innerhalb nationaler/lokaler Normen weiter definiert. Grundsätzlich gilt die Wasserqualität als akzeptabel, wenn ein lebenslanger Konsum des Wassers gesundheitlich unbedenklich ist. Die Erschwinglichkeit ist gegeben, wenn der Kauf von Wasser den Kauf anderer Grundbedürfnisse nicht beeinträchtigt [46]. Als Maßstab dient hier oftmals der Anteil der Kosten für Wasser, Sanitärversorgung und Hygiene am Haushaltsbudget bzw. den Gesamtausgaben. Als Erschwinglichkeitsgrenze werden i.d.R. zwischen 2-6 % der Gesamtausgaben definiert [46]. Die Zugänglichkeit bzw. Erreichbarkeit der Wasserversorgung gilt als gegeben, wenn der Wasserbezug innerhalb einer Distanz < 1000m vom Wohnort entfernt möglich ist bzw. die Zeit zur Wasserbeschaffung 30 Minuten nicht übersteigt (Distanz und Zeit gelten für Hin- und Rückweg inkl. Zeit in der Warteschlange bzw. zum Abfüllen der i.d.R. selbst mitgebrachten Gefäße). Detailliertere Ausführungen enthalten die Leitlinien für Trinkwasser der WHO [45].

2.3.1 SDG 6.1: Gerechter Zugang zu einwandfreiem und bezahlbarem Trinkwasser

Das Ziel des SDG 6.1 besteht darin, allen Menschen bis in das Jahr 2030 einen gerechten Zugang zu einwandfreiem und bezahlbarem Trinkwasser zu ermöglichen („By 2030, achieve universal and equitable access to safe and affordable drinking water for all“) [47]. Im Rahmen von Aufwertungsmaßnahmen in informellen Siedlungen findet sich dieses Ziel in Ansätzen zur Verbesserung der Trinkwasserversorgung wieder. Zwecks Benchmarking und um Entwicklungen zu vergleichen, führte das „Joint Monitoring Programm For Water Supply, Sanitation and Hygiene“ der WHO und UNICEF 5 Versorgungsstufen ein (Tabelle 2-1) [48]. Die oberste Stufe „sicher betriebene“ Trinkwasserdienstleistungen (engl. safely managed) gilt dabei als globaler Indikator für das SDG-Ziel 6.1. Als „verbessert“ (engl. improved) gilt eine leitungsgebundene Versorgung (einschließlich Haus- und Hofanschlüsse, öffentliche Wasserhähne und Zapfstellen) sowie die Versorgung über Bohrlöcher und Bohrbrunnen, geschützte Schachtbrunnen, geschützte Quellen, Regenwasser, Wasserkioske, abgepacktes Wasser und geliefertes Wasser [46]. Als „nicht verbessert“ bzw. „unerschlossen“ (engl. unimproved) gilt eine Versorgung, falls sie über ungeschützte Schachtbrunnen, ungeschützte Quellen oder Oberflächenwasser erfolgt [45]. Neben der Art der Wasserbereitstellung und Wasserqualität ist die Erreichbarkeit der Entnahmestellen ein wesentliches Merkmal zur Bewertung der Wasserversorgung. In Gebieten ohne Wasserversorgung bzw. ohne Entnahmestelle im unmittelbaren Umkreis bedeutet eine schrittweise Entwicklung, dass erste Maßnahmen dazu dienen die Erreichbarkeit einer verbesserten Wasserentnahmestelle zu verbessern. Eine Mindestmenge an verfügbarem Trinkwasser für jeden Menschen wird in den SDGs dagegen nicht definiert [45].

Tabelle 2-1: Stufen der Trinkwasserversorgung (deutsche Übersetzung aus [48])

Dienstleistungsstufe	Definition
safely managed	Trinkwasser aus einer verbesserten Quelle, die an Ort und Stelle zugänglich ist, bei Bedarf zur Verfügung steht und frei von fäkalen und vorrangigen chemischen Verunreinigungen ist. (Anmerkung: der vorrangige Indikator für mikrobiologische Verunreinigungen ist E. coli, für chemische Verunreinigungen sind es Arsen und Fluorid)
basic	Trinkwasser aus einer verbesserten Quelle, sofern die Abholzeit für einen Hin- und Rückweg nicht mehr als 30 Minuten beträgt, einschließlich Wartezeit.
limited	Trinkwasser aus einer verbesserten Quelle, für das die Abholzeit mehr als 30 Minuten für einen Hin- und Rückweg beträgt, einschließlich des Anstehens in der Warteschlange.
unimproved	Trinkwasser aus einem ungeschützten Schachtbrunnen oder einer ungeschützten Quelle
surface water	Trinkwasser direkt aus einem Fluss, Damm, See, Teich, Bach, Kanal oder Bewässerungskanal

Erreichbarkeit der Entnahmestelle nach WHO [1]

Die World Health Organization [1] untergliedert die Erreichbarkeit einer Wasserquelle in Verbindung mit einem personenbezogenen täglichen Wasserverbrauch in vier Kategorien (Tabelle 2-2). Sie sind das Ergebnis einer Auswertung zahlreicher Studien und bringen Wassermenge, Versorgungskategorie und Gesundheit miteinander in Verbindung. Daraus wird deutlich, dass der Wasserverbrauch pro Haushalt

in erste Linie von der Erreichbarkeit, ausgedrückt durch die Entfernung zur Entnahmestelle, bestimmt wird. Weitere Einflussfaktoren sind Kontinuität, Zuverlässigkeit sowie der zu zahlende Preis. Ein starker Anstieg des Wasserverbrauchs zeigt sich insbesondere nach Einführung von Hausanschlüssen. Dies stützt die Erkenntnisse von Cairncross [49], der bereits 1987 darauf hinwies, dass insbesondere in unmittelbarer Nähe einer Entnahmestelle bzw. deren Erreichbarkeit innerhalb weniger Minuten der Verbrauch zunimmt, während er bei einer Entfernung > 5min (Laufzeit zu Fuß) längere Zeit konstant (niedrig) bleibt. Die Informationen in Tabelle 2-2 sind ein Auszug der Kategorisierung der WHO [1], mit den für diese Arbeit wesentlichen Bezeichnungen und Daten. Die Distanz und Zeit für den Wasserbezug des Basislevels entspricht hierbei der Basis-Stufe aus Tabelle 2-1. Die Werte verstehen sich als Entfernung bzw. Zeiterfordernis inklusive der Zeit in einer potenziellen Warteschlange für den Hin- und Rückweg [45].

Tabelle 2-2: Wasserversorgungskategorien nach Verbrauch und Erreichbarkeit (Quelle: Auszug aus WHO [1], deutsche Übersetzung in Anlehnung an die englischsprachige Originalausgabe)

Erreichbarkeitslevel	Distanz und Zeit für den Wasserbezug	Typische Wasserentnahmemengen pro Person und Tag (l/(E·d)) ¹
Unzureichende Erreichbarkeit (<i>inadequate access</i>)	> 1.000m oder > 30min	Bezugsmenge kann 5,3l/Person/Tag unterschreiten
Basis Erreichbarkeit bzw. Grundversorgung (<i>basic access</i>)	100–1.000m oder 5–30min	Die durchschnittliche Menge wird wahrscheinlich 20l/Person/Tag nicht überschreiten
Mittlere Erreichbarkeit (<i>intermediate access</i>)	Wasserbezug über eine Entnahmestelle auf dem Grundstück oder innerhalb einer Distanz von 100m oder 5min	Durchschnittliche Menge ~50l/Person/Tag
Optimale Erreichbarkeit (<i>optimal access</i>)	Kontinuierliche Wasserbereitstellung über mehrere Entnahmestellen auf dem Grundstück	Durchschnittliche Menge übersteigt 100l/Person/Tag

¹ Die Wassermengen werden wahrscheinlich geringer sein, wenn die Versorgung intermittierend bzw. unzuverlässig oder wenn das Wasser für die Bevölkerung unerschwinglich ist.

2.3.2 Ansätze zur Wasserbereitstellung

Im Folgenden wird ein kurzer Einblick in verschiedene Versorgungsarten bzw. Ansätze zur Wasserbereitstellung bzw. Wasserentnahme gegeben. Nicht thematisiert werden Ansätze zur Gestaltung der Tarife, Zahlungsvarianten und Präferenzen der Bewohner, da diese von Gebiet zu Gebiet variieren.

Water & Sanitation for the Urban Poor (WUSP) [50] unterscheidet drei verschiedene Klassen von Versorgungsmöglichkeiten in Abhängigkeit ihrer Entfernung vom Haushalt und ordnen ihnen Anschlussarten zu:

Die erste Klasse ist dadurch charakterisiert, dass die Abnehmer ihr Grundstück nicht verlassen müssen um Trinkwasser zu beziehen. Dieser Klasse sind die Bereitstellungsarten „Hausanschluss“ und „Wasserlieferung“ zugeordnet. Der individuelle Hausanschluss wird durch ein leitungsgebundenes Wasserversorgungsnetz gespeist. Diese Art der Wasserbereitstellung zeichnet sich i.d.R. durch hohe

Investitionskosten für den (Aus-) Bau der Versorgungsleitungen aus, zusätzlich müssen für jeden Haushalt auch Kosten für Zähler und Absperrarmatur bedacht werden. Die Wasserlieferung ist oftmals in Gebieten zu finden, in denen die Wasserbeschaffung mit hohem Zeit- und Energieaufwand verbunden ist. Private Akteure nutzen diese Möglichkeit und bieten die Lieferung von Wasser bis zur Hütte an. Oftmals ist diese Art der Versorgung mit einem minderwertigen Dienstleistungsniveau (willkürliche Belieferung, mindere Wasserqualität, hohe Wasserpreise) verbunden [50]. Die Lieferung selbst erfolgt entweder in kleinen Mengen zu Fuß, mit Hilfe von Fuhrwerken oder über einen Tankwagen.

Die zweite Klasse umfasst gemeinschaftlich genutzte Wasseranschlüsse in unmittelbarer Umgebung zum Haushalt. Ein sehr bekannter Ansatz ist die Einrichtung von Zapfstellen in gemeinsam genutzten Höfen bzw. Gemeinschaftsbereichen (sog. shared yard connections). In Anlehnung daran existieren auch Varianten, bei denen der Weiterverkauf von Wasser von Verbrauchern mit einem Hausanschluss an Nachbarn ohne eigenen Hausanschluss erfolgt. Ebenfalls zu der Gruppe der Gemeinschaftsanschlüsse zählen Zähler-Cluster, bei denen mehrere Zähler bzw. Anschlüsse im Bereich bestehender Straßen zur Verfügung gestellt werden, von denen aus sich die Bewohner die Anschlussleitung oder einen Wasserschlauch selbst bis in ihr Haus oder den Garten verlegen. Im Vergleich zum individuellen Hausanschluss werden für diese Anschlussart i.d.R. weniger Leitungsmeter zur Erschließung benötigt, da sich mehrere Haushalte eine Zapfstelle teilen. Auf der anderen Seite müssen diese Zapfstellen eher vor Vandalismus geschützt werden bzw. abschließbar sein, was sich negativ auf die Kosten auswirken kann.

Die dritte Klasse umfasst öffentlich zugängliche Entnahmestellen, deren Standorte in dieser Arbeit Teil der dritten Forschungsfrage sind. Hierzu gehören öffentliche Verkaufsstände und Wasserkioske, öffentliche Zapfhähne (auch „standpipe“ genannt), die von einer bestimmten Gruppe von Verbrauchern geteilt werden sowie gemeinsam genutzte Wassertanks, die aus dem Wassernetz gespeist werden. Die Nutzung eines Wassertanks kann z.B. in Gebieten mit niedrigem Druck im Wassernetz bzw. einer intermittierenden Wasserversorgung von Vorteil sein. Sobald ausreichend Wasser zur Verfügung steht, bzw. im Rohrnetz ausreichender Druck vorhanden ist, füllt sich der Tank und kann im Anschluss unabhängig von den Bedingungen im Rohrnetz genutzt werden. Zu den öffentlichen Dienstleistungen zählen auch Prepaid-Zähler, die an öffentlich zugänglichen Entnahmestellen installiert sind. Über eine Prepaid-Karte mit einem Guthaben kann der Verbraucher die gewünschte Wassermenge entnehmen. Prepaid-Zähler werden zunehmend von städtischen Versorgungsunternehmen in Entwicklungsländern eingesetzt [51]. Sie haben sich in den meisten Subsahara-Staaten etabliert und werden von der Bevölkerung weitestgehend akzeptiert [52].

2.3.3 Intermittierende Wasserversorgung

Der Betrieb eines Wasserverteilungssystems wird als intermittierend bezeichnet, wenn das Wasser nicht kontinuierlich, d.h. 24h am Tag oder weniger als 7 Tage die Woche zur Verfügung gestellt werden kann [53]. In vielen Entwicklungsländern ist dies gängige Praxis [54]. Ein intermittierender Betrieb wird meist nicht im Rahmen der Planung berücksichtigt, sondern ist ein Resultat äußerer Zwänge und wird daher aus der Not heraus gewählt [54], [55], [56]. Die Gründe sind vielfältig. Auf der einen Seite nimmt der Druck auf die Ressource Wasser infolge des Klimawandels, Bevölkerungswachstums und Urbanisierung vielerorts zu, sodass die Nachfrage das Wasserdargebot überschreitet. Auf der anderen Seite werden im technischen Bereich eine mangelhafte Erhebung und Verwaltung von Betriebs- und Instandhaltungsdaten sowie eine unsachgemäße Systemauslegung als Ursachen für eine intermittierende Versorgung identifiziert [54], [53]. Auch mangelhafte institutionelle (Politik,

Regulierung, Organisationsstruktur) sowie gesellschaftliche und kulturelle Randbedingungen (Fachkräftemangel, Korruption, Akzeptanz, Verbraucherverhalten) können einen negativen Einfluss auf den Betrieb der Wasserverteilungsanlage haben [54].

Die Planung von Wasserverteilungssystemen geht i.d.R. von einem unbegrenzten Wasserdargebot aus, sodass die Wassermenge aus dem Bedarf resultiert [57]. Ein nicht der Planung entsprechender intermittierender Betrieb des Wasserverteilungssystems führt daher zu einer Reihe negativer Auswirkungen technischer, hygienischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Art. Da das Wasser nur für eine begrenzte Dauer zur Verfügung steht, kommt es in diesem Zeitraum zu einer erhöhten Nachfrage und damit hohen Entnahmen. Oftmals wird zur Deckung des täglichen Bedarfs so lange Wasser entnommen, bis kein Wasser mehr aus der Leitung kommt [57], [58], [59]. Für das Rohrnetz bedeutet das, dass anstelle der üblichen bedarfs- bzw. nachfrageabhängigen Entnahmebedingungen, druck- bzw. förderhöhenabhängige Entnahmebedingungen vorherrschen [58]. Die Konsequenz ist, dass die Bewohner in weiter vom Einspeisepunkt entfernten Netzbereichen oder Bereichen mit bereits zuvor sehr niedrigen Drücken als erste von der Versorgung abgeschnitten und damit benachteiligt werden. Daraus resultiert eine Ungleichheit der Verbraucher und ein schlechtes Dienstleistungsniveau [57]. Zur Überbrückung der Zeit ohne Wasserversorgung werden daher Speichertanks benötigt. Die intermittierende Wasserversorgung wirkt sich somit insbesondere auf ärmere Bevölkerungsgruppen nachteilig aus, da diese nicht die nötigen Investitionskosten und ausreichend Platz für Zisternen und/oder Tanks aufbringen können. Sie sind gezwungen einen überproportionalen Anteil ihres Einkommens für Wasser auszugeben (z.B. für private Wasserlieferanten). Trotz Speichertanks verweist die WHO darauf, dass sich ein intermittierender Betrieb reduzierend auf die personenbezogene Entnahmemenge auswirkt [45]. Eine weitere Folge der starken Nachfrage in kurzen Zeiträumen ist, dass die auf eine kontinuierliche Versorgung ausgelegten Netze für diesen Bedarf bzw. diese Bedarfsspitzen unterdimensioniert sind, woraus relativ hohe Druckverluste resultieren [58]. Zudem führt ein Leerlaufen der Leitungen dazu, dass Korrosionsprozesse begünstigt bzw. die Lebensdauer der Leitungen durch variierende Beanspruchungen (Druckstöße, Druckspitzen, Druckschwankungen) verkürzt werden [54]. Infolge des Lufteintrags kann es zudem zu Messungenauigkeiten der Zähler kommen, sodass Prepaid-Zähler während Versorgungsunterbrechungen dazu neigen „Luft zu verkaufen“ und der Kunde Guthaben verliert [50]. Eine weitere Einschränkung, die aus der eingeschränkten Wasserverfügbarkeit resultiert, ist, dass die Löschwasserversorgung nicht über das Rohrnetz erfolgen kann. Hierfür werden oftmals große Löschwasserbehälter in öffentlichen Gebäuden installiert, die zusätzliche Investitionskosten verursachen. Neben der eingeschränkten Verfügbarkeit des Wassers ist die Beeinträchtigung der Trinkwasserqualität eines der Hauptprobleme der intermittierenden Wasserversorgung [56], [58]. Infolge des niedrigen Drucks in der Rohrleitung, können Schadstoffe durch Rückflüsse oder Infiltrationen an Leckagestellen und undichten Rohrverbindungen eingetragen werden, die sich negativ auf die Wasserqualität auswirken. Der Eintrag wird durch private Förderanlagen verstärkt, da sie bei leerer Rohrleitung Unterdrücke im Netz hervorrufen können. Insbesondere bei der Wiederbefüllung einer zuvor leergelaufenen Rohrleitung kann es passieren, dass bei Wiederherstellung der Versorgung zu Beginn größere Mengen verunreinigten Wassers aus den Entnahmestellen fließen [45]. Dafür nötige, engmaschige Wasserqualitätskontrollen und die Durchführung von Desinfektionsmaßnahmen (falls nötig), stellen gleichzeitig logistische und finanzielle Herausforderungen dar.

Um die beschriebenen negativen Auswirkungen in bereits existierenden Systemen zu minimieren, existieren in der Literatur verschiedene Instrumente und Strategien. Nach Simukonda et al. [53] können

diese in zwei Gruppen unterschieden werden: Die erste Gruppe beschäftigt sich mit Ansätzen und Instrumenten zur Gestaltung und Analyse der Systeme [57], die zweite Gruppe beschäftigt sich mit Ansätzen zur Umstellung von einer intermittierenden auf eine kontinuierliche Versorgung [54], [60]. Konkrete und umfassende Auslegungsansätze für die Planung intermittierend betriebener Wasserverteilungssysteme existieren nicht oder sie sind nicht publiziert [53]. Gottipati et al. [61] untersuchen Möglichkeiten zur möglichst gerechten Wasserverteilung bei beschränkter Verfügbarkeit. Sie heben die Bedeutung des Netzlayouts sowie die Position des Reservoirs im Netz hervor. In Bezug auf das Netzlayout zeigen die Ergebnisse, dass ein intermittierendes Versorgungsnetz optimaler Weise radial um ein Reservoir im Zentrum ausgerichtet sein sollte. Ein ähnliches Ziel verfolgen Vairavamoorthy et al. [57] für bestehende Systeme. Sie entwickeln in ihrem Artikel Richtlinien für die Gestaltung und den Betrieb einer intermittierenden Versorgung mit dem Ziel, die Gerechtigkeit der Wasserversorgung im Hinblick auf die Dauer der Bereitstellung zu verbessern. Durch den Einsatz von Armaturen soll die Druckvariabilität im Netz minimiert werden.

Grundsätzlich müssen für die Dimensionierung der Leitungen intermittierender Systeme andere (höhere) Spitzenfaktoren zugrunde gelegt werden. Nach Abu-Madi et al. [62] steigt der Spitzenfaktor je kürzer das Zeitfenster der Wasserbereitstellung ist. Dementsprechend werden größere Nennweiten benötigt. Die Verwendung größerer Nennweiten im Netz hat jedoch negative Auswirkungen auf die Investitionskosten. Zudem werden zur Verhinderung von Rückflüssen mehr Absperrarmaturen wie Schieber oder Rückschlagklappen im Netz benötigt. Falls diese Armaturen nicht automatisiert öffnen und schließen wird hierfür Personal benötigt, sodass zusätzliche Personalkosten neben den ebenfalls steigenden Kosten für die Wartung der Armaturen entstehen. In Bezug auf die Trinkwasserqualität steigt infolge der längeren Wasserverweilzeiten im Netz die Verkeimungsgefahr, auch kann es zu deutlich erhöhten Wassertemperaturen kommen.

Die Literaturrecherche zeigt, dass die Probleme, die durch den intermittierenden Betrieb entstehen, bekannt sind. Die bestehenden Lösungsansätze und Strategien zielen in erster Linie auf bestehende Systeme. Genauso wie die Auslegung und Planung von intermittierenden Wasserverteilungssystemen werden sie in der Praxis jedoch nicht umgesetzt [55]. Dies führt dazu, dass weiterhin Wasserverteilungssysteme auf Grundlage eines kontinuierlichen Betriebs geplant werden, obwohl absehbar ist, dass ihr Betrieb zukünftig intermittierend erfolgt [55], [63], [54].

Mohapatra et al. [58] zeigen wie ein intermittierend betriebenes Wasserversorgungsnetz mit EPANET 2 simuliert werden kann. Der Besonderheit, dass Verbraucher bei einer intermittierenden Versorgung so lange Wasser entnehmen bis kein Wasser mehr aus der Leitung kommt, wird durch die Integration künstlicher Reservoirs anstelle der Abnehmer im Modell begegnet, die sie mit dem jeweiligen Entnahmeknoten verbinden. Einen ähnlichen Ansatz beschreiben auch Taylor et al. [59]. Die Reservoirs stellen das Verhalten der Konsumenten dar, die während der Zeit der Wasserbereitstellung ihre Speicher auffüllen. Die Wasserspiegellinie entspricht dabei der Druckhöhe am Entnahmeknoten unter der Annahme, dass die Druckdifferenz zum atmosphärischen Druck im Zulauf des Reservoirs gleich 0 ist. Um einen Rückfluss in das Netz während den Versorgungsunterbrechungen zu verhindern, wird an jedem Hausanschluss zusätzlich ein Rückschlagventil modelliert. Der Ansatz einer druckabhängigen Nachfrage zeigt anhand eines Fallbeispiels aus Nagpur (Indien), dass die Fließgeschwindigkeiten im Rohrnetz im Falle einer intermittierenden Versorgung ca. 9% (Hauptleitungen) bzw. 8,5% in Versorgungsleitungen höher sind, als bei kontinuierlichem Netzbetrieb. Die Druckverluste verhalten sich

ähnlich und liegen während des intermittierenden Betriebs um 16% bzw. 12,8% über den Druckverlusten bei kontinuierlichem Betrieb.

2.4 Sanitärversorgung in informellen Siedlungen

Das Recht auf Sanitärversorgung wurde im Dezember 2015 im Rahmen der Resolution 70/169 der Vereinten Nationen als Menschenrecht aufgenommen [64] und ist darüber hinaus im SDG 6 bzw. im SDG 6.2 enthalten:

„By 2030, achieve access to adequate and equitable sanitation and hygiene for all and end open defecation, paying special attention to the needs of women and girls and those in vulnerable situations“ [47]

Im Rahmen des Joint Monitoring Programm (JMP) für Wasserversorgung und Abwasserentsorgung der WHO und UNICEF wurden die Schlagworte und Ziele des SDGs 6 interpretiert bzw. konkretisiert und um Aspekte der Dienstleistungsqualität ergänzt. Hierzu wurden 5 Dienstleistungsstufen definiert (siehe Tabelle 2-3) Das Wort „angemessenen“ (adequate) im SDG 6.2 wird dabei als höchste Stufe, also als „sicher betriebene“ (safely-managed) Abwasserentsorgung, interpretiert. Die Unterteilung erfolgt im Wesentlichen danach, ob sich Bewohner eine Sanitäreinrichtung teilen müssen und ob diese „verbessert“ (improved) oder „nicht verbessert“ (unimproved) ist. Zu den verbesserten Einrichtungen zählen nach [48]: Toiletten mit Wasserspülung (Wasseranschluss oder Wasser wird vom Benutzer hineingeschüttet) und Anschluss an ein Abwassersystem, Klärgruben oder Grubenlatrinen, Grubenlatrinen mit Platten (einschließlich belüfteter Grubenlatrinen) und Komposttoiletten.

Tabelle 2-3: Sanitärversorgungsstufen (in deutscher Übersetzung aus [48])

Dienstleistungsstufen	Definition
safely managed	Nutzung von verbesserten Einrichtungen, die nicht mit anderen Haushalten geteilt werden und in denen die Ausscheidungen sicher an Ort und Stelle entsorgt oder entfernt und außerhalb des Standortes behandelt werden
basic	Nutzung von verbesserten Einrichtungen, die nicht mit anderen Haushalten geteilt werden
limited	Nutzung von verbesserten Einrichtungen, die mit anderen Haushalten geteilt werden
unimproved	Verwendung von Grubenlatrinen ohne Platte oder Plattform, Hängelatrinen oder Eimerlatrinen
open defecation	Entsorgung menschlicher Fäkalien auf Feldern, in Wäldern, im Gebüsch, in offenen Gewässern, an Stränden oder an anderen offenen Orten oder mit festen Abfällen

Zwischen 2015-2020 konnte der Anteil der Weltbevölkerung mit Zugang zum Stufe „safely managed“ von 47% auf 54%, zur Stufe „basic“ von 73% auf 78% erhöht werden [4]. Halten diese Trends an, erhöhen sich die Anteile bis ins Jahr 2030 auf ca. 67% (safely managed) bzw. ca. 90% (basic) [4]. Demnach wird das angestrebte Ziel einer „safely managed“ Sanitärversorgung für ca. 2,8 Milliarden Menschen nicht erreicht.

Ohne die Einführung sanitärer Einrichtungen werden überwiegend Hängelatrinen, Grubenlatrinen und sonstige Freiflächen zur Verrichtung der Notdurft genutzt (vgl. Tabelle 2-3 sowie [65]). Eine mangelhafte bzw. fehlende Sanitärversorgung wirkt sich direkt auf die Gesundheit der Menschen aus. Durchfallerkrankungen sind dabei eine der häufigsten Folgen einer nicht sachgemäßen Abwasserentsorgung.

Die Einführung konventioneller, zentraler Abwassersysteme bestehend aus Spültoiletten in jeder Hütte, einem gravitationsbasierten Kanalnetz sowie einer Kläranlage gestaltet sich aufgrund verschiedener sozialer, technischer und wirtschaftlicher Faktoren als schwierig [66], [67]. Die relativ unflexiblen Systeme sind oftmals nicht anpassungsfähig genug, um die spezifischen Anforderungen der Bevölkerung und die Bedingungen vor Ort zu berücksichtigen. So setzen Spültoiletten in den Haushalten einen Wasseranschluss voraus, der oftmals nicht vorhanden ist. Grundsätzlich geht ein geringer Wasserverbrauch mit sehr niedrigen Fließgeschwindigkeiten und längeren Aufenthaltszeiten des Abwassers bzw. Fäkalablagerungen im Kanalsystem einher. Dies kann dazu führen, dass die Einführung einer kanalgebundenen, gravitationsbasierten Abwasserentsorgung in informellen Siedlungen nicht zielführend ist [68]. Weitere Faktoren, die eine Trassierung des Kanalnetzes aus technischer Sicht erschweren, sind u.a. eine hohe Siedlungsdichte, eine willkürliche Anordnung und Ausrichtung der Hütten bzw. eine erschwerte Zugänglichkeit sowie die Lage der Siedlungen (ungünstige Bodenverhältnisse, Hanglage bzw. Topografie). Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Einführung eines Kanalsystems mit hohen Kosten verbunden. So zeigt die Machbarkeitsstudie von Mels et al. [67] anhand eines Fallbeispiels in Kapstadt, dass trotz geringer Entfernungen der informellen Siedlungen zum formellen Bereich, die Investitionskosten für die Installation der Toiletten, den Bau eines Kanalnetzes sowie die zu erwarteten Betriebskosten sehr hoch sind. Erschwerend kommt hinzu, dass die Bewohner vielerorts andere Materialien als Toilettenpapier als Reinigungsmittel nutzen, sodass Ausfälle des Systems aufgrund von Verstopfungen befürchtet werden. In den letzten Jahrzehnten wurden daher zahlreiche Ansätze zur Abwasserentsorgung und -behandlung entwickelt. Sie werden in Sanitärsysteme vor Ort (engl. on-site sanitation systems) und Sanitärsysteme außerhalb des Standorts (engl. off-site sanitation systems) unterschieden. Aufgrund der hohen Anzahl verschiedener Lösungen wird im Folgenden nur ein kleiner Auszug vorgestellt. Tilley et al. [69] und Mara [70] geben einen Einblick in weitere Ansätze.

Zu den on-site Sanitärsysteme zur Sammlung und Behandlung von Abwasser und Fäkalien zählen z.B. Gruben-, Kompostierungs-, Biogaslatrinen bzw. -toiletten sowie Klärgruben (septic tank). Die Toilettenart (z.B. Trockentoilette, Urinal, Toilette mit Zisternenspülung oder Nachschütten von Wasser) hat dabei Einfluss auf die Art der Sammlung und Behandlung. Grubenlatrinen bzw. Grubentoiletten, bei denen die Ausscheidungen über ein Loch im Boden in einer Grube gesammelt werden, sind die am weitesten verbreitete „verbesserte“ Sanitärtechnik und existieren in verschiedenen Formen [71], [65], [69]. Sie werden in Subsahara-Afrika von über 50% der städtischen Bevölkerung, insbesondere von Geringverdienern genutzt [71]. Durch die Installation eines zusätzlichen Belüftungsrohres können unangenehme Gerüche reduziert werden, wodurch die Latrine verhältnismäßig einfach aufgewertet wird (ventilated improved pit latrine). Grubenlatrinen existieren als Einzel- oder Zwillings-/Doppelgruben. Doppelgruben ermöglichen eine durchgängige Nutzung und die Entleerung ist bei ordnungsgemäßen Bau vereinfacht (twin-pit ventilated latrine). Eine weitere Variante sind „twin pits pour flush toilets“. Diese bestehen aus zwei Gruben (twin pits) sowie einer Toilette, die durch

Nachschütten von Wasser (pour flush toilet) gereinigt wird. Durch einen Siphon werden Gerüche effektiv reduziert. Während die volle Grube ruht, kann die danebenliegende Grube weiter genutzt werden. Der Inhalt der vollen Grube baut sich über die Zeit zu einem festen, erdähnlichen Material ab, das im Anschluss manuell ausgegraben werden kann. Grubenlatrinen verhindern durch den Einschluss der Ausscheidungen die Übertragung von Krankheitserregern infolge eines direkten Kontakts, sind je nach Ausführung einfach zu bauen und zu reparieren und gleichzeitig kostengünstig in der Anschaffung [69]. Der meist einfache Aufbau der Gruben verhindert jedoch entsprechende Behandlungsprozesse, sodass eine Nachbehandlung oder Entsorgung des Schlamms nötig ist. Die hierbei entstehenden Kosten sind im Vergleich zu den Baukosten hoch [69]. Außerdem besteht aufgrund der Bodeninfiltration die Gefahr einer Grundwasserkontaminierung. Dies betrifft insbesondere dicht besiedelte Gebiete, in denen die Entleerung der Latrinen, infolge der beschränkten Zugänglichkeit, schwierig sein kann. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Kompostierungslatrinen (composting latrine), bei denen sich unter der Latrine eine Kompostierungskammer befindet. Die biologisch abbaubaren Bestandteile werden durch Mikroorganismen unter aeroben Bedingungen zersetzt, sodass sie nach einiger Zeit als Dünger in der Landwirtschaft verwendet werden können. Sie zeichnen sich zudem durch eine ausreichende Reduzierung von Pathogenen, einer möglichen Verwertung weiterer organischer Feststoffe, Langlebigkeit und durch geringe Betriebskosten (bei Selbstentleerung) aus [69]. Auf der anderen Seite funktionieren Kompostierungskammern nur unter Beachtung eng definierter Betriebsbedingungen und erfordern dadurch gut geschultes Personal (Fachpersonal) bei Planung, Bau, Überwachung und Wartung [69]. Biogaslatrinen bezeichnen Grubenlatrinen, die an eine anaerobe Vergärungsanlage (Biogasreaktor) angeschlossen sind. Der Biogasreaktor besteht aus einer luftdichten Kammer, in der der anaerobe Abbau stattfindet. Während das Gärsubstrat als Dünger verwendet werden kann, steht das entstehende Biogas z.B. zum Kochen oder zur Stromerzeugung zur Verfügung [69]. Aufgrund der Anschaffungs- und Betriebskosten ist diese Form der Sanitärversorgung jedoch eher für kommunale/öffentliche Einrichtungen geeignet, da sie für private Haushalte im niedrigen Einkommensbereich unerschwinglich sind [71]. Klärgruben sind ein System zur Sammlung und Behandlung der Fäkalien aber auch Küchenabwässer [69]. Sie bestehen aus einem geschlossenen Behälter mit Zu- und Ablauf und verfügen meistens über zwei Kammern. Die Feststoffe im Abwasser setzen sich infolge der Schwerkraft ab (Sedimentation) und durchlaufen einen anaeroben Faulungsprozess. Der flüssige Überstand wird in die Kanalisation oder zur Versickerung abgeleitet. Die Reduzierung von Pathogenen und organischem Material ist jedoch nur mäßig, sodass Wasser und Schlamm eine weiterführende Behandlung benötigen [69]. Klärgruben sind mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden, benötigen Platz und Wasser und werden infolge nur von ca. 5% der Menschen in Subsahara-Afrika genutzt [71]. Grundsätzlich benötigen on-site Sanitärsysteme verhältnismäßig viel Platz, der insbesondere in sehr dicht besiedelten Gebieten oftmals nicht zur Verfügung steht. Darüber hinaus sind diese Lösungen im Vergleich zur vereinfachten Kanalisation (s.u.) im Allgemeinen teurer [70].

Zu den off-site-Abwassersystemen zählen z.B. die vereinfachte/gemeinsame Kanalisation (engl. simplified/condominial sewerage), Sanitärblöcke sowie die Vakuumkanalisation. Die vereinfachte Kanalisation sowie Sanitärblöcke bezeichnet Mara [70] als kostengünstige und skalierbare off-site Abwassersysteme, die sich für den Einsatz in städtischen Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte und niedrigem Einkommen eignen. Die vereinfachte/gemeinsame Kanalisation wurde in den 1980er Jahren in Brasilien entwickelt und kommt bis heute in Ländern Lateinamerikas, Afrikas und Südasiens zum Einsatz [70], [72]. Das Konzept entspricht weitestgehend einer konventionellen Kanalisation, jedoch mit

niedrigeren Konstruktionsstandards [69]. Zum Einsatz kommen i.d.R. PVC-Rohre mit relativ geringem Durchmesser (DN100). Sie verlaufen nur ca. 40-65cm unter der Erdoberfläche und weisen ein relativ geringes Gefälle auf. Im Unterschied zur konventionellen Kanalisation verfügen die Haushalte einer vereinfachten Kanalisation nicht über jeweils einen eigenen Anschluss an den Hauptkanal. Es werden zunächst Nachbarschaftseinheiten (Condominials) gebildet, die über einen gemeinsamen Kanal (meist DN100) miteinander verbunden werden. Dieser Kanal entwässert anschließend in einen konventionellen Hauptkanal (falls vorhanden) oder transportiert das Abwasser zu alternativen Behandlungsanlagen [70]. Insbesondere in Lateinamerika ist ein weiteres Merkmal des Ansatzes der Einbezug der Nutzer in den Projektprozess bzw. die Umsetzung [66]. Dieser ist jedoch nicht zwingend erforderlich, da oftmals Bauvorschriften der Installation von Entwässerungssystemen durch nicht zugelassene Fachleute entgegenstehen [66]. Nach Mara [70] ist diese Form der Kanalisation (mit Ausnahme von Gebieten, die regelmäßig überflutet werden) in städtischen Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte fast immer die nachhaltigste Lösung. Sie zeichnet sich durch vergleichsweise geringere Investitionskosten sowie niedrige Betriebskosten aus und lässt sich einfach erweitern [69]. Sie erfordert jedoch Fachpersonal für die Planung und können bei nicht ordnungsgemäßem Betrieb anfällig für Verstopfungen sein. [69]. Von der Gemeinschaft verwaltete Waschhäuser/Sanitärblöcke kommen vor allem in sehr armen Gebieten vor [70]. Die Waschhäuser bzw. Sanitärblöcke verfügen über einen Wasseranschluss sowie Gemeinschaftstoiletten/-latrinen. Sie befinden sich meist in Hinterhöfen oder an existierenden Straßen. Je nach örtlichen Rahmenbedingungen sind die Sanitärblöcke an eine Klärgrube oder eine konventionelle Kanalisation angeschlossen. Mels et al. [67] und Schouten et al. [65] kritisieren, dass Gemeinschaftstoiletten nicht das Bevölkerungswachstum berücksichtigen, sodass die Anzahl der Haushalte pro Toilette bei anhaltendem Zuzug in die Siedlung steigt. Grundsätzlich funktionieren Gemeinschaftstoiletten nach Mels et al. [67] aufgrund sozialer Verbindungen und einem damit im Zusammenhang stehenden Verantwortungsbewusstsein eher in kleineren Gemeinden als in Siedlungen mit hoher Bevölkerungsdichte. Durch die geteilte Nutzung der Sanitäreinrichtungen erreicht diese Dienstleistungsart nicht die Stufe „basic“ (vgl. Tabelle 2-3), sodass sie nur als vorübergehende Lösung zur Erreichung der SDGs geeignet ist.

Ein anderer Ansatz für den Abwassertransport ist die Vakuumkanalisation. Diese Form der Kanalisation zeichnet sich dadurch aus, dass der Abwassertransport hauptsächlich mit Hilfe von Luftdruckdifferenzen erfolgt, sodass der Einfluss topografischer Unterschiede auf die Trassierung abnimmt. Über die Vakuumrohre wird das Abwasser zum (Haupt-) Kanalnetz transportiert, von wo aus der weitere Transport gravitationsbasiert erfolgt [66]. Doch auch dieses System ist anfällig für Verstopfungen infolge der Nutzung nicht sachgemäßer Reinigungsartikel oder Entsorgung anderer Gegenstände über die Toilette.

3 Grundlagen der Wasserverteilungssysteme

Die Methodik zur Planungsunterstützung bezieht sich auf die Einführung einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgungsinfrastruktur bzw. Generierung eines Trinkwassernetzes. Dieses Kapitel enthält die hierfür nötigen Grundlagen aus Planung, Bau und Betrieb sowie der Modellierung und Optimierung von Trinkwassernetzen aus einer ingenieurtechnischen Perspektive. Darüber hinaus gibt das letzte Unterkapitel einen kurzen Einblick in derzeitige Ansätze zur automatisierten Netzerstellung.

Die Nomenklatur der Bestandteile sowie die in diesem Kapitel beschriebenen hydraulischen Anforderungen an ein Wasserverteilungssystem basieren auf der in Europa maßgebenden DIN für den anerkannten Stand der Technik für Wasserversorgungssysteme DIN EN 805 „Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden“ [73]. Diese wurden in Deutschland im Rahmen der Arbeitsblätter W400 „Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV)“, untergliedert in W400-1 (Teil 1: Planung), W400-2 (Teil 2: Bau und Prüfung) und W400-3 (Teil 3: Betrieb und Instandhaltung) des Deutschen Verein des Gas- und Wasserfachs (DVGW) und W410 (Wasserbedarf – Kennwerte und Einflussgrößen) konkretisiert. Zur Demonstration der in dieser Arbeit entwickelten Methodik zur Planungsunterstützung in Kapitel 5 wird auf diese Nomenklatur zurückgegriffen und die Netze entsprechend den hydraulischen Anforderungen deutscher Regelwerke geplant. Insbesondere die hydraulischen Mindestanforderungen und Bemessungsgrundlagen werden bei der Planung einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung in informellen Siedlungen sehr wahrscheinlich von diesen abweichen. Die Methodik enthält aus diesem Grund die Möglichkeit länderspezifische Abweichungen bzw. individuelle Vorgaben zu berücksichtigen.

3.1 Planung von Wasserverteilungssystemen

Wasserverteilungssysteme sind Teil eines Wasserversorgungssystems. Sie bestehen aus „(...) Rohrleitungen, Trinkwasserbehältern, Förderanlagen und sonstigen Einrichtungen zum Zweck der Verteilung von Wasser an die Verbraucher.“ [73]. Sie liegen zwischen der Wassergewinnung bzw. Aufbereitung und der Übergabestelle zum Verbraucher. Ihr Ziel ist es, Trinkwasser in hygienisch einwandfreier Qualität, in der erforderlichen Menge, mit ausreichendem Druck und mit hoher Versorgungssicherheit bereitzustellen [74]. Im Fokus dieser Arbeit steht die Generierung eines Trinkwasserversorgungsnetzes, bestehend aus geschlossenen, unterirdisch verlegten (Druck-) Rohrleitungen sowie deren Trassierung, Dimensionierung, Modellierung und Optimierung. Weiterführende Informationen zu Trinkwasserbehältern, Förderanlagen und sonstigen Einrichtungen zur Wasserverteilung enthalten u.a. Baur et al. [20], Urban und Mosbach [75], Urban et al. [76], Klingel [77], Karger und Hoffmann [78].

Die Planung von Wasserverteilungssystemen entsprechend dem anerkannten Stand der Technik ist die Voraussetzung für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb. Über die Rohrleitungen eines Wasserverteilungssystems erfolgt der Transport des Wassers. Sie werden nach DIN EN 805 bzw. DVGW (A) W400-1 unterschieden in Zubringer- und Fernleitungen sowie Haupt-, Versorgungs- sowie Hausanschlussleitungen, samt Einbauten und Bauwerken. Baur et al. [20] differenzieren diese in Transportsysteme, denen sie Zubringer- und Fernleitungen zuordnen und Versorgungssysteme, zu denen sie Haupt-, Versorgungs- und Hausanschlussleitungen zählen. Entsprechend dieser Gruppierung stehen in der entwickelten Methodik die Leitungsarten der Versorgungssysteme im Fokus. Hauptleitungen

verlaufen innerhalb des Versorgungsgebietes und werden entsprechend DIN EN 805 als „Wasserleitung mit Hauptverteilungsfunktion (...)“ beschrieben, die „(...) üblicherweise ohne direkte Verbindung zum Verbraucher [sind]“ [73]. Von den Hauptleitungen abgehend wird das Wasser über die Versorgungsleitungen zu den (Haus-) Anschlussleitungen transportiert. Die Anschlussleitungen sind die Verbindung zwischen Versorgungsleitung und Übergabestelle.

3.1.1 Netzarten

Das Netzlayout von Wasserversorgungsnetzen wird unterschieden in Verästelungsnetze, Ringnetze und vermaschte Ringnetze. Jede Art hat Vor- und Nachteile, sodass die häufig historisch gewachsenen Netze Mischformen aus beiden Systemen aufweisen [75].

Verästelungsnetze

Ein Rohrnetz wird als Verästelungsnetz (Abbildung 3-1 a)) bezeichnet, wenn es aus verzweigten Leitungssträngen, die keine Verbindung zueinander besitzen, besteht [77]. Der Transport des Wassers von der Einspeisung zum Abnehmer erfolgt über genau einen Leitungspfad, meist über eine Hauptleitung, von der Nebenleitungen abzweigen, sodass die Fließverteilung immer gleich bleibt. Dies führt dazu, dass bei einer Störung bzw. Versorgungsunterbrechung an einem Punkt im Verästelungsnetz, sämtliche in Fließrichtung hinter der Versorgungsunterbrechung liegende Abnehmer nicht mehr versorgt werden können. Den vergleichsweise geringen Baukosten für ein Verästelungsnetz stehen somit Defizite bei der Versorgungssicherheit gegenüber [79]. Das sogenannte „n-1 Prinzip“ wird nicht erfüllt (die Zahl der Versorgungswege n kann ohne Versorgungsausfall um 1 reduziert werden). Sofern keine Abnahme erfolgt, sind Endstränge zudem anfällig für Stagnation, sodass sie verhältnismäßig oft gespült werden müssen [78]. Nach DIN EN 805 [73] sollten Verästelungsnetze aus diesem Grund nur in sehr kleinen Erschließungsgebieten oder im ländlichen Raum geplant werden.

Infolge der eindeutig (vor-)definierten Fließwege ist auch die Berechnung des hydraulischen Gleichgewichts in verästelten Netzen einfacher als in vermaschten Netzen. Beginnend am entferntesten Entnahmepunkt werden entgegen der Fließrichtung die Knotenentnahmen addiert und die daraus resultierenden Strangdurchflüsse und Druckverluste ermittelt [78].

Ring- und vermaschte Ringnetze

Nach DIN EN 805 zeichnet sich ein Ringnetz (Abbildung 3-1 b)) dadurch aus, dass eine (Haupt-) Ringleitung existiert, von der aus weitere Nebenleitungen abzweigen. Existieren zwischen den Nebenleitungen weitere Leitungsverbindungen, resultiert dies in einem vermaschten Ringnetz (Abbildung 3-1 c)). Beide Netzarten ermöglichen die Einspeisung der Nebenleitungen von zwei Seiten der Hauptleitung, sodass die Versorgungssicherheit im Gegensatz zum Verästelungsnetz erhöht ist. Im Falle eines vermaschten Ringnetzes kann jeder Punkt entlang der Nebenleitungen von zwei Seiten gespeist werden, sodass das n-1 Prinzip vollständig erfüllt ist. Ringnetze bzw. vermaschte Ringnetze zeichnen sich über ein einheitlicheres Druckniveau bzw. bessere Druckverteilung aus. Auch die Deckung eines außergewöhnlich hohen Wasserbedarfs (z.B. Löschwasser im Brandfall) ist im Gegensatz zum Verästelungsnetz verbessert [78]. Nachteile dieser Netzform sind vor allem die mit dem Vermaschungsgrad und den dafür benötigten Leitungen steigenden Kosten sowie die Entstehung von Stagnationszonen bei starker Vermaschung [78].

In Ring- bzw. vermaschten Ringnetzen existieren mehrere Fließwege, sodass die Verteilung des Durchflusses bzw. die resultierenden Fließrichtungen nicht direkt ersichtlich sind. Die Berechnung des hydraulischen Gleichgewichts erfolgt daher iterativ. Bekannte Verfahren sind jene nach Hardy-Cross und die Gradienten-Methode von Todini und Pilati [80], die aufgrund ihres einfachen Aufbaus und der schnellen Konvergenz den Berechnungskern der weltweit bekannten Open-Source-Rohrnetzrechnungssoftware EPANET 2 [81] bildet [82].

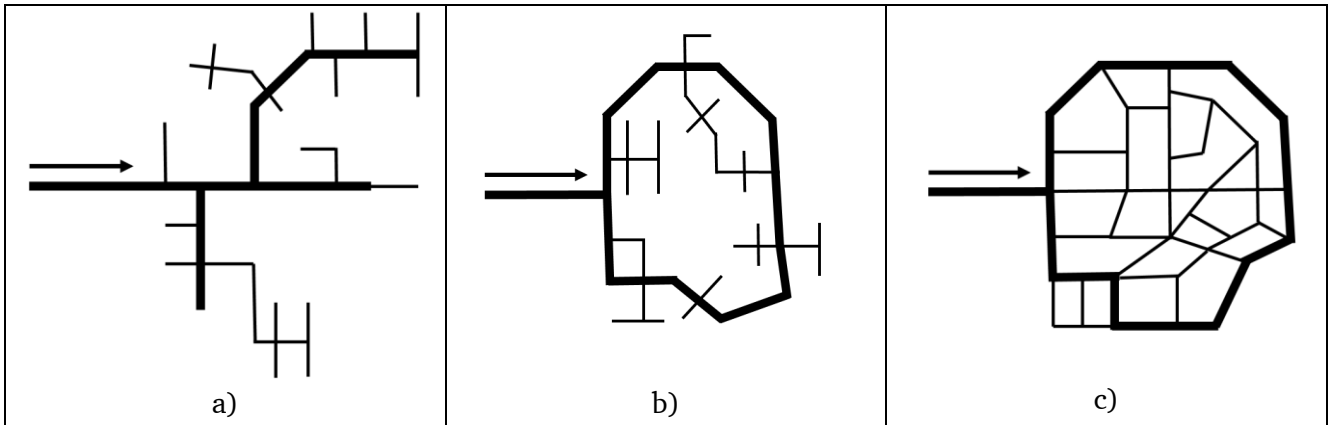


Abbildung 3-1: Netzarten: Verästelungsnetz (a), Ringnetz (b), vermaschtes Ringnetz (c)

3.1.2 Hydraulische Mindestanforderungen: Fließgeschwindigkeit und Versorgungsdruck

Die Fließgeschwindigkeit des Wassers hat Auswirkungen auf die Druckbedingungen im Netz sowie die Wasserqualität. Fließt das Wasser zu langsam, entstehen Stagnationsbereiche im Netz, die sich negativ auf die Wasserqualität auswirken können. Gleichzeitig begünstigt eine zu lange Verweilzeit des Wassers im Netz die Anreicherung des Wassers mit Korrosionsprodukten und losen Ablagerungen, die zu einer Trübung des Wassers und Geschmacksbeeinträchtigungen führen können [78], [74]. Zur Verhinderung zu langer Verweilzeiten im Netz sollten diese so geplant werden, dass eine Mindestfließgeschwindigkeit von 0,005m/s bei mittlerem Stundendurchfluss Q_{hm} nicht unterschritten wird [74]. Fließt das Wasser zu schnell, steigen die Druckverluste im Netz. Dies kann sich negativ auf die Förderkosten auswirken. Auch Druckstöße werden durch zu hohe Fließgeschwindigkeiten begünstigt. Nach DVGW-Arbeitsblatt W400-1 [74] sollte die Fließgeschwindigkeit in Versorgungsleitungen 2m/s nicht überschreiten. In einzelnen Anschlussleitungen sollten bei kurzzeitigen Spitzendurchflüssen 2,5m/s nicht überschritten werden.

Orts- bzw. Versorgungsnetze werden auf den höchsten Systembetriebsdruck MDP (Maximum Design Pressure) von mindestens 10bar geplant. Der Systembetriebsdruck (Design Pressure (DP)) sollte ca. 2bar unter dem MDP liegen, damit eine ausreichende große Reserve für Druckstöße zur Verfügung steht. Daraus resultiert ein maximaler Ruhedruck von $< 8\text{bar}$. Der Mindestdruck im Netz richtet sich nach der überwiegenden ortsüblichen Geschosshöhe der Bebauung einer Druckzone (siehe Kapitel 3.1.4). Dabei gilt, dass an der hydraulisch ungünstigsten Entnahmestelle (i.d.R. die am höchsten gelegene Entnahmestelle) ein Druck von 1,0bar nicht unterschritten wird [74]. Der Mindestdruck wird an der Abzweigstelle der Hausanschlussleitung von der Versorgungsleitung nachgewiesen und liegt i.d.R. zwischen 2-4bar [82].

3.1.3 Bemessungsgrundlagen

Die Bemessung des Rohrnetzes erfolgt auf Grundlage verschiedener Lastfälle unter Beachtung langfristiger Entwicklungen [74]. Durch die Simulation der Lastfälle werden unterschiedliche hydraulische Zustände im Netz untersucht, die anschließend den Anforderungen nach dem Regelwerk gegenübergestellt werden. In Bezug auf die Dimensionierung der Rohrleitungen sind die Lastfälle *Spitzendurchfluss am Tag des höchsten Wasserbedarfs* (Q_{hmax}) sowie *Löschwasserbereitstellung* hervorzuheben. Insbesondere in kleineren Gemeinden, Dörfern und in ländlichen Bereichen kann der Löschwasserfall für die Dimensionierung der Rohrleitungen maßgebend werden. In Zeiten ohne Löschwasserentnahme hat eine solche Dimensionierung jedoch oftmals negative Auswirkungen auf die Aufenthaltszeit des Wassers im Netz, sodass zur Bekämpfung von Stagnationsbereichen weitere Maßnahmen ergriffen werden müssen (z.B. regelmäßiges Spülen des Netzes).

Lastfall Spitzenstunde am Spitzentag Q_{hmax}

Der Lastfall *Spitzendurchfluss am Tag des höchsten Wasserbedarfs* (Q_{hmax}) wird zum Nachweis der maximalen Fließgeschwindigkeiten und minimalen Drücke im Netz herangezogen. Der Lastfall ist für die Dimensionierung der Leitungen maßgebend, falls die Anforderungen an die Löschwasserbereitstellung (s.u.) nicht über Q_{hmax} hinausgehen. Der Q_{hmax} wird entweder aus Messwerten (z.B. Behälterabflussdaten bzw. Daten aus einer Zonenbilanzierung) abgeleitet oder für Versorgungsgebiete mit über 1.000 Einwohnern (E) aus dem durchschnittlichen Stundenbedarf Q_{hm} und einem aus der Einwohnerzahl resultierenden *Spitzenstundenfaktor* f_h berechnet [83]:

$$f_h = 18,1 \cdot E^{-0,1682} \quad (1)$$

$$Q_{hmax} = Q_{hm} \cdot f_h \quad (2)$$

Für Versorgungsgebiete bis 1.000 Einwohner enthält das DVGW Arbeitsblatt W410 [83] gesonderte Richtwerte nach Anzahl der Einwohner und Wohneinheiten.

Lastfall Ruhedruck (max. Druck)

Die maximalen Drücke im Netz entstehen bei minimalem Verbrauch. Maßgeblich ist der *minimale Stundenbedarf am Tagesminimum* (Lastfall *Ruhedruck*) [82]. In der Rohrnetzrechnung wird hierfür oftmals ein Nullverbrauch bei maximal gefülltem Speichern angesetzt.

Lastfall Stagnation (min. Fließgeschwindigkeit)

Die minimalen Fließgeschwindigkeiten werden anhand des Lastfalls *mittlerer Stundenbedarf am Tag des mittleren Wasserbedarfs* (Q_{hm}) nachgewiesen. Zur Vermeidung von Stagnationsbereichen sollte die Fließgeschwindigkeit $> 0,005\text{m/s}$ betragen (siehe Kapitel 3.1.2).

Lastfall Löschwasserbereitstellung

Der Nachweis einer ausreichenden Löschwasserbereitstellung im Brandfall muss erbracht werden, wenn die Bereitstellung durch die öffentliche Wasserversorgung bzw. aus dem Rohrnetz erfolgen soll. Die Ermittlung des Löschwasserbedarfs sowie die Anforderung an die Bereitstellung des Löschwassers aus dem öffentlichen Trinkwasserrohrnetz enthält das DVGW Arbeitsblatt W405 [84]. Die erforderliche Löschwassermenge richtet sich nach der baulichen Nutzung, der Anzahl der Vollgeschosse bzw. der

Geschossflächenzahl (Verhältnis von Geschossfläche zu Grundstücksfläche) sowie der Gefahr der Brandausbreitung. Weiter wird unterschieden zwischen einem *Grundschutz* und einem über den Grundschutz hinausgehenden *Objektschutz* für Gebäude mit erhöhtem Brandrisiko. Im Rahmen der Rohrnetzberechnung muss nachgewiesen werden, dass die erforderliche Löschwassermenge im Umkreis (Radius) von 300m zum Löschojekt zur Verfügung steht und ein Mindestdruck von 1,5bar an keiner Stelle im bebauten Gebiet unterschritten wird. Der Nachweis einer ausreichenden Löschwasserbereitstellung gilt als erfüllt, wenn die geforderte Löschwassermenge und der Mindestdruck während einer Grundbelastung in Form des *maximalen Stundenbedarfs am Tage des mittleren Wasserbedarfs* ($Q_{\text{hmax, dm}}$) bereitgestellt werden kann.

3.1.4 Druckzoneneinteilung

Druckzonen werden gemäß DIN EN 805 definiert als „Zonen mit unterschiedlichen Energiehorizonten innerhalb eines Wasserversorgungssystems“ [73]. Sie gewährleisten die Einhaltung von Druckgrenzen und werden bei ausgedehnten Versorgungsgebieten oder Gebieten mit großen Höhenunterschieden eingerichtet [78], [74]. Druckzonen werden so ausgelegt, dass der Mindestdruck an der hydraulisch ungünstigsten Stelle nicht unter- bzw. der Systembetriebsdruck (DP) nicht überschritten wird, d.h. sie sind durch eine untere und eine obere Druckgrenze charakterisiert. Die obere Druckgrenze (maximaler Druck) tritt i.d.R. am tiefsten Punkt der Versorgungszone auf. Die untere Druckgrenze (minimaler Druck) muss auch an der hydraulisch ungünstigsten Stelle eingehalten werden. Hydraulisch ungünstige Stellen sind i.d.R. die am weitesten entfernten Punkte von der Einspeisung (hydraulisch ungünstig aufgrund der über die Fließstrecke entstehenden Druckverluste) oder die höchstliegenden Punkte des Rohrnetzes. Aus den Druckgrenzen und den Anforderungen an den Versorgungsdruck resultiert der maximal zulässige Höhenunterschied, den die Verbraucher einer Zone zueinander besitzen dürfen. Als Faustregel gilt, dass ab einem Höhenunterschied $\geq 50\text{m}$ das Versorgungsgebiet in mehrere Druckzonen aufgeteilt wird [78] [20]. Innerhalb eines Netzes sind die Druckzonen durch Absperrarmaturen, sog. *Zonenschieber*, hydraulisch entkoppelt. Eine Druckzone entspricht somit einem zusammenhängenden Teilnetz des gesamten Versorgungsnetzes. Die Einspeisung in die jeweilige Zone erfolgt entweder durch Behälter oder aus der benachbarten Zone bzw. an einer Übergabestelle über Druckerhöhungs- bzw. Druckminderungsanlagen. Die Lage und Ausdehnung einer Druckzone hat somit Einfluss auf die Lage und Anzahl der Druckerhöhungs- bzw. Druckminderungsanlagen.

Bestehende Forschungsansätze mit Bezug zu Druckzonen beschäftigen sich in erster Linie mit der Identifikation und Abgrenzung von Versorgungsbereichen für bestehende Systeme, d.h. mit der Partitionierung eines Systems zwecks Bilanzierung von Durchflüssen und Verbräuchen, zur Leckageermittlung und zur Kalibrierung [85], [86]. Dawidowicz [87] untersucht Einteilungsmöglichkeiten für Druckzonen in bestehenden Systemen im Hinblick auf die Standortbestimmung von Druckerhöhungs- und Druckminderungsanlagen. In der Praxis erfolgt die Abgrenzung von Druckzonen oftmals auf Basis betrieblicher Erfahrung, ohne einen weitergehenden wissenschaftlichen Ansatz (eigener Erfahrungswert). Aufgrund besonderer Anforderungen an die Zonenschieber, ist ein weit verbreitetes Kriterium der Zonenseparierung die Anzahl der Zonenschieber zu minimieren [85]. Grundsätzlich gilt, dass insbesondere in kleineren Versorgungsbereichen, falls möglich, die Einrichtung mehrerer Druckzonen vermieden werden sollte, da die Komplexität des Systems und die Kosten für den Betrieb steigen und der Wartungsaufwand erschwert wird [20].

3.2 Grundlagen der Rohrhydraulik

Im Rahmen der Rohrnetzrechnung, d.h. für den hydraulischen Nachweis der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Lastfälle, wird das Fluid Wasser als inkompressibel, d.h. mit konstanter Dichte ρ , angenommen. Es sei angemerkt, dass dies nicht für plötzlich auftretende Volumenstromänderungen oder Druckstörungen gilt, da dort die Kompressibilität des Wassers berücksichtigt werden muss [20].

3.2.1 Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung)

Im stationären Fließzustand gilt für inkompressible Fluide in vollständig gefüllten Rohrleitungen die Kontinuitätsgleichung (entsprechend des Prinzips der Massenerhaltung). Die Kontinuitätsgleichung besteht aus dem Volumenstrom Q , der durchflossenen Rohrquerschnittsfläche A sowie der Fließgeschwindigkeit v :

$$Q = v \cdot A \quad (3)$$

mit:

Q	Durchfluss	(m ³ /s)
A	Durchflussquerschnitt	(m ²)
v	Fließgeschwindigkeit	(m/s)

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass sich der Volumenstrom in einem Strömungsabschnitt bei Änderungen des durchflossenen Rohrquerschnitts nicht ändert. Die Fließgeschwindigkeit ist somit umgekehrt proportional zum Fließquerschnitt, sodass gilt:

$$Q_1 = Q_2 \quad (4)$$

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (5)$$

3.2.2 Energieerhaltung und hydraulische Druckverlustberechnung

Die hydraulische Berechnung von Druckrohrleitungen basiert auf dem Prinzip der Energieerhaltung mit der daraus entsprungenen Gleichung von Bernoulli für Strömungen. Die Gleichung besagt, dass bei stationärer Strömung und inkompressiblem Fluid, d.h. konstanter Dichte ρ , die Summe aus geodätischer Höhe z (Höhe über einem Bezugsniveau), Geschwindigkeitshöhe $\frac{v^2}{2 \cdot g}$ und Druckhöhe $\frac{p}{\rho \cdot g}$ entlang einer Stromlinie konstant ist. In Druckrohrleitungen wird die Gleichung von Bernoulli um den Druckhöhenverlust h_v erweitert. Die Energiehöhe H ergibt sich mit der Erdbeschleunigung g sowie dem Druck p des Fluids zu:

$$H = z + \frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + h_v = konst. \quad (6)$$

mit:

z	Geodätische Höhe	(m)
g	Erdbeschleunigung	(m/s ²)
p	Druck	(N/m ²)
ρ	Dichte	(kg/m ³)
h_v	Druckhöhenverlust	(m)

Der Druckhöhenverlust h_v setzt sich aus der Summe der Verluste infolge Reibung (sog. kontinuierliche Verluste) h_{vr} sowie der Summe der Verluste infolge lokaler Rohrleitungseinbauten, d.h. örtlicher Einzelverluste $h_{v\ddot{o}}$ zusammen, sodass gilt:

$$h_v = \sum h_{vr} + \sum h_{v\ddot{o}} \quad (7)$$

Mit:

h_{vr}	kontinuierliche Verluste	(m)
$h_{v\ddot{o}}$	örtliche Einzelverluste	(m)

Die örtlichen Druckverluste $h_{v\ddot{o}}$, die auf Rohrverbindungen, Formstücke, Armaturen, etc. zurückzuführen sind, werden in der Rohrnetzrechnung nicht gesondert berechnet. Sie werden durch die betriebliche Rauheit k (mit-)berücksichtigt [77] und daher an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt. Weiterführende Informationen zu örtlichen Verlusten enthält z.B. Baur et al. [20] und Klingel [77]. Die Druckhöhenverluste infolge Reibung h_{vr} berechnen sich für gerade Druckrohrleitungen nach der Formel von Darcy-Weisbach:

$$h_{vr} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \lambda \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g} \quad (8)$$

Mit:

λ	Widerstandsbeiwert	(-)
Re	Reynoldszahl	(-)
L	Rohrleitungslänge	(m)
D	Innendurchmesser	(m)

Der dimensionslose Widerstandsbeiwert λ ist abhängig von der Strömungsart (laminar oder turbulent), d.h. der Geschwindigkeitsverteilung im Rohrquerschnitt, dem Durchmesser sowie der Wandrauheit (hydraulisch glatt, hydraulisch rau, Übergangsbereich glatt-rau). Als laminar wird ein Strömungszustand bezeichnet, bei dem die Stromlinien eines Flüssigkeitsteilchens parallel verlaufen, sodass keine Durchmischung stattfindet [20]. Laminare Strömungsverhältnisse treten in der Praxis nur bei sehr kleinen Fließgeschwindigkeiten auf [20], [77]. Als turbulent wird die Strömung bezeichnet, wenn die

Stromlinien unregelmäßig verlaufen. Die Art des Strömungszustandes wird durch die Größe der ebenfalls dimensionslosen Reynoldszahl Re bestimmt:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (9)$$

Mit:

ν kinematische Viskosität (m²/s)

Der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung ist über die experimentell ermittelte kritische Reynoldszahl $Re_{krit} = 2320$ definiert [88]. Im laminaren Strömungsbereich bei $Re \leq 2320$ wird der Widerstandsbeiwert λ für glatte wie auch raue Rohre durch das Gesetz von Hagen-Poiseuille ermittelt:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

In Versorgungsleitungen liegen vorwiegend turbulente Strömungsverhältnisse vor [88]. In Abhängigkeit des Strömungszustandes an der Rohrwand bzw. der Dicke der laminaren Grenzschicht erfolgt die Ermittlung des Widerstandsbeiwertes λ für turbulente Strömungsverhältnisse in drei differenzierten Bereichen mit jeweils eigener Formel: der hydraulisch glatte Bereich, der hydraulisch raue Bereich sowie der Übergangsbereich glatt-rau [82]. Die Formel nach Prandtl-Colebrook (11) beschreibt in erster Linie den Übergangsbereich glatt-rau. Sie gilt jedoch auch für den hydraulisch rauhen Bereich als hinreichend genau [77], sodass sie nach DVGW Arbeitsblatt GW 303-1 für die Ermittlung des Widerstandsbeiwertes λ für turbulente Strömungen empfohlen wird [88].

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot D}\right) \quad (11)$$

Mit:

k Rauheit (mm)

Der Wert k beschreibt darin die Beschaffenheit der Rohrwandung in Form der Rauheit [88]. Zur Berechnung der Druckhöhenverluste werden in der Praxis die Druckhöhenverluste aus örtlichen Einzelverlusten und Ablagerungen im Netz in Form eines Wertes mitberücksichtigt, sodass die Wandrauheit durch einen höheren k_i -Wert (die sogenannte betriebliche Rauigkeit oder auch integrale Rauheit) in (mm) ersetzt wird [20]. Die k_i -Werte unterscheiden sich nach Netzart, Leitungsmaterial, Leitungsalter und Vermaschung. In bestehenden Netzen erfolgt die Ermittlung der k_i -Werte im Rahmen der Netzkalibrierung. Nach DVGW-Arbeitsblatt GW 303-1 liegt die integrale Rauheit in Abhängigkeit der Leitungsort und -material zwischen $k_i = 0,1\text{mm}$ (Zubringer- und Fernleitungen), $k_i = 0,4\text{mm}$ (Haupt und Versorgungsleitungen mit weitgehend gestreckter Leitungsführung), $k_i = 1,0\text{mm}$ (vermaschte Netze ohne Inkrustationen) und $k_i \geq 1,0\text{mm}$ (alte Rohrleitungen aus ungeschütztem Grauguss, duktilem Guss und Stahl) [88]. Eigene Erfahrungen zeigen, dass die im Rahmen von Kalibrierungskampagnen ermittelten Werte deutlich höher liegen können.

Alternativ kann zur Berechnung der kontinuierlichen Druckverlusthöhe h_{vr} die empirische Formel nach Hazen-Williams (12) genutzt werden. Diese wird insbesondere im nordamerikanischen Raum verwendet und nutzt einen dimensionslosen Hazen-Williams-Koeffizienten C , der die Durchflusskapazität der Rohrleitung beschreibt [77]. Dabei gilt: je größer C gewählt wird, desto glatter ist die Rohrleitung bzw. je niedriger C gewählt wird desto rauer ist die Rohrleitung.

$$h_{vr} = \frac{10,65 \cdot L}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \cdot Q^{1,852} \quad (12)$$

mit:

C Hazen-Williams-Koeffizient (-)

Baur et al. [20] differenzieren den Rauigkeitskoeffizient C materialabhängig. Demnach liegt dieser zwischen $C=75$ für alte GG-Rohre und $C=150$ für PVC-Rohre.

3.3 Modellierung und Simulation eines Rohrleitungsnetzes

Die in Kapitel 5 entwickelte Methodik beinhaltet u.a. die Rohrnetzmodellierung und -simulation mit der Hydrauliksoftware EPANET 2. Die folgenden Unterkapitel geben einen kleinen Einblick in die hierfür nötigen Grundlagen. Weitergehende Ausführungen enthalten z.B. Klingel [77] und Parra Sánchez [82].

3.3.1 Modellerstellung

Die Rohrnetzmodellierung bezeichnet die Abbildung eines realen Rohrnetzes in einem numerischen Modell, dem sogenannten *Rohrnetzmodell*. Die Topologie eines Rohrnetzes wird durch Ansätze aus der Graphentheorie (vgl. Kapitel 4.1) modelliert. Sämtliche Netzelemente werden in Form von *Knoten* oder *Strängen* im Modell abgebildet. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem *Knoten-Strang-Modell*. Jeder Strang repräsentiert einen Rohrleitungsabschnitt mit spezifischen, unveränderlichen Eigenschaften (Anfangs- und Endknoten, Durchmesser, Länge, Rauigkeit). Daneben werden auch Armaturen sowie Förder- und Druckerhöhungsanlagen in Form von Strängen modelliert. An den Knoten treffen die einzelnen Rohrleitungsabschnitte aufeinander. Über die Position der Knoten können daher Veränderungen der Leitungseigenschaften im Rohrnetz modelliert werden. Zusätzlich werden den Knoten Betriebsdaten wie Wasserentnahmen bzw. -verbräuche, -einspeisemengen und Druckvorgaben zugewiesen. Dabei muss bedacht werden, dass Hausanschlussleitungen oftmals nicht mitsimuliert werden, sodass der Verbrauch üblicherweise dem nächstliegenden Knoten zugeordnet wird. Ein Knoten mit zugewiesenem Verbrauch wird auch *Entnahmeknoten* genannt. Die Einspeisung in das Rohrleitungsnetz erfolgt über sogenannte *Einspeisepunkte*. Diese können Behälterabgänge, die Nachdruck-Seite der Übergabestellen von Druckminderungs- oder Druckerhöhungsanlagen oder auch einfach Übergabestellen (meist mit Durchflussmessung) darstellen. Modelltechnisch werden Einspeisepunkte als *Druckknoten* oder *Einspeiseknoten* (in Form einer negativen Abnahme) modelliert. Hierbei ist dem Einspeisepunkt jeweils eine Druckvorgabe zuzuordnen. Wird ein Behälter bzw. Speicher in Form eines Knotens in das Modell integriert, muss zusätzlich eine Potenzialhöhe, abgeleitet aus dem Wasserstand im Behälter, vorgegeben werden.

Die Eigenschaften der Knoten und Stränge werden auch als Attribute bezeichnet. Dies können beschreibende Attribute, wie z.B. eine Identifikationsnummer (ID) eines Netzelements, aber auch physische Eigenschaften mit Auswirkungen auf die hydraulischen Zustände im Netz sein (z.B. der

Durchmesser eines Stranges, die geodätische Höhe eines Knotens). Grundsätzlich entscheidet die Qualität der Datengrundlage über die Genauigkeit des Rohrnetzmodells. Parra Sánchez [82] enthält eine ausführliche Zusammenstellung zwingend erforderlicher und optionaler Daten und gliedert diese in Datengruppen. I.d.R. wird die *Netztopologie* (Systemdaten), d.h. die Lagebeziehung der Netzelemente samt deren Eigenschaften (in Bezug auf Leitungen z.B. Länge, Durchmesser, Rauheit, Material, Baujahr, etc.), aus einem bestehenden GIS-System exportiert bzw. über eine Datenbankschnittstelle in das Rohrnetzberechnungsprogramm importiert und ggf. durch Daten aus nicht digitalisierten Bestandsplänen ergänzt. Neben System-, Betriebs- und Wasserverbrauchsdaten ist für die hydraulische Berechnung ein digitales Höhenmodell, engl. *Digital Elevation Modell (DEM)*, zwingend erforderlich. Aus diesem werden die geodätischen Höhen der Knoten interpoliert.

3.3.2 Rohrnetzberechnung mit EPANET 2

Das Rohrnetzmodell dient in erster Linie der Simulation des hydraulischen Systemverhaltens, d.h. der Berechnung von Druck- und Durchflussverhältnissen, zu einem Zeitpunkt (stationäre Berechnung) oder in einem Zeitraum (instationäre Berechnung). Aus der Berechnung lassen sich Aussagen über Betriebszustände bzw. Planungsgrundlagen aus der Simulation verschiedener Lastfälle ableiten. Klingel bezeichnet die Rohrnetzberechnung als „(...) ein wichtiges Hilfsmittel zur Analyse bestehender und zur Planung neuer Systeme (...)“ [77]. Die Anforderungen und Aufgabenstellungen an die Simulation von Wasserversorgungsnetzen variieren. Sie wird zur Untersuchung verschiedener Systemzustände und -zusammenhänge genutzt [77], [88], wie z.B.:

- Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Verteilungsnetzen
- Identifikation von Schwachstellen/Netzengpässe
- Störfallsimulationen
- Erforderlicher Rückbau von Netzkapazitäten
- Wassergütemodellierung
- Ermittlung kostenoptimaler Verteilungsnetze
- Überprüfung der Versorgungssicherheit

Die Simulation von Trinkwassernetzen erfolgt entweder *stationär* oder *instationär*. Die stationäre Berechnung beinhaltet keine Zeitkomponente, sodass der Systemzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnet wird und die Strömungsbedingungen zum Zeitpunkt der Berechnung konstant sind [77]. Durch die Verwendung von Spitzenfaktoren und der Definition von hydraulischen Randbedingungen für den jeweilig untersuchten Lastfall, ist eine stationäre Berechnung für die Planung meist ausreichend. Im Gegensatz dazu besitzt die instationäre Berechnung eine Zeitkomponente. Sie findet meist bei spezielleren Fragestellungen, wie z.B. bei der Untersuchung von Druckstößen, Anwendung.

Die in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Lastfälle werden durch eine Rohrnetzberechnung simuliert und bilden die Grundlage sowohl für die Planung der Netze als auch später für die Bestandsnachweise. Die Drücke im Netz werden für jeden Lastfall an den Knoten nachgewiesen. Die berechneten Durchflüsse, Fließgeschwindigkeiten und bezogenen Druckverlusthöhen werden an Strängen ausgegeben. Auch die Rohrnetzoptimierung (Trassen- und/oder Durchmesseroptimierung) erfolgt unter Zuhilfenahme der Rohrnetzberechnung. So nutzen Optimierungsalgorithmen Ergebnisse hydraulischer Berechnungen, um die hydraulischen Anforderungen in Form von Randbedingungen eines Optimierungsproblems zu überprüfen. Auch in dieser Arbeit wird ein solcher Ansatz zur Ermittlung optimaler Durchmesser

verwendet. Hierfür wird auf den Berechnungskern der Hydrauliksoftware EPANET 2 (Version 2.2) [89] zurückgegriffen. EPANET 2 ist eine von der United States Environmental Protection Agency (EPA) entwickelte Open-Source-Softwareanwendung zur Modellierung und Simulation von Wasserverteilungssystemen, die seit der Veröffentlichung 2008, international Anwendung findet [90]. Durch den offenen Source-Code bzw. das *EPANET Programmer's Toolkit* ist die Software insbesondere unter Forschenden sehr beliebt, sodass heute zahlreiche Erweiterungen zur Untersuchung verschiedenster Zusammenhänge mit Bezug auf Wasser und Rohrnetze existieren (z.B. Eintrag und Ausbreitung von Kontaminationen, Untersuchungen von Wechselwirkungen zwischen chemischen und biologischen Stoffen und deren Wechselwirkungen mit Wasser und den Rohrwänden, etc.). Das Hauptaugenmerk liegt jedoch auf der hydraulischen Simulation bzw. Analyse von Trinkwassernetzen. Zur Berechnung der Druckverluste kann zwischen den Formeln nach Hazen-Williams, Darcy-Weisbach und Chezy-Manning gewählt werden. Die Netze werden in EPANET 2 erstellt oder können als .NET (EPANET Projekt) bzw. .INP (Textdatei) sowohl importiert als auch exportiert werden.

3.4 Optimierung von Wasserverteilnetzen

Das weitgehend unterirdisch verlaufende Wasserverteilungssystem stellt mit ca. 60-80% den größten Anteil am Anlagevermögen eines Wasserversorgungsunternehmens dar, sodass Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung dieser Anlagen einen besonderen Stellenwert besitzen [20]. Erste Forschungstätigkeiten mit Bezug auf die Optimierung von Wasserverteilnetzen werden auf die 1890er Jahre datiert, wobei schnellere Fortschritte erst ab den 1960er Jahren durch die Nutzung digitaler Computer zur Netzwerkanalyse zu verzeichnen sind [91]. Die Anwendung von Optimierungsansätzen findet für verschiedene Problemstellungen statt. Grundsätzlich wird zwischen Ansätzen zur Planung neuer Systeme und Ansätzen zur Veränderung bzw. Anpassung bestehender Systeme unterschieden, wobei erstere im Folgenden weiter ausgeführt werden. Die Planung von Wasserverteilungssystemen ist komplex, da Kosten, Größe, Standort und Betriebszustand verschiedenster Netzkomponenten (Rohre, Pumpen, Reservoirs, Armaturen, etc.) betrachtet und miteinander in Einklang gebracht werden müssen [91]. Werden darüber hinaus weitere Aspekte wie Wasserqualität, Resilienz, Robustheit, Ungewissheit, Flexibilität, Zuverlässigkeit, Risiken, Umweltauswirkungen etc. in die Betrachtung einbezogen, erhöht sich die Komplexität weiter. Die verschiedenen Aspekte und Anforderungen können dabei in einem Zielkonflikt zueinander stehen. Das Optimierungsproblem wird dadurch mehrdimensional, sodass von einer *multikriteriellen Optimierung* gesprochen wird, bei der ein Kompromiss zwischen verschiedenen Zielsetzungen erreicht werden muss [82]. Das Ergebnis eines solchen Problems wird als *Pareto-Optimum* bezeichnet. Die Punkte aus der Menge zulässiger Lösungen liegen entlang der *Pareto-Front*, einer Kurve, auf der eine Verbesserung des einen Kriteriums gleichzeitig zur Verschlechterung eines anderen Kriteriums führt. Im Bereich der Wassernetze enthält die überwiegende Anzahl der Optimierungsmodelle (69%) jedoch nur ein Ziel, meist in Form der Minimierung der Kosten (*least-cost-design*) [91].

Die Optimierungsprobleme lassen sich in Gruppen unterteilen. Es werden Ansätze zur Durchmesser-, Topologie- (=Trassenoptimierung) und Betriebsoptimierung (Pumpen, Wasserqualitätsmanagement, Schieber) unterschieden. Weitere Ansätze beschäftigen sich z.B. mit der Modellkalibrierung, Netzpartitionierung zur besseren Leckageüberwachung sowie Systemzuverlässigkeit, -robustheit und -ausfallsicherheit. Einen umfassenden Einblick in verschiedene Ansätze und Fragestellungen zur Wasserverteilnetzoptimierung enthalten Mala-Jetmarova et al. [91] und Savic et al. [19].

Die Optimierung von Wasserverteilnetzen ist ein Teilbereich der Netzwerkoptimierung und somit ein NP-schweres Problem (vgl. Kapitel 4.2). Zur Lösung der Optimierungsprobleme existiert eine Vielzahl verschiedener Methoden. Sie werden in exakte, d.h. deterministische, metaheuristische (stochastische) und hybride Methoden unterschieden [91], [82]. Zu den deterministischen Methoden zählen z.B. *Linear Programming* (LP), *Nonlinear Programming* (NLP), *Mixed Integer Programming* (MIP), *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) und *Mixed Integer Nonlinear Programming* (MINLP). Es gilt zu beachten, dass bei der Berücksichtigung der Hydraulik ein nicht-lineares Problem entsteht (siehe Gleichung (8) zur Berechnung der Druckverluste). Aus diesem Grund können Methoden der linearen Optimierung nur durch mathematische Linearisierung der Druckverluste, d.h. Druckverluste als Funktion von Leitungslänge und Durchmesser bei bekanntem Durchfluss, verwendet werden [82]. Da die Fließverteilung nur in verästelten Netzen bekannt ist (vgl. Kapitel 3.1.1), sind lineare Optimierungsmethoden nur auf diese und nicht auf vermaschte Netze anwendbar [92]. Mit zunehmender Netzgröße und damit steigender Anzahl an Variablen sind die NP-schweren Probleme nicht mehr mit exakten Methoden lösbar, sodass verstärkt Verfahren, die eine gute Näherungslösung zum globalen Optimum finden, genutzt werden. Die Auswertung der Forschungsliteratur zur Optimierung von Wasserversorgungsnetzen von Mala-Jetmarova et al. [91] und Savic et al. [19] zeigt, dass seit Mitte der 1990er Jahre metaheuristische Verfahren eine dominierende Rolle eingenommen haben. Zu diesen zählen u.a. Simulated Annealing, künstliche neuronale Netze und populationsbasierte Algorithmen (z.B. Genetische Algorithmen, Particle Swarm Optimization, Harmony-Search-Algorithmus). Eine umfangreiche Zusammenstellung verschiedener deterministischer und metaheuristischer Verfahren enthalten Bilal und Plant [93], Savic et al. [19], Mala-Jetmarova [91]. Unabhängig der Verfahren fällt jedoch auf, dass trotz hoher Kosten der Systeme sowie großer Fortschritte in Bezug auf die Effizienz der Optimierungsalgorithmen und Komplexität der Modelle, ihr Einsatz in der Praxis geringer als erwartet ausfällt [19].

3.4.1 Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung stammt aus dem Bereich der Strukturoptimierung. In Bezug auf Wassernetze bezeichnet sie die Optimierung der Netzstruktur bzw. des Netzlayouts. Sie wird in dieser Arbeit synonym auch als *Trassenoptimierung* bezeichnet. Der Begriff Trassieren bezeichnet „(...) die technisch und wirtschaftlich günstigste Einordnung der RL [Rohrleitung] im Gelände.“ [20]. Hierbei ist die kürzeste Verbindung jedoch nicht gleichbedeutend mit der kostengünstigsten Trasse, denn die Trassierung wird beeinflusst durch die Topographie und Bebauung des Geländes, der Verkehrswege, Baugrundverhältnisse und das Gefährdungspotential durch andere Gebäude [20], [74]. Trotz der Vielzahl an Einflussfaktoren erfolgt die Ermittlung der Kosten bei einem Trassenoptimierungsproblem meist über die Trassenlänge bzw. die Gesamtlänge der benötigten Rohre [94].

Der Baukostenanteil von Versorgungleitungen beträgt 45-60% der Gesamtkosten der Wasserversorgungsanlagen, sodass eine falsche Planung oder Ausführung (Bau) der erdverlegten Leitungen nur unter hohem Arbeits- und Finanzaufwand korrigiert werden kann [20]. Chee et al. [95] zeigen anhand des Leitungsmaterials PVC, dass bei Kunststoffleitungen mit kleinen bis moderaten Nennweiten (\leq DN200), wie sie in Verteilungsnetzen zum Einsatz kommen, die Kosten für Erdarbeiten (Aushub, Bettung, Equipment, Arbeitszeit) zwischen 70-90% der Gesamtkosten der Baumaßnahme betragen können, während der Kostenanteil des Rohrmaterials (abhängig von der Nennweite) dementsprechend gering (ca. 10-30%) ausfällt. Insbesondere die Kosten der Bettung besitzen im kleinen Nennweitenbereich den größten Kostenanteil (ca. 65% bei DN100 bis ca. 42% bei DN200). Erst ab einem

Durchmesser \geq DN250 nehmen die Kosten für das Rohrmaterial den größten Anteil der Gesamtkosten ein. Es ist davon auszugehen, dass die Kostenanteile je nach Land und Bebauungsgebiet variieren und nicht exakt übertragbar sind. Trotzdem wird die Notwendigkeit ein Versorgungsnetz unter Berücksichtigung der Versorgungsziele mit möglichst wenig Leitungsmeter zu planen deutlich. Neben der Planung neuer Netze, findet die Topologieoptimierung auch Anwendung im Bereich der Netzreduktion. Der Aufbruch von Maschen und Identifizierung alternativer Trassen können geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von Stagnationsbereichen darstellen [82].

3.4.2 Durchmesseroptimierung

Die Optimierung des Durchmessers, d.h. des Innendurchmessers, der Leitungsrohre (auch als *DN-Optimierung* bezeichnet) stellt ein entscheidendes Werkzeug zur Beeinflussung der hydraulischen Zustände in einem Wasserversorgungsnetz dar. Der Durchmesser besitzt direkte Auswirkungen auf die im Zusammenhang zueinander stehenden Parameter Durchfluss, Fließgeschwindigkeit und Druck (vgl. Kapitel 3.2.1 und Kapitel 3.2.2). Die DN-Optimierung kommt daher bei der Dimensionierung neuer Leitungen als auch bei der Optimierung bestehender Systeme, bspw. zur Reduzierung von Druckverlusten oder Stagnationsbereichen, zum Einsatz. Die hydraulischen Eigenschaften des Netzes wirken sich dabei nicht nur auf die Versorgungsqualität, sondern auch auf Energie-, Betriebs- und Instandhaltungskosten aus. Zudem steigen die Investitionskosten einer Rohrleitung mit zunehmendem Durchmesser [20]. Die Berücksichtigung sämtlicher Aus- und Wechselwirkungen führt insbesondere in vermaschten Ringnetzen zu einem sehr komplexen Optimierungsproblem. Aus diesem Grund beziehen sich die meisten Anwendungen auf eine *least-cost-design*-Optimierung (Optimierung der geringsten Kosten), bei der die Zielfunktion einer Kostenfunktion aus Rohrdurchmesser und Leitungslänge entspricht [96]. Andere Aspekte, wie die Netztopologie und die Konnektivität, werden als bekannt angenommen. Ein solcher, relativ allgemeiner Ansatz der DN-Optimierung resultiert in folgender Zielfunktion [82], [96]:

$$\min f(D_1, \dots, D_n) = \sum_{i=1}^N c(D_i L_i) \quad (13)$$

Mit:

D_i	Durchmesser der Leitung i
L_i	Länge der Leitung i
$c(D_i, L_i)$	Kosten der Leitung i in Abhängigkeit von Durchmesser und Länge der Leitung i
N	Leitungsanzahl

Die Rohrtypen stehen nur in definierten Nennweitenschritten, d.h. als Elemente einer diskreten Menge, zur Verfügung, sodass ein diskretes, kombinatorisches NP-schweres Problem entsteht [19]. Sie stellen die Variablen des Optimierungsproblems dar. Die hydraulischen Anforderungen (i.d.R. Druck und Fließgeschwindigkeit) nach Regelwerk (Kapitel 3.1.2) werden über Nebenbedingungen in das Optimierungsproblem integriert. Zur Überprüfung einer Lösung auf Zulässigkeit müssen die hydraulischen Parameter durch hydraulische Simulation des Systems berechnet und mit den Anforderungen verglichen werden.

3.4.3 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen (GA) gehören zu der Klasse der populationsbasierten Metaheuristiken und kommen seit den 1990er Jahren bei der Optimierung von Rohrnetzen zum Einsatz [97], [98]. Sie eignen sich insbesondere für kombinatorische Optimierungsprobleme [99], zu denen bspw. die DN-Optimierung aber auch die Topologie- bzw. Trassenoptimierung gehören. GA orientieren sich am biologischen Evolutionsprozess, d.h. an der Fortpflanzung natürlicher Lebewesen, indem sie die biologischen Prinzipien der Anpassung und des *survival of the fittest* nach Darwin (Überleben der bestangepassten Individuen), über die Nachahmung der natürlichen Selektion und Mechanismen der Populationsgenetik, umsetzen. Vereinfacht ausgedrückt werden anfängliche Lösungsvorschläge so lange kombiniert und verändert (mutiert), bis eine hinreichend gute Lösung gefunden ist. Im Gegensatz zu vielen anderen Methoden arbeiten sie dabei nicht mit einer einzelnen Lösung, sondern parallel mit einer Menge von Lösungen [99]. Dadurch kann der gesamte *Lösungsraum* (=Menge möglicher Lösungen) eines Problems durchsucht werden, sodass GAs theoretisch dazu in der Lage sind, das globale Optimum zu finden, bzw. die Wahrscheinlichkeit steigt dieses zu finden. Darüber hinaus besitzen sie die Fähigkeit, sich auf der Suche nach dem globalen Optimum aus lokalen Optima zu lösen. In vielen Fällen reicht es jedoch aus, ein lokales Optimum zu ermitteln, das sich dem globalen Optimum ausreichend annähert, sodass GAs auch für NP-schwere Probleme gute Näherungslösungen liefern. Der Ablauf eines genetischen Algorithmus ist iterativ und unabhängig von dem betrachteten Problem immer gleich. Grundsätzlich wird für jedes Problem eine *Fitnessfunktion* (entspricht der Zielfunktion des Optimierungsproblems) konstruiert, anhand derer die „Güte“ (*Fitness*) eines Lösungskandidaten im Hinblick auf das zu lösende Problem gemessen wird. Die Fitness kann über Straffaktoren, sogenannte *Penalties*, negativ beeinflusst werden, um den Algorithmus davon abzubringen, in eine bestimmte Richtung fortzuschreiten. Der Aufbau und Ablauf genetischer Algorithmen ist sehr umfassend dokumentiert (u.a. [100], [99], [101]), weshalb an dieser Stelle nur ein kurzer chronologischer Überblick erfolgt:

Initialisierung und Evaluation

Die *Initialisierung* beschreibt die Bildung einer *Startpopulation*, bestehend aus einzelnen *Individuen*, die jeweils als *Chromosom* abgebildet werden. Jedes Chromosom stellt dabei eine Lösung des Problems dar. Die Chromosomen sind meist in Form einer Zeichen- oder Zahlenkette codiert. Sie bestehen aus zumeist mehreren *Genen*, die jeweils eine bestimmte Teileigenschaft bzw. ein bestimmtes Merkmal des Individuums beschreiben. Die Ausprägungen eines Gens sind festgelegt und werden als *Allele* bezeichnet. Der Zusammenhang von Chromosom, Gen und Allel zeigt Abbildung 3-2. In der anschließenden *Evaluation* wird anhand der Fitnessfunktion jedes Individuum hinsichtlich seiner Güte (*Fitness*) bewertet. Abschließend werden alle Individuen einer Population nach ihrer Güte sortiert.

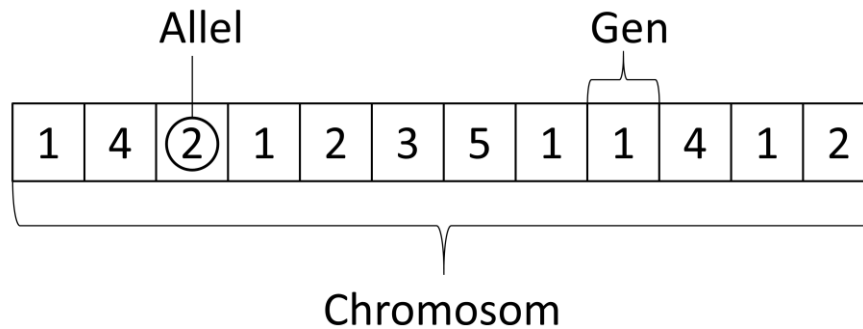


Abbildung 3-2: Bestandteile eines Individuums

Selektion

Auf Grundlage der Fitnesswerte der Chromosomen wird bei der (*Eltern-*) *Selektion* aus der Menge der Individuen eine Teilmenge ausgewählt, die die nächste Generation der Population bilden. Für die Auswahl existieren verschiedene Ansätze wie z.B. fitnessproportionale Selektion, rangbasierte Selektion, Stochastic Universal Sampling oder die Roulett Wheel Selection [99]. In allen Fällen steigt die Selektionswahrscheinlichkeit für ein Individuum mit dessen Fitness („survival of the fittest“). Nicht gut angepasste Individuen werden dadurch im Verlauf von besser angepassten Individuen verdrängt. Die ausgewählten Individuen werden anschließend durch genetische Operatoren verändert.

Crossover

Aus der Menge der durch die Selektion ausgewählten Individuen werden zufällige Individuen-Paare (Eltern) gewählt. Das *Crossover* beschreibt die Art und Weise wie neue Individuen aus der Elterngeneration gebildet werden. Falls gewünscht, können Eltern auch ohne Modifikation direkt in die Folgepopulation übernommen werden. In diesem Fall wird eine Crossover-Wahrscheinlichkeit definiert. Liegt diese z.B. bei 80%, wird ein Intervall $[0,1[$ in zwei Teilintervalle $[0, 0,8[$ und $[0,8, 1[$ unterteilt. Dann wird eine gleichverteilte Zufallszahl im Intervall $[0, 1[$ erzeugt, die bestimmt, ob es zum Crossover kommt oder nicht. Im Falle eines Crossovers existieren verschiedene Varianten dieses durchzuführen. Die einfachste Form ist das sogenannte 1-Punkt-Crossover. Hier wird per Zufall eine Stelle auf den Chromosomen eines Elternpaares bestimmt, an der sie in zwei Teile getrennt werden. Anschließend werden die Chromosomabschnitte gegenseitig ausgetauscht, sodass zwei neue, rekombinierte Nachkommen entstehen. Neben dem 1-Punkt-Crossover existieren weitere Variationen wie z.B. N-Punkt-Crossover, Uniform-Crossover, Diagonal-Crossover, Uniform-Order-Based-Crossover, Edge-Rekombination. Eine Beschreibung dieser Verfahren enthält z.B. Biethahn et al. [101].

Mutation

Die *Mutation* ist für die Erhaltung einer Grunddiversität innerhalb einer Population verantwortlich und trägt dazu bei, dass alle Punkte im Suchraum erreicht werden können [100]. Hierzu werden zufällig ein oder mehrere Gene eines Individuums verändert oder ausgetauscht. Durch das Einbringen von Inhomogenität und Divergenz in die Population wird eine frühzeitige Konvergenz verhindert. Der Umfang der Mutationen wird über eine Wahrscheinlichkeit bzw. Mutationsrate festgelegt. Der Einfluss der Mutation ist bei GAs verhältnismäßig gering, weshalb sie auch als „Hintergrundoperator“ bezeichnet wird [100].

Die Schritte Evaluation, Selektion, Crossover und Mutation werden über *n-Generationen* wiederholt. Jede Generation unterscheidet sich durch die genetischen Operatoren von der vorherigen und bringt neue und im Idealfall bessere Lösungen hervor. Es kann jedoch auch passieren, dass durch Kombination zweier Chromosomen eine schlechtere Lösung entsteht, sodass eine stetige Verbesserung nicht garantiert ist. Über ein Abbruchkriterium erhält der Algorithmus die Information, dass eine hinreichend gute Lösung gefunden wurde. Das Abbruchkriterium kann z.B. eine vorgegebene Anzahl an Generationen sein oder in Folge eines stagnierenden Fitnesswertes gewählt werden (es tritt keine Verbesserung zu den vorherigen Generationen auf). Das Ergebnis ist das Chromosom mit der zu diesem Zeitpunkt besten Fitness.

3.5 Ansätze zur automatisierten Netzerstellung

In den vergangenen Jahren wurden einige Ansätze zur automatisierten Netzerstellung entwickelt, die speziell auf formelle, urbane Siedlungsbereiche abzielen und die Analyse und den Vergleich verschiedener Wasserversorgungsstrukturen ermöglichen. Hintergrund der automatisierten Netzerstellung ist, dass es sich bei der (Trink-) Wasserversorgung um eine kritische Infrastruktur handelt, sodass Daten für Forschungszwecke und Publikationen i.d.R. nicht großflächig zur Verfügung stehen [102] bzw. nicht bereitgestellt werden dürfen. Doch selbst wenn Daten von Versorgungsunternehmen für Forschungszwecke bereitgestellt werden, ist deren Modellierung bzw. die Erstellung eines hydraulischen Modells in Abhängigkeit der Siedlungsgröße sehr zeitintensiv.

Sitzenfrei [103] präsentiert eine Zusammenfassung verschiedener Netzerstellungsansätze. Er selbst entwickelte das Softwaretool „WDS Designer“ [104], das ein Werkzeug zur algorithmischen Generierung von Wasserverteilungssystemen auf Basis von GIS-Daten ist. Auf Grundlage von Rasterdaten zur Bevölkerungs- und Bebauungsdichte, geodätischen Höhen sowie vordefinierten Netzstrukturblöcken können verschiedene virtuelle Netze bzw. Fallstudien erzeugt werden, die in der Folge zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit bestehender Systeme genutzt werden können. Der Ansatz ist Bestandteil der Projekte „VIBe“ (=Virtual Infrastructure Benchmarking) und „DynaVIBe“ (=Dynamic Virtual Infrastructure Benchmarking) und wurde u.a. durch Implementierung eines „graph concatenation approach“ weiterentwickelt sowie in eine Matlab-Umgebung integriert. Das Netz wird basierend auf einer quadratischen Gitterstruktur erstellt, wobei jedem Gitterpunkt eine stochastische Abweichung zugeordnet werden kann, um dessen Position zu variieren. Die vordefinierten Netzstrukturblöcke unterscheiden sich im Verbindungsgrad (connectivity), Anzahl der Stickleitungen, strukturellen Unterschieden, Anzahl der Knoten in einem Block und der Anzahl an redundanten Verbindungen [105]. Eine Schnittstelle zum Hydraulik-Solver EPANET 2 ermöglicht die hydraulische Untersuchung des Netzes sowie eine DN-Optimierung. Nach Sitzenfrei et al. [105] zeigt das Tool gute Ergebnisse bei einem Vergleich der hydraulischen Eigenschaften des automatisch generierten Netzes mit einem realen Netz. Damit ermöglicht es die Untersuchung verschiedener Ausbauvarianten aus hydraulischer Sicht bzw. im Hinblick auf Leistungskapazitäten. Des Weiteren erlaubt es eine grobe Abschätzung der Baukosten von Wasserversorgungssystemen im urbanen Raum auf Grundlage der GIS Daten. Die Verwendung von Rasterdaten zeigt jedoch auch, dass die Trassierung nicht die reale Siedlungsstruktur abbildet. Hinzu kommt, dass informelle Siedlungsstrukturen sehr heterogen sind [16], sodass vordefinierte Netzstrukturblöcke diese u.U. nicht richtig abbilden können.

Zischg et al. [106] stellen einen Ansatz zur automatisierten Erstellung zukünftiger Wasserverteilungsnetze vor. Ausgehend vom derzeitigen Netz werden potenzielle zukünftige Stadtstrukturen aus Masterplänen bzw. das zukünftig angestrebte Straßennetz in das Modell integriert. Durch

Berücksichtigung von Unsicherheiten in Bezug auf die Bevölkerungsentwicklung und schrittweises Trennen und Verbinden von Netzelementen können Szenarien simuliert und hydraulisch bewertet werden. Anschließend werden daraus Planungs- und Anpassungskonzepte für den Austausch von Leitungen abgeleitet, um eine zukünftige Leistungsfähigkeit zu gewährleisten.

Auch Rehm et al. [102] nutzt das Konzept der parallelen Infrastrukturen [107] und erstellt auf Grundlage von Daten zur bestehenden Verkehrsinfrastruktur bzw. eines Straßennetzes aus OSM-Daten ein Maximalnetz, welches als Graph modelliert ist. Im Gegensatz zur algorithmischen Netzgenerierung von Sitzenfrei et al. [105] und Zischg et al. [106] werden hier Optimierungsverfahren eingesetzt, um ein realitätsnahes, städtisches Verteilungssystem zu generieren. Die räumliche Verteilung des Wasserbedarfs wird durch Landnutzungs- bzw. lokale Klima-Zonen-Daten des Untersuchungsgebietes sowie des Gesamtverbrauchs innerhalb eines bestimmten Zeitraums aufgeschlüsselt und dem nächstliegenden Knoten zugeordnet. Anschließend wird ein kostenminimales Wassernetz ermittelt, das sämtliche Verbrauchsknoten verbindet. Das Optimierungsproblem ist dabei in Form eines Mixed Integer Programms formuliert und resultiert in einem zusammenhängenden Verästelungsnetz, das aus mehreren Quellen gespeist wird. Insgesamt verdeutlicht der Ansatz eindrucksvoll das Potenzial georeferenzierter open-source Daten zur Erstellung von Wasserversorgungssystemen.

Für die automatisierte Erstellung einer leitungsgebundenen Wasserversorgungsstruktur in informellen Siedlungen existieren dagegen noch wenige Ansätze. Auch die zuvor vorgestellten Ansätze können nicht ohne weitere Anpassungen auf diese Siedlungen übertragen werden. Insbesondere durch die meist unstrukturierte, heterogene Bebauung der informellen Siedlungsbereiche, die nur zum Teil durch kartierte Straßen erschlossen sind, sowie durch variierende Anforderungen an die Bereitstellung des Wassers an den Verbraucher, bestehen andere Herausforderungen im Vergleich zur Trassierung in formellen Siedlungsbereichen.

Rausch et al. [108], [17] erstellen auf Grundlage von Fernerkundungsdaten ein optimiertes Wasserversorgungsnetzwerk mit einer optimalen Kombination verschiedener Versorgungsmöglichkeiten. Die Versorgungsmöglichkeiten umfassen die Bereitstellung von Trinkwasser durch Rohrleitungen sowie durch unterschiedliche Fahrzeuge. Der Fokus der Arbeit liegt auf der mathematischen Optimierung eines Versorgungsnetzwerks in Form eines Kostenmodells, das eine optimale Wasserverteilung zwischen verschiedenen Slums ermittelt, die aus hoch aufgelösten Satellitendaten identifiziert und anschließend klassifiziert wurden. Tatsächlich mögliche Versorgungswege sowie die Positionen der einzelnen Abnehmer oder eine realitätsnahe Lokalisation der Entnahmestellen sind jedoch kein Bestandteil des Modells. Entnahmestellen und Zwischenspeicher werden in Form des Mittelpunktes der zuvor identifizierten Slumfläche modelliert. Die verschiedenen Slums im Stadtgebiet werden anschließend ohne Berücksichtigung der örtlichen Strukturen und Platzverhältnisse, quasi per Luftlinie, zu einem Versorgungsnetzwerk verbunden. Das Optimierungsmodell wird als gemischt-ganzzahliges lineares Problem (MILP) modelliert und mit Hilfe des Optimierungssolvers IBM CPLEX gelöst. Zusätzlich werden Graphen- sowie Clusteralgorithmen aus der Informatik in die Methodik integriert.

Brelsford et al. [25] entwickeln eine Methodik zur nachträglichen Einführung eines Straßennetzes, die die Abrissmaßnahmen und Kosten auf ein Minimum reduziert. Die Methode zielt auf Slums, in denen aufgrund der dichten Bebauung kein ausreichender Platz für die Einführung eines Straßen- oder Abwassernetzes existiert. Ausgehend von der tatsächlichen Bebauung werden diejenigen Hütten

identifiziert, die zur Erschließung des Betrachtungsgebietes entfernt oder umgesiedelt werden müssen, um jeder Hütte einen Zugang zur Infrastruktur zu ermöglichen.

4 Grundlagen aus Mathematik, Informatik und Logistik

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Planungsunterstützung resultiert aus einem Zusammenspiel verschiedener Fachrichtungen. In den folgenden Unterkapiteln werden die hierfür relevanten Grundlagen aus den Bereichen Mathematik, Informatik und Logistik vorgestellt. Die einzelnen Methoden können dem Begriff „Operations Research“ zugeordnet werden. Der Begriff steht für die „(...) Analyse von praxisnahen, komplexen Problemstellungen im Rahmen eines Planungsprozesses zum Zweck der Vorbereitung von möglichst guten Entscheidungen durch die Anwendung mathematischer Methoden (...)“ [109]. Die Anwendung erfolgt im Kontext betriebswirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher Fragestellungen [110]. In dieser Arbeit fallen hierunter die Minimierung von Kosten sowie die Optimierung von Transportwegen bzw. Versorgungsnetzen.

4.1 Graphentheorie

Die Graphentheorie ist ein Teilgebiet der diskreten Mathematik. Sie kommt in verschiedensten Anwendungen zum Einsatz und dient zur Modellierung, Abbildung und Untersuchung komplexer Zusammenhänge. In dieser Arbeit werden Methoden aus der Graphentheorie zur Modellierung des Wasserverteilungssystems, Distanzermittlung im Netzwerk sowie der späteren Optimierung eines Verästelungsnetzes genutzt. Informationen, die über die Ausführungen in diesem Kapitel hinausgehen, enthält u.a. [111], [112], [113], [114], [115].

Ein *Graph* $G = (V, E)$ besteht aus einer Menge von *Knoten* (tw. auch Ecken genannt) ($V = \text{vertices}$) und *Kanten* ($E = \text{edges}$). Sind sowohl die Knoten als auch die Kanten endlich, wird auch der Graph als endlich bezeichnet. Eine Kante $e \in E$ besteht aus einem Paar von Knoten $u, v \in V$, die sie verbindet $\{u, v\} \in E$. Zwei Knoten heißen *benachbart*, wenn es zwischen ihnen eine Kante gibt. Besitzt der Graph definierte Anfangs- und Endknoten, sodass $\{u, v\} \neq \{v, u\}$ gilt, wird er als *gerichteter Graph* (oder *Digraph* = directed graph) bezeichnet. Gilt dagegen $\{u, v\} = \{v, u\}$ wird er als *ungerichteter Graph* bezeichnet. Grundsätzlich können zwischen zwei Knoten mehrere Kanten (*Mehrfachkanten*) existieren. Einen Sonderfall stellt eine *Schleife* dar. Sie bezeichnet eine Kante, die einen Knoten mit sich selbst $\{v, v\}$ verbindet. Existieren keine Mehrfachkanten und keine Schleifen, wird von einem *einfachen Graph* gesprochen. Eine Kantenfolge $W = e_0, \dots, e_n \in E$ wird als *Kantenzug* bezeichnet, wenn die aufeinanderfolgenden Kanten durch gemeinsame Knoten miteinander verbunden sind. Tritt in einem Kantenzug kein Knoten mehrfach auf, so ist W ein *Weg*. Ein Graph heißt *zusammenhängend*, wenn zwischen allen Knoten im Graph ein Weg existiert. Als *Kreis* wird ein Kantenzug mit gleichem Anfangs- und Endknoten ($v_1 = v_t$) bezeichnet, in dem alle Kanten verschieden sind. Besitzt ein zusammenhängender Graph keine Kreise bzw. n Knoten, die durch $n-1$ Kanten miteinander verbunden sind, sodass zwischen zwei Knoten genau ein Weg existiert, wird er als *Baum* bezeichnet. Ist dieser Graph jedoch nicht zusammenhängend, wird er als *Wald* bezeichnet. Als *vollständiger Graph* wird ein Graph bezeichnet, in dem sämtliche Knoten miteinander über jeweils eine Kante verbunden sind, d.h. er enthält alle möglichen Knotenpaarkombinationen als Kanten, und es gilt $E = V \times V$. Ein Graph heißt *planar*, wenn er sich in der Ebene darstellen lässt während sich keine seiner Kanten überschneidet. Ein Graph heißt *bipartit*, wenn seine Knoten aus zwei disjunkten Teilmengen A und B bestehen und zwischen den Knoten einer Teilmenge keine Kanten bestehen. Er ist *vollständig bipartit*, wenn jeder Knoten aus A mit jedem Knoten aus B über eine Kante verbunden ist. Den Kanten eines Graphen können *Kantengewichte*

in Form einer *Gewichtungsfunktion* $c(e)$ zugeordnet werden. In diesem Fall handelt es sich um einen *gewichteten Graph*. Die Leitungslängen können beispielsweise in Form von Kantengewichten modelliert werden aber auch Zeitspannen, Kosten, Wahrscheinlichkeiten, etc.. Die Anzahl an Kanten eines ungerichteten Graphen G , die an einen Knoten angrenzen, wird als *Grad* $d_G(v)$ eines Knoten v bezeichnet. Im Falle eines gerichteten Graphen G wird zwischen dem *Eingangsgrad* $d_G^-(v)$ (auch *Innengrad*) und *Ausgangsgrad* $d_G^+(v)$ (auch *Außengrad*) unterschieden.

4.1.1 Kürzeste-Wege-Problem

Die Suche des kürzesten Weges zwischen zwei unterschiedlichen Knoten eines Graphen wird als *Kürzeste-Wege-Problem* bzw. international als *Shortest-Path-Problem* bezeichnet. In einem gewichteten Graph $G = (V, E)$ wird der Weg gesucht, bei dem die Summe der Kantengewichte minimal ist. Zunächst muss hierfür die *Länge* eines Weges definiert werden. Sei $c: E \rightarrow \mathbb{R}$ die Gewichtungsfunktion, die jeder Kante des Graphen G eine Länge zuweist, so definiert sich die Länge $c(W)$ eines Weges $W = e_0, e_1, \dots, e_k \in E$ durch:

$$c(W) := \sum_{i=1}^k c(e_i) \quad (14)$$

Die *Distanz* $dist$ wird als die Länge des kürzesten Weges definiert. Zwischen zwei vorgegebenen Knoten $u, v \in V$ des Graphen G ergibt sich unter Berücksichtigung der Gewichtungsfunktion:

$$dist_c(u, v, G) := \inf\{c(W) : W \text{ ist ein Weg von } u \text{ nach } v \text{ in } G\}$$

In den meisten Anwendungen existieren zwischen zwei Knoten u und v mehrere Wege, sodass die Herausforderung darin besteht, aus den vielen verschiedenen Optionen den kürzesten Weg zu finden. Je nach Art der Gewichtungsfunktion und gesuchten Knoten existieren verschiedene Algorithmen zur Lösung des Problems. Wird die Länge des kürzesten Weges ab einem Startknoten s zu einem Zielknoten t mit $s, t \in V$ gesucht, wird von einem *Single-Pair-Shortest-Path-Problem* gesprochen. Wird die Länge des kürzesten Weges ab einem Startknoten $s \in V$ zu sämtlichen anderen Knoten v für alle $v \in V$ des Graphen G gesucht, wird dies als *Single-Source-Shortest-Path-Problem* bezeichnet. Unter der Voraussetzung, dass G ein zusammenhängender Graph mit nicht negativen Kantengewichten $c(e) \geq 0$ für alle $e \in E$ ist, können beide Typen mit Hilfe des Algorithmus von Dijkstra [116] optimal gelöst werden [111]. Der iterative Algorithmus wird der Gruppe der Greedy-Algorithmen („gieriges Vorgehen“) zugeordnet, die ein Problem schrittweise lösen. Es wird derjenige Folgezustand gewählt, der in diesem Zwischenschritt das beste Ergebnis darstellt bzw. dem größten Gewinn entspricht. Das Vorgehen basiert auf der Annahme, dass jeder Teilabschnitt eines kürzesten Weges selbst auch ein kürzester Weg ist. Während der sogenannten Initialisierung wird zunächst der Startknoten $s \in V$ definiert, von dem aus alle anderen Knoten $v \in V$ bzw. der Zielknoten $z \in V$ (im Falle eines SPP) erreichbar sein müssen. Außerdem werden allen Knoten die Eigenschaften *Kosten* (entspricht hier der Distanz $dist_c(v)$) und *Vorgänger* zugeordnet. Die Kosten des Startknotens s werden $dist_c(s) = 0$ angesetzt. Der Startknoten wird in einer Menge $M \subseteq V$ für bereits erreichte Knoten gespeichert. Für sämtliche andere Knoten v mit

$v \neq s$ werden die Kosten zunächst als unendlich ($\text{dist}_c(s,v) = +\infty$) angesetzt, da die Länge der kürzesten Wege zu diesen noch unbekannt ist. In der ersten Iteration werden die vom Startknoten direkt zu erreichenden Knoten (benachbarte Knoten) sowie deren Kosten ermittelt. Der Knoten mit den geringsten Kosten wird ausgewählt und in die Menge der bereits erreichten Knoten M aufgenommen. Parallel werden auch dessen Eigenschaften (nach der ersten Iteration entsprechen die Kosten dem Kantengewicht der Verbindung vom Startknoten zu diesem Knoten bzw. der Vorgänger ist der Startknoten) gespeichert. In der nächsten Iteration wiederholt sich das Vorgehen der ersten Iteration, ausgehend von dem zuvor ermittelten Knoten. Aus den benachbarten Knoten wird immer der Knoten, der mit den geringsten Kosten zu erreichen ist, ermittelt und samt dessen Eigenschaften in die Menge bereits erreichter Knoten M aufgenommen. Kommt es dabei zu einer Verbindung zu einem noch nicht erfassten Knoten oder ergibt sich eine Verringerung der Kosten für einen bereits erfassten Knoten, werden diese aktualisiert und der neue direkte Vorgänger des entsprechenden Knoten gespeichert. Die Iteration erfolgt so lange, bis alle Knoten in die Menge M aufgenommen und somit alle im Graph enthaltenen Knoten erreicht wurden. Der aus diesem Vorgehen entstehende Graph ist ein Baum kürzester Wege bezüglich s [114], der jedoch nicht mit einem minimalen Spannbaum verwechselt werden darf. Für detailliertere Ausführungen und Beispiele sei an dieser Stelle an entsprechende Fachliteratur verwiesen: z.B. [111], [114].

4.1.2 Minimaler Steinerbaum

Ein *Spannbaum* (auch *spannender Baum* genannt) eines Graphen $G = (V, E)$ beschreibt einen Teilgraphen, der alle Knoten enthält und gleichzeitig kreisfrei d.h. minimal zusammenhängend ist. Besitzt der Graph eine Gewichtungsfunktion $c: E \rightarrow \mathbb{R}^+$, die jeder Kante $e \in E$ ein nicht-negatives (Kanten-) Gewicht zuordnet, wird die Summe aller Kantengewichte als *Kosten* des Graphen G bezeichnet [111]. Ein *minimal spannender Baum* (engl. *minimum spanning tree*) entspricht einem spannenden Baum, dessen Gesamtkosten (d.h. die Summe der Gewichte der im Teilgraphen enthaltenen Kanten) minimal sind. Es existieren verschiedene Algorithmen zur Ermittlung des minimal spannenden Baumes. Bekannte Algorithmen zur Ermittlung minimal spannender Bäume sind der Kruskal Algorithmus sowie der Algorithmus von Prim [114].

Das minimale Steinerbaum-Problem (engl. *Steiner-Tree-Problem*) ist eine Verallgemeinerung des minimum-spanning-tree-problem und des shortest path problem. Während das minimum spanning tree problem eine Teilmenge an Kanten ermittelt, die sämtliche Knoten eines zusammenhängenden, gewichteten, ungerichteten Graphen G auf dem kostengünstigsten Weg verbindet, entspricht ein minimaler Steinerbaum einem Teilgraphen G' von G , der endlich viele (vor-) gegebene Knoten, sogenannte *Terminale* (terminal nodes) $T \subseteq V$ mit minimalen Kosten ($\min \sum_{e \in G'} c_e$) miteinander verbindet. Der Teilgraphen G' kann dabei neben den Terminalen auch noch weitere Knoten, sogenannte *Steinerpunkte* enthalten, die notwendig sind um die Terminale miteinander zu verbinden. Abgesehen von zwei Spezialfällen, die in polynomieller Zeit lösbar sind [114], ist das minimale Steinerbaum-Problem ein NP-vollständiges Problem [117], [114], [118]. Dies führt dazu, dass die Laufzeit aller Algorithmen, die das Problem exakt lösen, exponentiell mit der Anzahl der Knoten steigt. Es müssen zunächst alle möglichen Steinerbäume untersucht werden, um aus diesen den minimalen Steinerbaum zu identifizieren. Daraus folgt, dass sich diese Ansätze für größere Netzwerke (nach Sadeghi und Fröhlich [119] bei vollständigen Netzwerken ab ~ 50 Knoten) in der Praxis als ungeeignet erweisen. Durch Approximierung können jedoch ebenfalls gute Lösungen gefunden werden.

4.2 Ganzzahlige- und Gemischt-ganzzahlige-Optimierung

In dieser Arbeit werden Ansätze der ganzzahligen bzw. gemischt-ganzzahligen-linearen Programmierung zur Berechnung optimaler Wasserentnahmepunkte, im Kontext von Forschungsfrage 3, im Netz genutzt. Der folgende (stark reduzierte) Einblick dient ausschließlich dem Verständnis der im weiteren Verlauf dieser Arbeit genutzten Begriffe und Methoden. Detaillierte Ausführungen und Zusammenhänge enthalten z.B. Kallrath [120], Gritzmann [121], Grimme et al. [122], Domschke et al. [109].

„Der Begriff der *Optimierung*, im mathematischen Sinne verwendet, bedeutet die Bestimmung des Maximums oder Minimums einer Funktion f , die auf einem (beschränkten) Bereich S oder Zustandsraum definiert ist.“ [120]. Durch das *Dualitätsprinzip* der Optimierung ist eine getrennte Betrachtung einer Maximierung und Minimierung einer Funktion nicht notwendig, da sich die Maximierung der Funktion f leicht durch das Minimieren der Funktion $-f$ darstellen lässt [122]:

$$\max f = -\min(-f) \text{ bzw. } \min f = -\max(-f).$$

Die weiteren Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich aus diesem Grund nur auf die Minimierung. Ein Optimierungsproblem besteht im Kern aus einer Zielfunktion f sowie einer *zulässigen Menge* X (auch *zulässiger Bereich*), die alle *zulässigen Lösungen* $x \in X$ beinhaltet [17]. Die zulässigen Lösungen sind wiederum durch eine bestimmte Anzahl von n -vielen Entscheidungsvariablen $x = (x_1, \dots, x_n)$ charakterisiert. Durch das Lösen des Optimierungsproblems wird die Belegung der Entscheidungsvariablen bestimmt [17]. Die Belegung der Entscheidungsvariablen wird dabei durch die Zielfunktion quantitativ bewertet. Wird die zulässige Menge dabei nicht durch *Nebenbedingungen* (Restriktionen) beschrieben, handelt es sich um ein *unrestringiertes Optimierungsproblem* [121]. Existieren Nebenbedingungen zur Beschreibung der zulässigen Menge, handelt es sich um ein *restringiertes Optimierungsproblem*.

Ein lineares Optimierungsproblem (auch „lineares Programmierungsproblem“, engl. *linear programming problem (LP)*) besitzt eine lineare Zielfunktion sowie lineare Nebenbedingungen, die durch Gleichungen oder Ungleichungen dargestellt werden können. Das LP ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} \text{Minimiere } & c^T x \\ \text{s.t. } & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Dabei ist der Kostenvektor $c \in \mathbb{R}^n$, die Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ beschreibt mit dem Vektor $b \in \mathbb{R}^m$ die m -vielen Nebenbedingungen. $Ax \leq b$ sowie die Nichtnegativitätsbedingung $x \geq 0$ sind jeweils elementweise zu verstehen, d.h. $x \geq 0: \Leftrightarrow x \in \mathbb{R}_+^n = \{x \in \mathbb{R}_+^n: x_i \geq 0, i = 1, \dots, n\}$. Wenn ein Punkt $x = (x_1, \dots, x_n)$ alle Nebenbedingungen, inkl. der Nichtnegativitätsbedingungen, erfüllt, heißt x *zulässige Lösung*. Darüber hinaus wird die zulässige Lösung x^* als *optimal* bezeichnet, wenn kein zulässiges x mit kleinerem (Minimierungsproblem) bzw. größerem (Maximierungsproblem) als Zielfunktionswert $f(x^*)$ existiert. [109]. Zusammengefasst lässt sich das LP darstellen als:

$$\min\{c^T x \mid Ax \leq b, x \in \mathbb{R}_+^n\} \quad (16)$$

Im Gegensatz dazu dürfen bei einem ganzzahligen Optimierungsproblem (engl. *integer programming problem (IP)*) alle Variablen ausschließlich ganzzahlige Werte (aus \mathbb{Z}) annehmen [122]. Sind Zielfunktion und Nebenbedingungen linear, wird dies als *integer linear programming problem (ILP)* bezeichnet. Das ILP ergibt sich zu:

$$\min\{c^T x \mid Ax \leq b, x \in \mathbb{Z}_+^n\} \quad (17)$$

Bei der gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung (engl. *mixed integer linear programming (MILP)*) besitzen r -viele Variablen der Lösung ganzzahlige Werte $x_1, \dots, x_r \in \mathbb{Z}_+^r$, während die verbleibenden $(n-r)$ -viele Variablen kontinuierliche $x_{r+1}, \dots, x_n \in \mathbb{R}_+^{n-r}$ Werte besitzen. Das MILP ergibt sich zu:

$$\min\{c^T x \mid Ax \leq b, x \in \mathbb{Z}_+^r \times \mathbb{R}_+^{n-r}\} \quad (18)$$

Je nach Art des Optimierungsproblems stehen zur Lösung eine Vielzahl von Algorithmen zur Verfügung. Es wird dabei zwischen exakten (deterministischen) und heuristischen Lösungsverfahren unterschieden. Exakte Lösungsverfahren finden eine optimale Lösung in endlich vielen Schritten und beweisen sie als solche, während Heuristiken nach möglichst guten Lösungen suchen [109].

Zu den bekanntesten exakten Verfahren zählt z.B. die vollständige *Enumeration (Brute-Force-Methode)*, die auf der Ermittlung und Untersuchung sämtlicher Möglichkeiten beruht, aus der anschließend die optimale Lösung abgeleitet wird [114], [123]. Mit wachsender Komplexität eines Problems steigt die Anzahl der verschiedenen Möglichkeiten ein System zu lösen, sodass das „Durchprobieren“ sämtlicher Möglichkeiten in sehr hohen, nicht mehr vertretbaren, Rechenzeiten oder Rechnerkapazitäten resultieren würde. Die Komplexitätstheorie klassifiziert daher die Probleme bezüglich ihrer Komplexität in die Komplexitätsklassen P und NP . Vereinfacht ausgedrückt werden Probleme der Klasse P zugeordnet, wenn sie durch einen deterministischen Algorithmus in polynomieller Laufzeit gelöst werden können [114]. Probleme der Klasse NP sind dadurch gekennzeichnet, dass die erforderliche Rechenzeit exponentiell zur Problemgröße zunimmt, sodass sie ab einer bestimmten Größe nicht mehr effizient lösbar sind [120]. Innerhalb der Gruppe existieren somit große Unterschiede hinsichtlich der Lösbarkeit. Probleme werden als *NP-schwer* bezeichnet, wenn kein Algorithmus bekannt ist, „(...) der auch die schwierigsten zu lösende Instanz des Problems mit polynomialem Aufwand löst (...)“ [109]. Die meisten ganzzahligen Problemtypen gehören zu den NP -schweren Problemen [109]. Heuristische Verfahren (auch Heuristiken) werden insbesondere bei NP -schweren Problemen genutzt, wenn exakte Verfahren keine Lösung innerhalb einer vertretbaren Laufzeit liefern. Die von Heuristiken gefundenen Lösungen garantieren jedoch nicht, dass überhaupt ein Optimum gefunden (bzw. als solches erkannt) wird [109].

4.3 Grundlagen der Standortplanung

Die Methoden zur optimierten Standortbestimmung stammen aus der Logistik. Beim Aufbau von Logistiknetzwerken bzw. Planung von Distributionsnetzwerken stellt sich die Frage wie Konsumgüter optimal verteilt bzw. zwischengelagert werden können. Verteilungsnetze verbinden verschiedene Standorte miteinander, sodass ein Warenaustausch ermöglicht wird. Die Anzahl und Position der Standorte hat damit direkte Auswirkungen auf die Planung der Verteilungsnetze bzw. potenzielle Trassierungsmöglichkeiten haben Einfluss auf potenzielle Standorte. Die Standortplanung umfasst zahlreiche Modelle und Problemformulierungen aufgrund der Vielzahl verschiedener

Anwendungsbereiche und Entscheidungskriterien. Im Fokus stehen Standortprobleme (engl. *facility-location-problems*) sowie damit eng verwandte Überdeckungsprobleme (engl. *covering-location-problems*) [124], [125], [126]. Klassische Standortprobleme bestehen aus einer Menge von (Service-) Einrichtungen bzw. Anbietern, Kunden und Kosten. Aus der Menge der (Service-)Einrichtungen soll eine Teilmenge ermittelt werden, die unter Minimierung der Kosten die „bestmöglichen“ Standorte zur Erfüllung der (Kunden-)Nachfrage enthält bzw. jedem Kunden mindestens eine Serviceeinrichtung unter Minimierung der Kosten zuweist [127]. Ein „optimaler Standort“ ist somit problemspezifisch und hängt in erster Linie von dessen Zweck ab. Zu den bekanntesten Standortproblemen zählen *center problems* (Kapitel 4.3.1) und *median problems*. Die sehr ähnlichen Überdeckungsprobleme (auch als Standortabdeckungsproblem bezeichnet), zielen „(...) stärker auf die Einhaltung eines vorgegebenen Service-Niveaus bei der Ansiedlung von Servicezentren bzw. Outlets ab.“ [128], d.h. die Einrichtungen werden so platziert, dass eine Nachfrage bestmöglich bedient wird [129]. Es existieren verschiedene Varianten von Überdeckungsproblemen, wobei insbesondere das *location set covering problem* (Kapitel 4.3.2) sowie das *maximum covering location problem* im Fokus stehen.

Je nach Standortbeschränkungen und Art der Abstandsbeziehungen bzw. Entfernungen wird im Wesentlichen zwischen drei Modellierungsmöglichkeiten unterschieden: Modelle, denen ein Netzwerk mit Entfernungsdaten bzw. Distanzen zugrunde liegt und in dem ausschließlich dessen Knoten (endliche Menge) als Standorte zugelassen sind, werden als *diskrete Modelle* (*discrete facility- bzw. covering-location problem*) bezeichnet. Können Standorte an jedem beliebigen Punkt (Menge unendlich) in der euklidischen Ebene festgelegt werden, wird dies als *kontinuierliches Modell* (*continuous facility- bzw. covering-location problem*) bezeichnet. Eine Mischung der beiden Varianten wird als *semidiskretes Modell* bezeichnet, indem die Standorte sowohl in den Knoten als auch an jedem beliebigen Punkt entlang der Kanten eines Netzwerks liegen. Die Modellierung bzw. Art der Formulierung des Optimierungsproblems ist von großer Bedeutung. So eröffnet ein diskretes Modell die Möglichkeit Techniken der ganzzahligen Optimierung (*Integer Programming*) und kombinatorischen Optimierung zur Lösung dieser Probleme zu nutzen [127]. Über die Zielfunktion wird berücksichtigt, ob der Standort einer Serviceeinrichtung von Kunden in unmittelbarer Umgebung gewünscht oder möglichst weit entfernt liegen soll. Auch Kombinationen aus beiden existieren. Mattfeld und Vahrenkamp [128] unterscheiden die jeweiligen Modelle weiter nach zeitlicher Dimension (statisch oder dynamisch) sowie in Bezug auf die Verfügbarkeit einer Serviceeinrichtung (deterministisch oder stochastisch).

4.3.1 p-Center-Problem

Das *p-Center-Problem* ist eine Erweiterung des *1-Center-Problem*, gehört zur Familie der Facility-Location-Probleme [130] und wurde erstmals von Hakimi 1965 [131] als Generalisierung des *Absolut-Center-Problem* definiert. Das Ziel des *p-Center-Problems* besteht darin, *p*-Standorte zu bestimmen, sodass die maximale Distanz zwischen Kunden und Standorten minimiert wird. In diesem Zusammenhang werden die Ergebnisse auch als „MiniMax-Lösung“ bezeichnet

Sei $G = (V, E)$ ein Graph mit einer Knotenmenge $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ und einem Gewicht w_j für den Knoten $v_j \in V$. Dazu sei $X_p = \{x_1, \dots, x_p\}$ eine Menge von *p* Punkten auf *G*, die Distanz $d(X_p, v_j)$ zwischen X_p und Knoten v_j wird berechnet aus $\min_{i=1, \dots, p} d(x_i, v_j)$ (beschreibt die Länge des kürzesten Weges zwischen Punkt x_i und Knoten v_j). Das *p-Center-Problem* besteht darin, eine Menge X_p von *p* Punkten auf *G* zu finden, sodass $\max_{j=1, \dots, n} w_j \cdot d(v_j, X_p)$ minimiert wird [132].

Centerprobleme spielen daher insbesondere im kommunalen Dienstleistungsbereich eine große Rolle. Dort stellt sich die Frage, wie Notfalleinrichtungen wie Feuerwehr oder Krankenhäuser, aber auch Sicherheitseinrichtungen wie Polizeistationen in einem (Stadt-) Netz lokalisiert werden sollten, damit sie von allen anderen Knoten schnellstmöglich erreicht werden können [133], [132], [128], [126]. Auch für Probleme, bei denen die Nachfrage abhängig von der Entfernung ist bzw. gegen null fällt, falls eine Maximalentfernung überschritten wird [128] sowie im Zusammenhang mit Fragen zur Gebäudeevakuierung und Standortwahl von Schutzräumen [130] spielen Center-Probleme eine Rolle. Verwandte Probleme, wie die Minimierung der Gesamt- (p -Absolut) oder Durchschnittsentfernung (p -Median), bevorzugen tendenziell Kunden, die sich in dicht besiedelten Gebieten befinden. Bei der Standortwahl öffentlicher Einrichtungen und deren Erreichbarkeit, ist dies jedoch oftmals nicht gewollt, da diese Ansätze im Umkehrschluss Kunden in weniger dicht besiedelten Gebieten benachteiligen [132]. Das p -Center-Problem kann bezüglich der Platzierung der Einrichtungen unterschieden werden in *absolute p -Center-Problems* sowie *vertex restricted p -Center-Problems*. Während die Standorte für Einrichtungen bei einem vertex restricted p -Center-Problem auf die Knoten eines Netzwerks beschränkt sind, können sie bei einem absolute p -Center-Problem zusätzlich an jeder Stelle entlang einer Kante eines Netzwerks liegen. Verfügen die Einrichtungen über eine Kapazität, die nicht überschritten werden darf, wird das Problem als *capacitated p -Center-Problem* bezeichnet. Andernfalls wird von *einem uncapacitated p -Center-Problem* gesprochen. Sollen einzelne Kunden mehr oder weniger bevorzugt werden, können die jeweiligen Knoten gewichtet werden, und es entsteht ein *weighted p -Center-Problem*. In der Literatur existieren zahlreiche weitere Varianten und Formulierungen des p -Center-Problems, jeweils mit mehreren mathematischen und heuristischen Lösungsansätzen. Einen umfassenden Einblick dazu enthält Calik [130] und Rezapour [134]. In dieser Arbeit wird das p -Center-Problem als Mixed Integer Programming (MIP) nach Daskin [135] formuliert, sodass es als *diskretes p -Center-Problem* vorliegen muss. Hierfür gilt, dass der Graph $G = (J \cup I, E)$ bipartit und vollständig ist, mit der Menge der Service-Einrichtungen I sowie der Menge der Kunden J [132].

4.3.2 Location-Set-Covering-Problem

Das *Location-Set-Covering-Problem* (auch *set-covering-problem*) stammt aus der Familie der *Überdeckungsprobleme*, ist gleichzeitig aber eng verwandt mit dem *uncapacitated p -Center-Problem* [130], [125], [126]. Erstmals wurde es 1971 von Toregas et al. [136] formuliert. Das Location-Set-Covering-Problem bestimmt die minimal erforderliche Anzahl von (Service-) Einrichtungen, um alle Kunden innerhalb einer bestimmten Entfernung oder Zeit versorgen zu können [137], [132], [128]. Die Entfernung bezeichnet dabei meistens räumliche oder zeitliche Abstände. Im Falle räumlicher Abstände kann die Distanz entweder durch einen Radius oder im Falle eines Netzwerks über die tatsächliche Wegstrecke berücksichtigt werden. Liegt dem Location-Set-Covering-Problem ein Netzwerk zugrunde, kann es in Form eines Integer Programming Problem (Kapitel 4.2) formuliert werden [128]. Das Problem ist jedoch NP-schwer (Laporte S. 108), sodass das Finden einer optimalen Lösung in vertretbarer Zeit von der Größe des Lösungsraums abhängt.

4.4 Grundlagen der Gebietsplanung

Die Gebietsplanung bezeichnet die Zusammenfassung kleinerer Einheiten (*Basisgebiete*) zu einer bestimmten Zahl von größeren Einheiten (*Distrikte* oder *Territorien*) unter Berücksichtigung relevanter Planungskriterien. Sehr bekannte Beispiele finden sich u.a. bei der Einteilung von Wahlbezirken (*political districting*), der Verkaufs- (*sales territory design*) und Vertriebsgebietsplanung (*distribution*

districting) sowie der Gebietsplanung für Dienstleistungen (*service districting*) [138]. Während bei der Einteilung von Wahlbezirken das Ziel der Gebietsplanung darin besteht jeder Stimme einen gleichen Einfluss zu verleihen, steht bei der Einteilung von Vertriebsgebieten oftmals die Profitmaximierung bzw. Kostenminimierung im Fokus. Daneben kann durch die Gebietsplanung sichergestellt werden, dass der verbundene Arbeitsaufwand gleichmäßig auf die Distrikte aufgeteilt wird [139]. Bei der Verteilung von öffentlichen Dienstleistungen, beispielsweise der Zuweisung von Schülern auf Schulen, findet die Gebietsplanung ebenfalls Anwendung. Hier können unter Einhaltung der schulischen Kapazitäten, Minimierung von Pendelzeiten oder auch der Gewährleistung einer ausgewogenen ethnischen Zusammensetzung Schüler optimal verteilt werden [140], [141], [142], [143]. Bei der Anwendung auf Polizeibezirke können über die Gebietsplanung geringe Antwortzeiten der Einsatzkräfte erreicht werden [144], [145]. Ein weiteres untersuchtes Anwendungsfeld ist die Aufspaltung eines monopolistisch aufgebauten Stromnetzes in kleinere Gebiete zur Förderung von Wettbewerb im Stromsektor [146].

Die Planungskriterien unterscheiden sich je nach Anwendungsfall und sind somit spezifisch zu wählen. Oft genutzte Planungskriterien sind Kompaktheit, Kontiguität (Zusammenhang), Balance sowie eine vollständige und exklusive Zuordnung aller Basisgebiete [138], [147]. In Bezug auf die Stadtplanung bedeutet eine hohe Kompaktheit, dass einzelne Einheiten eines Distriktes vergleichsweise nah beieinanderliegen, sodass die Annahme besteht, dass daraus kürzere Wege bzw. Reisezeiten innerhalb eines Distrikts resultieren [145]. Gleiches trifft auf zusammenhängende Gebiete zu [138]. Sie ermöglichen ein schnelles Reisen, ohne dass das Gebiet verlassen werden muss. Entsprechend deutet eine hohe Kompaktheit gemeinsam mit dem Kriterium „Kontiguität“ im Durchschnitt auf kurze Wege innerhalb eines Distrikts hin, sodass sie gemeinsam ein Schlüssel zur Minimierung von Reisezeiten sind [148]. Übertragen auf die Einführung einer Dienstleistung, wie einer leitungsgebundenen Wasserversorgungsinfrastruktur, bedeutet ein kurzer Weg eine entsprechend geringere Leitungslänge, sodass sich die Erfüllung der Kriterien positiv auf die Verlegungskosten sowie auf hydraulische Rohrleitungswiderstände (und damit geringere Pumpenergiekosten) auswirken. Durch das Kriterium der Balance wird versucht eine bestimmte Größe, die so genannte Aktivität, gleichmäßig auf die entstehenden Distrikte zu verteilen. Sie entspricht einer je nach Planungsszenario unterschiedlichen Eigenschaft der Basisgebiete [149]. In Bezug auf die Einteilung von Vertriebs- und Servicegebieten kann die Aktivität z.B. in Form der Arbeitsbelastung, Arbeitsaufwand zur Erbringung einer Dienstleistung, Reisezeiten oder potenziellen Gewinnen ausgedrückt werden. Aber auch andere Attribute wie z.B. Fläche, Verbrauch, Einwohnerzahl oder auch ihre ethnische Zusammensetzung [138] sind hier denkbar. Üblicherweise wird innerhalb einer Gebietseinteilung lediglich eine Aktivität berücksichtigt. Es gibt nur wenige Veröffentlichungen, in denen innerhalb der Balance mehrere Aktivitäten eingerechnet werden [138]. Das Kriterium der vollständigen und exklusiven Zuordnung bedeutet, dass sämtliche Basisgebiete in der Lösung vertreten sein müssen. Außerdem kann ein Basisgebiet nur einem Distrikt zugeordnet werden. Eine Mehrfachzuweisung ist nicht zulässig.

Es existieren zahlreiche Methoden zur Lösung von Gebietsplanungsproblemen, die in verschiedenen Klassen zusammengefasst werden können. Kalcsics und Ríos- Mercado [138] unterscheiden „Location-Allocation Methods“, „Construction Methods“, „Set-Partitioning“ Modelle, „Computational Geometry Methods“ sowie Meta-Heuristiken. Ausführlichere Beschreibungen enthält z.B. Ricca et al. [150]. Der in diesem Bericht genutzte Algorithmus der „rekursiven Partitionierung“ in Anlehnung an Kalcsics et al. [149] stammt aus der Klasse der „Computational Geometry Methods“ [138]. Der Algorithmus nutzt das Prinzip der sukzessiven Dichotomien, d.h. der iterativen Aufteilung des Planungsgebietes in jeweils zwei

Teile. Das geometrisch motivierte Verfahren führt zu sehr guten Ergebnissen in Bezug auf die Balance [140], sodass eine gute Aufteilung des gewählten Aktivitätskriteriums erwartet wird. Auf Grundlage des rekursiven Partitionierungsalgorithmus entwickelte Ulrich [151] eine weiterführende Heuristik für eine kombinierte Standort- und Gebietsplanung. Auch Butsch [140] untersucht in seiner Arbeit Stärken und Schwächen des Algorithmus und entwickelte diesen weiter. Bei einem Vergleich mit einem ähnlichen Algorithmus kommt er zu dem Ergebnis, dass beide Algorithmen auch Lösungsansätze für die Routenplanung oder Standortwahl sein können („Moreover, these algorithms can be a basis of solution approaches where districting problems occur as part of another problem, such as routing or facility location.“ [140]). Daneben wird die interaktive Nutzbarkeit des Algorithmus, welcher über seinen modularen Aufbau gut an das jeweilige Problem angepasst werden kann sowie eine gute Abwägung unterschiedlicher Planungskriterien hervorgehoben [140], [138]. Der Algorithmus liefert auch bei sehr großen Lösungsräumen schnelle Ergebnisse und erfüllt durch die Aufteilung des Gebiets entlang von Trenngeraden das Kriterium der Kontiguität. Die allgemeine Funktionsweise des Algorithmus mit den im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen spezifischen Anpassungen enthält Kapitel 5.3.2.

Kompaktheitsmaße

Kompakte Gebiete sind nach Kalcics et al. [149] „einigermaßen rund geformt und unverzerrt“. Eine eindeutige Definition der Kompaktheit existiert jedoch nicht [140], sodass auch kein allgemeingültiges, mathematisches Maß der Kompaktheit definiert werden kann [152], [140]. Kompaktheit ist multidimensional und somit subjektiv und kann je nach Anwendungsfall variieren. Dabei kann sich die Kompaktheit auf das gesamte Betrachtungsgebiet, (ausgewählte) einzelne Gebiete oder auf Kombinationen aus beiden beziehen [140]. Die globale Kompaktheit eines Gebietsplanes kann beispielsweise über die Längen der inneren Grenzen oder der durchschnittlichen Kompaktheit der beinhalteten Gebiete bestimmt werden. Um die Kompaktheit eines spezifischen Gebiets zu beurteilen, sind zahlreiche Ansätze entwickelt worden. Nach Ansolabehere et al. [153] werden die verschiedenen Ansätze in der Literatur in Kategorien differenziert. Die Unterteilung erfolgt in Streuungsmaße, die die allgemeine Form und Fläche eines Bezirks bewerten, Maße, die den Umfang eines Distrikts bewerten (schlechte Bewertung von Distrikten mit verzerrten Grenzen; der maximal kompakte Distrikt ist ein Kreis) und Maße, die die Bevölkerungsverteilung einbeziehen (Einbezug der Bevölkerungskonzentration bei der Bewertung der Form eines Bezirks, z.B. in der politischen Anwendung). Young [152] stellt in dieser Hinsicht verschiedene Kompaktheitsmaße mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen vor. Kaufman et al. [154] bezeichnen das Längen-Breiten-Verhältnis des kleinsten umschließenden Rechtecks, das Konvexe-Hüllen-Verhältnis, die Maße nach Reock [155], Polsby-Popper [156] und einen modifizierten Ansatz nach Boyce-Clark [157] als gängige Kompaktheitsmaße. Das Konvexe-Hüllen-Verhältnis beschreibt das Verhältnis der Gebietsfläche zur Fläche des minimal begrenzenden konvexen Polygons des Gebiets. Bei den Maßen nach Reock und Polsby-Popper handelt es sich dagegen um kreisbasierte Maße: Während Reock das Verhältnis der Gebietsfläche zur Fläche des kleinsten Kreises, der das Gebiet umschließt, berechnet, bestimmt Polsby-Popper das Verhältnis der Gebietsfläche zur Fläche des Kreises mit dem gleichen Umfang. Das Maß nach Boyce-Clark bewertet die Kompaktheit anhand der normierten, mittleren Abweichung der vom Schwerpunkt zu den Scheitelpunkten des Gebiets führenden Linien. Zusätzlich definiert Kaufman et al. [154] ein neues Kompaktheitsmaß, die X-Symmetrie. Die Kompaktheit wird anhand des Quotienten aus der Überlappungsfläche eines Distrikts und seiner Spiegelung auf der horizontalen Achse sowie seiner ursprünglichen Distriktfläche bestimmt [154]. Auf diese Weise erhalten Formen wie Kreise und Rechtecke aufgrund ihrer Symmetrie gute Bewertungen.

Ansolahehere et al. [153] bezeichnen das Konvexe-Hüllen-Verhältnis sowie die Maße nach Reock, Polsby-Popper und das Schwartzberg Maß als „Schlüsselmethoden“ zur Messung der Kompaktheit. Das Schwarzbergmaß entspricht dem Verhältnis des Umfangs der Distriktgrenze zum Umfang eines Kreises gleicher Fläche [158]. Prinzipiell lässt sich das Konvexe-Hüllen-Verhältnis und das Maß nach Reock den Streuungsmaßen zuordnen, wohingegen das Polsby-Popper- und das Schwartzberg-Maß den Umfang des Distriktes bzw. den Verlauf der Außengrenze bewerten.

5 Entwicklung einer Methodik zur Planungsunterstützung

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird eine Methodik zur schnellen und automatisierten Entwicklung von Trassierungsmöglichkeiten sowie der Dimensionierung eines Wasserversorgungsnetzwerks unter Berücksichtigung individueller Planungsvorgaben in ungeplanten bzw. unstrukturierten Gebieten entwickelt. Die Methodik soll als eine Art Planungsunterstützungswerkzeug in einen partizipativen Upgrading-Ansatz integriert werden können. Ein partizipativer Upgrading-Ansatz bedeutet, dass die Interessen der Bewohner sowie die der anderen Entscheidungsträger in Einklang gebracht werden müssen. Während auf der einen Seite Fragen zur Lokalisation der Entnahmestellen, Leitungsführung und Versorgungssicherheit im Fokus stehen, muss die Maßnahme auf der anderen Seite finanzierbar und damit möglichst kostengünstig sein. Die Planung basiert daher auf der aktuellen Bebauungsstruktur, zur Verfügung stehenden Freiflächen, existierenden Straßen bzw. Wegen, Bestandleitungen (falls vorhanden) sowie verschiedenen Optimierungsansätzen. Die enge Kopplung an ein GIS visualisiert einerseits die räumliche Ausgangssituation, andererseits die Auswirkungen von Entscheidungen in Bezug auf die Trassierung und ermöglicht es damit verschiedene Akteure in den Planungsprozess einzubinden. Die Methodik ist in der Programmiersprache Python umgesetzt und vereint Ansätze der algorithmischen Geometrie, Graphentheorie, Logistik, Gebietsplanung, mathematischen Optimierung und Hydraulik.

Die Methodik unterstützt die Planung auf verschiedenen Betrachtungsebenen, deren Anzahl und Bezeichnung in der Literatur variieren. Abbott [16] definiert vier Ebenen: Die höchste Ebene befasst sich mit der Integration des informellen in den formellen Siedlungsbereich. Die zweite Ebene umfasst die informelle Siedlung als Ganzes. Die dritte Ebene bezeichnet er als die der kleinen Nachbarschaft, die ihre Wurzeln im Blockkonzept (vgl. Kapitel 2.2.1) hat. Auf der vierten und untersten Ebene stehen die einzelnen Familien bzw. Bewohner im Fokus. Ähnliche Untergliederungen finden sich auch bei weiteren Autoren. Kohli et al. [159] gliedern diese in „slum environment“, „slum settlement level“ und „object level“. Taubenböck und Kraff [160] definieren die räumlichen Ebenen für eine systematische Strukturanalyse in „entire district level“, „block level“ und „building level“. Hecht [161] differenziert in seiner Arbeit zur automatisierten Klassifizierung von Gebäudegrundrissen die räumlichen Ebenen „Makro-Ebene“, „Meso-Ebene“ und „Mikro-Ebene“, die Arlt et al. [162] zuvor als raumbezogene Skalenebenen der Siedlungsstruktur definieren und in Bezug zu Maßstäben setzen. In Anlehnung an diese Unterteilungen und unter Berücksichtigung von Bezeichnungen in der Gebietsplanung werden die Bezeichnungen der Betrachtungsebenen „*informal settlement level*“, „*district level*“ und „*building level*“ gewählt. Die Integration des informellen Bereiches in die umliegende formelle Siedlung ist jedoch kein Bestandteil der Methodik. Aufgrund der Abhängigkeiten wird die Zuweisung von Eigenschaften zur jeweiligen Ebene nicht so streng getrennt wie in den zuvor genannten Quellen. Aufeinander aufbauend durchläuft die Methodik diese Ebenen, wobei der Detaillierungsgrad der Planung stetig zunimmt. Jede Ebene besteht dabei aus einzelnen Modulen, die auch unabhängig voneinander genutzt werden können. Der modulare Aufbau ermöglicht gleichzeitig manuell in den Prozess einzugreifen, sodass individuelle Planungsvorgaben zu jeder Zeit integriert werden können. Abbildung 5-1 enthält eine Übersicht der Methodik:

Auf der höchsten Ebene, dem *informal settlement level*, wird das Betrachtungsgebiet abgegrenzt und darin liegende, vorhandene Infrastruktur und Bebauung sowie unüberwindbare Hindernisse und nicht zur Trassierung zur Verfügung stehende Freiflächen (im Folgenden „Barrieren“) in einem GIS-System abgebildet. Die Daten liefern die Grundlage zur Erstellung eines Maximalnetzes, das zunächst sämtliche

potenzielle Leitungstrassen enthält. Über die Definition einer Mindestbreite für Haupt- und Versorgungsleitungstrassen wird das Maximalnetz reduziert. Die verbleibenden potenziellen Hauptleitungstrassen bilden ein vermaschtes Ringnetz. Die innerhalb einer Masche liegende Siedlungsfläche wird als Basisgebiet bezeichnet. In der darauffolgenden Ebene, dem *district level*, erfolgt die Einteilung der Distrikte und Ableitung eines übergeordneten Hauptleitungsnetzes. Hierzu werden die Basisgebiete, unter Berücksichtigung der geodätischen Höhe sowie räumlicher und ggf. sozial-räumlicher Beziehungen, durch einen rekursiven Partitionierungsalgorithmus zu Distrikten zusammengefasst. Aus den Distriktgrenzen resultiert das Hauptleitungsnetz zur späteren Erschließung der Upgrading-Areas. Je nach Größe eines Distrikts, kann dieser daher einer einzelnen Upgrading-Area oder einem Zusammenschluss mehrerer Upgrading-Areas entsprechen. Auf der Ebene *building level* werden, unter Berücksichtigung der potenziellen Versorgungsleitungstrassen, optimierte Entnahmestandorte innerhalb einer Upgrading-Area identifiziert, die in der Trassenoptimierung zu einem zusammenhängenden Versorgungsnetz verbunden werden. Die Methodik schließt mit einer DN-Optimierung auf Grundlage hydraulischer Randbedingungen ab.

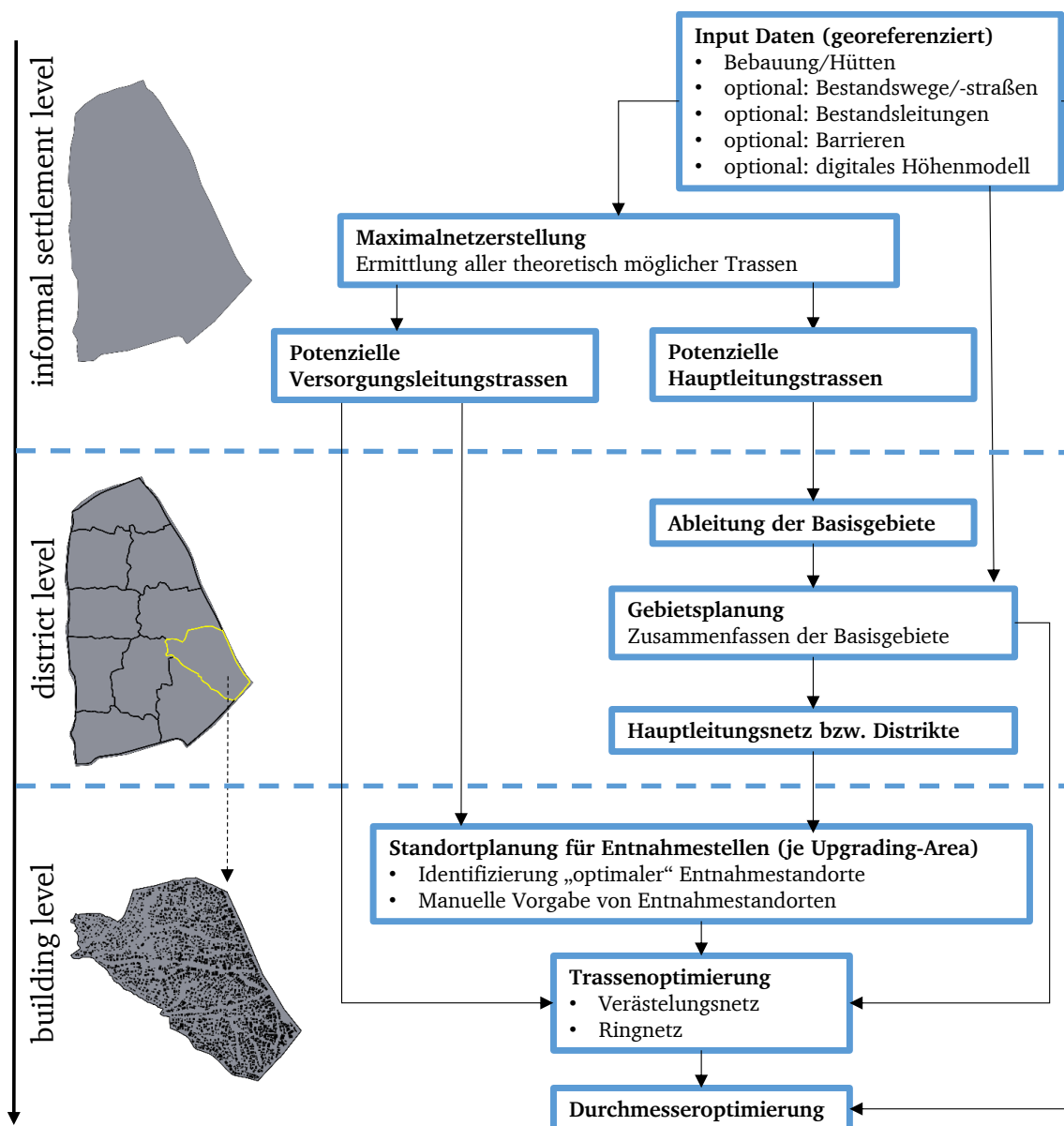


Abbildung 5-1: Aufbau der Methodik - Betrachtungsebenen und Module

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die einzelnen Schritte detailliert eingegangen. Zunächst werden in Kapitel 5.1 die genutzte Computer-Hardware sowie die verwendete Software vorgestellt. Die weitere Gliederung orientiert sich an den eingeführten Betrachtungsebenen. Kapitel 5.2 beschäftigt sich mit dem Datenimport, der Maximalnetzerstellung sowie der Ableitung potenzieller Hauptleitungs- und Versorgungsleitungstrassen. Im Kapitel 5.3 erfolgt darauf aufbauend die Gebietsplanung, in der die Basisgebiete zu Distrikten zusammengefasst werden und ein übergeordnetes Hauptleitungsnetz abgeleitet wird. Auf der Ebene des „building level“ in Kapitel 5.4 werden optimale Entnahmestandorte identifiziert, die in der Trassenoptimierung zu einem zusammenhängenden Netz verbunden werden. Abschließend werden die hydraulisch optimalen Durchmesser ermittelt.

Teile der Methodik wurden im Rahmen zweier Publikationen der internationalen Fachleserschaft zugänglich gemacht. Hieraus enthalten die Unterkapitel Auszüge in deutscher Übersetzung.

- „Combined Districting and Main Line Routing—A Method to Implement a Basic Drinking Water Supply Infrastructure in Informal Settlements“ [27]
- „Development of a New Method to Support a Participatory Planning for Piped Water Supply Infrastructure in Informal Settlements“ [26]

5.1 Hardware und Software

Die Anwendung der Methodik ist auf gängigen Rechnerkapazitäten möglich (hier genutzt Intel® Core™ i7-7920HG CPU @ 3.10 GHz, 16GB SSD-RAM) und nicht von speziellen Hochleistungsrechnern in Bezug auf Optimierungsergebnisse abhängig. Für die Betrachtung der NP-schweren Probleme bedeutet das, dass praktikable Lösungen generiert werden, die ggf. nicht einem globalen Optimum entsprechen. Zur Automatisierung der Methodik sind sämtliche Bearbeitungsschritte in der Programmiersprache *Python* [163] in der Entwicklungsumgebung *Eclipse* (IDE) umgesetzt. Python ist laut dem „Popularity of Programming Language Index“ (PYPL-Index) die derzeit beliebteste Programmiersprache weltweit [164]. Ein Vorteil von Python ist, dass es sich über verschiedene Entwicklungsumgebungen auf allen üblichen Plattformen und Betriebssystemen anwenden lässt und die Verbreitung und Nutzung barrierefrei erfolgt. Gemeinsam mit der intuitiven Syntax führte dies dazu, dass sich Python in den vergangenen Jahren für wissenschaftliche und ingenieurtechnische Berechnungen bewährt und verbreitet hat [165]. Als Geoinformationssystem wird die open-source-software *QGIS* [166], sowie die darin standardmäßig enthaltenen Verarbeitungswerkzeuge genutzt. Eine Schnittstelle zwischen Python und QGIS erlaubt die Nutzung der Bearbeitungswerkzeuge von QGIS direkt aus der Python-Umgebung heraus. Gleichzeitig dient QGIS der Visualisierung der Zwischenergebnisse und ermöglicht manuelle Eingriffe, die in die darauffolgenden Bearbeitungsschritte integriert werden. Das Wassernetz wird durch Ansätze aus der Graphentheorie mit Hilfe der Python-Bibliothek *NetworkX* [167] modelliert. Falls nicht individuell vorgegeben, erfolgt die Lokalisierung der Entnahmestellen über ein Location-Set-Covering-Problem in Zusammenspiel mit einem unweighted vertex p-Center-Problem. Die Optimierungsprobleme werden jeweils über die kostenlose Open-Source-Softwaresuite von Google [168] formuliert und durch den SCIP-Solver [169] gelöst. Während das Location-Set-Covering-Problem mit diesem Solver auch für große Betrachtungsgebiete mit über 500 Hütten in akzeptabler Zeit gelöst werden kann, zeigen eigene Untersuchungen, dass der open-source-solver das p-Center-Problem für Untersuchungsgebiete mit ca. 350 Hütten und 500 Knoten ebenfalls in akzeptabler Zeit löst. Für größere Untersuchungsgebiete ist eine Schnittstelle zum kostenpflichtigen Gurobi-solver [170] implementiert. Die Topologie- und DN-Optimierung für das Versorgungsnetz erfolgt je nach Netzart durch einen genetischen Algorithmus. Zur

Reduzierung der Laufzeit werden die Berechnungen der einzelnen Iterationen auf mehrere CPU-Kerne mit Hilfe des Python-Moduls *multiprocessing* verteilt. Der genetische Algorithmus für die DN-Optimierung nutzt außerdem den EPANET 2-Berechnungskern (Version 2.2) [89] zur Überprüfung der hydraulischen Randbedingungen. Die von EPANET 2 bereitgestellte Programmierschnittstelle ist in der Programmiersprache C geschrieben. Da die entwickelte Methodik in der Programmiersprache Python umgesetzt ist, erfolgt der Zugriff über das Tool „Water Network Tool for Resilience“ (WNTR) [171]. WNTR ist ein auf EPANET 2 basierendes Python-Paket zur Analyse und Simulation der Resilienz von Wasserversorgungsnetzen. Für diese Anwendung werden die von WNTR bereitgestellten Funktionen und Methoden zur Erweiterung und Anpassung der Netzstruktur (Hinzufügen und Entfernen von Elementen), Änderung von Parametern (z.B. Durchmesser) und Auslesen von Simulationsergebnissen genutzt. Die Ermittlung der geodätischen Höhen der Netzknoten erfolgt durch Interpolation aus einem DEM (Digital Elevation Model) über das Python-Modul *scipy.interpolate* [172].

5.2 Informal Settlement Level: Untersuchungsgebiet, Datenimport und Maximalnetzerstellung

Der erste Schritt ist die Abgrenzung des Betrachtungsgebietes und Import der verfügbaren Daten in QGIS. Die Input-Daten müssen georeferenziert in Form von dbf- bzw. shape-Dateien vorliegen. Es handelt sich hierbei um gängige GIS-Dateiformate. Mindestvoraussetzung für die Methodik sind georeferenzierte Daten zur Bebauungsstruktur in Form von Gebäudegrundrissen (als Polygone). Die Bebauung kann je nach Datenverfügbarkeit aus GIS-Systemen übernommen, aus OSM-Daten importiert, mit Hilfe von georeferenzierten Luftbildaufnahmen und Bilderkennungssoftware generiert oder händisch aus georeferenzierten Luftbildaufnahmen digitalisiert werden. Optional können auf ähnliche Weise kartierte Straßen/Wege (als Linienvektoren), Bestandsleitungen (als Linienvektoren) und unüberwindbare Hindernisse integriert werden. Unüberwindbare Hindernisse bzw. Siedlungsbereiche, die von der Betrachtung ausgeschlossen werden sollen, werden in Form von Polygonen und/oder Linienvektoren in QGIS importiert oder aus Luftbildaufnahmen digitalisiert. Sie werden im Folgenden als „Barrieren“ bezeichnet. Als Barrieren können z.B. gelten: Vegetation, Flüsse, Überschwemmungsgebiete, Steilhänge, Bahntrassen, mehrspurige Schnellstraßen, schwierige Baugrundverhältnisse. Der modulare Aufbau der Methodik sowie die enge Kopplung jedes Bearbeitungsschrittes an QGIS ermöglicht es, unerwünschte Trassen auch erst im später generierten und in QGIS visualisierten Netz manuell zu entfernen oder zu verändern. Alle Daten werden zunächst in ein zu wählendes Zielverzeichnis kopiert, sodass die Rohdaten immer unverändert bleiben. Zur späteren Verschneidung werden die Daten zunächst auf ein zu wählendes Koordinatenverzeichnis reprojiziert bzw. vereinheitlicht. Anschließend werden die geometrischen Eigenschaften der einzelnen Objekte auf Plausibilität geprüft (z.B. müssen Polygone geschlossen sein, keine Überlappung, Duplikate entfernen, Digitalisierungsfehler korrigieren). Optional können bei entsprechender Datenverfügbarkeit jedem Bebauungspolygon die entsprechende Personenanzahl sowie der Wasserbedarf pro Hütte zugeordnet werden. Der Wasserbedarf beeinflusst die hydraulischen Verhältnisse im Netz und wirkt sich damit auf die spätere DN-Optimierung (Kapitel 5.4.3) aus.

5.2.1 Maximalnetzerstellung

Die Grundlage der gesamten Methodik bildet das Maximalnetz, das zunächst sämtliche potenzielle Trassierungsoptionen enthält. Die Ableitung des Maximalnetzes steht in direktem Zusammenhang mit Forschungsfrage 1:

Wie können automatisiert Haupt- und Versorgungsleitungstrassen in den sehr heterogenen, unstrukturierten und dicht bebauten Gebieten identifiziert werden?

Im Bereich der Netzoptimierung ist die Nutzung eines Maximalnetzes zur Ableitung eines Versorgungsnetzes gängige Praxis [79]. Untersuchungen von [107] zeigen, dass sowohl Versorgungs- als auch Entsorgungsleitungen häufig parallel zu der Verkehrsinfrastruktur bzw. im Straßenkörper und unter Gehwegen verlaufen. Wie in [106], [173] und [102] wird das Konzept der parallelen Infrastrukturen angewandt und bereits kartierte Straßen und Wege als potenzielle Leitungstrassen berücksichtigt. Die Daten werden als Linienelemente modelliert und entsprechend des Ansatzes von van Horen [40] (vgl. Kapitel 2.2.1) als fest bzw. unveränderlich definiert.

Im Gegensatz zum formellen Siedlungsbereich sind in informellen Gebieten jedoch nicht alle Straßen und Wege kartiert. Zudem bewegen sich die Menschen dort auch über nicht befestigte Fußpfade, Hinterhöfe oder Gärten (im Folgenden als „Freiflächen“ zusammengefasst) fort. Das Konzept der parallelen Infrastrukturen wird daher erweitert und sämtliche unbebauten Flächen als möglicher Trassenraum in die Betrachtung einbezogen. Flächen und unüberwindbare Hindernisse, die nicht für potenzielle Leitungstrassen zur Verfügung stehen bzw. nicht zur Verfügung stehen sollen, können in Form eines Polygons von der Maximalnetzerstellung ausgeschlossen werden. Sie werden als *Barrieren* bezeichnet. Ist eine Barriere als Linienelement (z.B. Bahntrasse) modelliert, darf sie von keiner potenziellen Trasse geschnitten werden. Da die Methodik keine Umsiedlungsmaßnahmen vorsieht, verlaufen potenzielle Leitungstrassen zwischen der Bebauung, sodass sämtliche Mittelachsen zwischen den Objekten bzw. ein Netz-Skelett-Modell generiert werden muss. Gold et al. [174] zeigen, dass hierzu *Voronoi-Polygone* genutzt werden können und hebt deren Bedeutung bei der Digitalisierung von Linien-Objekten wie z.B. Straßen und Flüssen hervor. Voronoi-Polygone (auch Voronoi-Regionen oder Thiessen Polygonen) stammen aus der algorithmischen Geometrie und werden zur Modellierung des Raumes und speziell zur Lösung geometrischer Distanzprobleme genutzt [175], [176]. Die Punkte $p \in P$, in einer Ebene werden über Nachbarschaftsbeziehungen und unter Berücksichtigung ihrer euklidischen Distanzen zueinander Regionen zugewiesen. Ein Voronoi-Polygon beschreibt eine Fläche in der Ebene, in der jeder Punkt näher zum korrespondierenden Zentrum p_i liegt als zu jedem anderen Zentrum einer Punktmenge P . Für zwei Punkte p_i und p_j mit $i \neq j$ der Punktmenge $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ in der Ebene und der euklidischen Distanz $d(p,x)$ wird die Halbebene definiert zu [177]:

$$B_{ij} = \{x \in R^2 \mid d(p_i - x) < d(p_j - x)\} \quad (19)$$

Die Voronoi- Region V_i des Punktes p_i wird definiert als:

$$V_i = \bigcap_{j \neq i} B_{ij} \quad (20)$$

Benachbarte Voronoi-Regionen werden durch Voronoi-Kanten (*voronoi-edge*) voneinander getrennt, deren Endpunkte als Voronoi-Knoten (*voronoi vertices*) bezeichnet werden. Der Verlauf der *voronoi-edge*, entspricht der Mittelachse zwischen den betrachteten Punkten p_i und p_j der Punktmenge P .

Die heterogene Anordnung und Form der Hütten in informellen Siedlungen führt dazu, dass für benachbarte Gebäude mehrere Abstandsbeziehungen hergestellt werden müssen, anhand derer dann die Mittelachse bestimmt wird. Würden die Mittelachsen allein von den Mittelpunkten der Hütten ausgehend gebildet, blieben Ausrichtung und Größe der Hütte unberücksichtigt. Hiyoshi [177] untersuchte den Einsatz von Voronoi-Kanten bzw. den dazu dualen Delaunay-Kanten im Zusammenhang mit dem „curve reconstruction problem“, das eng mit dem Skelett-Modell bzw. Mittelachsen-Modell verwandt ist. Dabei wird herausgestellt, dass mit Hilfe von Voronoi-Kanten die Mittelachse zwischen Objekten in Abhängigkeit der Dichte der Punktmenge angenähert werden kann. Zur Generierung der Mittelachsen zwischen der Bebauung werden daher in definierten Abständen Stützpunkte entlang der Gebäude- und Barrierengeometrie erstellt. Die Stützpunkte entsprechen der Punktmenge zur Erstellung der Voronoi-Polygone. Je nach gewünschter Annäherung der Mittelachsen sollten die Abstände der Stützpunkte klein ($\leq 1\text{m}$) gewählt werden. Die generierten Mittelachsen bzw. Elemente des Skelett-Modells entsprechen zunächst sämtlichen theoretisch möglichen Leitungstrassen. Der Prozess der Maximalnetzerstellung ist in Abbildung 5-2 anhand eines Ausschnittes dargestellt. Ausgehend von der Bebauung (grau) werden Stützpunkte im 1m-Abstand (weiß) und daraus Voronoi-Polygone gebildet (Abbildung 5-2 a) cremefarben). Anschließend werden sämtliche Voronoi-Kanten, die ein Bebauungs-Polygon schneiden, entfernt. Die verbleibenden Kanten werden mit den Linienelementen bereits kartierter Straßen/Wegen (in Abbildung 5-2 b) weiß dargestellt) durch QGIS-Werkzeuge verschnitten und bilden gemeinsam mögliche Trassen bzw. das Maximalnetz (Abbildung 5-2 b), rote Linienelemente). Mit Verweis auf die o.g. Forschungsfrage führt das Vorgehen dazu, dass selbst bei völlig heterogenen Bebauungsstrukturen ohne einheitliche Gebäudeausrichtung potenzielle Trassen gefunden werden.

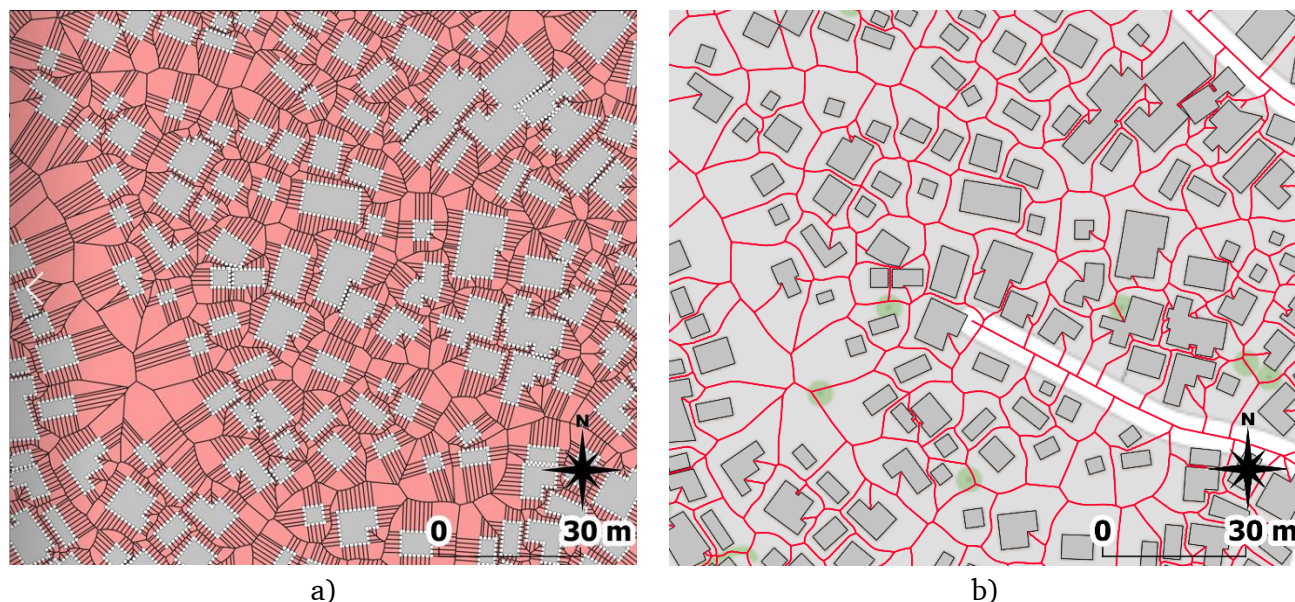


Abbildung 5-2: Gebäude, Stützpunkte und Voronoi-Polygone (a); Ableitung des Maximalnetzes in der Detailansicht (b)

Existieren im Betrachtungsgebiet bereits Bestandsleitungen, werden diese auf die gleiche Weise wie Straßen/Wege, ebenfalls als Linienelemente in das Modellnetz integriert. Das Maximalnetz setzt sich in diesem Fall aus bereits kartierten Straßen/Wegen, aus den auf Grundlage von Freiflächen abgeleiteten

Leitungstrassen sowie Bestandsleitungen zusammen. Die einzelnen Linienelemente werden an ihren Schnittpunkten aufgebrochen und an diesen Stellen Knoten eingefügt. Jedes Linienelement erhält anschließend in einer Attributtabelle (Abbildung 5-3) eine eindeutig zuordbare Identifikationsnummer (Spalte „dc_id“) sowie die eindeutige Identifikationsnummer des Start- (Spalte „node1“) und Endknotens (Spalte „node2“). Die Reihenfolge der Start- und Endknoten ist hierbei vernachlässigbar (Fließrichtungen in entgegengesetzter Richtung werden in der hydraulischen Berechnung mit negativem Vorzeichen ausgegeben). Der Abstand zwischen zwei Knoten eines Linienelements wird als Länge in die Spalte „length“ eingetragen. Die Werte der Spalten „diameter“, „roughness“ und „status“ sind Default-Werte, die in der späteren DN-Optimierung bzw. Netzberechnung mit Hilfe des englischsprachigen Tools EPANET 2 benötigt werden. Sollen Bestandsleitungen im zukünftigen Netz zwingend erhalten bleiben und/oder eine Trassierung entlang kartierter Straßen/Wege gesondert berücksichtigt werden, erhalten die entsprechenden Elemente eine Kennung, sodass zwischen verschiedenen Trassenarten unterschieden werden kann (Spalten „free_path“ = Freifläche, „street“ = Straße, „stock_pipe“ = Bestandsleitung). Zusätzlich können auf ähnliche Weise auch beliebig viele weitere kostenbeeinflussende Umgebungsbedingungen, z.B. für variierende Baugrundverhältnisse, in Form von Kostenfaktoren integriert werden. Die Unterscheidung verschiedener Trassenarten und die Einführung von Umgebungsbedingungen ermöglichen eine Differenzierung der Kosten in der späteren Optimierung (siehe Kapitel 5.4.2). Aus graphentheoretischer Sicht entsteht ein planarer, gewichteter Graph.

dc_id	length	node1	node2	diameter	roughness	status	minorloss	free_path	road	stock_pipe
11	6,4679...	509	516	999,0000...	1,000000...	open	0	NULL	1	NULL
12	66,644...	514	509	999,0000...	1,000000...	open	0	1	NULL	NULL
13	31,296...	509	514	999,0000...	1,000000...	open	0	1	NULL	NULL
14	18,499...	516	533	999,0000...	1,000000...	open	0	1	NULL	NULL
15	1,9999...	551	514	999,0000...	1,000000...	open	0	NULL	1	NULL

Abbildung 5-3: Leitungsattributtabelle

Abnehmer bzw. Entnahmestellen werden in der Wassernetzmodellierung ebenfalls über Knoten abgebildet. In formellen Siedlungsbereichen entspricht die Position der Abnehmer bzw. Häuser modelltechnisch die der Entnahmestellen. Dies ist je nach Versorgungskategorie (vgl. Tabelle 2-2) in informellen Siedlungen nicht der Fall. Existieren in einem Gebiet beispielsweise nur öffentliche Entnahmestellen, können schnell einige hundert Meter Entfernung zwischen dem Abnehmer und der Entnahmestelle liegen. Aus diesem Grund werden die Abnehmer in dieser Methodik nicht den Entnahmestellen gleichgesetzt, sondern separat verwaltet. Ihre Position wird aus den Mittelpunkten der Bebauungspolygone abgeleitet, sodass sie als Punktgeometrie vorliegen. Liegen alternativ georeferenzierte Daten zu den jeweiligen Positionen der Abnehmer oder Entnahmestellen vor, können diese ebenfalls über QGIS importiert werden.

5.2.2 Reduzierung des Maximalnetzes: Haupt- und Versorgungsleitungen

Je nach Planungsziel und der damit in Verbindung stehenden Nutzung der einzelnen Module der Methodik werden aus dem Maximalnetz verschiedene Leitungsarten abgeleitet. Besteht das Ziel in der Generierung eines übergeordneten Hauptleitungsnetzes auf dem district level, werden aus dem Maximalnetz potenzielle Hauptleitungstrassen abgeleitet. Besteht das Ziel in der Generierung eines

Versorgungsnetzes auf dem Building-Level, das die Abnehmer über Entnahmestellen versorgt, stehen potenzielle Versorgungsleitungstrassen im Fokus. Aus den verschiedenen Leitungsarten können differenzierte Anforderungen in Bezug auf die räumliche Ausdehnung der Trassierung resultieren. Daher können über die Definition von Mindestbreiten potenzielle Trassierungsoptionen für die jeweilige Leitungsart aus dem Maximalnetz abgeleitet werden. In diesem Zug müssen auch die Anforderungen zur Umsetzung der Baumaßnahme, d.h. die Arbeitsstreifenbreite (Mindestbreite des Grabens, Deponierung des Aushubs zur Wiederverfüllung, Zugänglichkeit für Baufahrzeuge, etc.) bedacht werden. Auch nach der Baumaßnahme werden Nutzungsbeschränkungen im Bereich der Leitung durch einen lastfreien Schutzstreifen mit entsprechender Mindestbreite vereinbart [20]. Die Anforderungen an eine Mindestbreite der Schutz- und Arbeitsstreifen resultieren aus den jeweiligen Regelwerken und sind somit länderspezifisch zu wählen. Hierbei sei angemerkt, dass es im Bereich informeller Siedlungen häufig zu pragmatischeren Lösungen mit deutlich geringeren Mindestbreiten als im Regelwerk definiert kommt. Soll eine Trasse auch für andere Infrastrukturen genutzt werden (z.B. Einführung eines Straßennetzes), muss die Mindestbreite entsprechend der Infrastruktur mit dem größten Platzbedarf gewählt oder entsprechende Anforderungen bei parallelen Verläufen berücksichtigt werden. Grundsätzlich bietet die Mehrfachnutzung einer Trasse eine gute Möglichkeit die Gesamtkosten einer Baumaßnahme zu reduzieren, da z.B. die Kosten für Erdarbeiten geteilt werden können. Das im ersten Schritt ermittelte Maximalnetz wird daher entsprechend der tatsächlichen Platzverhältnisse und Anforderungen an die Trassierung reduziert. Es werden diejenigen Trassen verworfen (bzw. auf einen anderen Layer für nichtgenutzte Linienelemente übertragen), die die definierte Mindestbreite zur Bebauung und/oder einer Barriere nicht erfüllen. Die Mindestbreite einer Trasse wird über einen Distanzpuffer um die Linienelemente des Maximalnetzes abgebildet. Schneidet der Puffer ein Gebäude/eine Barriere wird die entsprechende Trasse verworfen bzw. auf einen Layer für ungültige Linienelemente übertragen. Von der Reduzierung ausgenommen sind Bestandsleitungen. Auf diese Weise werden mögliche Trassen für Haupt- und Versorgungsleitungen sichtbar, wobei die Mindestbreite von der Haupt- zur Versorgungsleitung prinzipiell abnimmt. Die Visualisierung des Maximalnetzes in QGIS ermöglicht zusätzlich jederzeit manuelle Eingriffe in die Trassierungsmöglichkeiten. Die Sicherung der Linienelemente, die die Mindestbreite unterschreiten, auf einem extra Layer ermöglicht beispielsweise deren nachträgliche Nutzung, falls die planende Person entscheidet für spezielle Bereiche von der Mindestbreite abzuweichen.

Potenzielle Hauptleitungstrassen

Die Hauptleitungen bzw. deren Trasse erfüllen in der Methodik zwei Aufgaben. Einerseits transportieren sie das Wasser bis zur Übergabestelle, d.h. zum Einspeisepunkt in den jeweiligen Distrikt, gleichzeitig soll ihr Verlauf das Untersuchungsgebiet in kleinere Distrikte unterteilen bzw. das Untersuchungsgebiet durch ein übergeordnetes Hauptleitungsnetz unterteilt werden. Hintergrund ist, dass es für informelle Siedlungen typisch ist, dass Dienstleistungen wie Wasser/Löschwasser/Abwasser/sanitäre Einrichtungen/Müllsammlung/Strom entlang bestehender Straßen bzw. an den Außenseiten eines Siedlungsblocks verlaufen [25], [41]. Bei der Untergliederung des Betrachtungsgebietes werden daher nur Distriktgrenzen in Betracht gezogen, die über ausreichend Platz für die Einführung einer Infrastruktur verfügen. Die potenziellen Distriktgrenzen entsprechen somit potenziellen (Haupt-) Trassen für Infrastrukturen, hier den Hauptleitungen der zukünftigen Wasserversorgung. Das Maximalnetz wird entsprechend den Anforderungen an die Mindestbreite zukünftiger Haupttrassen reduziert. Um für spätere Upgrading-Maßnahmen eine maximale Flexibilität in Bezug auf die

Erschließung der innerhalb der Distrikte liegenden Upgrading-Areas zu gewährleisten, sollen ähnlich des Ansatzes von van Horen [40] alle Distrikte durch Haupttrassen umgeben sein. Auf diese Weise muss bei der Einteilung der Distrikte noch nicht festgelegt werden, an welchen Stellen die späteren Einspeisepunkte in ebendiese liegen. Gleichzeitig wird bereits vor der eigentlichen Aufwertung die Bereitstellung einer Grundversorgung entlang der Distriktgrenzen ermöglicht. Aus diesem Grund werden die verbleibenden Stichleitungen, selbst wenn sie entsprechend des Distanzpuffers für eine Haupttrasse in Frage kämen, entfernt. Es entsteht ein maximal vermaschtes Ringnetz aus potenziellen Hauptleitungstrassen. Die von den Hauptleitungstrassen umgebenen Flächen werden im Folgenden als *Basisgebiete* bezeichnet. Die Basisgebiete bilden die Grundlage der Gebietseinteilung (Kapitel 5.3) Die Schritte von der Ausgangssituation über die Generierung des Maximalnetzes bis zur Ableitung der potenziellen Hauptleitungen und Distriktgrenzen enthält Abbildung 5-4. Dabei bietet die enge Kopplung der Methodik an QGIS zu jeder Zeit die Möglichkeit individuell in den Prozess einzugreifen.

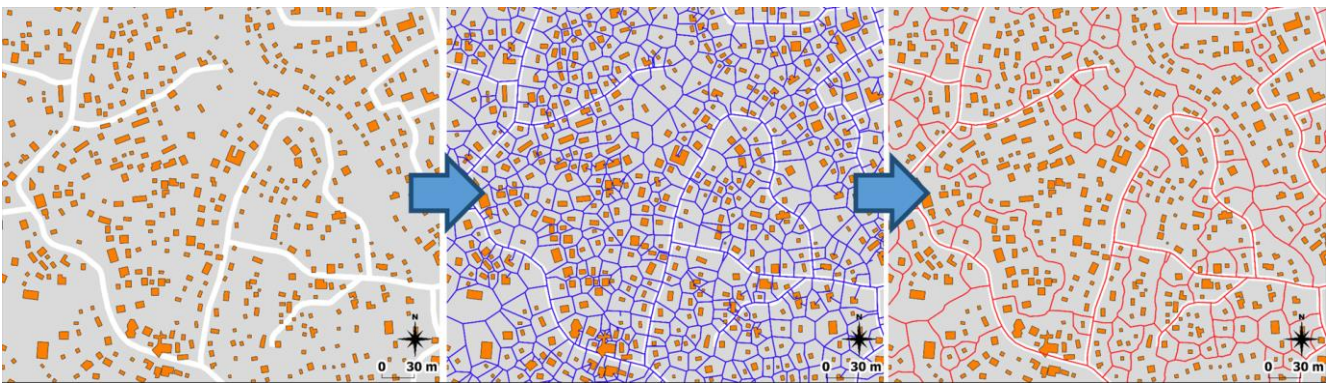


Abbildung 5-4: Generierung potenzieller Distriktgrenzen und Ableitung der Basisgebiete

Potenzielle Versorgungsleitungstrassen

Die Versorgungsleitungen transportieren das Wasser von der Einspeisestelle eines aufzuwertenden Gebiets zu den Entnahmestellen. Im Randbereich zu formellen Siedlungen erfolgt die Einspeisung an einer Übergabestelle aus dem Bestandsnetz (falls das Bestandsnetz über entsprechende Kapazitäten verfügt), ansonsten an einer Übergabestelle vom übergeordneten Hauptleitungsnetz. Alternative Einspeisemöglichkeiten sind Wassertanks, die über Trinkwasser-Tankfahrzeuge gefüllt werden oder klassisch über ein Reservoir.

Die Druckverhältnisse an der Einspeisestelle sowie die Topografie bestimmen, ob an der Übergabestelle eine Druckerhöhung oder Druckreduzierung vorzusehen ist, sodass, wie im Falle einer Einspeisung über ein Reservoir bzw. einen Wassertank, ein hydraulisch entkoppelter Bereich (Druckzone) entsteht. Aus Kostengründen (Zonenschieber, Druckerhöhungsanlagen, Druckminderungsanlagen, etc.) und im Sinne einer einfachen Betriebsweise, sollten die Leitungen der verhältnismäßig kleinen Upgrading-Areas innerhalb einer Druckzone liegen, wenn die Topografie dies zulässt. Aus diesem Grund werden die Versorgungsleitungen als zusammenhängendes Netz modelliert. Der Distanzpuffer (Abbildung 5-5 a) transparent orange), der der Mindestbreite für eine potenzielle Versorgungsleitungstrasse entspricht, wird individuell gewählt. Die Linienelemente, deren Distanzpuffer kein Gebäude oder sonstiges Hindernis berührt, entsprechen den potenziellen Versorgungsleitungstrassen.

Die Rechenzeit der Optimierungsalgorithmen für die Topologie- und DN-Optimierung (vgl. Kapitel 5.4.2 und 5.4.3) wird maßgeblich durch die Größe des Lösungsraums bestimmt. Daher werden die verbleibenden potenziellen Versorgungsleitungstrassen durch Zusammenfassen und Entfernen von

Leitungselementen und Knickpunkten reduziert, ohne deren Konnektivität zu verändern. Kurze Leitungselemente werden entfernt bzw. benachbarte Knoten in einem definierten Radius zusammengeführt. Verbindet ein Knoten nur zwei Kanten miteinander (Knotengrad = 2), wird der Knoten entfernt und beide Leitungselemente zu einem zusammengefasst. Dies kann jedoch nicht unbegrenzt geschehen, da die Knoten potenzielle Standorte für Entnahmestellen darstellen (vgl. Kapitel 5.4.1) und somit in einem gewissen Abstand zu den Abnehmern liegen sollen. Gleichzeitig wird die Geländetopologie bei zu langen Leitungselementen während der hydraulischen Berechnung vernachlässigt, sodass u.U. potenzielle Schwachstellen im Netz (Hochpunkte, Tiefpunkte) unerkant bleiben. Weitere Schritte der Netzaufbereitung sind:

- Entfernung paralleler Kanten zwischen zwei Knoten
- Leitungselemente ohne Anbindung an das Netz werden einem separaten Layer zugewiesen
- Entfernung von „self loops“ (Leitung mit identischem Anfang- und Endknoten) durch Einfügen eines Knotens in der Mitte der Leitung und Entfernung des äquivalenten Strangs

In Abbildung 5-5 b) sind die potenziellen Versorgungsleitungstrassen nach der Netzreduktion in blau sowie die Knoten in cyan dargestellt.

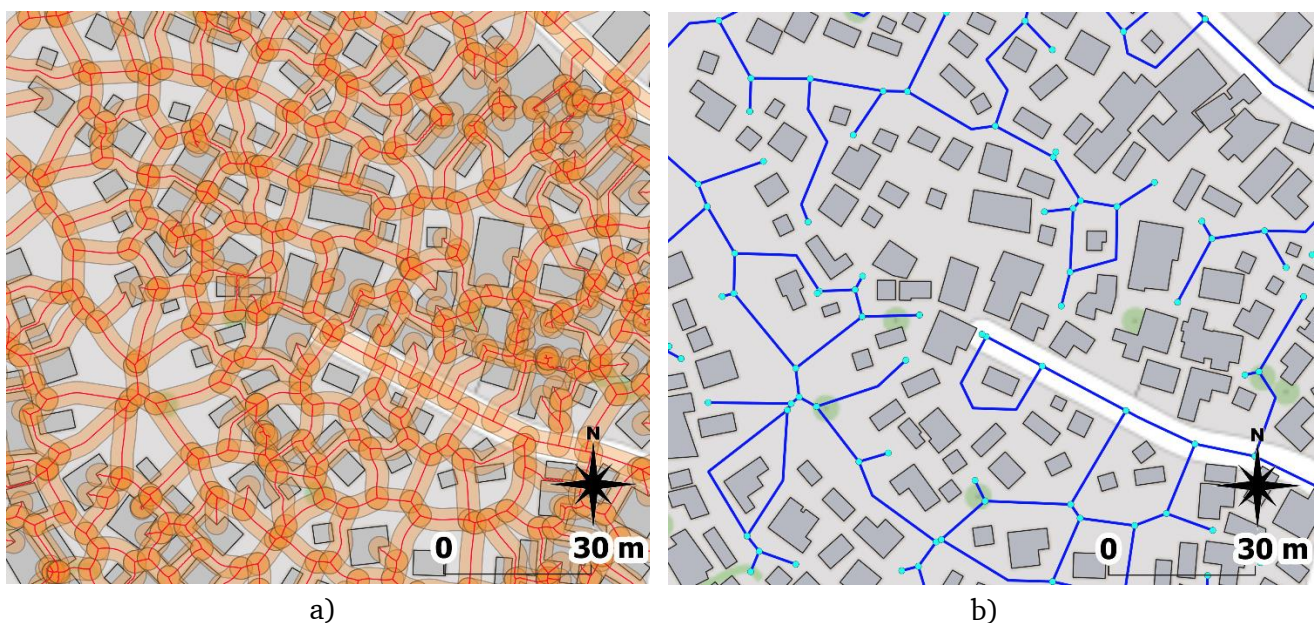


Abbildung 5-5: Potenzielle Trassen mit Distanzpuffer (a); potenzielle Versorgungsleitungstrassen nach der Netzreduktion (b)

5.3 District level: Gebietseinteilung und Identifikation von Hauptleitungstrassen

Die Einteilung eines Gesamtgebietes in Untereinheiten resultiert in einer interdisziplinären Problemstellung. Auf der einen Seite soll eine möglichst optimale Gebietsaufteilung in Bezug auf zu wählende Einteilungsparameter wie Form und Größe erfolgen, auf der anderen Seite müssen bei der Bildung von Upgrading-Areas auch soziale, kulturelle, ethnologische sowie technische Randbedingungen berücksichtigt werden. Aufgrund der gesellschaftlichen Bedeutung ist die Einteilung eines Planungsgebiets in kleinere Untereinheiten anhand formaler Kriterien wichtig [151]. Hierzu wird Forschungsfrage 2 aufgegriffen:

Wie kann eine Sektorierung großer informeller Siedlungsbereiche vorausschauend in die Planung integriert werden, sodass eine hohe Flexibilität in Bezug auf die Erschließung zukünftiger Upgrading-Areas mit einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung erhalten bleibt?

Zur Beantwortung dieser Frage besteht das Ziel der Gebietseinteilung in dieser Arbeit darin, das Gebiet unter Berücksichtigung räumlicher, sozialer und technischer Kriterien in kleinere Untereinheiten zu unterteilen, aus deren Grenzen ein übergeordnetes Hauptleitungsnetz zur späteren Erschließung der Upgrading-Areas abgeleitet werden kann. Dabei gilt es zu beachten, dass eine Trassierung gewählt wird, die ausreichend Flexibilität für zukünftige, heute noch unbekannte Einspeisepunkte bietet. Im Folgenden werden die aus der Gebietsaufteilung entstehenden Untereinheiten als *Distrikte* bezeichnet. Verfügt ein Distrikt über entsprechende Eigenschaften (z.B. Fläche, Hüttenanzahl, Einwohner, etc.), sodass er als Ganzes aufgewertet werden kann, wird er in dieser Arbeit als *Upgrading-Area* (bzw. *Upgrading-Block* vgl. Kapitel 2.2.1) bezeichnet. Sind die gebildeten Distrikte jedoch zu groß, um sie im Rahmen einer Aufwertungsmaßnahme erschließen zu können, müssen sie weiter in Upgrading-Areas unterteilt werden, d.h. ein Distrikt besteht in diesem Fall aus einer Menge von Upgrading-Areas.

5.3.1 Gebietseinteilung

Die Grundlage der Gebietseinteilung bilden die Basisgebiete. Sie werden aus den potenziellen Hauptleitungstrassen der Maximalnetzreduzierung abgeleitet (vgl. Abbildung 5-4). Ein Basisgebiet wird hier als eine von potenziellen Hauptleitungstrassen umgebene Einheit definiert, die Informationen über die planungsrelevanten Eigenschaften enthält. Die planungsrelevanten Eigenschaften werden im Sinne der Gebietsplanung als *Aktivität* der Basisgebiete bezeichnet. Die Basisgebiete enthalten in dieser Methode die Aktivitäten Einwohnerzahl, Wasserverbrauch und Anzahl der Hütten. Darüber hinaus werden die geometrischen Aktivitäten Basisgebietsfläche sowie der Basisgebietsumfang integriert. Die Gebietseinteilung erfolgt anschließend anhand einer Aktivität im Zusammenspiel mit einem zu wählenden Balancemaß, d.h. die Aktivität wird unter Berücksichtigung des Balancemaßes auf die gewünschte Distriktanzahl aufgeteilt. Ein Distrikt besteht somit aus einer Menge von Basisgebieten. Dabei gilt es zu beachten, dass die entstehenden Distrikte zusammenhängend und möglichst kompakt sind. Soll ein Distrikt über eine Druckzone mit Wasser versorgt werden, gilt es bei der Einteilung zusätzlich die geodätischen Höhen zu berücksichtigen. Im Rahmen der Methodik kann die Einteilung entweder manuell über die Schnittstelle zu QGIS oder automatisiert mit Hilfe eines rekursiven Partitionierungsalgorithmus in Anlehnung an Kalcsics et al. [149] erfolgen. Die Beschreibung der Funktionsweise des rekursiven Partitionierungsalgorithmus enthält das folgende Kapitel 5.3.2.

Zusätzlich zu den technischen/geometrischen Aktivitäten müssen bei der Aufwertung auch soziale, kulturelle, ethnologische, ökonomische, ökologische und rechtliche Faktoren innerhalb einer Upgrading-

Area berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese Faktoren werden im Rahmen der automatisierten Gebietseinteilung nicht berücksichtigt. Trotzdem kann durch die enge Kopplung an QGIS Einfluss auf die spätere Einteilung genommen werden. Liegen beispielsweise sozial-räumliche Beziehungen zwischen Personen benachbarter Basisgebiete vor, können die Basisgebiete zusammengefasst werden, indem die sie trennende Grenze (= potenzielle Hauptleitungstrasse) entfernt wird. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass z.B. benachbarte Familienmitglieder später nicht in getrennte Distrikte und damit in getrennte Upgrading-Areas eingeteilt werden. Auch nach der Gebietseinteilung bietet die enge QGIS-Kopplung die Möglichkeit den generierten Einteilungsvorschlag nachträglich individuell anzupassen, sodass eine maximale Flexibilität auf die vorherrschenden Bedingungen sichergestellt ist.

Die Basisgebiete wurden durch potenzielle Hauptleitungstrassen voneinander abgegrenzt, sodass nach der Gebietseinteilung auch die Grenzen der daraus hervorgegangenen Distrikte aus potenziellen Hauptleitungstrassen bestehen. Diese ergeben einen Vorschlag für das zukünftige Hauptleitungsnetz, von dem aus die weitere Erschließung erfolgen kann. Da jeder Distrikt auf diese Weise von Hauptleitungen umgeben ist, besteht eine große Flexibilität in Bezug auf die Lokalisierung zukünftiger Einspeisepunkte in die innerhalb eines Distriktes liegenden Upgrading-Areas. Auf diese Weise wird berücksichtigt, dass zukünftige Einspeisungspunkte aufgrund der hohen Fluktuation in informellen Siedlungen und der damit verbundenen siedlungsstrukturellen Änderungen heute noch nicht bekannt sind. Einen Überblick über das Vorgehen zur Ableitung der Distrikte und des daraus resultierenden übergeordneten Hauptleitungsnetzes enthält Abbildung 5-6.

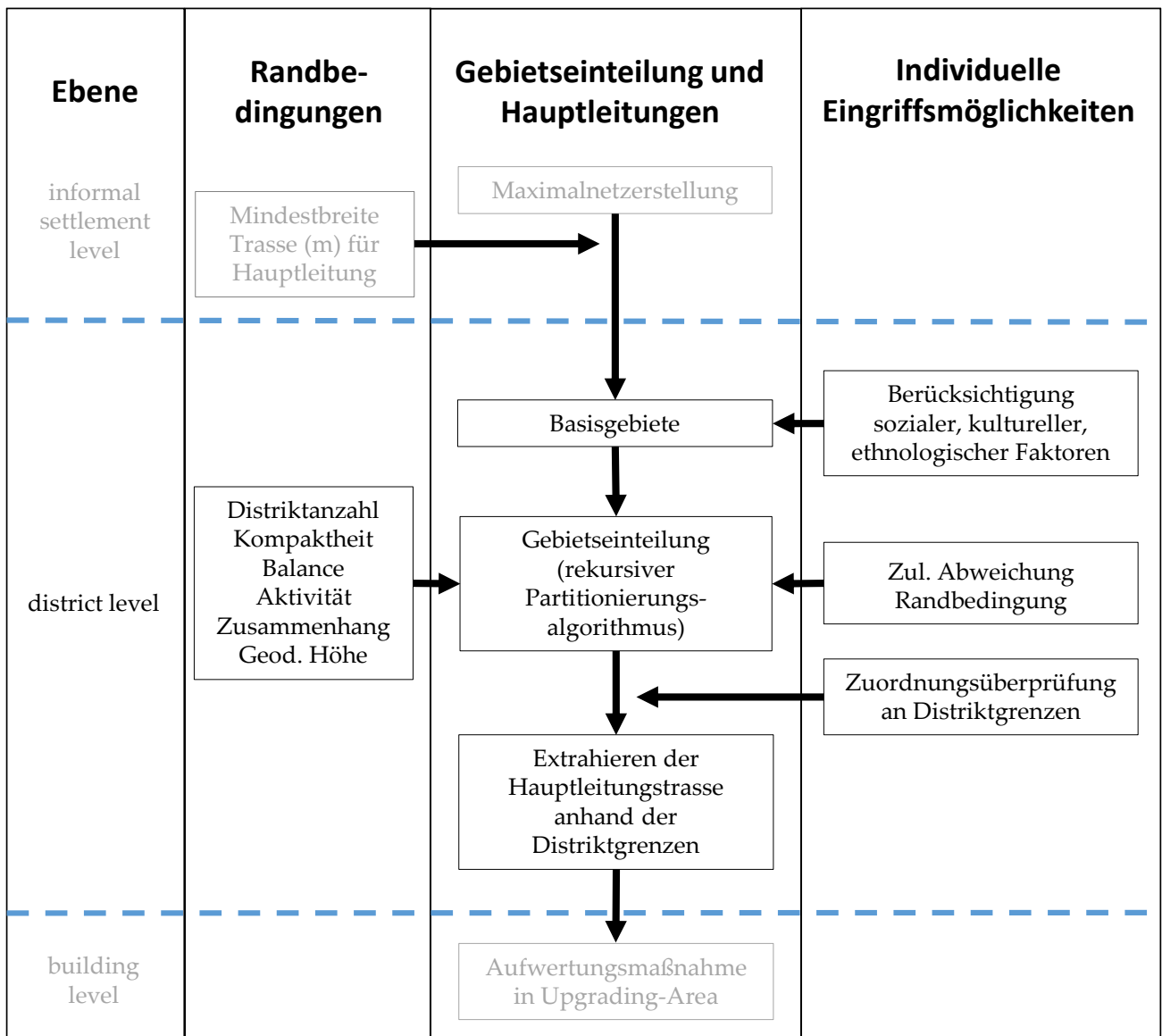


Abbildung 5-6: District level – Prozess zur Gebietseinteilung und Ableitung der Hauptleitungstrassen

5.3.2 Rekursiver Partitionierungsalgorithmus und Kompaktheitsmaße

Der folgende Abschnitt enthält die grundlegende Funktionsweise des rekursiven Partitionierungsalgorithmus sowie die Beschreibung der implementierten Kompaktheitsmaße. Detailliertere Ausführungen zum Algorithmus sind Kalcsics et al. [149] und Ulrich [151] zu entnehmen. Das Gebietsplanungsproblem besteht zu Beginn aus einer Grundmenge an Basisgebieten $B = \{1, \dots, n\}$, die jeweils ein geometrisches Objekt in der Ebene repräsentieren sowie der gewünschten Distriktanzahl $q \in \mathbb{N}^+$. Der Algorithmus unterteilt das Problem $P(B, q)$ so lange in kleinere Teilprobleme P' bis die gewünschte Distriktanzahl erreicht ist, d.h. ein Teilproblem P' nur noch aus einem Distrikt besteht $P'(B, 1)$. Dabei verfügt jedes Basisgebiet über planungsrelevante Eigenschaften (spezifische Aktivität), die es bei der Aggregation der Basisgebiete zu berücksichtigen gilt. Um eine optimale Aufteilung zu generieren, wird jedes Teilproblem mittels Trenngeraden in Partitionen unterteilt, die anschließend anhand verschiedener Kriterien bewertet und verglichen werden. Die Aufteilung eines Gebietes entlang von Trenngeraden impliziert zusammenhängende Distrikte. Die Trenngeraden liegen jeweils mit einem Winkel von $180^\circ/n$ zueinander versetzt im Planungsraum, wobei n der Anzahl an Suchrichtungen

entspricht, die vom Nutzer vorgegeben wird. Die Anzahl der Suchrichtungen wirkt sich auf diese Weise auf die kombinatorische Komplexität aus, sodass Einfluss auf die Laufzeit des Algorithmus genommen werden kann. Gleichzeitig bedeutet dies, dass eine zu geringe Anzahl an Suchrichtungen im Wechselspiel mit der räumlichen Verteilung der Basisgebiete Einfluss auf die erreichbare Kompaktheit hat und sich somit negativ auf die Qualität der Ergebnisse auswirken kann [150]. Kalcsics et al. [149], stellen gute Ergebnisse bei $n = 8$ fest, Ulrich [151] empfiehlt bei seiner Anwendung lediglich vier Suchrichtungen. Die aus den Suchrichtungen resultierenden Trenngeraden teilen das Problem jeweils in zwei Hälften. Diese werden als linke (B_l) und rechte (B_r) Seite einer Partition bezeichnet. Für eine Partition $P = (B_l, B_r)$ einer Punktmenge B gilt: $B_l, B_r \neq \emptyset, B_l \cup B_r = B, B_l \cap B_r = \emptyset$. Die Aufteilung der Basisgebiete erfolgt anhand des Balancekriteriums. Dafür wird zunächst die Summe der Aktivitäten ermittelt. Diese soll möglichst gleichmäßig auf die beiden zu bildenden Distrikte aufgeteilt werden. Parallel werden die Basisgebiete entsprechend der Suchrichtung sortiert. Aus der sortierten Liste werden so viele Basisgebiete einem Distrikt zugeordnet, bis die zulässige Aktivität des Distrikts erreicht ist. In einer anschließenden Zulässigkeitsüberprüfung kann eine Toleranz bzw. Abweichung der Balance berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere bei diskreten Problemen unbedingt erforderlich, da eine exakte Aufteilung der Aktivität oftmals nicht möglich ist. Ist eine Einteilung zulässig, wird die entstandene Partition in dieser Methodik anhand der Kompaktheit bewertet. Die Aufteilung mit der größten Kompaktheit wird ausgewählt. Das Vorgehen wiederholt sich so lange, bis die gewünschte Distrikanzahl erreicht ist bzw. jedes Teilproblem nur noch über einen festzulegenden Distrikt ($q' = 1$) verfügt. Sollte sich während der Laufzeit ein gegebenes Teilproblem über die möglichen Suchrichtungen nicht in eine zulässige Partition unterteilen lassen, wird eine *Backtracking* Funktion ausgelöst. Das bedeutet, dass jenes Problem, das das nur unzulässig lösbare Teilproblem hervorgebracht hat, reaktiviert, die bestehende Aufteilung gelöscht bzw. mit einer anderen Aufteilung entsprechend der Sortierung des Bewertungsmaßes (hier Kompaktheitsmaß) fortgefahren wird. Jene Suchrichtung, die zu dem unzulässigen Teilproblem geführt hat, wird für das konkrete reaktivierte Problem ebenfalls gelöscht, um eine Wiederholung der unzulässigen Partition auszuschließen. In dem Fall, dass ein Problem nicht mehr über gültige Suchrichtungen verfügt, gilt es ebenfalls als nur unzulässig lösbar und löst ein Backtracking für das übergeordnete Problem aus.

Der Aufbau des Algorithmus ermöglicht die Integration wasserversorgungsspezifischer Kriterien. Hierfür wurde der beschriebene Algorithmus entsprechend angepasst. Das Maximalnetz bzw. die daraus abgeleiteten potenziellen Hauptleitungstrassen bilden die Grundlage zur Definition der Basisgebiete (vgl. Kapitel 5.3.1). Je nachdem ob um eine Hütte herum ausreichend Platz für eine Haupttrasse zur Verfügung steht oder nicht, bestehen Basisgebiete aus einer oder einer Ansammlung mehrerer Hütten. Die Einteilung eines Basisgebiets in die jeweilige Partition erfolgt über eine Punktgeometrie, d.h. dessen geometrischen Schwerpunkt. Enthält ein Basisgebiet mehrere Hütten, werden deren Eigenschaften (=Aktivität) zusammengefasst (summiert) und dem geometrischen Schwerpunkt des Basisgebiets zugeordnet. Die Repräsentation von Basisgebieten in Form eines Punktes in der Ebene ist eine typische Vorgehensweise bei der Einteilung von Dienstleistungsbezirken [140], [148]. Bedacht werden muss dabei, dass der geometrische Schwerpunkt bei verästelten, konkav begrenzten Flächen außerhalb des Objekts liegen kann. Eine automatisierte Überprüfung der Basisgebiete und ihrer geometrischen Schwerpunkte weist daher entsprechende Gebiete aus, sodass der Nutzer auf diese reagieren kann. Des Weiteren können bei der Betrachtung von Schwerpunkten Schwierigkeiten in Bezug auf die Erfüllung des Kontiguitäts-Kriteriums entstehen, wenn benachbarte Basisgebiete deutliche Größenunterschiede aufweisen oder einzelne Basisgebiete eine schlauchförmige Geometrie besitzen. Aus diesem Grund sind

die Basisgebiet-Polygone mit ihren entsprechenden Schwerpunkten über eine interne ID verbunden. Soll geprüft werden ob die einer Partition zugewiesenen Punkte einen zusammenhängenden Distrikt ergeben, werden über die IDs die zugehörigen Basisgebiete ermittelt. Diese werden dann auf gemeinsame Kanten (Außengrenzen) untersucht. Die Zulässigkeit einer Aufteilung wird über die Balance geprüft. Abhängig von den verfügbaren Informationen kann theoretisch jede numerische Größe über die Balance berücksichtigt werden. In Bezug auf die Wasserversorgung zählt hierzu z.B. der Wasserbedarf, die Bevölkerungszahl oder die zu versorgende Fläche. Da es sich im vorliegenden Fall um ein diskretes Optimierungsproblem handelt, ist es unwahrscheinlich das Balancekriterium ohne Abweichung erfüllen zu können. Aus diesem Grund wird für die Balance ein Toleranzbereich definiert, innerhalb dessen eine Abweichung zwischen den einzelnen Distrikten zulässig ist. Im Hinblick auf die hydraulischen Bedingungen innerhalb der Distrikte muss bei der Gebietsplanung zudem die Geländetopographie berücksichtigt werden. Im Sinne einer möglichst einfachen Betriebsweise sollen die Leitungen eines Distrikts innerhalb einer Druckzone liegen. Daher fließt die geodätische Höhe der Basisgebiete in Form einer harten Abbruchbedingung in die Zulässigkeitsüberprüfung ein. Hierfür wird zunächst für jedes Hüttenpolygon dessen Schwerpunkt bestimmt und diesem seine geodätische Höhe durch Interpolation aus einem DEM (Digital Elevation Model) über das Python-Modul *scipy.interpolate* [172] zugewiesen. Da ein Basisgebiet auch aus einer Ansammlung von Hütten bestehen kann, werden der absolute Hoch- und Tiefpunkt der Hütten im Basisgebiet ermittelt und als Attribute dem Schwerpunkt des Basisgebiets übergeben. Der Nutzer kann anschließend wählen, welche Höhendifferenz innerhalb eines Distrikts zulässig ist. Bei Überschreitung der zulässigen Höhendifferenz wird die Partition verworfen bzw. ein Backtracking ausgelöst. Erfüllt eine Einteilung sämtliche Zulässigkeitsbedingungen, erfolgt die Bewertung einer Partition über die Kompaktheit. Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, existieren verschiedene Ansätze um die Kompaktheit eines Gebietes zu bestimmen. Die Methodik enthält die nach Kaufman et al. [154] und Ansolabehere et al. [153] gängigen Kompaktheitsmaße. Dies sind aus der Kategorie der Streuungsmaße die Ansätze nach Reock und das konvexe-Hüllen-Verhältnis, aus der Kategorie der Umfangbewertungsmaße sind die Ansätze nach Schwarzberg und Polsby-Popper integriert. Zusätzlich sind das Length-Width Ratio, sowie das X-Symmetry-Maß integriert. Da jedes dieser Maße bestimmte Gebietsformen belohnt bzw. bestraft (z.B. die konvexe Hülle ein Dreieck, Reock einen Kreis), schlagen Ansolabehere et al. [153] eine Kombination der Maße vor. In Bezug auf die Einteilung des Gesamtgebietes in einzelne Distrikte sollen die Flächen zur späteren Erschließung möglichst kompakt sein (unter der Annahme kürzerer Wege infolge kompakter Flächen), sodass hier Streuungsmaße berücksichtigt werden müssen. Gleichzeitig entsprechen die Distriktgrenzen den zukünftigen Hauptleitungstrassen, sodass auch Maße, die sich auf den Umfang eines Distrikts auswirken, integriert werden müssen. Die Methodik enthält daher die Möglichkeit, über Wichtungsfaktoren mehrere Kompaktheitsmaße miteinander zu kombinieren. Auf diese Weise wird den Schwachstellen der einzelnen Kompaktheitsmaße, wie sie in Young [152] beschrieben sind, entgegengewirkt. Die Gesamtkompaktheit berechnet sich in diesem Fall aus der Summe der gewichteten Einzelkompaktheitsmaße, d.h. es handelt sich um ein summenbasiertes Kompaktheitsmaß.

5.4 Building level: Variantenentwicklung für ein Versorgungsnetz

Auf der Ebene des *building levels* stehen die einzelnen Abnehmer bzw. ein optimierter Transport des Wassers zu den Abnehmern einer Upgrading-Area im Fokus. Für Erschließungsmaßnahmen stehen meist mehrere Ausbauvarianten zur Verfügung, die es unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten, verschiedener Interessen und Zielsetzungen abzuwägen gilt. In diesem Kapitel wird ein Vorgehen zur Generierung dieser Varianten entwickelt vor dem Hintergrund der Forschungsfrage 3:

Wie können unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten automatisiert Ausbauvarianten generiert werden, die zudem die Transparenz in der Entscheidungsfindung sowie das Kriterium einer gerechten Erreichbarkeit einer öffentlichen Entnahmestelle unterstützen?

Zur Beantwortung der Frage enthält diese Ebene Module zur Standortermittlung der Entnahmestellen, zur Topologieoptimierung von Verästelungs- und Ringnetzen sowie zur DN-Optimierung der Versorgungsleitungen. Das Ziel besteht darin, jedem Abnehmer die Möglichkeit zu bieten, eine Entnahmestelle innerhalb einer bestimmten Entfernung zu erreichen. Gleichzeitig soll die Versorgung aller Abnehmer in Bezug auf das Versorgungsnetz möglichst kostengünstig sein. Grundlage sind die aus der Maximalnetzerstellung abgeleiteten potenziellen Versorgungsleitungstrassen in der jeweiligen betrachteten Upgrading-Area. Die potenziellen Versorgungsleitungstrassen in einer Upgrading-Area ergeben das *maximale Versorgungsnetz*.

Die Identifizierung der möglichst optimalen Trasse ist je nach Größe des zugrundeliegenden Netzes, d.h. der Anzahl der Leitungen und potenziellen Entnahmestellen (Knoten), ein großes diskretes kombinatorisches Problem. Auch Rausch [17] stellt die Problematik des sehr großen kombinatorischen Problems in ihrem Ansatz heraus und schlägt zur Reduktion der Rechenzeit eine Zerlegung des Gesamtproblems in kleinere Teilprobleme vor. Sie reduziert das Problem bzw. die Netzwerkmöglichkeiten durch Clusterung, in dem anschließend nur der Mittelpunkt jedes Clusters als Abnehmer definiert und das Netzwerk mit einer Heuristik (minimale Spannbäume) gelöst wird. Eine Clusterung von Hütten zu „Versorgungsblöcken“ erfolgt jedoch auf Kosten potenzieller Trassen bzw. Entnahmestandorte, die zwischen diesen Hütten verlaufen. Für die Betrachtung einzelner Abnehmer im Zusammenhang mit der Erreichbarkeit der Entnahmestellen ist dieser Ansatz somit ungeeignet. Werden die Entnahmestellen nicht vorab individuell festgelegt, kommt zur großen Leitungsanzahl erschwerend hinzu, diese im Betrachtungsgebiet zu lokalisieren. Das bedeutet, dass für jede Hütte sämtliche Knoten in einer Entfernung von x -Metern als potenzielle Entnahmestellen in Betracht gezogen werden müssen, da Entnahmen in der Netzmodellierung über Knoten abgebildet werden. Dieses Problem kann jedoch zum Vorteil werden, indem durch Lokalisierung der Entnahmestellen vor Beginn der Trassenoptimierung der Lösungsraum reduziert wird. Rezapour [134] zeigt anhand eines Beispiels aus der Telekommunikation, dass aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Entscheidungsvariablen eine Trennung von Standortplanung und Trassenoptimierung keine mathematisch optimale Lösung hinsichtlich des Netzdesigns generiert. Ein wesentlicher Unterschied zum vorliegenden Problem ist jedoch, dass dort die Leitung bis zum Kunden gelegt wird, sodass Kosten monetär bzw. in Leitungsmetern ausgedrückt werden können. Die Methodik zur Planungsunterstützung zielt auf Aufwertungsmaßnahmen zur Erreichung der Versorgungskategorie *basic* bzw. *intermediate access* (vgl. Tabelle 2-2), die noch keinen individuellen Hausanschluss für jeden Bewohner vorsehen. Infolgedessen muss der Kunde einen Fußweg bis zur Entnahmestelle zurücklegen, sodass es sich bei der Distanz um

persönliche und damit nicht monetäre bzw. schwer zu quantifizierende Kosten eines Menschen handelt (Zeit, Wasserverbrauch abhängig von Distanz, Gesundheit, etc.). Die Praxis zeigt zudem, dass die Lokalisation der Entnahmestellen bei einem partizipativen Upgrading-Ansatz im engen Austausch mit der Bevölkerung im Vorhinein diskutiert und abgestimmt wird. Die Standortplanung der Entnahmestellen wird aus diesem Grund getrennt von der Trassenoptimierung betrachtet bzw. in der Praxis individuell von den Entscheidungsträgern festgelegt.

5.4.1 Standortplanung für Wasserentnahmestellen und Verbrauchszuweisung

Unter der Annahme gleicher Anschaffungs- und Betriebskosten der Entnahmestellen innerhalb einer Upgrading-Area, ist es aus Kostengründen sinnvoll eine minimale Entnahmestellenanzahl zu ermitteln, die die Versorgung des Gebietes unter Berücksichtigung der angestrebten Versorgungskategorie sicherstellen (vgl. Tabelle 2-2). Dabei gilt es zu beachten, dass der Wasserverbrauch pro Haushalt direkt abhängig von der Erreichbarkeit der Entnahmestelle, ausgedrückt durch die Distanz, ist [49], [1]. Aus diesem Grund muss neben der maximal zulässigen Entfernung von einem Abnehmer zu einer Entnahmestelle, deren Standort im Netz möglichst „gerecht“ in Bezug auf die Erreichbarkeit und der damit verbundenen Möglichkeit der Wassernutzung gewählt werden. Für die automatisierte Standortplanung der Wasserentnahmestellen werden folgende Annahmen und Beschränkungen definiert:

- Entnahmestandorte in der unmittelbaren Umgebung sind gewünscht bzw. werden bevorzugt je näher sie am Abnehmer liegen.
- Anschaffungs- und Betriebskosten der Entnahmestellen sind an jedem potenziellen Standort gleich
- Alle Abnehmer werden gleich behandelt (keine Bevorzugung einzelner)
- Der Ansatz besitzt keine Zeitkomponente, die sich auf die Standortwahl auswirkt (statischer Ansatz)
- die Verfügbarkeit der Serviceeinrichtung wird nach dem Bau als gegeben gesehen (deterministischer Ansatz)

Mögliche Erweiterungen der Methodik im Hinblick auf die Formulierung des Optimierungsproblems der Standortbestimmung von Entnahmemöglichkeiten enthält der Ausblick in Kapitel 8. Neben der automatisierten Standortplanung der Entnahmestellen können weitere Entnahmestellen manuell über QGIS eingepflegt werden.

Die minimal erforderliche Anzahl an Entnahmestellen wird unter Berücksichtigung einer maximal zulässigen Distanz zwischen Abnehmer und Entnahmestelle mit Hilfe eines Location-Set-Covering-Problem (vgl. Kapitel 4.3.2) ermittelt. Anschließend werden die Standorte der Entnahmestellen über die Lösung eines p-Center-Problems bestimmt. Während die Minimierung der Gesamt- (p-Absolut-Problem) oder Durchschnittsentfernung (p-Median-Problem) Kunden begünstigt, die in dicht besiedelten Bereichen leben [132], werden durch die Verwendung des p-Center-Problems Standorte ermittelt, für die die maximale Entfernung eines Kunden zur Entnahmestelle minimal ist (minimax) (vgl. Kapitel 4.3.1). Anders ausgedrückt, wird der am weitesten entfernte Abnehmer so gut wie möglich gestellt. Im Hinblick auf die Abhängigkeit des häuslichen Wasserverbrauchs von der Erreichbarkeit der Entnahmestelle unterstützt das p-Center-Problem damit den gewählten Grundsatz einer möglichst „gerechten“ Standortwahl. Beide Ansätze sind unabhängig voneinander nutzbar. Soll z.B. untersucht werden welche Auswirkung das Planungskriterium „Erreichbarkeit“ (ausgedrückt durch die Entfernung zw. Abnehmer und Entnahmestelle) auf die Entnahmestellenanzahl hat, kann das Location-Set-

Covering-Problem genutzt werden. Durch die Nutzung des p-Center-Problems wird deutlich, um wie viel die Erreichbarkeit verbessert werden kann, wenn z.B. eine weitere Entnahmestelle finanziert wird. Zur Lösung beider Probleme wird ein diskretes Modell erstellt. Der zugrundeliegende Graph $G = (J \cup I, E)$ ist bipartit und vollständig, mit der Menge der Abnehmer I sowie der Menge der Entnahmestandorte J . Die Position der Abnehmer entspricht den jeweiligen Gebäudemittelpunkten. Sie werden als Knoten (im Folgenden *Abnehmerknoten*) modelliert und im Hinblick auf das p-Center-Problem nicht gewichtet, sodass jeder Abnehmer unabhängig von dessen Verbrauch gleichbehandelt wird. Abnehmerknoten stehen nicht als potenzielle Standorte für Entnahmestellen (im Folgenden *Entnahmestandorte*) zur Verfügung. Die potenziellen Entnahmestandorte werden auf die Knoten des maximalen Versorgungsnetzes beschränkt. Hierzu muss zunächst die Netzart definiert werden. Soll ein Verästelungsnetz entstehen, werden alle Knoten des maximalen Versorgungsnetzes als potenzielle Entnahmestandorte in Betracht gezogen. Soll ein Ringnetz entstehen, werden sämtliche auf Stichleitungen liegende Knoten von der Betrachtung ausgeschlossen, d.h. sie stehen als potenzielle Entnahmestandorte nicht zur Verfügung. Zur Ermittlung der tatsächlichen Distanz bzw. Wegstrecke zwischen Abnehmer und einem potenziellen Entnahmestandort werden zunächst sämtliche Anschlusswege vom jeweiligen Gebäudemittelpunkt zu den umliegenden Knoten des maximalen Versorgungsnetzes generiert (Abbildung 5-7, rot). Es wird die Einschränkung definiert, dass die von einer Hütte ausgehenden Anschlusswege nur von den jeweiligen Bewohnern genutzt werden. Sobald sich ein Bewohner auf einem Knoten (cyan) des maximalen Versorgungsnetzes befindet, erfolgt die weitere Fortbewegung über dessen Kanten (blau). Eine weitere Einschränkung ist, dass Anschlusswege kein Leitungselement kreuzen dürfen. Die Distanz zwischen Kunde und Entnahmestandorten entspricht somit der tatsächlichen Wegstrecke. Oftmals wird die zulässige Distanz über Definition eines Radius definiert, wodurch das Location-Set-Covering-Problem aufgrund der Berechnung euklidischer Distanzen zu einem Mixed Integer Quadratically Constrained Problem (MIQCP) wird. Der Radius um einen Kunden entspricht jedoch einer Distanz über die Luftlinie und somit in einem Gebiet mit dichter Bebauung oder anderen Hindernissen oftmals nicht der Realität. Anschließend werden die Distanzen zwischen allen Abnehmern und den potenziellen Entnahmestandorten durch Lösung des Shortest-Path-Problem nach Dijkstra (Kapitel 4.1.1) aus NetworkX ermittelt.

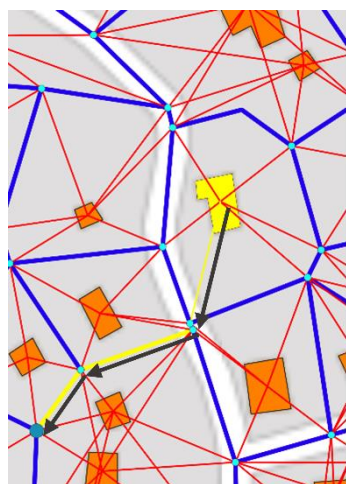


Abbildung 5-7: Generierung der Anschlusswege

Ermittlung der benötigten Entnahmestellenanzahl

Durch die zugrundeliegende Netzstruktur kann das Location-Set-Covering-Problem infolgedessen als ILP mit OR-Tools [168] formuliert und mit Hilfe des SCIP-Solvers [169] gelöst werden. Die Information, ob ein Entnahmeknoten (=Entnahmestandort) innerhalb einer definierten Distanz von einem Abnehmerknoten erreichbar ist oder nicht, wird über binäre Variablen in einer Distanzmatrix gespeichert. Mit einer vorgegebenen maximal zulässigen Entfernung DC zu einem Entnahmestandort und einer Strecke $d_{i,j} > 0$ zwischen Abnehmerknoten $i \in I$ zu einem im Knoten $j \in J$ (=potenzieller Entnahmestandort) wird das Location-Set-Covering-Problem in Anlehnung an Mattfeld et al. [128] formuliert zu:

$$a_{i,j} \begin{cases} 1 & \text{wenn } d_{i,j} \leq DC \\ 0, & \text{falls nicht} \end{cases} \quad (21)$$

$$y_j \begin{cases} 1 & \text{wenn Entnahmestandort in Knoten } j \in J \\ 0, & \text{falls nicht} \end{cases} \quad (22)$$

$$\min \sum_{j \in J} y_j \quad (23)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in J} a_{i,j} \cdot y_j \geq 1, \quad \forall i \in I \quad (24)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J \quad (25)$$

Über die Allocation-Variablen $a_{i,j}$ in (21) und unter Berücksichtigung der Distanz Strecke $d_{i,j}$ wird definiert, ob der Abnehmer i dem Knoten j zugeordnet werden kann ($a_{i,j} = 1$) oder nicht ($a_{i,j} = 0$). Die Location-Variable y_j in (22) definiert, ob Knoten j ein Entnahmestandort ist ($y_j = 1$) oder nicht ($y_j = 0$). Sie ist binär (25). Über die Zielfunktion in (23) wird die Summe der Entnahmestandorte minimiert unter der Bedingung, dass alle Abnehmer mindestens einem Entnahmestandort zugeordnet sind (24).

Ermittlung gerechter Entnahmestandorte

Dem p-Center-Problem liegt die gleiche Netzstruktur zu Grunde. Die Distanzen zwischen Abnehmerknoten und den Knoten des maximalen Versorgungsnetzes (=potenzielle Entnahmestandorte) werden ebenfalls mit dem „Kürzeste-Wege-Algorithmus“ nach Dijkstra aus NetworkX ermittelt und in eine Kostenmatrix in Form eines zweidimensionalen Arrays geschrieben. Das so entstandene *diskrete* p-Center-Problem, wird entsprechend Daskin [135] als MILP formuliert. Es wird eine binäre Allocation-Variable $x_{i,j}$ eingeführt (27). Sie definiert, ob ein Abnehmer i einem potenziellen Entnahmestandort in Knoten j zugeordnet werden kann ($x_{i,j} = 1$) oder nicht ($x_{i,j} = 0$) (26):

$$x_{i,j} \begin{cases} 1 & \text{wenn Abnehmer } i \in I \text{ potenziellen Entnahmestandort in Knoten } j \in J \text{ zugeordnet ist} \\ 0, & \text{falls nicht} \end{cases} \quad (26)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (27)$$

Die Zielfunktion ergibt sich zu:

$$\min W \quad (28)$$

Sie wird minimiert unter den folgenden Nebenbedingungen:

$$\sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \leq W, \quad \forall i \in I \quad (29)$$

$$\sum_{j \in J} y_j \leq p \quad (30)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (31)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (32)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J \quad (33)$$

Die Zielfunktion (28) minimiert die maximale Distanz W zwischen einem Abnehmerknoten und dem nächstliegenden Entnahmestandort (29). Anzahl der Entnahmestellen p wurden zuvor über das Location-Set-Covering-Problem ermittelt. Dies wird in (30) berücksichtigt, indem die Summe der Entnahmestandorte y_j kleiner gleich p ist. (31) besagt, dass jeder Abnehmer genau einem Entnahmestandort zugeordnet werden darf, während (32) eine Zuordnung eines Abnehmers ($x_{ij} = 1$) nur erlaubt, wenn der Knoten einem Entnahmestandort entspricht ($y_j = 1$). Dabei ist y_j eine binäre Location-Variable (33), die anzeigt, ob ein Knoten $j \in J$ ein Entnahmestandort ist ($y_j = 1$) oder nicht ($y_j = 0$). Nach Abschluss der Berechnung werden die ermittelten Entnahmestandorte bzw. -knoten in der Attributtabelle (der Knoten) entsprechend markiert.

Zuweisung der Verbräuche

Den ermittelten Entnahmestandorten werden, je nach verfügbarer Datenlage, die Entnahmemengen der Abnehmer automatisiert oder individuell zugeordnet. Automatisiert erfolgt die Zuordnung der Abnehmer immer dem nächstliegenden Entnahmestandort. Die Entnahmemengen an der jeweiligen Entnahmestelle spielen bei der hydraulischen Optimierung des Netzes (Kapitel 5.4.3) eine wesentliche Rolle. Es sei angemerkt, dass in der Realität nicht immer die nächstliegende Entnahmestelle genutzt wird. So können beispielsweise soziale Faktoren dazu führen, dass Personen eine in der Umgebung liegende Entnahmestelle nutzen, die jedoch nicht der zu ihrer Hütte nächstliegenden entspricht. Eine automatisierte Zuweisung ist in diesem Fall ohne zusätzliche Informationen nicht möglich bzw. ein konkretes zukünftiges Nutzerverhalten ist an dieser Stelle nicht plausibel zu berücksichtigen. Bei entsprechender Datenverfügbarkeit ermöglicht die enge Kopplung und Darstellung der Zwischenergebnisse in QGIS jedoch manuelle Korrekturen der automatisierten Zuweisung, sofern diese sinnvoll ist.

5.4.2 Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung (auch Trassenoptimierung) ermittelt ein „optimales“ Versorgungsnetz, das die in Kapitel 5.4.1 ermittelten oder individuell vorgegebenen Entnahmeknoten (=Entnahmestandorte) mit der Übergabestelle, d.h. dem Einspeiseknoten verbindet. Die Optimierung basiert auf einem least-cost-design-Ansatz, in dem die Kosten durch die Leitungslänge ausgedrückt werden. Je nach angestrebter Netzart kann zwischen einem Optimierungsansatz zur Generierung eines Verästelungsnetzes und einem Optimierungsansatz für ein Ringnetz gewählt werden. Die Modellierung ist in beiden Fällen gleich, sodass sich die Ansätze nur durch den jeweils hinterlegten Optimierungsalgorithmus unterscheiden. Das Verästelungsnetz resultiert aus einem Steiner-Tree-Problem, das Ringnetz wird durch einen genetischen Algorithmus ermittelt. Es handelt sich in beiden Fällen um heuristische Ansätze, die das Finden des globalen Optimums nicht garantieren, jedoch gute Näherungslösungen für die jeweils NP-schweren Probleme liefern. Auch wenn Hydraulik und Trassierung korrelieren, fließen hydraulische Parameter und Randbedingungen an dieser Stelle noch nicht in die Optimierung ein, da diese den Lösungsraum deutlich vergrößern würden. Die getrennte bzw. aufeinander folgende Optimierung von Trasse und Durchmesser ist für reale Fallbeispiele gängige Praxis. Die Literatur [93], [178], [179], [79], [180] zeigt, dass sich existierende Forschungsansätze zur gleichzeitigen Optimierung von Trasse und Durchmesser auf sehr kleine Netze mit wenigen Leitungselementen bzw. Maschen beschränken (sehr bekannte und oft genutzte Referenznetze sind das „Hanoi Water Distribution Network“, bestehend aus 3 Maschen mit 34 Leitungen und 31 Knoten sowie das Referenznetz „Network 2“ nach Morgan und Goulter [181], das aus 18 Maschen mit 37 Leitungen und 20 Knoten besteht). In den jeweiligen Forschungsarbeiten steht die mathematische Formulierung des Optimierungsproblems im Vordergrund, weniger die Anwendbarkeit des Ansatzes auf realitätsnahe Trinkwassernetze. Sie erweisen sich aus diesem Grund für diese Methodik als ungeeignet.

Modellierung

Zunächst werden sämtliche potenzielle Versorgungsleitungen und Knoten, die in der betrachteten Upgrading-Area liegen, aus dem in Kapitel 5.2.2 generierten maximalen Versorgungsnetz extrahiert. Die in Kapitel 5.4.1 ermittelten oder vom Nutzer individuell vorgegebenen Entnahmestellen bzw. -knoten sind in der Knotentabelle entsprechend markiert, sodass sie sich von den restlichen Knoten unterscheiden lassen. Unter Vernachlässigung fließrichtungsbeeinflussender Armaturen, wie

Rückschlagklappen, wird das Netz als ungerichteter, gewichteter Graph $G = (V, E)$ mit Hilfe des Python-Package NetworkX [167] modelliert. Die Kanten des Graphen entsprechen den potenziellen Versorgungsleitungen. Ihnen wird ein Kantengewicht in Form der Länge des jeweiligen Leitungsabschnitts zugeordnet (nicht negative Kantengewichte $w: E \rightarrow \mathbb{R}^+$). Über die Kennzeichnung der Trassenart (*free_path* = Freifläche, *street* = Straße, *stock_pipe* = Bestandsleitung) in der Attributtabelle der Leitungen (vgl. Abbildung 5-3) kann Einfluss auf die Kantengewichte genommen und damit die spätere Trassierung beeinflusst werden. Hierzu werden für j -Trassenarten entsprechend j -viele Gewichtungsfaktoren f eingeführt (hier f_{stock_pipe} , f_{street} , f_{free_path}), die multipliziert mit der jeweiligen Leitungslänge das Kantengewicht w ergeben. Für jeden Gewichtungsfaktor f_j gilt: $\{f_j \mid 0 \leq f_j \leq 1\}$. Die Kantengewichte ergeben sich aus:

$$w_i = f_{ij} \cdot l_i \quad (34)$$

Mit:

w_i	Kantengewicht des Strangs i	(m)
f_{ij}	Gewichtungsfaktor der Trassenart j des Strangs i	(-)
l_i	Länge des Strangs i	(m)

Auf diese Weise können z.B. Trassen entlang bestehender Straßen günstiger gegenüber Trassen über Freiflächen gestellt werden. Enthält ein Gebiet z.B. Bestandsleitungen, deren Weiternutzung ohne wesentliche Zusatzkosten möglich ist, wird $f_{stock_pipe} = 0$ gesetzt, sodass diese Leitungen ohne Kosten in das Netz integriert werden. Dies führt dazu, dass die Lösung u.U. „günstiger“ im Vergleich zu alternativen Lösungen ist und damit bevorzugt wird. Die Art der Kostenbetrachtung kann sehr einfach erweitert werden. Liegen beispielsweise Informationen zu unterschiedlichen Baugrundverhältnissen vor, die sich positiv oder negativ auf den Aufwand der Leitungsverlegung und damit die Kosten auswirken, kann diese Information in Form eines weiteren Gewichtungsfaktors in der Attributtabelle berücksichtigt und auf diese Weise in die Kostenermittlung integriert werden.

Verästelungsnetz

In Bezug auf die Leitungslänge bzw. das Kantengewicht resultiert ein kostenminimales Netz immer in einem Verästelungsnetz, da jede Verbindung zweier Stichleitungen zu einem Ring zusätzliche Kosten verursachen würde. Die Ermittlung des kosten- bzw. längenminimalen Verästelungsnetzes, das n -Entnahmeknoten mit m -Einspeisepunkten verbindet, wird durch das graphentheoretische *Steiner-Tree-Problem* beschrieben [182], das insbesondere beim Aufbau von Versorgungsnetzen eine wichtige Rolle spielt [128], [183] (vgl. Kapitel 4.1.2). Die in Kapitel 5.4.1 ermittelten und/oder individuell definierten Entnahmeknoten werden als terminal-nodes T an das Steiner-Tree-Problem übergeben. Das Steiner-Tree-Problem spannt ein, in Bezug auf die Kantengewichte, minimales Netz zwischen den terminal-nodes T , die einer Teilmenge aller Knoten des Graphen G entspricht $T \subseteq V$. Die Kosten des ermittelten Netzes entsprechen der Summe der Kantengewichte w_i , der im Netz verbleibenden Stränge $i \in I$ mit $I \subseteq E$:

$$Kosten_{Netz} = \sum_{i \in I} w_i \quad (35)$$

Zur Lösung des Steiner-Tree-Problem wird der *approximate-steiner-tree-solver* aus der Python-Bibliothek NetworkX [167] genutzt. Sadeghi und Fröhlich [119] untersuchten die Leistungsfähigkeit verschiedener approximativer Steiner-Tree-Problem-Algorithmen und verglichen deren Ergebnisse mit denen eines exakten Algorithmus. Sie weisen die Tauglichkeit der approximativen Algorithmen im Kontext eines menschlichen Protein-Protein Interaktionsnetzwerks, das mit Hilfe von Steinerbäumen untersucht wird, nach. Müller et al. [118] untersuchten, im Zusammenhang mit einem kosteneffizienten Glasfasernetzausbau, verschiedene neuere approximative Steiner-Tree-Problem-Algorithmen zur Lösung des Problems. Die Ergebnisse zeigen, dass für jedes der gewählten Referenznetze ein anderer Algorithmus die beste Lösung liefert. Der hier genutzte *approximate-steiner-tree-solver* aus der Python-Bibliothek NetworkX dient dabei als Referenzsolver. Er generiert in allen Fallbeispielen nahezu gleichwertige Ergebnisse in Bezug zur besten Lösung und für das Netz mit den meisten Leitungselementen selbst die beste Lösung. Die Berechnungszeit des *approximate-steiner-tree-solver* entspricht dabei einem Bruchteil der Berechnungszeit der anderen untersuchten Algorithmen. Der Algorithmus ermittelt zunächst für alle Terminale Teilbäume, sodass eine Art Start-Ziel-Kostenmatrix entsteht. Über einen *shortest-path-Algorithmus* werden anschließend die kürzesten Wege identifiziert, die dann zu einem Teilbaum vereinigt werden. Aus dem vereinigten Teilbaum wird abschließend der minimale Spannbaum ermittelt. Das Vorgehen gleicht dem heuristischen Ansatz *Sub-graph of merged steiner trees* von Sadeghi und Fröhlich [119], der in deren Untersuchung sehr gute Ergebnisse in kurzer Zeit lieferte. Entsprechend der Dokumentation liegt das Ergebnis des NetworkX-*approximate-steiner-tree-solver* innerhalb eines Faktors von $(2 - (2/t))$ des optimalen Steiner-Tree. Dabei entspricht t der Anzahl der Zielknoten, in diesem Fall der Summe aus Entnahmestellen und Einspeisepunkten [167].

Ringnetz

Die Ableitung eines kostengünstigen Ringnetzes erfolgt über einen genetischen Algorithmus. Das Ziel besteht darin, die hinsichtlich der Kantengewichte kürzeste Verbindung zwischen den Entnahmeknoten und den Einspeiseknoten zu ermitteln, während jeder Entnahmeknoten über mindestens zwei voneinander unabhängige Pfade von einem Einspeiseknoten versorgt werden kann. Die Versorgung über mindestens zwei voneinander unabhängige Pfade entspricht dem *n-1-Prinzip* und damit der ingenieurtechnischen Beschreibung von Ausfallsicherheit bzw. Versorgungssicherheit nach DVGW [74]. Der Aufbau des Algorithmus ist vor dem Hintergrund zufriedenstellender Lösungen pragmatisch. Weiterführende Ansätze und Erweiterungen der einzelnen Operatoren enthält z.B. Weicker [100].

Die Laufzeit des genetischen Algorithmus steigt mit zunehmender Netzgröße. Aus diesem Grund wird vor Beginn der Optimierung das Ausgangsnetz, das sämtliche potenzielle Versorgungsleitungstrassen im Untersuchungsgebiet beinhaltet, reduziert. Bereits bei der Lokalisierung der Entnahmestandorte in Kapitel 5.4.1 wurde vorgegeben, ob ein Verästelungs- oder Ringnetz angestrebt wird. Im Falle eines Ringnetzes wurden sämtliche Knoten auf Stickleitungen als potenzielle Entnahmestandorte von der Betrachtung ausgeschlossen, sodass auch die Entnahmeknoten nicht auf Stickleitungen liegen können. Zur Reduzierung des Lösungsraums werden daher sämtliche Stickleitungen von der Betrachtung ausgeschlossen. An den Abzweigen der ehemaligen Stickleitungen sind die Leitungen des verbleibenden Netzes durch Knoten mit einem Knotengrad = 2 unterbrochen. Wie bereits bei der Reduzierung des Maximalnetzes (Kapitel 5.2.2) werden entsprechende Knoten entfernt und benachbarte Leitungselemente zu einem zusammengefasst. Die Reduzierung des Netzes ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Darin sind die Leitungen blau, Entnahmeknoten grün sowie sonstige Knoten cyan dargestellt.

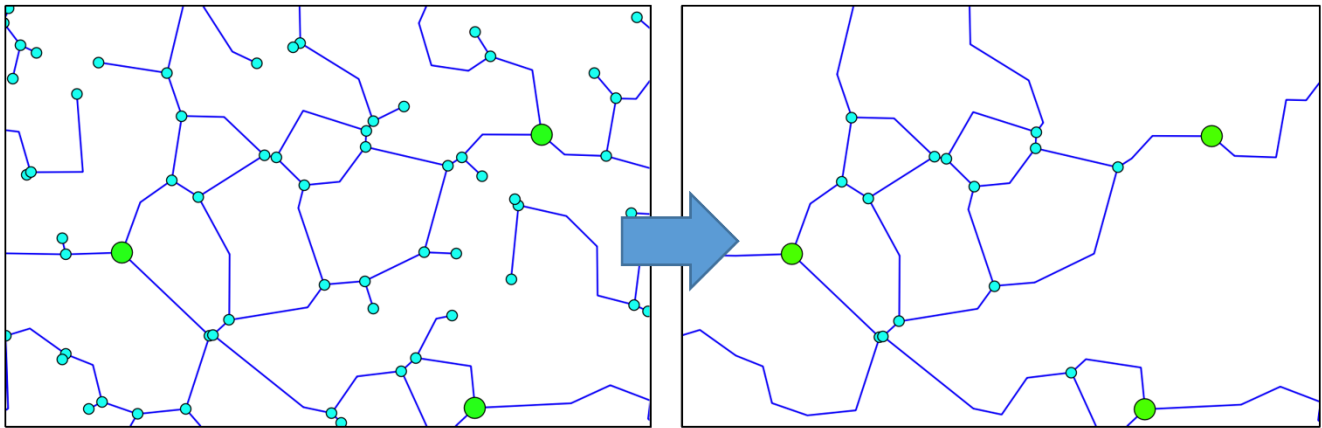


Abbildung 5-8: Reduzierung des Versorgungsnetzes vor Beginn der Ringnetzoptimierung

Eine weitere, sehr wesentliche Reduzierung der Laufzeit des Algorithmus, erfolgt durch die Verteilung der Berechnung auf mehrerer CPU-Kerne über das Python-Modul *Multiprocessing*. Der genetische Algorithmus ist so programmiert, dass die normalerweise hintereinander ablaufende Evaluierung der einzelnen Individuen nun auf die zur Verfügung stehenden n-CPU-Kerne verteilt wird, sodass die Berechnungen parallel erfolgen. Am Ende einer Generation werden die Ergebnisse gesammelt, entsprechend der Fitness sortiert und, falls das Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, die nächste Generation erstellt und bewertet. Abbildung 5-9 zeigt das Prinzip des Multiprocessing am hier genutzten Beispiel des genetischen Algorithmus. Auf der linken Seite der Abbildung ist der „klassische“ Aufbau, auf der rechten Seite der hier genutzte Aufbau des genetischen Algorithmus dargestellt.

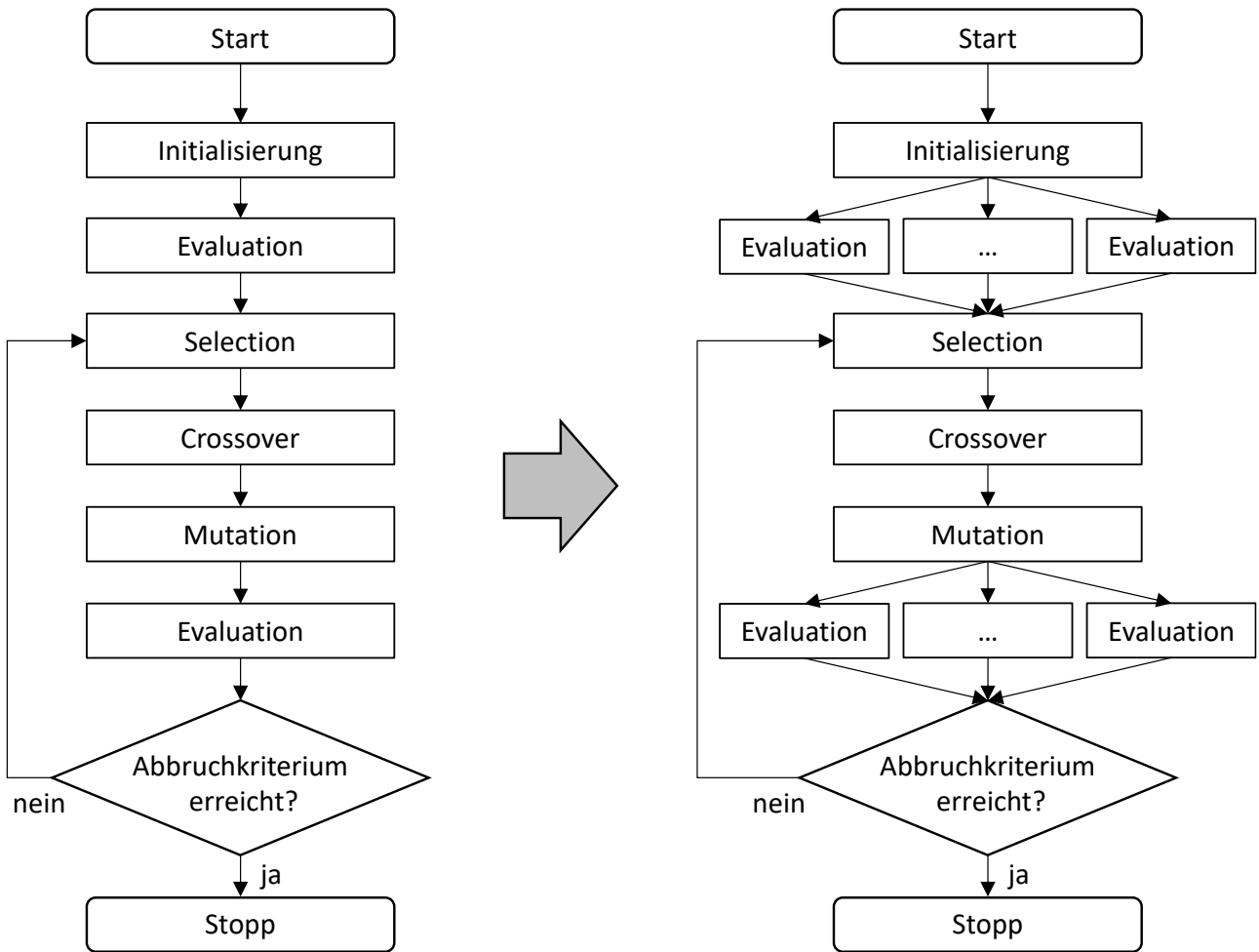


Abbildung 5-9: Aufbau des genetischen Algorithmus (links) und Einführung von Multiprocessing (rechts)

Die Bewertungsfunktion zur Berechnung der Fitness eines Individuums (Lösungskandidaten) entspricht zunächst der Summe seiner Kantengewichte. Ein geringerer Fitnesswert bedeutet in diesem Fall eine höhere Güte der Lösung, da ein kostenminimales Netz in Bezug auf dessen Kantengewichte gesucht wird. Die Integration der Randbedingungen erfolgt über einen Strafterm $Straf: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, der in die Bewertungsfunktion integriert wird. Bei Verletzung der Randbedingungen wird der aus dem Strafterm ermittelte Wert zur Summe der Kantengewichte addiert, sodass unerwünschte Lösungen mit höheren Kosten, d.h. einer schlechteren Fitness belegt werden. Dies reduziert die Wahrscheinlichkeit der weiteren Fortpflanzung. Grundsätzlich werden ungültige Lösungen jedoch zugelassen um den Lösungsraum nicht von vornherein zu stark zu reduzieren. Die Verwendung von Straftermen oder Straffunktionen wird daher auch als „tolerante Methode“ hinsichtlich der Integration von Randbedingungen bezeichnet [100]. Mit steigender Anzahl der Iterationen werden ungültige Lösungen nach und nach aus der Population durch gültige Lösungen mit höherer Güte verdrängt. Zur Definition und Quantifizierung der Strafterme existieren allerdings keine allgemeingültigen Kriterien, sodass sie immer problemspezifisch gewählt werden müssen [100]. Durch den Strafterm $Straf: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ und Integration graduierbarer Randbedingungen kann sich die Höhe des Strafterms an der Anzahl der Randbedingungen sowie der Schwere ihrer Verletzung orientieren [100].

Zur Generierung eines Ringnetzes mit minimalem Kantengewicht, das die Einspeiseknoten mit den Entnahmeknoten unter Berücksichtigung des n-1-Prinzips verbindet, werden zunächst folgende Strafkriterien P definiert:

- $P_{EinspeiseKNO}$: Anzahl der nicht in der Lösung enthaltenen Einspeiseknoten
- $P_{EntnahmeKNO}$: Anzahl der nicht in der Lösung enthaltenen Entnahmeknoten
- P_{TN} : Anzahl der Teilnetze, falls Teilnetze > 1
- P_{Ring} : Anzahl der Entnahmeknoten, die die Bedingung n-1 nicht erfüllen
- $P_{Erreichbarkeit}$: Anzahl der Entnahmeknoten, die nicht von einem Einspeiseknoten erreichbar sind

Die Strafkriterien berücksichtigen, wie viele und wie stark die Randbedingungen verletzt werden. Hierzu wird jeder Lösungskandidat als Graph in NetworkX modelliert, sodass graphentheoretische Ansätze die Prüfung der Randbedingungen unterstützen. Um ungültige Lösungen vergleichsweise deutlich schlechter zu bewerten, werden die Strafkriterien mit der Summe der Kantengewichte des (reduzierten) Ausgangsnetzes L_{max} multipliziert. Da die Einspeiseknoten sowie die Anzahl der Teilnetze direkte Auswirkungen auf mehrere Kriterien haben, jedoch im Vergleich zu den Strafkriterien mit Bezug auf Entnahmeknoten weniger stark gewichtet sind, werden die Kriterien $P_{EinspeiseKNO}$ und P_{TN} mit einem zusätzlichen, sehr hohen Faktor (10.000)¹ belegt. Der Strafterm ergibt sich zu:

$$Straf = (P_{EinspeiseKNO} \cdot 10.000 + P_{EntnahmeKNO} + P_{TN} \cdot 10.000 + P_{Ring} + P_{Erreichbarkeit}) \cdot L_{max} \quad (36)$$

Die Kosten eines Individuums $Kosten_{Individuum}$ berechnen sich anschließend aus der Summe der Kantengewichte, der in der Lösung enthaltenen Stränge $i \in I$ mit $I \subseteq E$ sowie der Höhe des Strafterms:

$$Kosten_{Individuum} = \left(\sum_{i \in I} w_i \right) + Straf \quad (37)$$

Der Ablauf des Algorithmus entspricht der Beschreibung in Kapitel 3.4.3 bzw. Abbildung 5-9. Die potenziellen n-Leitungstrassen des reduzierten Versorgungsnetzes entsprechen den Variablen einer Lösung. Sie sind binär codiert (1 = Leitungstrasse ist in Lösung, 0 = Leitungstrasse ist nicht in Lösung). Die Belegung der n-Gene eines Individuums erfolgt während der Initialisierung nach dem Zufallsprinzip. Da durch die Integration des Strafterms die Lösungskandidaten mit einem hohen Fitnesswert schlechten Lösungen entsprechen, erfolgt die Bewertung der Fitness anhand ihres Kehrwertes. Auf diese Weise erhalten Individuen eine hohe Güte, wenn die Kosten aus Kantengewichtssumme und Höhe des Strafterms gering ist und umgekehrt. Anschließend erfolgt eine rangbasierte Selektion der Eltern für die nächste Generation. Das bedeutet, dass nicht die Fitness selbst, sondern der Rang einer Lösung die Wahrscheinlichkeit bestimmt ausgewählt zu werden. Die neuen Individuen werden aus beiden Elternteilen durch 1-Punkt-Crossover gebildet und durch den Mutationsoperator durch Bildung der Inversen des Allels an zufällig ausgewählten Genen verändert. Die Anzahl der Individuen einer Population, die Anzahl der Iterationen und Nachkommen sowie die Mutationswahrscheinlichkeit können frei gewählt werden.

¹ Zur Einschränkung des Lösungsraums und schnelleren Konvergenz werden in der Praxis häufig ausgewählte Kriterien mit abiträr hohen Faktoren belegt, wie bspw. 10.000. Versuche mit anderen Faktoren wie bspw. 100.000 haben ergeben, dass die Strafkostenfunktion hinsichtlich hoher Faktoren robust ist. Der Wert 10.000 ist aus diesem Grund stellvertretend gewählt.

5.4.3 Durchmesseroptimierung

Die DN-Optimierung für Trinkwassernetze ist ein NP-schweres Problem [97]. Grund hierfür sind die als diskrete Menge zur Verfügung stehenden Rohrtypen bzw. deren Durchmesser und die nicht-lineare Gleichung zur Berechnung der Druckverluste [94], [184]. Genetische Algorithmen haben sich als effektive Suchmethode für nicht-lineare Optimierungsprobleme erwiesen und im Bereich der Wasserversorgung, insbesondere bei der DN-Optimierung, bewährt [19], [91], [185], [179], [97]. Laut Parra [82] eignen sie sich „(...) hervorragend zur Suche von Variablen, die diskrete Werte annehmen können (...)“.

Zunächst wird das aus der Topologieoptimierung entstandene Netz mit Hilfe des Python-Moduls WNTR [186] automatisiert als hydraulisches Modell aufgesetzt. Die Modellierung erfolgt mit Hilfe graphentheoretischer Ansätze als Knoten-Strang-Modell. Der Einspeiseknoten wird durch ein Reservoir modelliert. Der Einspeisedruck wird in die Einheit Meter Wassersäule (mWs) umgerechnet und dem Reservoir in Form der Behälterfüllstandhöhe übergeben. Je nachdem in welchem Planungsstadium das DN-Optimierungsmodul der Methodik genutzt wird, kann auch ein bereits bestehendes hydraulisches Modell geladen werden.

Zur Ermittlung einer guten Näherungslösung wird das Grundgerüst des GA aus Kapitel 5.4.2 genutzt und an das DN-Optimierungsproblem angepasst. Die Leitungselemente (=Stränge) werden an den GA übergeben, sodass die Gene eines Chromosoms den Leitungselementen entsprechen (Initialisierung). Die Gene sind im Gegensatz zur Topologieoptimierung jedoch nicht binär kodiert. Die Allele entsprechen dem jeweiligen Leitungsdurchmesser d aus der diskreten Menge D , die sämtliche zur Verfügung stehenden Durchmesser enthält ($d \in D$). Welche Durchmesser die Menge D enthält kann vom Nutzer, je nach bevorzugtem Rohrtyp und gewünschten Nennweitenschritten, individuell vorgegeben werden.

Die Randbedingungen des GA zur DN-Optimierung setzen sich nach Savic et al. [96] aus „harten“ und „weichen“ Randbedingungen zusammen. Während die harten Randbedingungen in jeder Zwischenlösung erfüllt werden müssen, können weiche Randbedingungen auf Kosten eines Straffaktors verletzt werden. Die Art der Randbedingungen differenziert Mala-Jetmarova et al. [91] weiter in drei Gruppen:

- hydraulische Randbedingungen (resultieren aus den physikalischen Gesetzen der Strömung in Rohrleitungen)
- Systembeschränkungen (z.B. minimaler und maximaler Druck, Fließgeschwindigkeit in Rohrleitungen)
- Randbedingungen der Entscheidungsvariablen (z.B. Definition der Rohrdurchmesser).

Die hydraulischen Randbedingungen werden im GA als harte Randbedingungen definiert. Es gilt für jeden Knoten das Prinzip der Massenerhaltung (bekannt als *erstes Kirchhoffsche Gesetz* aus der Elektrotechnik). Das Prinzip der Massenerhaltung wird als Knotenbedingung formuliert und besagt, dass an jedem Knoten im Rohrnetz die Summe der Zuflüsse gleich der Summe der Abflüsse ist [88]:

$$\sum Q_{in} + \sum Q_{out} = Q_K \quad (38)$$

mit:

Q_{in}	Zufluss zu einem Knoten
Q_{out}	Abfluss von einem Knoten
Q_K	externer Zufluss oder Knotenabnahme

Übertragen auf Wassernetze besagt das *zweite Kirchhoffsche Gesetz*, dass unter Beachtung der Fließrichtung die Summe der Druckverlusthöhen der Rohrleitungen einer Masche gleich Null sind (Prinzip der Energieerhaltung). Das Prinzip der Energieerhaltung wird als Maschenbedingung für jede Masche des Netzes formuliert:

$$\sum_{i \in l} h_{f_i} = 0 \quad (39)$$

mit:

h_{v_i}	Druckverlust in Leitung i
-----------	---------------------------

Die Erfüllung der beiden harten Randbedingungen erfolgt durch Kopplung des GA an den hydraulischen Solver von EPANET 2 [81]. Als Schnittstelle wird das Modul WNTR [186] genutzt. Die Belegung der Gene wird dem hydraulischen Modell übergeben. Anschließend erfolgt die hydraulische Simulation und damit Prüfung der harten Randbedingungen durch den EPANET 2-Solver. Die Druckverluste werden nach in EPANET 2 hinterlegten Berechnungsansatz entsprechend Gleichung (8) (Darcy-Weißbach) oder Gleichung (12) (Hazen-Williams) (vgl. Kapitel 3.2.2) berechnet.

Die zweite Gruppe der Randbedingungen umfasst Einschränkungen und Anforderungen an das System, in diesem Fall das Versorgungsnetz. Sie werden als weiche Randbedingungen berücksichtigt. Sie umfassen bei der DN-Optimierung mindestens die Druckverhältnisse an den (Entnahme-)Knoten, zusätzlich oftmals die Fließgeschwindigkeit in den Rohrleitungen [91], [79], [180]. Die minimal- und maximal zulässige Druckhöhe werden für jeden Knoten j definiert:

$$H_{min} \leq H_k \leq H_{max}; \quad k = 1, \dots, J \quad (40)$$

Darin beschreibt H_k die Druckhöhe an Knoten k, während H_{min} bzw. H_{max} der definierten Mindest- bzw. Maximaldruckhöhe am Knoten k entspricht. Diese Bedingung gilt für alle J-Knoten.

Auf gleiche Weise werden die Anforderungen an die Fließgeschwindigkeit berücksichtigt. Die minimal- und maximal zulässige Fließgeschwindigkeit wird für jeden Strang i definiert:

$$v_{min} \leq v_i \leq v_{max}; \quad i = 1, \dots, N \quad (41)$$

Darin beschreibt v_i die Fließgeschwindigkeit in Strang i , während v_{min} bzw. v_{max} der Vorgabe für Mindest- bzw. Maximalfließgeschwindigkeit in Strang i entsprechen. Diese Bedingung gilt für alle N -Stränge.

Die dritte Gruppe der Randbedingungen umfasst den zulässigen Bereich der Entscheidungsvariablen. Hier entsprechen die Entscheidungsvariablen den Durchmessern. Die zur Verfügung stehenden Durchmesser d_i werden auf eine diskrete Menge D beschränkt:

$$d_i \in D \quad i = 1, \dots, N$$

Zielfunktion entsprechend Gleichung (13) (Kapitel 3.4.2) ergibt sich für den least-cost-design-Ansatz zunächst zu:

$$\min f(D_1, \dots, D_n) = \sum_{i=1}^N c(D_i L_i) \quad (42)$$

Je nach Wahl der Durchmesser können jedoch die Mindest- und Maximalanforderungen an die Druckhöhe und Fließgeschwindigkeit verletzt werden. Aus diesem Grund gehen beide als weiche Randbedingungen in Form von Straftermen (engl. *penalty*) in die Fitnessbewertung eines Individuums ein [94], [180], [91]. Die Fitnessfunktion wird in dieser Methodik in Anlehnung an Afshar und Jabbari [180] entsprechend erweitert. Die Erweiterung differenziert die jeweilige „Schwere“ eines Verstoßes. Durch Normalisierung der Faktoren werden die Randbedingungen Druck- und Fließgeschwindigkeit jedoch gleich gewichtet. Die Fitnessfunktion ergibt sich nach [180]:

$$\text{Min } C_p = \sum_{i=1}^N c(D_i L_i) + \alpha_p \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{v_i}{v_{min}} - 1 \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{v_i}{v_{max}} - 1 \right)^2 + \sum_{k=1}^J \left(\frac{H_k}{H_{min}} - 1 \right)^2 + \sum_{k=1}^J \left(\frac{H_k}{H_{max}} - 1 \right)^2 \right) \quad (43)$$

Der Faktor α_p ist darin ein Straffaktor (= engl. *penaltyfactor*), der bei Verletzung einer Randbedingung einen hohen Wert annimmt bzw. gleich Null ist, wenn die Randbedingungen erfüllt sind. Die Integration der Systembeschränkungen in Form von weichen Randbedingungen führen dazu, dass eine Lösung auch bei Nichterfüllung der Bedingungen auf Kosten der Straffaktoren zulässig ist. Wie bereits im Ansatz der Topologieoptimierung werden diese Lösungskandidaten aufgrund ihrer geringeren Fitness jedoch mit der Zeit aus der Population verdrängt.

Im Falle eines Ringnetzes kann der Nutzer zusätzlich wählen, ob das Netz über eine hydraulische Redundanz verfügen soll oder nicht. Die hydraulische Redundanz beschreibt die Eigenschaft, auch bei Ausfall einer Leitung die Wasserversorgung aufrecht zu erhalten, bei gleichzeitiger Erfüllung der hydraulischen Randbedingungen und Systembeschränkungen. Hierfür werden weitere hydraulische Berechnungen des Netzes durchgeführt und der Strafterm der Fitnessfunktion im Falle einer Verletzung

der Systembeschränkungen erweitert. Es werden nacheinander sämtliche Leitungen außer Betrieb genommen und der sich jeweils einstellende hydraulische Zustand untersucht. Modelltechnisch wird hierfür der Status einer Leitung über das EPANET 2-Feld „inital-status“ auf „cosed“ gesetzt, sodass die Leitung keinen Durchfluss aufweist (vgl. Abbildung 5-3). Für die restlichen noch in Betrieb befindlichen Leitungen und Knoten werden die Systembeschränkungen (min./max. Fließgeschwindigkeit sowie min./max. Druckhöhe) überprüft und diese ggf. in die Penaltyberechnung aufgenommen. Den Ablauf enthält Abbildung 5-10 in Form eines Pseudocodes.

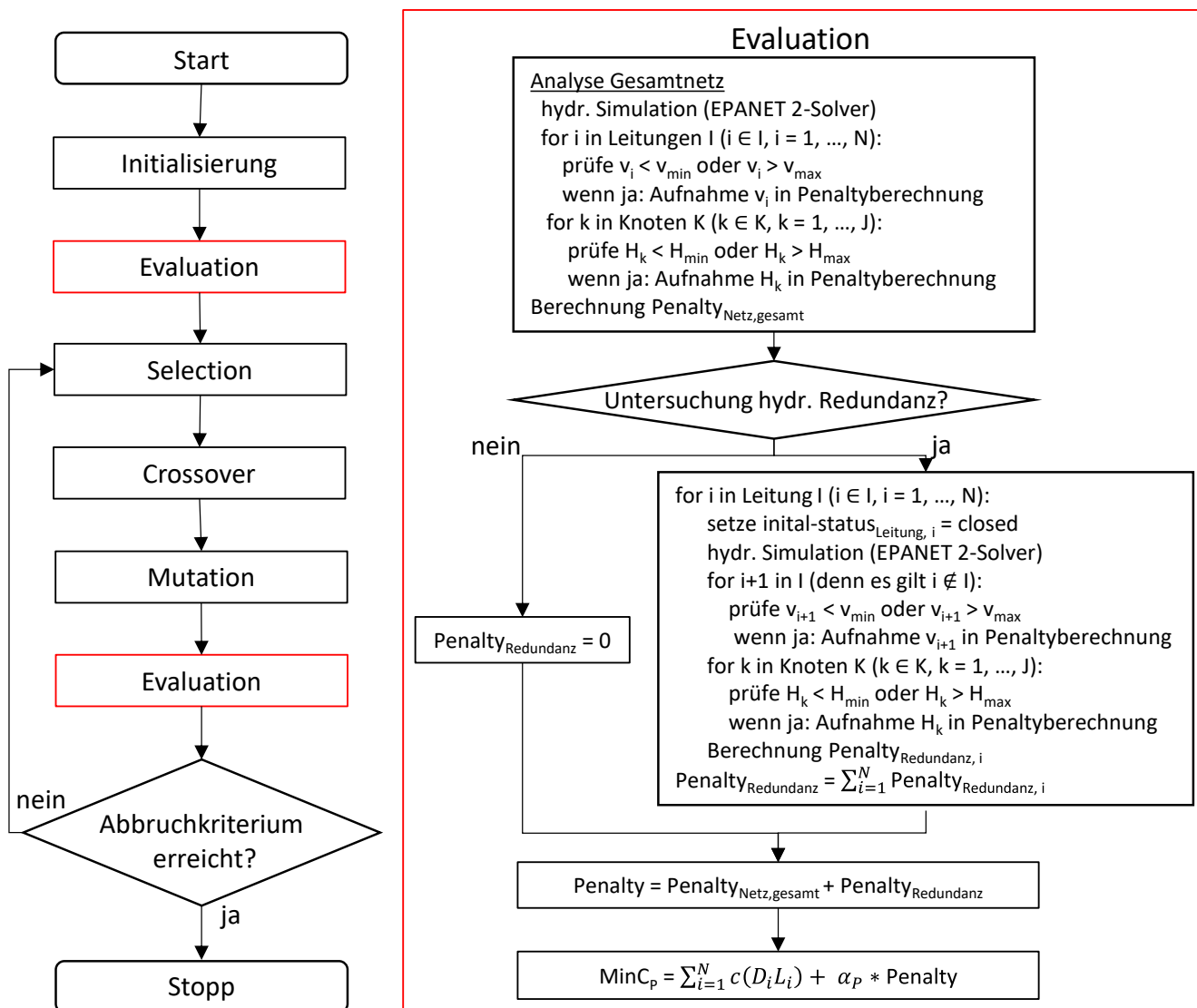


Abbildung 5-10: GA zur DN-Optimierung - Pseudocode zur Evaluation

6 Ergebnisse

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik wird im Folgenden durch zwei informelle Siedlungen in Subsahara-Afrika validiert. Anschließend wird der Ansatz auf eine ländliche Siedlung übertragen. Dem Aufbau der zugrundeliegenden Methodik folgend, werden die Betrachtungsgebiete zunächst in einzelne Distrikte unterteilt und ein übergeordnetes Hauptleitungsnetz identifiziert. Anschließend wird für eine Upgrading-Area innerhalb eines Distrikts unter Variation der Rahmenbedingungen ein Wasserversorgungsnetz mit Entnahmemöglichkeiten generiert. Kapitel 6.1 enthält die beispielhaft gewählten Aufwertungsziele sowie die Datengrundlage der jeweiligen Fallbeispiele zur Veranschaulichung der Methodik. Die Methodik wird in Kapitel 6.2 auf eine große informelle Siedlungsfläche in Windhoek (Namibia) angewandt und im Detail beschrieben. Anschließend erfolgt in Kapitel 6.3 eine weitere Anwendung auf eine informelle Siedlung in Lusaka (Sambia). Anhand der ländlichen Siedlung Gouani in Mali werden weitere Potenziale des Ansatzes für Gebiete außerhalb großer Ballungszentren in Kapitel 6.4 aufgezeigt. Sämtliche Ergebnisse werden graphisch dargestellt, analysiert und damit die praktische Anwendbarkeit der Methodik nachgewiesen. Der Fokus liegt auf der Demonstration der Methodik. Sämtliche dazu verwendeten Daten und getroffenen Annahmen gilt es unter realen Bedingungen zu spezifizieren und ggf. anzupassen.

Teile der Methodik wurden im Rahmen zweier Publikationen der internationalen Fachleserschaft zugänglich gemacht. Hieraus enthalten die Unterkapitel Auszüge in deutscher Übersetzung.

- „Combined Districting and Main Line Routing - A Method to Implement a Basic Drinking Water Supply Infrastructure in Informal Settlements“ [27]
- „Development of a New Method to Support a Participatory Planning for Piped Water Supply Infrastructure in Informal Settlements“ [26]

6.1 Aufwertungsziele und Datengrundlage

Zur Veranschaulichung der Methodik werden für die Fallbeispiele beispielhaft Aufwertungsziele definiert. Diese sind frei gewählt und können in der Praxis entsprechend angepasst werden. Grundsätzlich gilt, dass in der Praxis die Wahl des Versorgungsniveaus und der Datengrundlage den Entscheidungsträgern obliegt.

Zunächst erfolgt auf der Ebene „informal settlement level“ die Generierung des Maximalnetzes und die Ableitung potenzieller Hauptleitungs- und Versorgungsleitungstrassen:

- Trassen gelten als potenzielle Hauptleitungstrassen, wenn eine Trassenbreite von mindestens 10m gewährleistet ist, ohne die Bebauung oder eine Barriere zu schneiden
- Trassen gelten als potenzielle Versorgungsleitungstrassen, wenn eine Trassenbreite von mindestens 5m gewährleistet ist, ohne die Bebauung oder eine Barriere zu schneiden

Für die Ebene „district level“ werden folgende Aufwertungsziele definiert:

- Im ersten Fallbeispiel wird ein übergeordnetes Haupttrassenlayout gesucht, das aus einer Distrikteinteilung abgeleitet wird. Im zweiten Fallbeispiel sollen über die Distrikteinteilung direkt Upgrading-Areas gebildet werden, d.h. ein Distrikt entspricht in diesem Fall einer Upgrading-Area.
- Die Abgrenzung der Distrikte soll in beiden Fällen entlang bestehender Straßen und Wege und/oder zwischen Hütten verlaufen, die in einem Abstand von mindestens 10m zueinander liegen (Haupttrassen).
- Die einzelnen Distrikte sollen annähernd gleich groß sein, d.h. die Fläche dient als Balancemaß. Eine Abweichung von 20% wird als Zulässigkeitsbedingung akzeptiert.
- Möglichst hohe geografische Kompaktheit: Durch die Kompaktheit sind die Distrikte bzw. die daraus resultierenden Upgrading-Areas einfacher zu verwalten und wirtschaftlich zu betreiben [149], sodass eine (weitestgehende) Leitungslängenminimierung innerhalb der Distrikte angenommen wird.
- Höhenkompaktheit = 50m zur Verhinderung mehrerer Druckzonen innerhalb eines Distrikts aufgrund zu hoher Höhendifferenzen.

Auf der Ebene „building level“ wird der Wasserbedarf bzw. die maximal zulässige Entfernung der Abnehmer zu einer Entnahmestelle entsprechend der Versorgungskategorisierung nach [1] (vgl. Tabelle 2-2) gewählt. Für jedes Fallbeispiel werden zwei Varianten untersucht. In der ersten Variante besteht das Ziel der Aufwertung in der Erfüllung der Kriterien der Kategorie „basic access“. Entsprechend wird definiert:

- täglicher personenbezogener Wasserbedarf = 20l
- Entfernung zur nächstliegenden Entnahmemöglichkeit 300m (d.h. 600m für Hin- und Rückweg)

In der zweiten Variante sollen die Fallbeispiele entsprechend den Anforderungen der Kategorie „intermediate access“ aufgewertet werden:

- täglicher personenbezogener Wasserbedarf = 50l
- Entfernung zur Zapfstelle maximal 50m (d.h. 100m für Hin- und Rückweg)

In beiden Varianten wird die Anbindung des neuen Versorgungsbereiches an das bestehende Wassernetz bzw. der Ort der Einspeisung in das neue Versorgungsgebiet dabei als gegeben angenommen. Die hydraulischen Anforderungen an die Netze werden aus dem deutschen Regelwerk [88], [74], [83] übernommen. Die Auslegung des Versorgungsnetzes erfolgt exemplarisch anhand des Lastfalls Spitzenstunde am Tag des maximalen Verbrauchs Q_{hmax} [74] (vgl. Kapitel 3.1.3) unter Beachtung der Systembeschränkungen:

- Maximale Fließgeschwindigkeit $v_{max} = 2\text{m/s}$
- Minimale Fließgeschwindigkeit $v_{min} = 0,005\text{m/s}$
- Maximaler Druck $p_{max} = 80\text{mWs}$ ($\sim 8\text{bar}$)
- Minimaler Druck $p_{min} = 20\text{mWs}$ ($\sim 2\text{bar}$)

Es sei angemerkt, dass die Werte der Systembeschränkungen länderspezifisch variieren können. Da EPANET 2 Berechnungswerte in der Einheit mWs ausgibt, wird diese auch im Folgenden genutzt. Es wird überschlägig angesetzt: 1bar $\sim 10\text{mWs}$. Für die DN-Optimierung wird der gängige Rohrtyp PE100 SDR11 in den Nennweitenschritten DN32, DN63, DN90, DN110, DN160, DN225 gewählt. Es ergeben









sich daraus die Innendurchmesser 26mm, 51,4mm, 73,6mm, 90mm, 130,8mm, 184mm. Die Rauigkeit wird entsprechend DVGW Arbeitsblatt GW 303-1 [88] für neue Versorgungsleitungen mit $k_i = 0,4\text{mm}$ gewählt.

Die Datengrundlage bilden frei verfügbare Open-Street-Maps-Daten (OSM) (Zugriff Datensatz Windhoek: 29.03.22, Zugriff Datensatz Lusaka: 15.09.2022). Sie enthalten Gebäudegrundrisse in Form von georeferenzierten, zweidimensionalen Polygonen sowie bestehende Straßen und Wege als Linienvektoren. Der Datensatz enthält keine Information zur Unterscheidung der Gebäudenutzung, sodass eine Differenzierung des Wasserverbrauchsverhaltens nicht möglich ist. Werden in der Praxis solche Daten erhoben, können diese jedoch einfach über QGIS den jeweiligen Polygonen zugeordnet und im weiteren Verlauf berücksichtigt werden. Die Daten zur Bevölkerungszahl stammen aus dem Portal „WorldPop“ (www.worldpop.org/) [187], das Rasterdaten (Geotiff Format) zur Einwohnerzahl Namibias, Sambias und Malis in der Rastergröße von ca. 100x100m zur Verfügung stellt. Die Datensätze stammen aus dem Jahr 2020 und enthalten Daten in der Einheit Einwohnerzahl pro Pixel, wobei die Gesamteinwohnerzahlen der Länder so angepasst wurden, dass sie den offiziellen Bevölkerungsschätzungen der Vereinten Nationen entsprechen [187]. Es sei angemerkt, dass solche Datensätze meist auf Zensusdaten vergangener Jahre basieren, die mit Hilfe der offiziellen Bevölkerungswachstumsrate des jeweiligen Landes auf ein Betrachtungsjahr hochgerechnet werden. Im Falle informeller Siedlungen kann dieses Vorgehen dazu führen, dass die Einwohnerzahlen deutlich unterschätzt werden, da das Bevölkerungswachstum in diesen Gebieten i.d.R. vom landesweiten Mittel abweicht. Zur Demonstration der Methodik sind die Werte jedoch ausreichend. Die Rasterdaten werden mit den jeweiligen Betrachtungsgebieten verschnitten. Anschließend wird die Bevölkerungszahl einer Gebietsfläche auf die Hütten in Abhängigkeit ihrer Grundfläche aufgeteilt. Dezimalwerte werden dabei grundsätzlich aufgerundet.

Das jeweilige digitale Höhenmodell (im Folgenden *DEM* (digital elevation model)) stammt von NASA Earthdata [188]. Die Daten liegen als Rasterdaten in einer Auflösung von 30m x 30m vor. Die Grauwerte der einzelnen Raster entsprechen den jeweiligen Höhenwerten. Aus den Rastern werden zunächst die Konturlinien (Vektordaten) über QGIS abgeleitet, und die Werte zwischen zwei Konturlinien in 1m Abständen interpoliert. Anschließend werden entlang der Konturlinien Punkte im Abstand von 1m zueinander generiert und ihnen die entsprechenden Höhenwerte übergeben. Das DEM liegt für die Fallbeispiele dementsprechend als Punktwolke vor. Die Zuweisung der geodätischen Höhe zu den Knoten erfolgt über das Modul `scipy.interpolate`. Bzgl. der Auflösung sind die Daten zur Erläuterung der Methodik ausreichend, für detailliertere hydraulische Untersuchungen in der Praxis wird eine feinere Auflösung empfohlen. Grundsätzlich dienen sämtliche hier genutzte Daten allein der Veranschaulichung der Methodik und sollten in der Praxis durch eigens generierte und eventuell genauere Datensätze ausgetauscht werden.

Die in den folgenden Kapiteln zur Verbildlichung des Vorgehens genutzten Abbildungen enthalten eine einheitliche farbliche Kennzeichnung der einzelnen (Netz-)Elemente. Falls nicht explizit anders angegeben, werden die Elemente wie in Tabelle 6-1 angezeigt:

Tabelle 6-1: Legende der Netzelemente und Hütten

Versorgungsleitungen	blau	
Hauptleitungen	rot	
Knoten des Versorgungsnetzes	cyan	
Einspeiseknoten in die Upgrading-Area	rot	
Ermittelte Entnahmestellen	grün	
Bebauung / Hütten	orange	
Bestehende Straßen und Wege	grau	
Barriere	magenta	

6.2 Fallbeispiel Windhoek (Namibia)

Die Stadt Windhoek ist die Hauptstadt Namibias. Wie viele andere (Groß-) Städte in Sub-Sahara Afrika steht die Stadt vor erheblichen Herausforderungen in Bezug auf die Einführung von Infrastrukturen in die am Stadtrand kontinuierlich wachsenden informellen Siedlungen [189], [190]. Infolge des anhaltenden Zustroms von Menschen in die Stadt gehen Prognosen davon aus, dass sich ab dem Jahr 2025 mehr informelle Hütten als formale Häuser in Windhoek befinden [38]. Der durchschnittliche Wasserverbrauch in den informellen Siedlungsbereichen liegt bei ca. 25 Liter pro Einwohner und Tag [191] und deutet somit auf die Versorgungskategorie „basic access“ hin (vgl. Tabelle 2-2). Die Studie von Lewis et al. [192] zeigt, dass die Wasserversorgung in einigen Bereichen infolge des anhaltenden Zuzugs sogar rückläufig ist und der Zugang insgesamt als schlecht bezeichnet werden muss. Insgesamt existieren in Bezug auf den Wasserverbrauch große Unterschiede, die wahrscheinlich auf die unterschiedliche Entfernungen zu den Wasserentnahmestellen zurückzuführen sind [192]. Die Entnahme des Wassers erfolgt zum Großteil über öffentliche Standpipes, die über eine Prepaid-Karte freigeschaltet werden [191]. Des Weiteren existieren Gemeinschaftsstandpipes (Nutzung durch feste Gemeinschaften) sowie private Standpipes, die extra angemietet werden können.

Das diesem Kapitel zugrundeliegende Untersuchungsgebiet liegt im Nordwesten der Stadt (Abbildung 6-1 cyan). Es grenzt im Süden an den ehemals informellen und mittlerweile aufgewerteten Siedlungsbereich „Goreangab Ext 3“. Westlich liegt der informelle Siedlungsbereich Havana.



Abbildung 6-1: Lage des Untersuchungsgebiets (cyan) in Windhoek (Namibia) (Quelle Karte: [193])

6.2.1 Informal Settlement Level

Das Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 6-2 a) dargestellt. Es umfasst eine Fläche von ca. 3,77 km² (cyan) mit ca. 11.900 Hütten. Die Bebauung liegt in Form von zweidimensionalen, georeferenzierten Polygonen vor. Abweichend zu Tabelle 6-1 sind existierende Straßen bzw. Wege, zwecks deutlicherem Kontrast zum cyan dargestellten Betrachtungsgebiet, schwarz dargestellt. Zwecks Demonstration sind beispielhaft kleinere Bereiche als Barrieren in Form von Polygonen definiert. Die Verschneidung der Einwohnerzahl-Rasterdaten [187] mit der Gebietsfläche ergibt, dass im Untersuchungsgebiet ca. 31.000 Einwohner leben. Die Aufteilung der Einwohnerzahl auf die einzelnen Hütten erfolgt anteilig nach Größe der Grundfläche einer Hütte. Eine Differenzierung der Gebäudenutzung mit Auswirkung auf den Wasserverbrauch findet aufgrund fehlender Daten nicht statt. Über die enge GIS-Kopplung ist dies bei vorhandener Datenlage jedoch möglich und empfohlen. In Abbildung 6-2 b) sind die genutzten Höhendaten als 30x30m Raster dargestellt und entsprechend ihrer Höhenwerte eingefärbt. Im Untersuchungsgebiet existiert ein maximaler Höhenunterschied von 63m (min. 1.546m a.s.l., max. 1.609m a.s.l) bezogen auf die Versorgungspunkte (Hütten). Daraus folgt, dass unter der Vorgabe eines maximal zulässigen Höhenunterschieds je Druckzone von 50m (vgl. Kapitel 3.1.4) die geodätische Höhe im district level berücksichtigt wird, d.h. als Zulässigkeitsbedingung in die Gebietseinteilung einfließen muss.

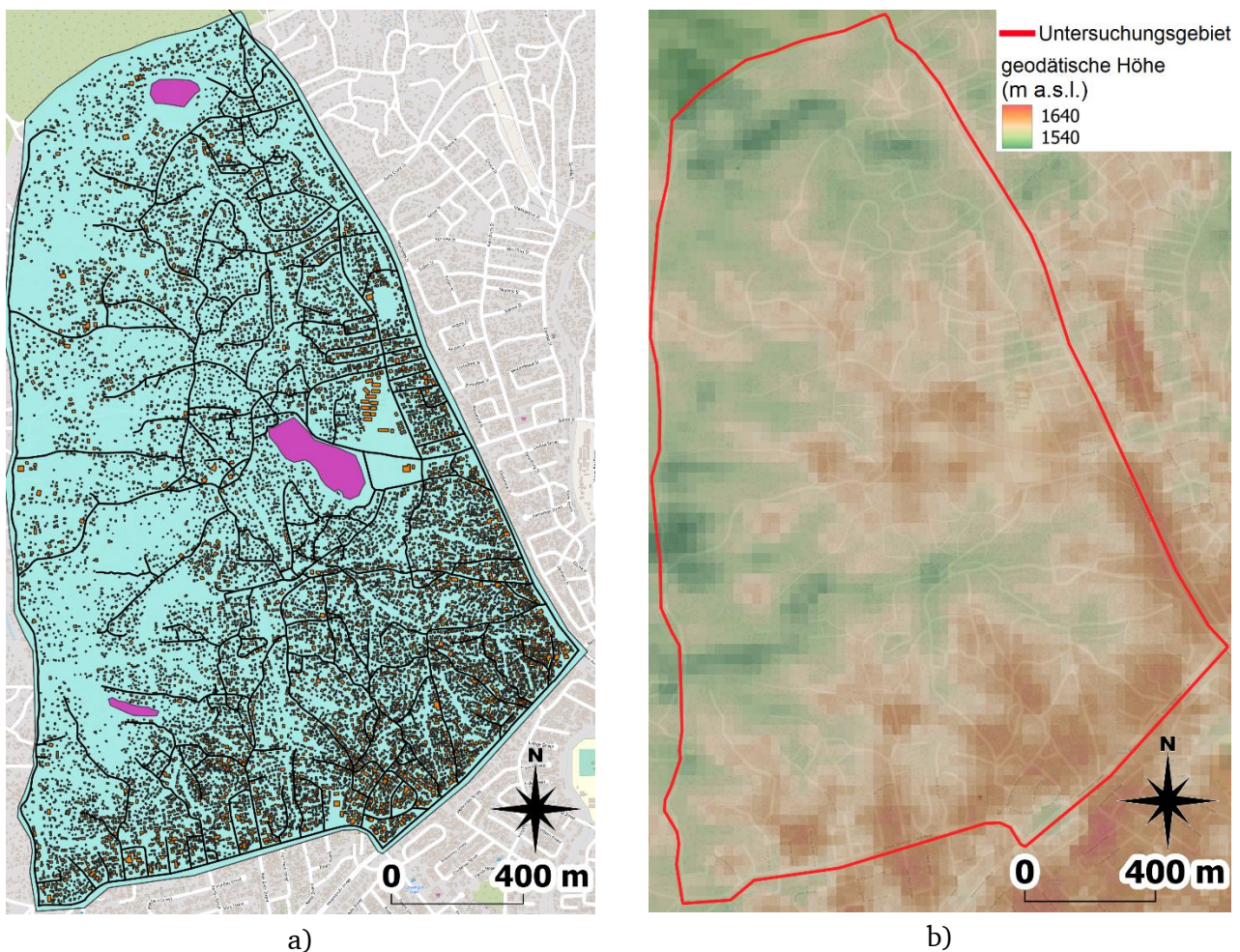


Abbildung 6-2: Betrachtungsgebiet Windhoek und Input-Daten (a); topologische Karte des Untersuchungsgebiets (b) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193], Quelle Höhendaten: [188])

Auf Basis der Bebauung, bestehender Straßen und Wege sowie den als Barrieren gekennzeichneten Flächen wird das Maximalnetz erstellt. Dieses beinhaltet zunächst sämtliche Trassierungsmöglichkeiten. Die als Barrieren gekennzeichneten Flächen werden erkannt und bei der Netzerstellung entsprechend berücksichtigt. Das Maximalnetz sowie ein Detailausschnitt einer als Barriere gekennzeichneten Fläche enthält Abbildung 6-3.

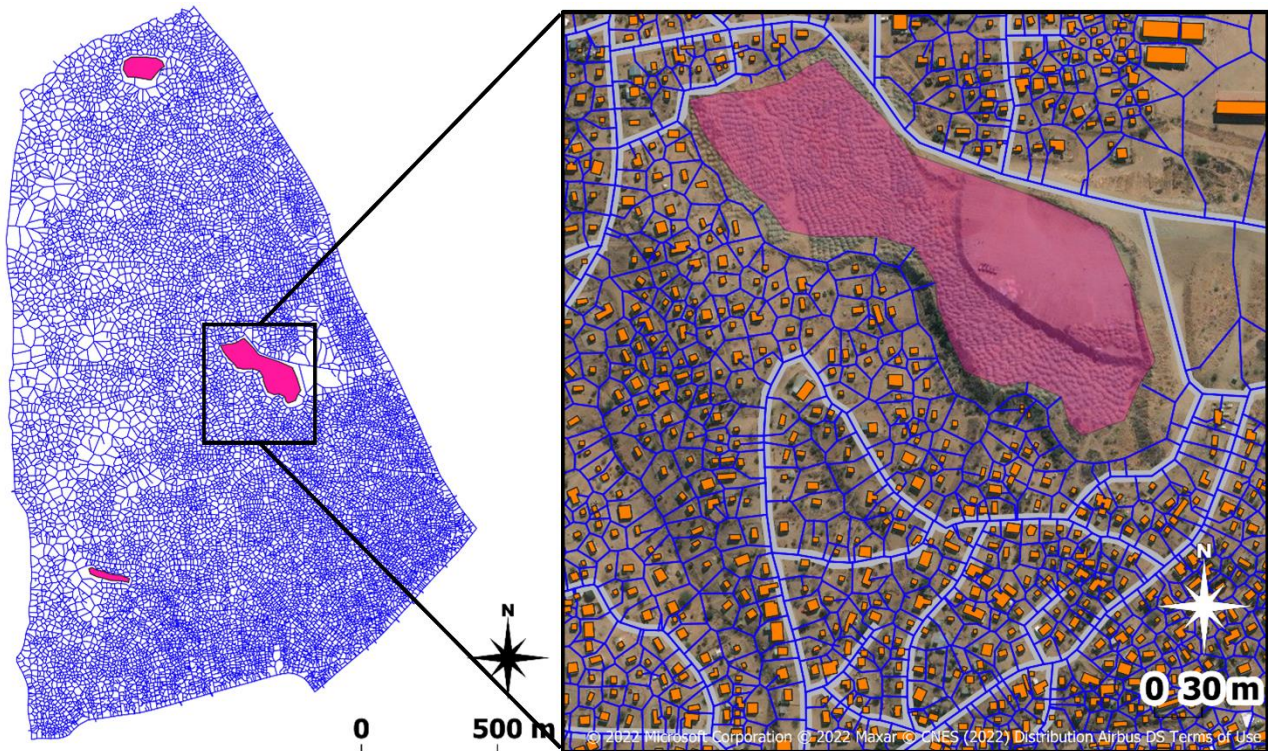


Abbildung 6-3: Maximalnetz (links) und Detailansicht Barriere (rechts) (Quelle Hintergrundkarte: [194], Quelle Bebauung/Straßen: [193])

6.2.2 District level

Auf der Ebene des district levels besteht das Ziel für dieses Fallbeispiel in der Generierung eines übergeordneten Hauptleitungsnetzes, von dem aus das gesamte Betrachtungsgebiet erschlossen werden kann. Potenzielle Hauptleitungstrassen grenzen die Basisgebiete voneinander ab, die durch einen rekursiven Partitionierungsalgorithmus zu Distrikten zusammengefasst werden. Die entstehenden Distriktgrenzen entsprechen dem gesuchten Hauptleitungsnetz. Je nach gewähltem Mindestabstand zur Bebauung bzw. angesetzter Mindestbreite für den Arbeitsstreifen resultieren aus den identifizierten Freiflächen verschiedene potenzielle Hauptleitungstrassen und somit Basisgebiete. Je kleiner der Mindestabstand gewählt wird, desto mehr potenzielle Trassierungsoptionen stehen zur Verfügung. Infolgedessen erhöht sich auch die Anzahl der Basisgebiete, sodass eine gleichmäßigere Aufteilung der Aktivität auf Kosten der Hauptleitungstrassenbreite begünstigt wird. Bestehende Straßen werden entsprechend van Horen [40] als gegeben und unveränderlich in den Ansatz integriert. Stichstraßen, die nicht zur Bildung eines Basisgebietes genutzt werden können, bleiben unberücksichtigt.

Abbildung 6-4 a) zeigt das Untersuchungsgebiet mit 11.900 Hütten. Es wird deutlich, dass die Bebauungsdichte südöstlich, nahe dem formellen Bereich, deutlich höher ist als im nordwestlichen Bereich. In Abbildung 6-4 b) ist der Mindestabstand zur Bebauung für Leitungen über Freiflächen ≥ 5 m gewählt. Die Bestandsstraßen, die zur Bildung der Basisgebiete beitragen, sind schwarz hervorgehoben.

Infolge des weniger dicht besiedelten nordwestlichen Siedlungsbereiches entstehen viele kleine Basisgebiete, während in den dicht besiedelten südöstlichen Bereichen weniger und größere Basisgebiete entstehen. Insgesamt enthält das Gebiet 5.229 Basisgebiete. Das größte Basisgebiet umfasst dabei 251 Hütten. Deutlicher wird dieser Effekt, wenn der Mindestabstand zur Bebauung $\geq 10\text{m}$ gewählt wird (Abbildung 6-4 c)). Das Untersuchungsgebiet enthält in dieser Variante 1.637 Basisgebiete. Insbesondere im südöstlichen Bereich entstehen relativ große Basisgebiete, die nur durch die bereits existierenden Straßen abgegrenzt sind. Das größte Basisgebiet umfasst 401 Hütten.

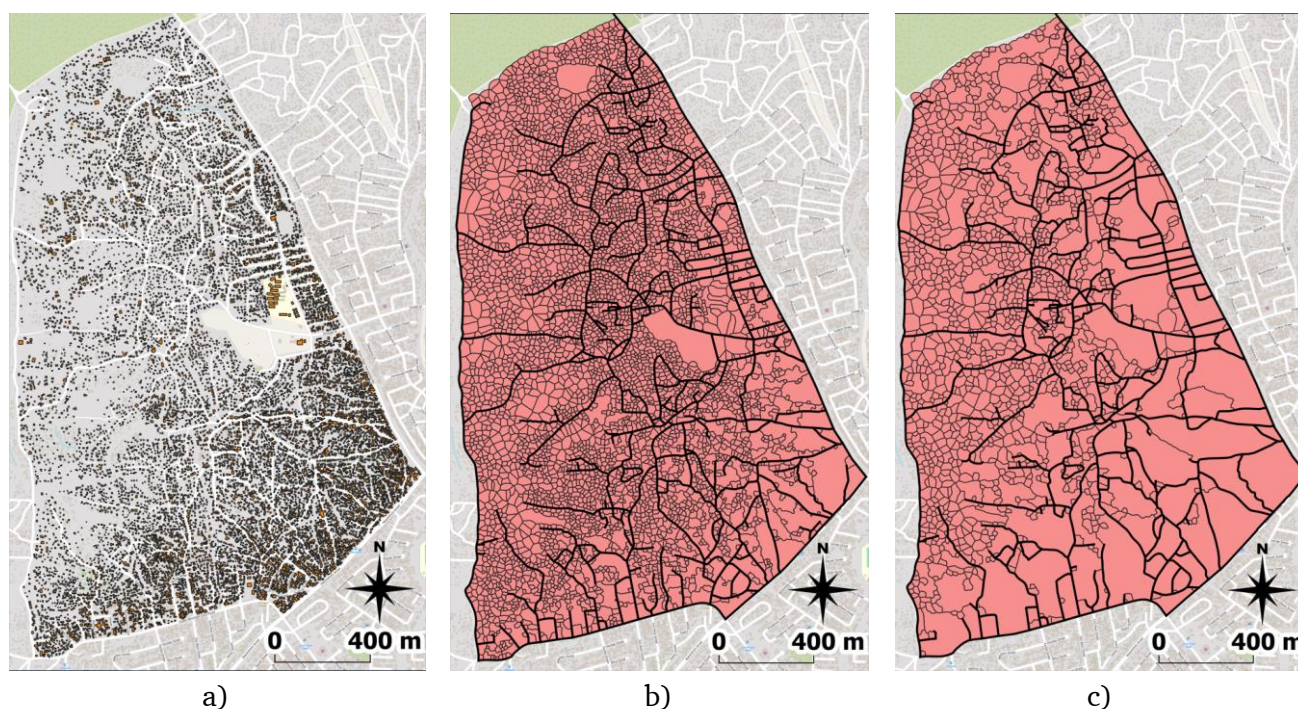


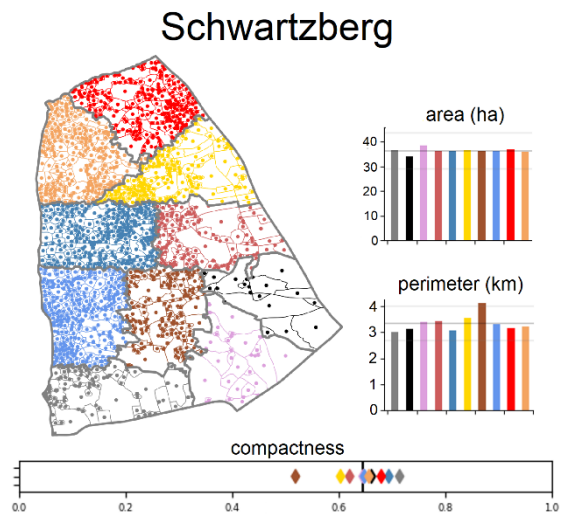
Abbildung 6-4: Das Betrachtungsgebiet (a); Basisgebietserstellung bei Mindestabstand $>5\text{m}$ (b); Basisgebietserstellung bei Mindestabstand $>10\text{m}$ (c) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Ein weiteres Kriterium ist die gewünschte Distriktanzahl. Diese wirkt sich direkt auf das Ziel der Gebietsunterteilung aus und muss entsprechend des Balancekriteriums (z.B. Fläche, Personenanzahl) und im Kontext zum Gesamtgebiet gewählt werden. Je größer die Anzahl gewählt wird, desto kleinere Distrikte werden generiert. Zur Ableitung eines übergeordneten Hauptleitungsnetzes wird das Gebiet beispielhaft in 10 Distrikte aufgeteilt.

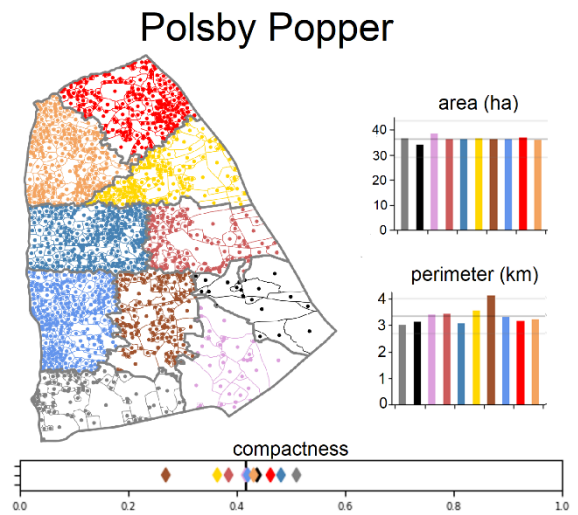
In Abbildung 6-5 ist ein Auszug der Ergebnisse unter Verwendung verschiedener Kompaktheitsmaße dargestellt, in denen die Fläche als Balancekriterium gewählt wurde. In der Zulässigkeitsbedingung wurden eine maximale Höhendifferenz je Distrikt von $\Delta h = 50\text{m}$ sowie eine Abweichung des Balancekriteriums von 20% akzeptiert. Die Suchrichtungen wurden entsprechend Kalcsics et al. [149] mit $n = 8$ gewählt. Je nach gewähltem Kompaktheitsmaß entstehen unterschiedliche Raumorganisationen und Distriktformen. In allen Einteilungen ist die Zulässigkeitsbedingung der Höhe sowie das Balancekriterium Fläche („area“) innerhalb der zulässigen Abweichung erfüllt. Informativ sind zusätzlich die Umfänge der entstehenden Distrikte („perimeter“) dargestellt. Die Maße nach Schwartzberg (Abbildung 6-5 a)) und Polsby-Popper (Abbildung 6-5 b)) generieren in diesem Beispiel identische Einteilungen und bestätigen damit die bereits festgestellte Ähnlichkeit der beiden Maße [156], [153]. Auffällig ist, dass das auch das Convex-Hull-Ratio (Abbildung 6-5 c)) sowie das Maß nach

Reock (Abbildung 6-5 d)) den südlichen Bereich des Betrachtungsgebiets sehr ähnlich den Maßen nach Schwartzberg und Polsby-Popper einteilen. Wesentliche Unterschiede ergeben sich im nördlichen Bereich. Hier führen die Maße nach Schwartzberg, Polsby-Popper und das Convex-Hull-Ratio zu spitzen Dreiecksformen, während die anderen Maße (Reock, Convex-Hull-Ratio, Length-Width-Ratio (Abbildung 6-5 e), X-Symmetrie (Abbildung 6-5 f)) rechteckige Unterteilungen hervorrufen. In allen Aufteilungen ragt im nördlichen Bereich des schwarz dargestellten Distrikts ein schmales, langgezogenes Basisgebiet aus dem benachbarten Distrikt ein. Dies ist auf die Einteilung der Basisgebiete anhand ihres Schwerpunktes zurückzuführen. So sitzt der Schwerpunkt des schmalen, länglichen Basisgebiets im Grenzbereich zwischen beiden Gebieten. Die südlichen Gebiete sind relativ groß, sodass ein Teil der Fläche nördlich zum Nachbardistrikt abschließt, während deren Schwerpunkt weiter südlich liegt. Solche speziellen Zuordnungsprobleme müssen im Nachhinein individuell korrigiert werden.

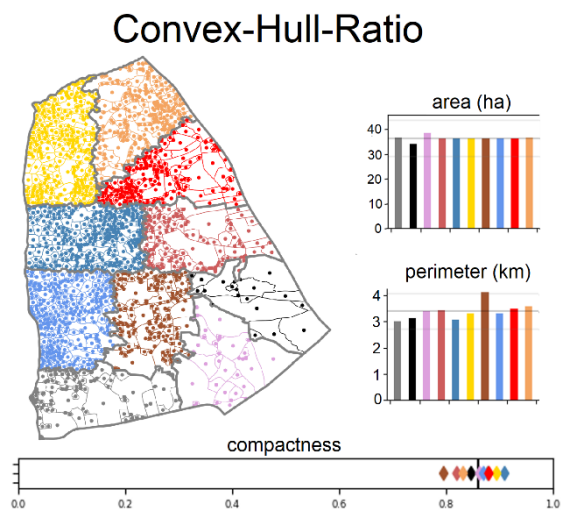
Die Kompaktheitsskala unter der jeweiligen Gebietseinteilung ermöglicht einen Vergleich der durch das jeweilige Kompaktheitsmaß gebildeten Distrikte. Da kein allgemeingültiges mathematisches Maß zur Bewertung der Kompaktheit existiert [152], [140], können die Ergebnisse der verschiedenen Kompaktheitsmaße jedoch nicht direkt miteinander verglichen werden. Hier erfolgt die Bewertung der Ergebnisse anhand der Länge der inneren Distriktgrenzen. Diese entspricht der Länge der Hauptleitungen und steht damit in direktem Zusammenhang zu den Kosten für die Einführung dieser Infrastruktur. Das Ziel der Gebietseinteilung ist demnach eine möglichst geringe Distriktgrenzlänge. Eine solche umfangbasierte Bewertung ließe jedoch insbesondere die Distriktform unberücksichtigt. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse nach Young [152] auch visuell bewertet werden. Diese intuitive Bewertung liegt sprichwörtlich im Auge des Betrachters und ist daher sehr individuell. In der Praxis gilt es dabei die Vorstellungen der Stadtplanung bzw. Raumorganisation zu berücksichtigen.



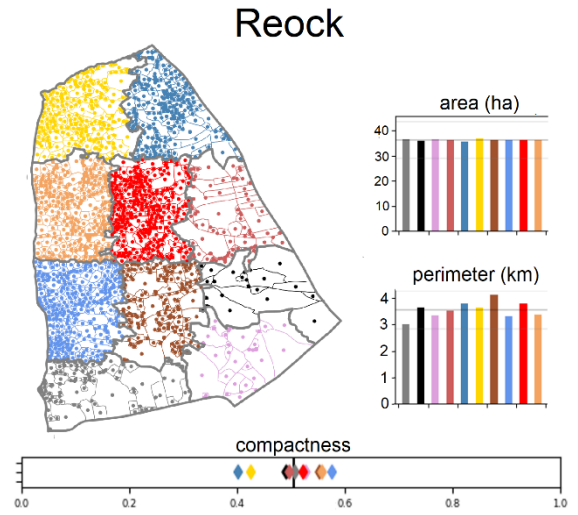
a)



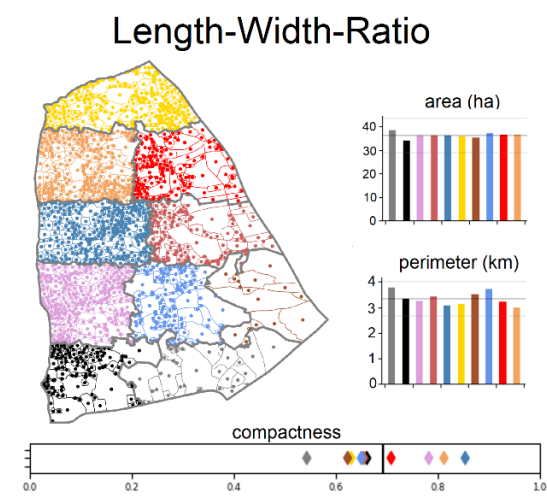
b)



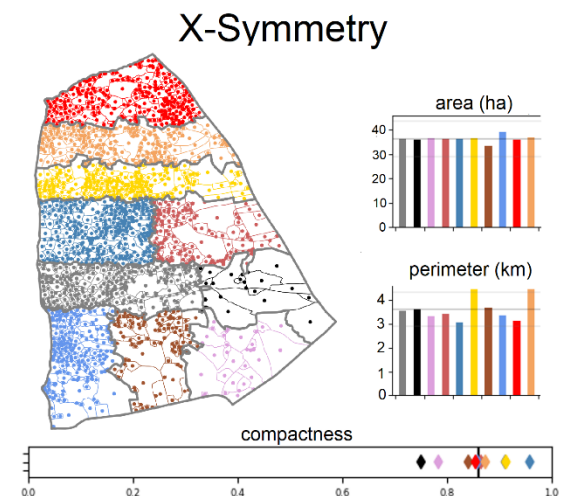
c)



d)



e)



f)

Abbildung 6-5: Ergebnisse der Gebietseinteilung nach verschiedenen Kompaktheitsmaßen

Wird die minimale Länge der inneren Distriktgrenzen als Bewertungsmaß genutzt, zeigt die Einteilung nach Schwartzberg mit einer Länge von 12,7 km die besten Resultate. Die X-Symmetrie besitzt dagegen mit 14,1 km die längsten inneren Distriktgrenzen. Ist jedoch eine dreieckige Raumordnung, wie sie nach Schwartzberg im nördlichen Bereich gebildet wird, nicht gewünscht, besteht die Möglichkeit verschiedene Kompaktheitsmaße über Wichtungsfaktoren miteinander zu kombinieren. In Abbildung 6-6 sind die Maße nach Schwartzberg und das Length-Width-Ratio kombiniert. Die innere Distriktgrenze reduziert sich infolgedessen auf 12,4 km und die Dreiecksstruktur im Norden weicht einer rechteckigen Raumordnung.

Schwartzberg + Length-Width-Ratio

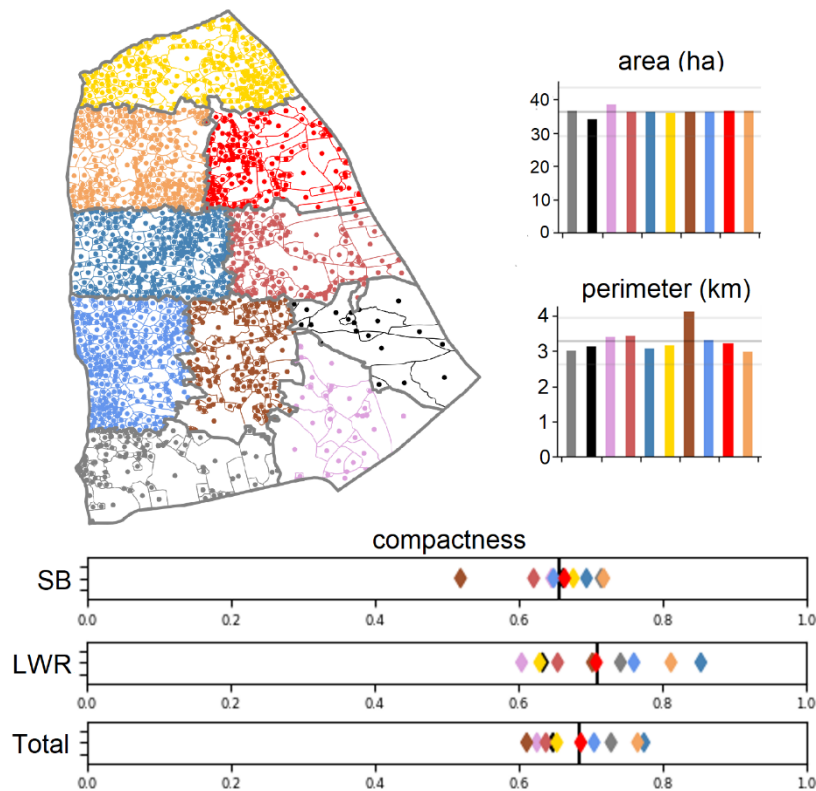


Abbildung 6-6: Gebietseinteilung nach gewichteten Kompaktheitsmaßen

Wie der Fall des schmalen, länglichen Basisgebiets, das in den schwarzen Distrikt hineinragt, zeigt, sollten die automatisiert generierten Ergebnisse aus einer praxisnahen Perspektive nachträglich manuell überprüft und, falls erforderlich, angepasst werden. Dies betrifft insbesondere die Randbereiche. So werden die Distriktgrenzen allein durch das Balancekriterium und Kompaktheitsmaß definiert, ohne nahegelegene Straßen oder Wege zu bevorzugen, die sich als natürliche Distriktgrenzen anbieten würden. Im jeweiligen Einzelfall muss daher entschieden werden, ob manuelle Anpassungen erfolgen, die eventuell zur Verletzung des Balancekriteriums führen. In Abbildung 6-7 ist eine mögliche Anpassung dargestellt. Die Distriktgrenze wird an der bestehenden Straße orientiert. Wesentliche Änderungen wurden nur für das mittige braune Gebiet durchgeführt, dessen Grenzverlauf infolge der automatisierten Einteilung etwas unregelmäßig erschien. Insgesamt sind ca. 3,5% der Basisgebiete von einer manuellen Anpassung betroffen. Sie sind in Abbildung 6-7 (links) grün dargestellt.

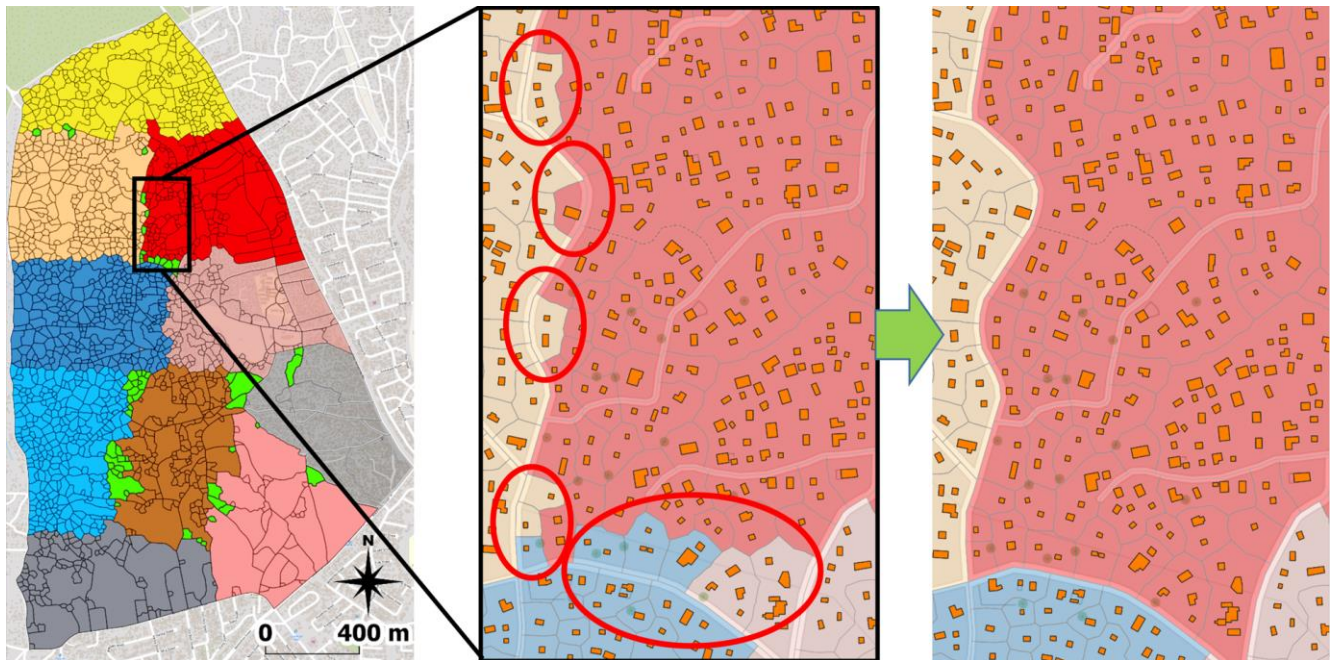


Abbildung 6-7: Manuelle Anpassungen nach automatisierter Gebietseinteilung (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Die finale Gebietsaufteilung ist in Abbildung 6-8 a) dargestellt. Die Einteilung zeigt, dass einige Distriktgrenzen entlang bereits existierender Straßen/Wege (schwarz dargestellt) verlaufen, was die Erschließung tendenziell begünstigt. Infolge der individuellen Anpassungen reduziert sich die innere Grenzlänge auf 9km. Die Höhendifferenz in den generierten Gebieten schwankt zwischen $\Delta h_{\min} = 14\text{m}$ (cremefarbenes Gebiet im nord-westlichen Bereich) und $\Delta h_{\max} = 43\text{m}$ (blaues Gebiet), sodass die Zulässigkeitsbedingung (max. 50m) erfüllt ist (Abbildung 6-8 b). Auch aus visueller Sicht, wird das Gebiet relativ gleichmäßig und überwiegend in die gewünschte Rechteckstruktur unterteilt. Das anhand der Distriktgrenzen abgeleitete Hauptleitungsnetz ist in Abbildung 6-8c) in rot dargestellt. Während die Trassierung im nördlichen Bereich abschnittsweise einen leicht kurvigen Verlauf besitzt, verläuft sie im südlichen Bereich relativ geradlinig. Für einen direkteren Verlauf müsste entweder die Zuordnung der einzelne Basisgebiete in den Randbereichen überprüft oder Umsiedlungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden.

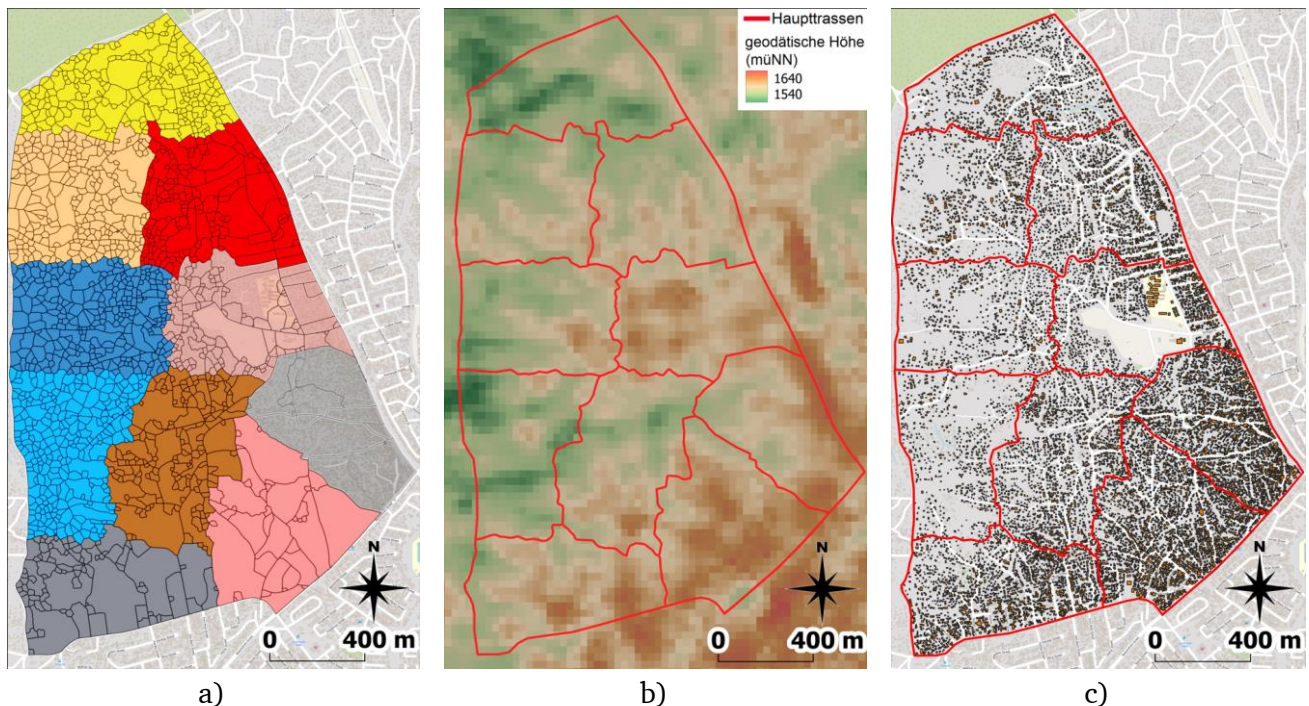


Abbildung 6-8: Finale Gebietsaufteilung farblich gekennzeichnet (a); Gebietsaufteilung in Bezug auf geodätische Höhenkompaktheit (b); Darstellung des übergeordneten Hauptleitungsnetzes (c) (Quelle Karte/Bebauung: [193])

6.2.3 Building level

Das in Kapitel 6.2.2 generierte Hauptleitungsnetz umschließt die gebildeten Distrikte, sodass eine hohe Flexibilität für die Erschließung kleinerer Upgrading-Areas innerhalb der Distrikte existiert. Im Folgenden wird eine leitungsgebundene Wasserversorgungsinfrastruktur für eine Upgrading-Area geplant. Die Upgrading-Area entspricht in diesem Beispiel einem Basisgebiet aus der Gebietsaufteilung. In Abbildung 6-9 (links) sind die Basisgebiete (schwarz) sowie das in Kapitel 6.2.2 generierte Hauptleitungsnetz dargestellt. Abbildung 6-9 (rechts) enthält die Detailansicht der hier betrachteten Upgrading-Area. Sie enthält 336 Hütten auf einer Fläche von 6,14ha mit ca. 1.250 Einwohnern (die Einwohnerzahl basiert auf einer Verschneidung der Bevölkerungsdaten von [187] mit der Fläche). Im nördlichen sowie westlichen Bereich grenzt die Upgrading-Area an das Hauptleitungsnetz, sodass in diesen Bereichen die Übergabestelle angeordnet d.h. die Einspeisung erfolgen kann. Zunächst werden optimale Wasserentnahmestandorte berechnet. Hierbei werden in einer Variante die Anforderungen an die Erreichbarkeit entsprechend der Kategorie „basic-access“, in einer weiteren Variante die Anforderungen an die Erreichbarkeit entsprechend der Kategorie „intermediate access“ erfüllt. Für beide Varianten werden anschließend hinsichtlich der Leitungslänge optimale Verästelungs- und Ringnetze generiert. Sie werden abschließend in Bezug auf die Leitungsdurchmesser hydraulisch optimiert.

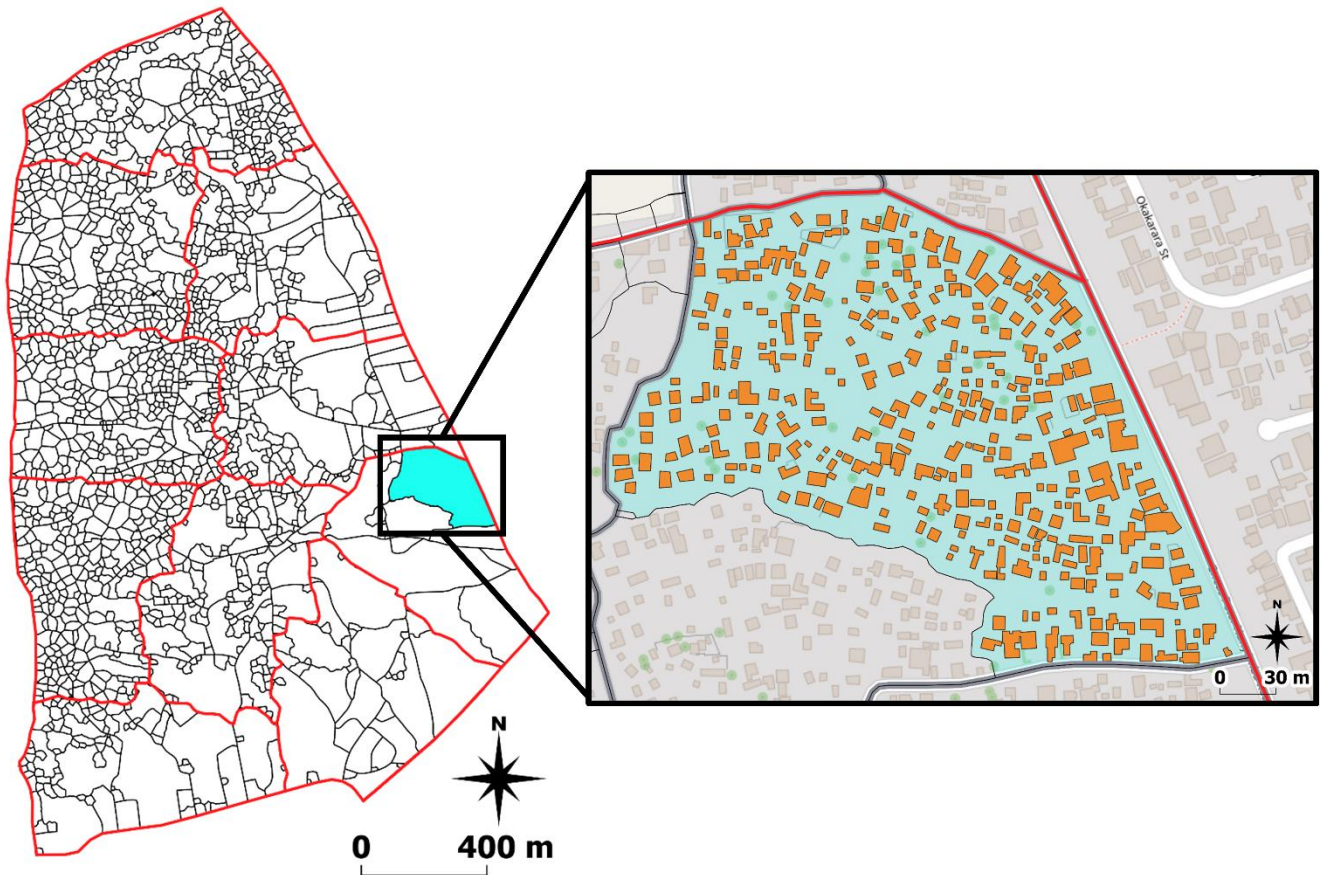


Abbildung 6-9: Informelles Siedlungsgebiet (links) und Abgrenzung einer Upgrading-Area (rechts) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Von den in Kapitel 6.2.1 generierten potenziellen Versorgungsleitungsstrassen des Gesamtgebiets werden die in der Upgrading-Area liegenden Trassen extrahiert (Abbildung 6-10). Sie bilden in Bezug auf die Upgrading-Area ein maximales Versorgungsnetz, aus dem die finale Trassierung abgeleitet wird. Das maximale Versorgungsnetz innerhalb der Upgrading-Area besteht aus 361 Strängen mit einer Gesamtlänge von 4,9km. Sie sind über 325 Knoten miteinander verbunden. Die Einspeisestelle in die Upgrading-Area wird zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Vorhinein festgelegt. Sie erfolgt in Form eines Einspeiseknotens von der Hauptleitung aus am südwestlichen Punkt der Upgrading-Area.

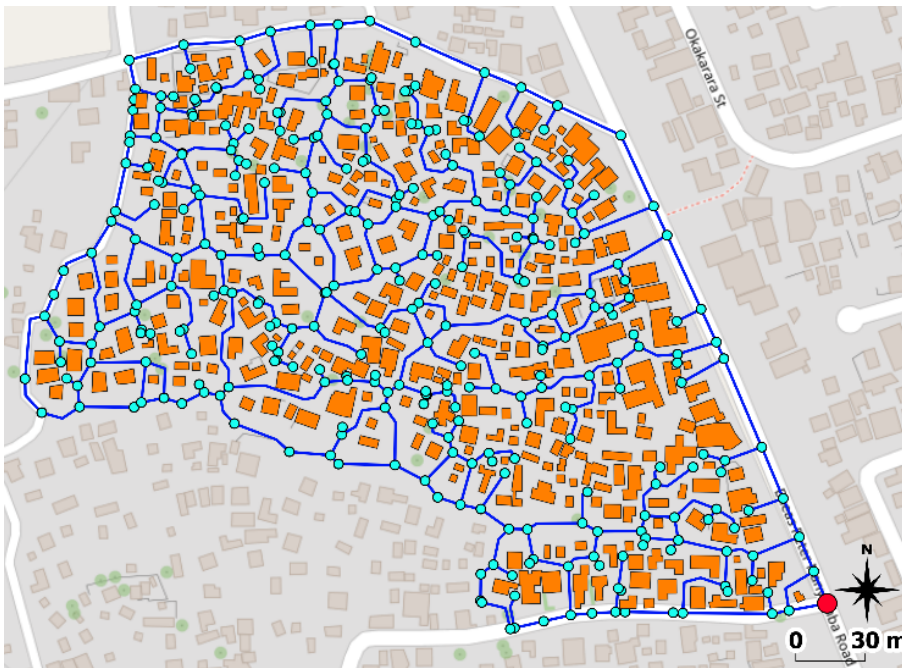


Abbildung 6-10: Potenzielle Versorgungsleitungstrassen in der Upgrading-Area (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Die potenziellen Entnahmestandorte entsprechen bei einem Verästelungsnetz sämtlichen Knoten des maximalen Versorgungsnetzes in der Upgrading-Area. Im Falle eines Ringnetzes stehen Knoten, die auf Stichleitungen liegen, nicht zur Verfügung, sodass sie von der Berechnung ausgeschlossen werden. Die Ermittlung der benötigten Entnahmestellenanzahl zur Gewährleistung des Erreichbarkeitskriteriums der entsprechenden Versorgungskategorie nach Tabelle 2-2 (siehe Kapitel 2.3.1) erfolgt über das Location-Set-Covering-Problem. Für ein Verästelungsnetz zeigen die Ergebnisse, dass für eine Versorgung der Kategorie „basic access“ (Erreichbarkeit einer Entnahmestelle innerhalb einer Entfernung von 1.000m für Hin- und Rückweg) eine Entnahmestelle ausreicht. Für die Versorgungskategorie „intermediate access“ (Erreichbarkeit einer Entnahmestelle innerhalb einer Entfernung von 100m für Hin- und Rückweg) werden nach Berechnung des Location-Set-Covering-Problem dagegen mindestens 17 Entnahmestellen benötigt. Abbildung 6-11 enthält darauf aufbauend die Ergebnisse des p-Center-Problem für variierende Entnahmestellenanzahlen. Sie bestätigen die Berechnung des Location-Set-Covering-Problem und präzisieren diese. Für ein Verästelungsnetz erfüllt demnach eine Entnahmestellenanzahl zwischen 1 bis 16 Stück die Kategorie „basic access“, während ab einer Entnahmestellenanzahl ≥ 17 Stück die Versorgungskategorie „intermediate access“ erreicht wird.

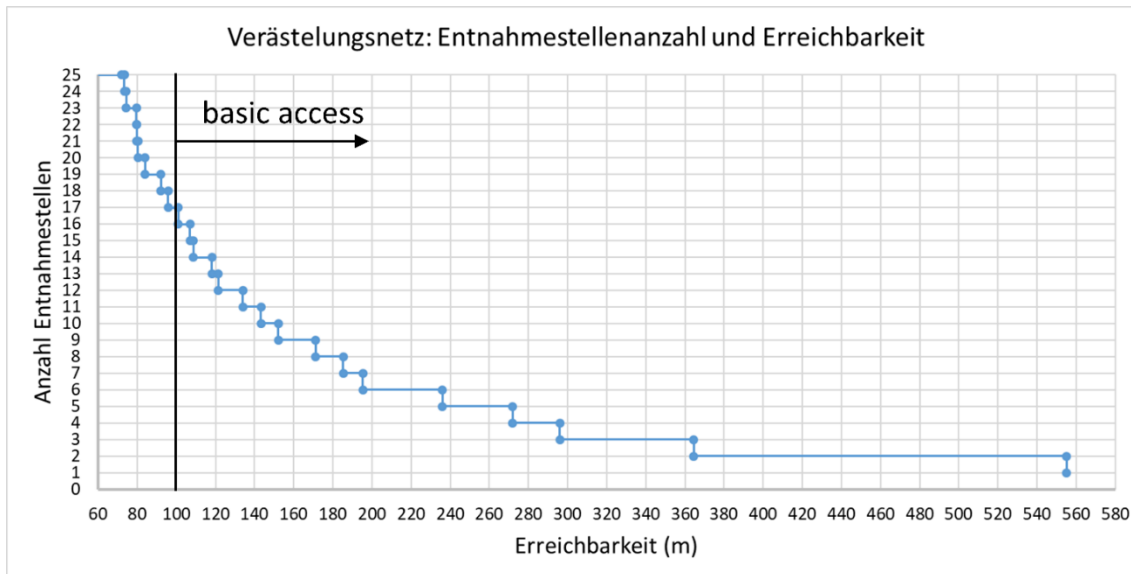


Abbildung 6-11: Windhoek Verästlungsnetz - Anzahl der Entnahmestellen in Abhängigkeit der Erreichbarkeit

In Bezug auf das Ringnetz zeigt die Berechnung, dass das Erreichbarkeitskriterium der Kategorie „basic access“ ebenfalls mit einer Entnahmestelle erfüllt werden kann. Das Erreichbarkeitskriterium der Kategorie „intermediate access“ kann dagegen mit einem Ringnetz nicht erfüllt werden. Grund ist die Beschränkung der potenziellen Entnahmestellen auf die Knoten der Ringleitungen, während ggf. näherliegende Knoten auf Stichleitungen von der Betrachtung ausgeschlossen sind. Dies führt dazu, dass eine Entfernung von 127m (Summe Hin- und Rückweg) zwischen dem am schlechtesten gestellten Abnehmer und einer Entnahmestelle nicht unterschritten werden kann. Abbildung 6-12 zeigt, dass mit 12 Entnahmestellen die minimale Entfernung erreicht ist. Weitere Entnahmestellen führen nicht zu einer Verbesserung des am schlechtesten gestellten (d.h. am weitesten entfernten) Abnehmers. Grundsätzlich erhält die Planung durch diese Berechnungen eine gute Übersicht über die Auswirkungen zusätzlicher Entnahmestellen auf deren Erreichbarkeit in einer Upgrading-Area.

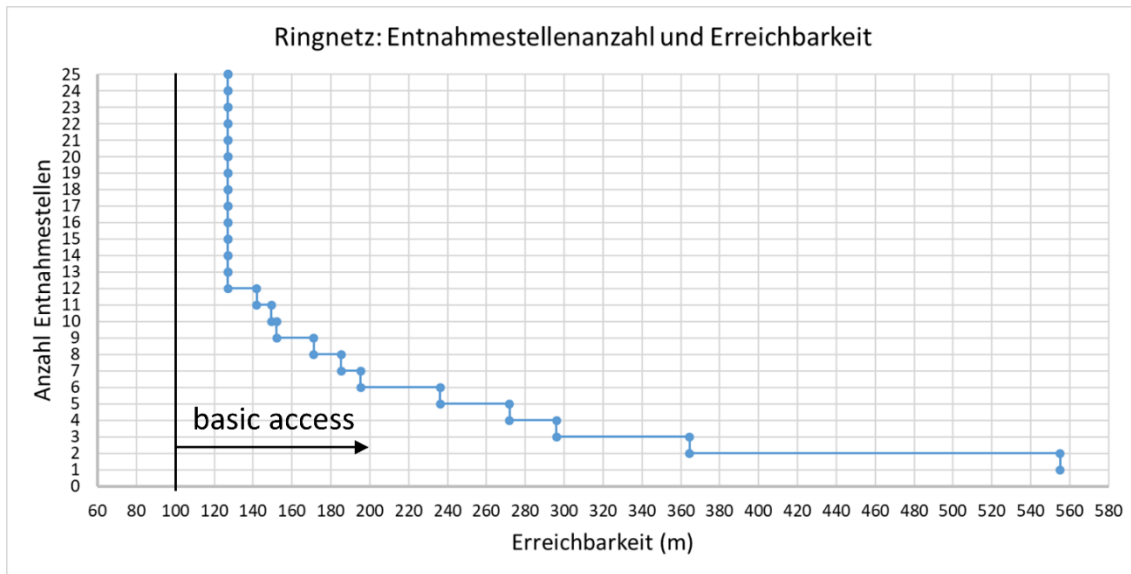


Abbildung 6-12: Windhoek Ringnetz - Anzahl der Entnahmestellen in Abhängigkeit der Erreichbarkeit

Einführung Wasserversorgungsinfrastruktur - Variante „basic access“

Entsprechend des Planungsziels (Erreichbarkeit einer Entnahmestelle innerhalb von 600m (Summe für Hin- und Rückweg)) wird der optimale Standort der Entnahmestelle in Bezug auf ihre Erreichbarkeit im maximalen Versorgungsnetz über das p-Center-Problem ermittelt. Sie ist in Abbildung 6-13 grün dargestellt. Sie liegt auf einem Ring, sodass keine separate Berechnung der Entnahmestellen für das Ringnetz nötig ist. Der am schlechtesten gestellte bzw. am weitesten entfernte Abnehmer wird hierbei so gut wie möglich gestellt. In Abbildung 6-13 ist dieser Abnehmer gelb dargestellt (rechts unten). Er liegt 277,6m, d.h. 555,2m für Hin- und Rückweg, von der Entnahmestelle entfernt. Das Beispiel zeigt deutlich, dass die Berücksichtigung der Distanz über tatsächliche (Fuß-)Wege (gelb) maßgebliche Auswirkungen auf die Planung hat. Würde die Distanz zwischen Entnahmestelle und Abnehmer über einen Radius, d.h. per Luftlinie, berücksichtigt, würde der Planung eine maximale Entfernung von 195m suggeriert. Dies entspricht nicht der Realität und kann im schlimmsten Fall den Erfolg einer Upgrading-Maßnahme gefährden, da Versprechungen in Bezug auf die Erreichbarkeit nicht eingehalten werden (können) und die Akzeptanz infolgedessen sinkt. Der Entnahmestelle wird der Wasserbedarf aller Abnehmer im Gebiet zugeordnet. Entsprechend der Aufwertungsziele wird der Wasserbedarf mit 20l pro Person und Tag angesetzt. Bei 1.250 Einwohnern entspricht dies einem täglichen Wasserbedarf von insgesamt 25m³.

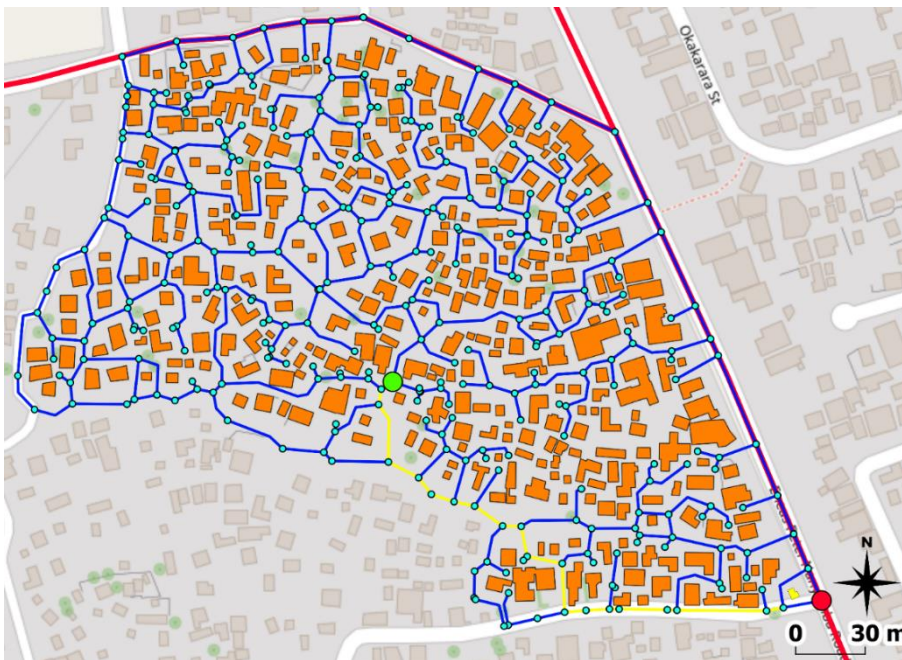


Abbildung 6-13: Ergebnis des p-Center-Problem zur Erreichung der Versorgungskategorie „basic access“ (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Topologieoptimierung

Das Netz wird zunächst mit sämtlichen Linienelementen sowie Knoten als Graph $G = (V, E)$ modelliert. Der Einspeiseknoten sowie der Entnahmeknoten werden darin als Terminale T definiert und G an den approximate-steiner-tree-solver aus der Python-Bibliothek NetworkX übergeben. Dieser ermittelt den Teilgraphen G' von G mit $T \subseteq V$, sodass ein unter den gewählten Randbedingungen und in Bezug auf die Kantengewichte kostenminimales, zusammenhängendes Netz generiert wird.

Eine differenzierte Betrachtung von potenziellen Trassen entlang bestehender Straßen, über Freiflächen im Betrachtungsgebiet oder der Einbezug von Bestandsleitungen ist durch eine Gewichtung der Kanten

im Graphen möglich. Die Auswirkungen einer unterschiedlichen Gewichtung enthält Abbildung 6-14. Bei gleicher Gewichtung der Trassenart besitzt die Leitung zwischen dem Einspeise- und dem Entnahmeknoten eine Länge von 281m (Abbildung 6-14 a)). Dieser Wert entspricht gleichzeitig der Summe der Kantengewichte. Wird eine Trassierung entlang bestehender Straßen bevorzugt, werden die entsprechenden Kanten über den Faktor f_{street} im Graph gewichtet. In Abbildung 6-14 b) wurde $f_{street} = 0,5$ (-) gesetzt. Das bedeutet, dass ein Meter Leitungstrasse entlang einer bestehenden Straße zwei Metern Leitungstrasse über Freiflächen entspricht. Das Leitungsnetz umfasst eine Länge von insgesamt 288m, davon verlaufen 121m entlang bestehender Straßen und 167m über Freiflächen. Daraus resultiert ein Kantengewicht von 227,5m ($= 0,5 \cdot 120,5m + 167,3m$).



Abbildung 6-14: Verastelungsnetz mit einer Entnahmestelle: ohne Differenzierung der Trassenart (a); mit Straßenfaktor $f_{street} = 0,5$ (b) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Auf die Generierung eines Ringnetzes wird bei einer Entnahmestelle verzichtet, da das Ringnetz unter Berücksichtigung von Abbildung 6-13 offensichtlich ist.

Durchmesseroptimierung

Die Optimierung der Leitungsdurchmesser erfolgt beispielhaft anhand des generierten Versorgungsnetzes ohne Differenzierung der Trassenart (Abbildung 6-14 a)). Die Upgrading-Area verfügt über ca. 1.250 Einwohner verteilt auf 336 Hütten. Entsprechend dem zuvor definierten Planungswert von 20l pro Person und Tag (vgl. Kapitel 6.1) beträgt der tägliche Wasserbedarf in der Upgrading-Area $25m^3/Tag$. Der Spitzenfaktor f_h wird nach Gleichung (1) bestimmt. Für 1.250 Einwohner beträgt $f_h = 5,45$ (-), sodass entsprechend Gleichung (2) $Q_{hmax} = 5.677l/h = 1,58l/s$ resultiert. Der Wert wird dem Entnahmeknoten zugeordnet. Die Einspeisung erfolgt über den rot markierten Knoten am südöstlichen Rand. Die Druckvorgabe am Einspeiseknoten ist den örtlich vorherrschenden Bedingungen entsprechend zu wählen. Hier erfolgt die Einspeisung beispielhaft mit einem Druck von 3,5bar. Die Anforderungen an Hydraulik und Bemessung sind in der Praxis mit den länderspezifischen Anforderungen abzugleichen und ggf. anzupassen. So ergibt sich z.B. der Spitzendurchfluss bei nur einer Entnahmestelle im Gebiet eher aus technischen Gesichtspunkten der Entnahmeverrichtung, während beispielsweise die Gleichzeitigkeit der Entnahme in diesem Fall keine Rolle spielt. Die Berechnung des GA erfolgt für eine Populationsgröße = 150 und 50 Iterationen. Der Mutationsfaktor wird mit 1% gewählt.

Die Berechnung des optimalen Durchmessers ist bei einer einzigen Versorgungsleitung trivial. Dies zeigt auch der Verlauf der Fitness der jeweils besten Lösung einer Iteration in Abbildung 6-15. Im Zuge der zufälligen Belegung des Gens in der ersten Iteration wurde die beste Lösung direkt gefunden, sodass sich die Fitness nicht weiter verbessert. Der Fitnesswert der besten Lösung beträgt 14,5 (-). Dies lässt sich aus der Länge des Strangs multipliziert mit dem gewählten Innendurchmesser reproduzieren zu: $281,2 \cdot 0,0514 = 14,5$.

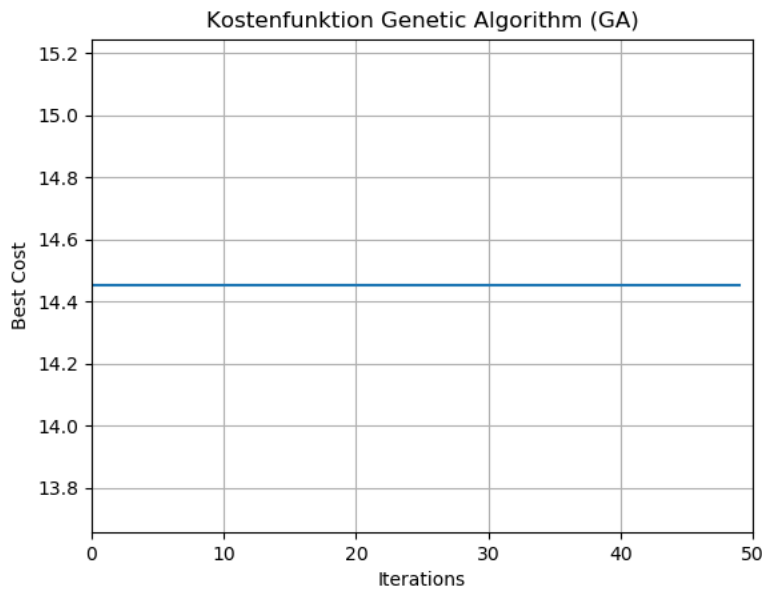


Abbildung 6-15: Verlauf der Kosten der besten Lösung je Iteration - Verästelungsnetz bei Versorgungskategorie "basic access"

Die Überprüfung der hydraulischen Bedingungen und Systembeschränkungen erfolgt durch eine hydraulische Simulation in EPANET 2. Aus Abbildung 6-16 ist zu entnehmen, dass am Entnahmeknoten der Mindest- und Maximaldruck eingehalten wird. Die Fließgeschwindigkeit in der Leitung beträgt 0,76m/s.

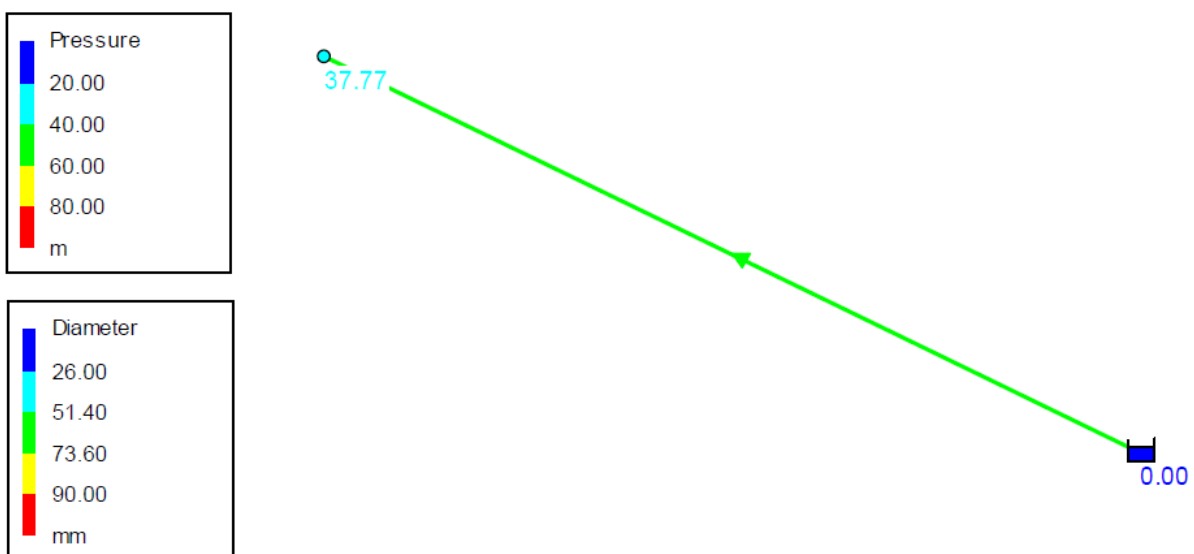


Abbildung 6-16: Ergebnis DN-Optimierung - Verästelungsnetz bei Versorgungskategorie "basic acces"

Einführung Wasserversorgungsinfrastruktur - Variante „intermediate access“ – Verästelungsnetz

Zur Einführung einer Trinkwasserversorgung der Kategorie „intermediate access“ werden nach Abbildung 6-11 für ein Verästelungsnetz 17 Entnahmestellen benötigt. Die entsprechend des p-Center-Problem ermittelten Entnahmestellenstandorte für ein Verästelungsnetz sind in Abbildung 6-17 hervorgehoben. Der am weitesten entfernte Abnehmer liegt hierbei 48m, d.h. 96m für Hin- und Rückweg, von der nächsten Entnahmestelle entfernt.

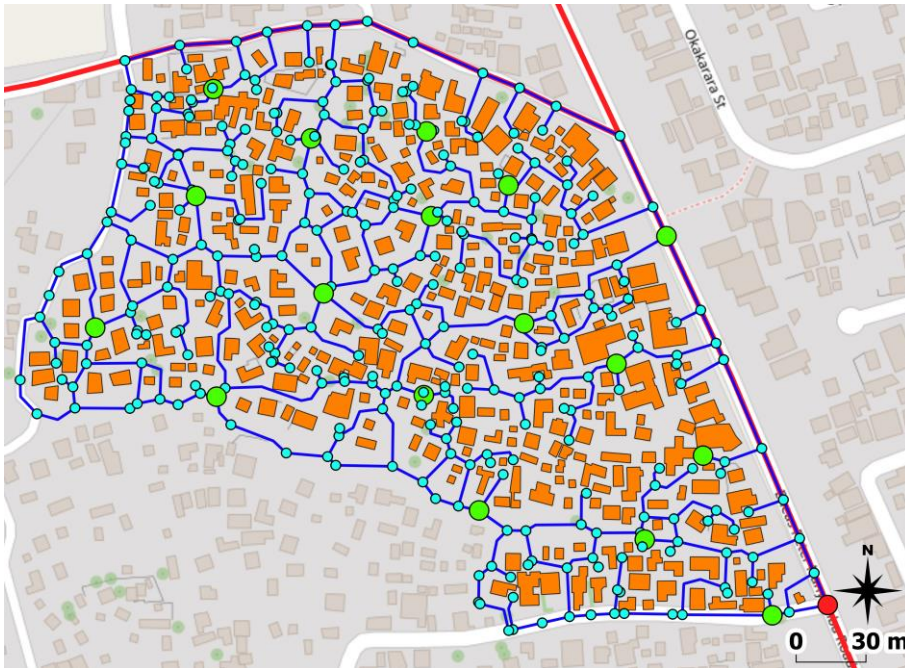
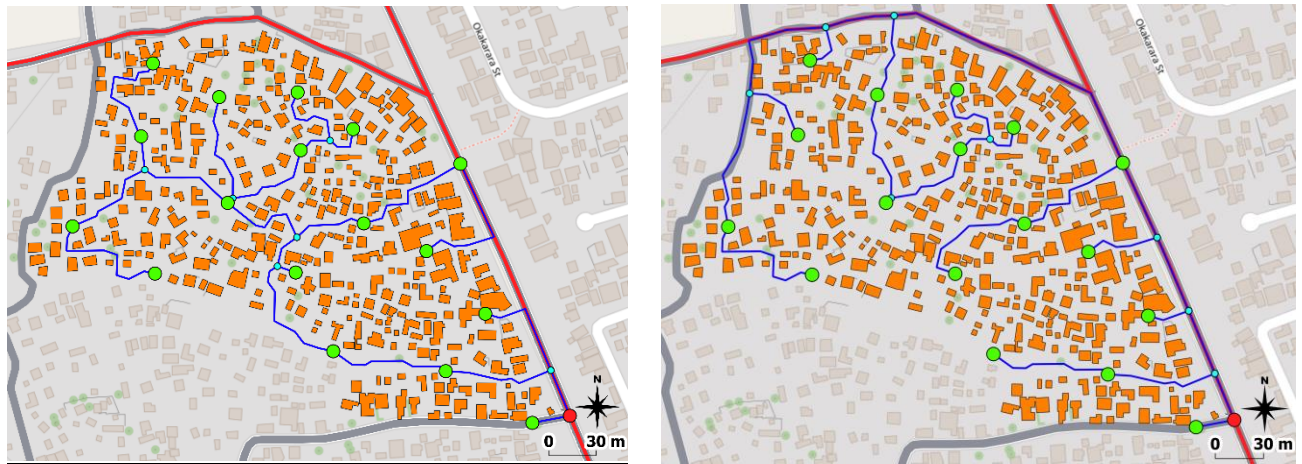


Abbildung 6-17: Verästelungsnetz - Ergebnis des p-Center-Problem zur Erreichung der Versorgungskategorie „intermediate access“ (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Topologieoptimierung

Wie im Falle des Netzes mit einer Entnahmestelle (s.o.) werden die Entnahmeknoten sowie der Einspeiseknoten als Terminale T im Netz G definiert und das in Bezug auf die Kantengewichte minimale Verästelungsnetz G' mit Hilfe des approximate-steiner-tree-solver generiert. Abbildung 6-18 a) enthält das minimale Verästelungsnetz ohne Differenzierung der Trassenart. Das Netz besitzt eine Gesamtlänge von 1.316m, wovon ca. 160m entlang bestehender Straßen verlaufen. Ist eine Trassierung entlang bestehender Straßen bevorzugt, wird das Kantengewicht der entsprechenden Linienelemente über den Trassenartfaktor f_{street} reduziert. In Abbildung 6-18 b) ist $f_{street} = 0,1$ gewählt. Das Netz besitzt eine Gesamtlänge von 1.536m, davon verlaufen 639m entlang bestehender Straßen. Die Summe der Kantengewichte entspricht 961m ($= 639m \cdot 0,1 + (1.536m - 639m)$).



a)

b)

Abbildung 6-18: Verästelnetz mit 17 Entnahmestellen: ohne Differenzierung der Trassenart (a); mit Straßenfaktor $f_{street} = 0,1$ (b) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Durchmesseroptimierung

Die DN-Optimierung erfolgt für das Verästelnetz am Beispiel der bevorzugten Trassierung entlang bestehender Straßen (Abbildung 6-18b). Zunächst wird für jeden Verbraucher die nächstliegende Entnahmestelle ermittelt und ihr anschließend der entsprechende Wasserbedarf zugeordnet. Die Distanz ermittelt sich aus der tatsächlichen Wegstrecke, von einer Hütte entlang der potenziellen Versorgungsleitungstrassen (die hier als Fußwege dienen) bis zu einer Entnahmestelle. Hütten, die gemeinsam von einer Entnahmestelle versorgt werden, sind in Abbildung 6-19 farblich gruppiert. Es sei angemerkt, dass in der Realität nicht immer die nächstliegende Entnahmestelle genutzt wird. So können beispielsweise soziale Faktoren dazu führen, dass Personen eine in der Umgebung liegende Entnahmestellen nutzen, die jedoch nicht der zu ihrer Hütte nächstliegenden entspricht. Eine automatisierte Zuweisung ist in diesem Fall ohne zusätzliche Informationen nicht möglich. Bei entsprechender Datenverfügbarkeit ermöglicht die enge Kopplung und Darstellung der Zwischenergebnisse in QGIS jedoch manuelle Korrekturen der automatisierten Zuweisung.

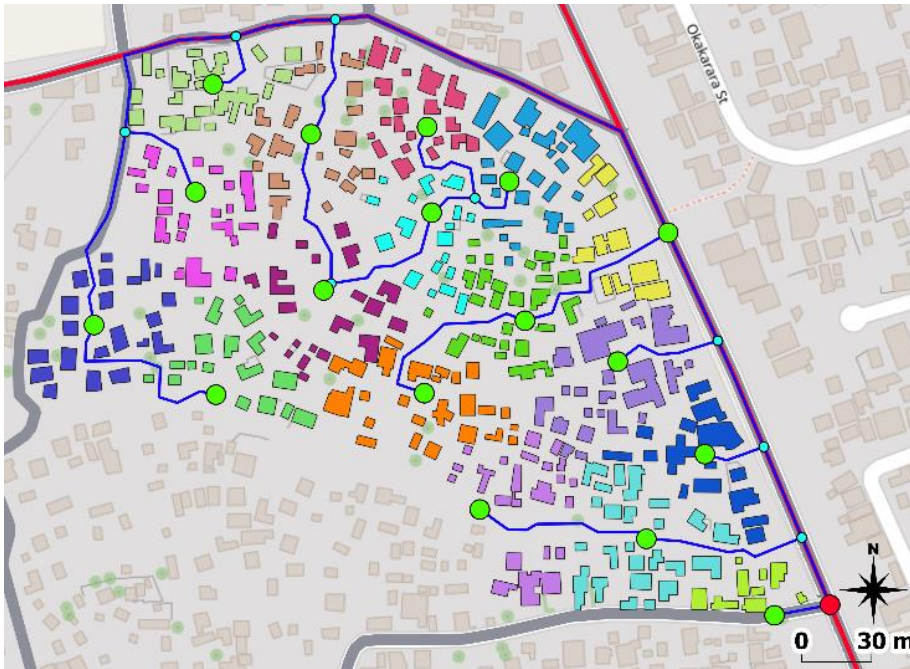


Abbildung 6-19: Verästelnetz bei Versorgungskategorie "intermediate access" - Zuweisung der Hütten zu den Entnahmeknoten (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Für die Versorgungskategorie „intermediate access“ wird ein Wasserbedarf von 50l pro Einwohner und Tag angesetzt. Bei 1.250 Einwohnern entspricht dies einem Wasserbedarf von $62,5\text{m}^3/\text{Tag}$. Unter Berücksichtigung von $f_h = 5,45$ (-) (s.o.) ergibt sich für den Lastfall Spitzenstunde am Tag des maximalen Bedarfs $Q_{h\max} = 14.193\text{l/h}$ bzw. $3,94\text{l/s}$. Die Verbräuche der einzelnen Hütten werden der jeweils zugewiesenen Entnahmestelle zugeordnet. Wie zuvor, wird ein Einspeisedruck von 35mWs ($\sim 3,5\text{bar}$) angenommen, während der Mindestdruck an den Entnahmeknoten 20mWs ($\sim 2\text{bar}$) nicht unterschreiten darf. Die Berechnung des GA erfolgt für eine Populationsgröße = 150 und 50 Iterationen. Der Mutationsfaktor wird mit 1% gewählt. Das Netz wird aus QGIS automatisiert in ein für das Hydraulikprogramm EPANET 2 lesbares Datenformat überführt, das die hydraulischen Randbedingungen und Systembeschränkungen für jede Iteration überprüft. Dies führt bei dem gewählten Verästelnetz zu einer Berechnungsdauer des GA von ca. 4min. Der GA findet die beste Lösung mit einer Fitness = 61,2 (-). Der Verlauf der Fitness der besten Lösung in jeder Iteration enthält Abbildung 6-20.

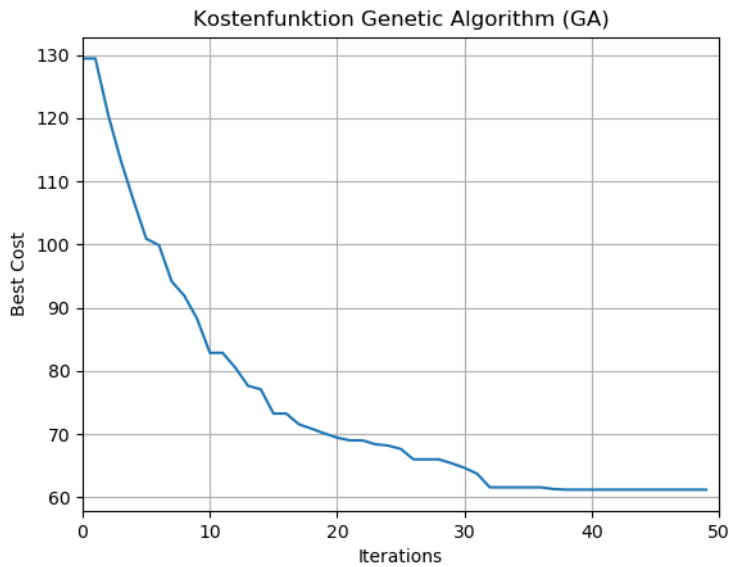


Abbildung 6-20: Verlauf der Kosten der besten Lösung je Iteration: Verästelungsnetz bei Versorgungskategorie "intermediate access"

Die für das Netz ermittelten optimalen Rohrtypen sowie deren Leitungslängen enthält Tabelle 6-2.

Tabelle 6-2: Ermittelte Rohrtypen und Leitungslängen für ein Verästelungsnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"

Rohrtyp	Innendurchmesser (mm)	Länge (m)
32 PE100 SDR11	26,0	816,1
63 PE100 SDR11	51,4	587,5
90 PE100 SDR11	73,6	132,7

Basierend auf den ermittelten Durchmessern erfolgt ebenfalls durch EPANET 2 die hydraulische Überprüfung der Ergebnisse. Sie ist in Abbildung 6-21 dargestellt. Die Leitungen sind entsprechend ihres Durchmessers eingefärbt, die Fließrichtung ist durch Pfeile dargestellt und der Druck an den Knoten in mWs angegeben. Es zeigt sich, dass die Durchmesser in Fließrichtung von der Einspeisung zu den Entnahmeknoten wie gewünscht abnehmen und auch die Abfolge der Durchmesser plausibel erscheint (keine großen Sprünge in der Durchmesserabfolge). Die hydraulische Berechnung zeigt, dass die Druckbedingung $p_{\min} \leq p \leq p_{\max}$ an allen Knoten erfüllt wird. Die maximale Fließgeschwindigkeit beträgt $v_{\max} = 1,07\text{m/s}$, die minimale Fließgeschwindigkeit $v_{\min} = 0,10\text{m/s}$ (nicht in Abbildung 6-21 dargestellt). Die Systembeschränkungen (vgl. Kapitel 5.4.3) sind somit für die Lösung erfüllt. Unter Berücksichtigung der Kostenfunktion (Gleichung (43)) und Beachtung Tabelle 6-2 reproduziert sich die Fitness der besten Lösung: $816,1 \cdot 0,026 + 587,5 \cdot 0,0514 + 132,7 \cdot 0,0736 = 61,2$.

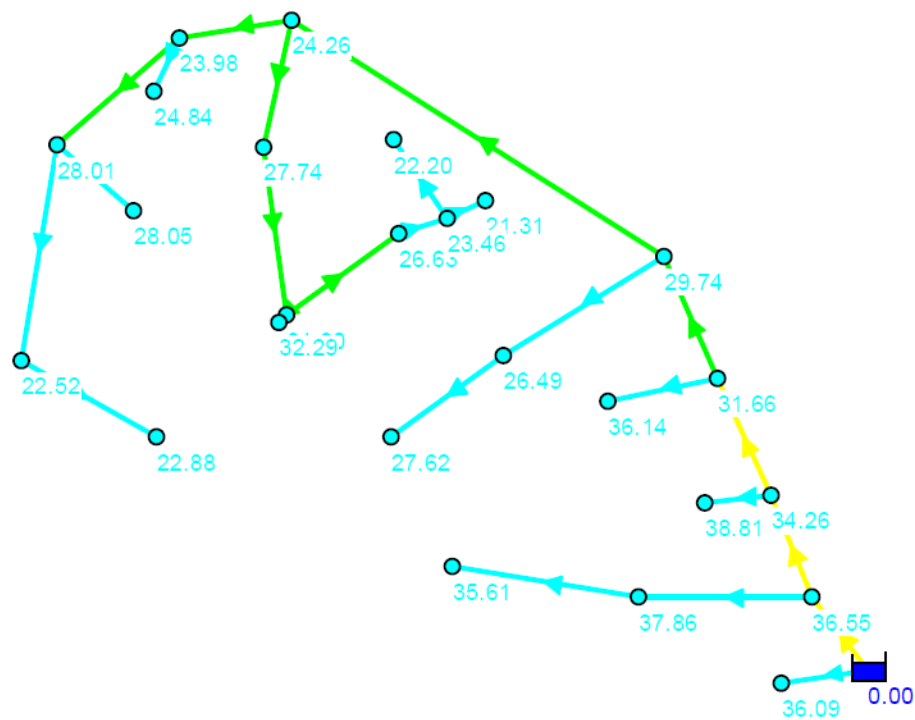
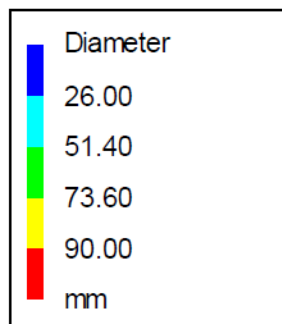
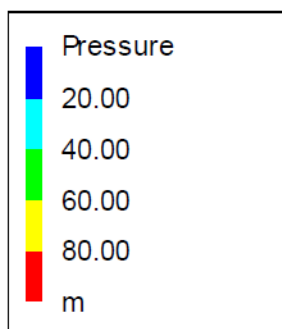


Abbildung 6-21: Ergebnis DN-Optimierung - Verästelnetz der Versorgungskategorie "intermediate acces"

Einführung Wasserversorgungsinfrastruktur - Variante „intermediate access“ - Ringnetz

Wird ein Ringnetz angestrebt, stehen die Knoten, die auf Stichleitungen liegen, nicht als potenzielle Entnahmestellenstandorte zur Verfügung. Stichleitungen und deren Knoten dienen jedoch weiterhin zur Generierung der Anschlusswege vom Abnehmerknoten zum Versorgungsnetz (vgl. Abbildung 5-7) und damit zur Ermittlung der (Fuß-)Weglänge zwischen Abnehmer und einer potenziellen Entnahmestelle. Sie sind in Abbildung 6-22 grau angedeutet. Nach Ermittlung der Entnahmestellenstandorte werden die Stichleitungen und die entsprechenden Knoten aus dem Netz entfernt, um den Lösungsraum während der Topologieoptimierung zu reduzieren. Abbildung 6-22 enthält die berechneten Entnahmestellenstandorte des Ringnetzes sowie dessen um die Stichleitungen reduzierten Stränge. Vor der Optimierung besteht der Graph G aus 37 Maschen, 118 Strängen mit einer Gesamtlänge von 3,3km sowie 82 Knoten.

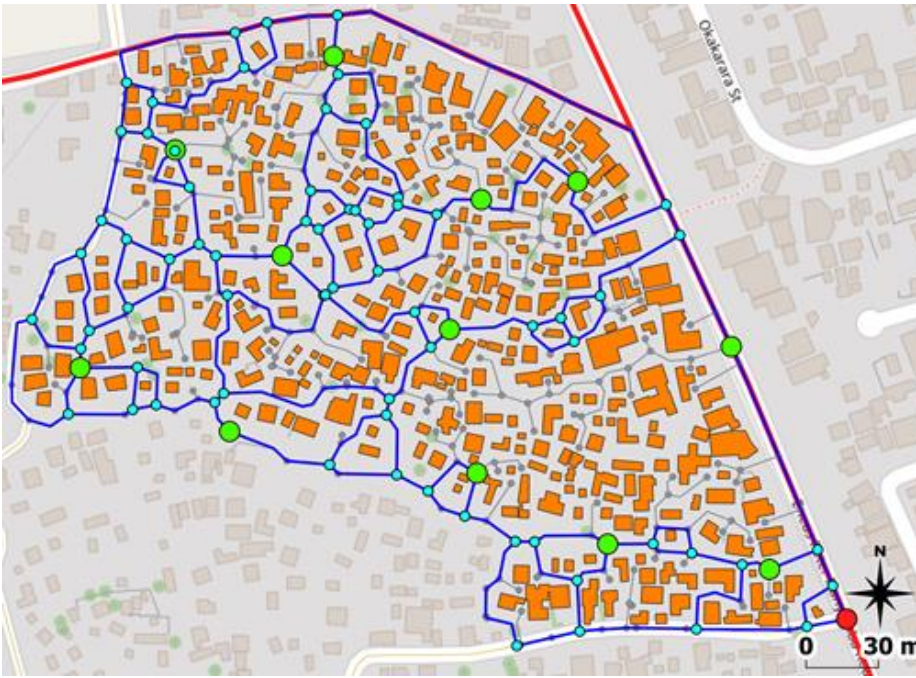
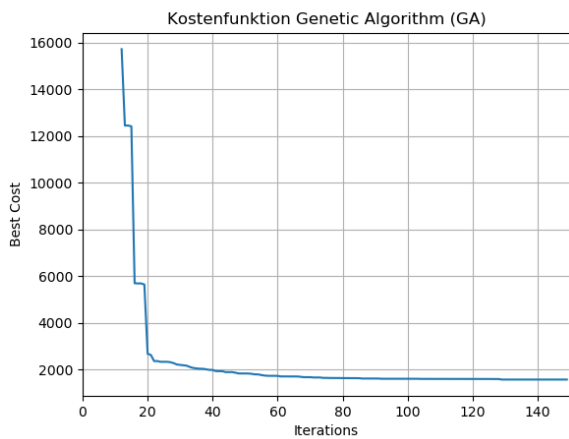


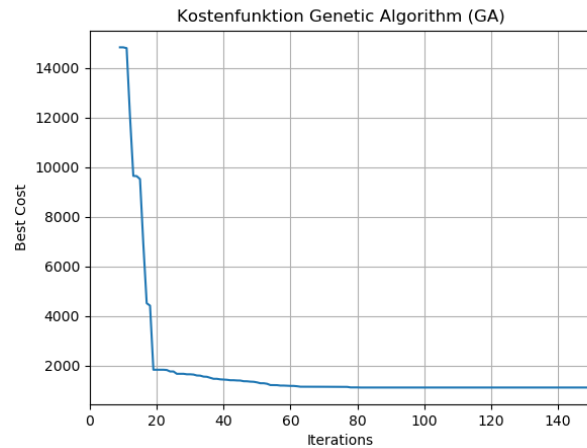
Abbildung 6-22: Ringnetz - Ergebnis des p-Center-Problem zur Erreichung der Versorgungskategorie „intermediate access“ (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Topologieoptimierung

Die Ermittlung eines hinsichtlich der Kantengewichte kostenminimalen Ringnetzes erfolgt über den in Kapitel 5.4.2 beschriebenen GA. Die Verteilung der Berechnungen jeder Iteration auf sämtliche Kerne des Rechners (Multiprocessing) führt dazu, dass die Suche nach einer Lösung über eine große Population erfolgen kann, ohne dass eine unverhältnismäßig lange Berechnungszeit benötigt wird. Generell existieren bzgl. der Parametrierung eines GA zahlreiche Untersuchungen und Ansätze [100], [195]. Die folgenden Ergebnisse basieren auf einer Population = 600 mit 150 Iterationen. Die Mutationswahrscheinlichkeit wird entsprechend [100] mit 1% für binär kodierte GAs gewählt. Die Berechnungszeit liegt bei ca. 20-25min, wobei die Kostenverläufe der Fitnessfunktion in Abbildung 6-23 andeutet, dass auch weniger Iterationen und damit eine kürzere Berechnungszeit zu guten Ergebnissen führt. In Abbildung 6-23 a) ist der Kostenverlauf der besten Lösung für jede Iteration ohne Differenzierung der Trassenart dargestellt. Die Kosten der besten Lösung betragen 1.537 (-). Abbildung 6-23 b) enthält den Kostenverlauf der besten Lösung einer Iteration bei einem Trassenartfaktor $f_{street} = 0,1$. Die Kosten der besten Lösung betragen 1.120 (-). Zwecks Skalierung der y-Achse sind Lösungen mit Kosten > 20.000 nicht dargestellt.



a)



b)

Abbildung 6-23: Kostenverlauf der besten Lösung in Abhängigkeit der Iterationen: Trassenartfaktor $f_{street} = 1$ (a); Trassenartfaktor $f_{street} = 0,5$ (b)

Die Ergebnisse der Ringnetzoptimierung ohne Differenzierung der Trassenart enthält Abbildung 6-24. Das Netz besitzt eine Länge von 1.537m, von denen 317m entlang bestehender Straßen verlaufen. Die Randbedingungen werden erfüllt, sodass der Fitnesswert der besten Lösung keinen Straffaktor enthält. Die Summe der Kantengewichte (Leitungslänge) entspricht somit dem Fitnesswert.

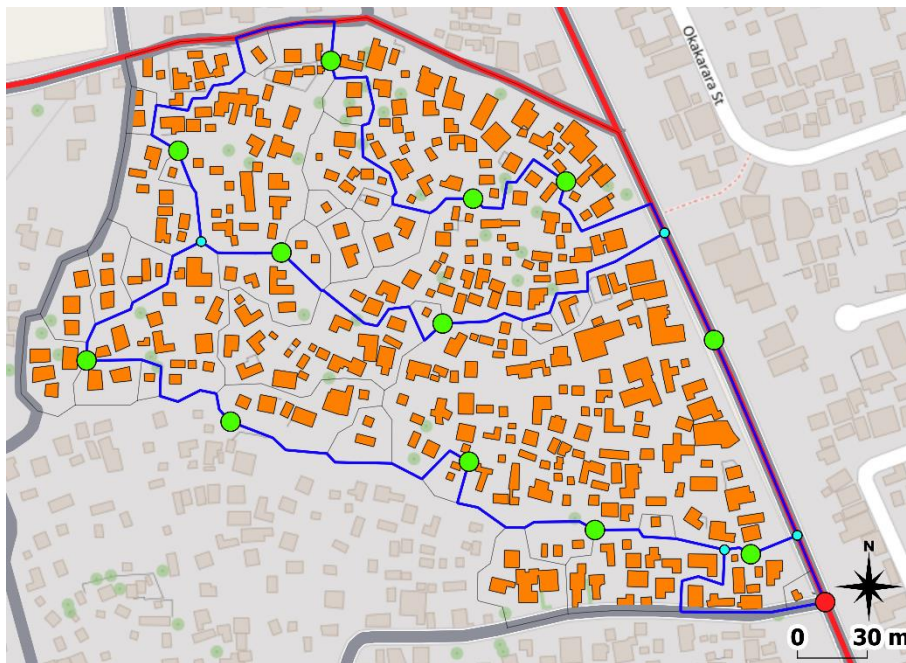


Abbildung 6-24: Ringnetz - Ergebnis Topologieoptimierung mit 12 Entnahmestellen ohne Differenzierung der Trassenart (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Abbildung 6-25 enthält das Ergebnis der Topologieoptimierung mit einem Trassenartfaktor $f_{street} = 0,1$. Das Netz besitzt eine Gesamtlänge von 1.574m, von denen ca. 504m entlang bestehender Straßen verlaufen. Sämtliche Randbedingungen werden erfüllt, sodass die Summe der Kantengewichte 1.120 (= $(1.070 + 0,1 \cdot 504)$) dem Fitnesswert der besten Lösung entspricht (vgl. Abbildung 6-23 b). Die im

Vergleich günstigere Bewertung von Leitungen entlang bestehender Straßen wird insbesondere am nordwestlichen bzw. westlichen Rand der Upgrading-Area deutlich.

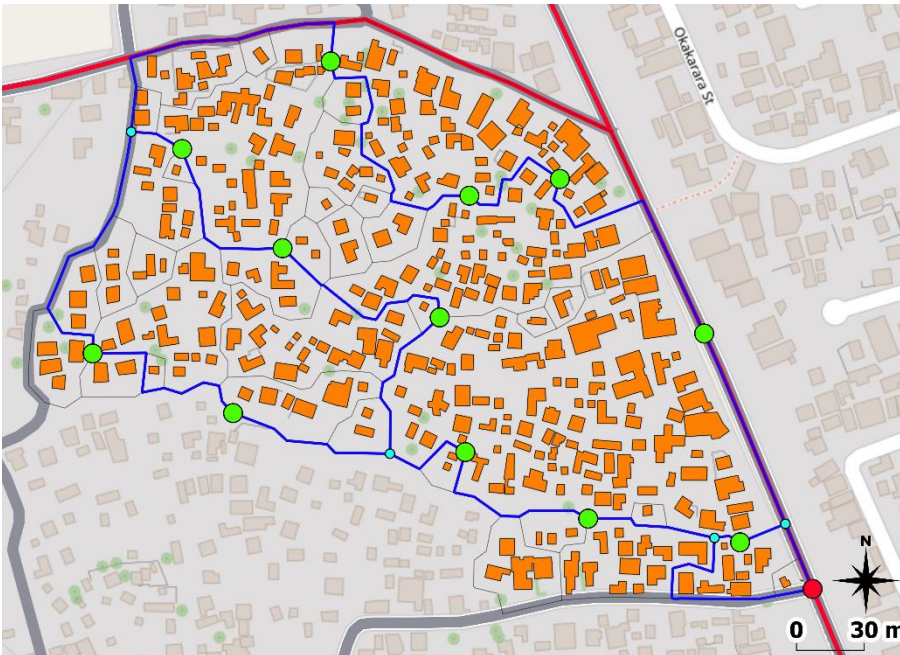


Abbildung 6-25: Ringnetz - Ergebnis Topologieoptimierung mit 12 Entnahmestellen mit Trassenartfaktor $f_{street} = 0,1$ (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Durchmesseroptimierung

Die DN-Optimierung erfolgt beispielhaft für das Ringnetz bei einer Bevorzugung einer Trassierung entlang bestehender Straßen (Abbildung 6-25). Zunächst werden die Hütten und deren Verbräuche dem jeweils nächstliegenden Entnahmeknoten zugeordnet (Abbildung 6-26).

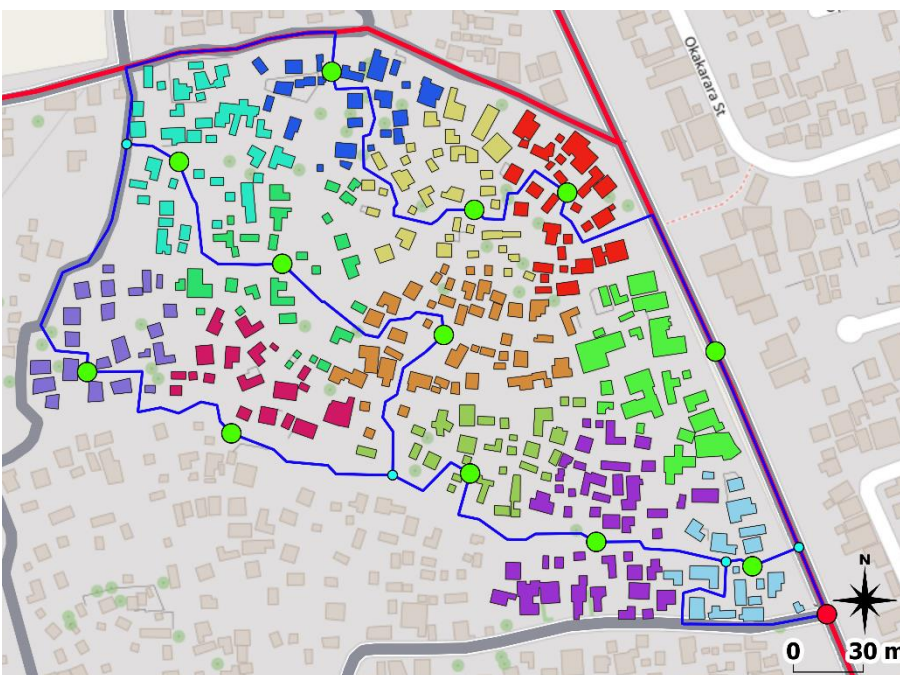


Abbildung 6-26: Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" - Zuweisung der Hütten zu den Entnahmeknoten (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Bzgl. des Verbrauchs, Einspeisedrucks, den Parametern des GA etc. erfolgt die DN-Optimierung analog zum Verästelungsnetz (s.o.). Der GA benötigt für das Netz ohne Redundanz eine Berechnungszeit von ca. 3min, für das Netz mit Redundanz ca. 60min. Die beste Lösung ohne Redundanz besitzt eine Fitness = 58,4 (-) (Abbildung 6-27 a)), mit Redundanz beträgt die Fitness = 94,2 (-) (Abbildung 6-27 b)).

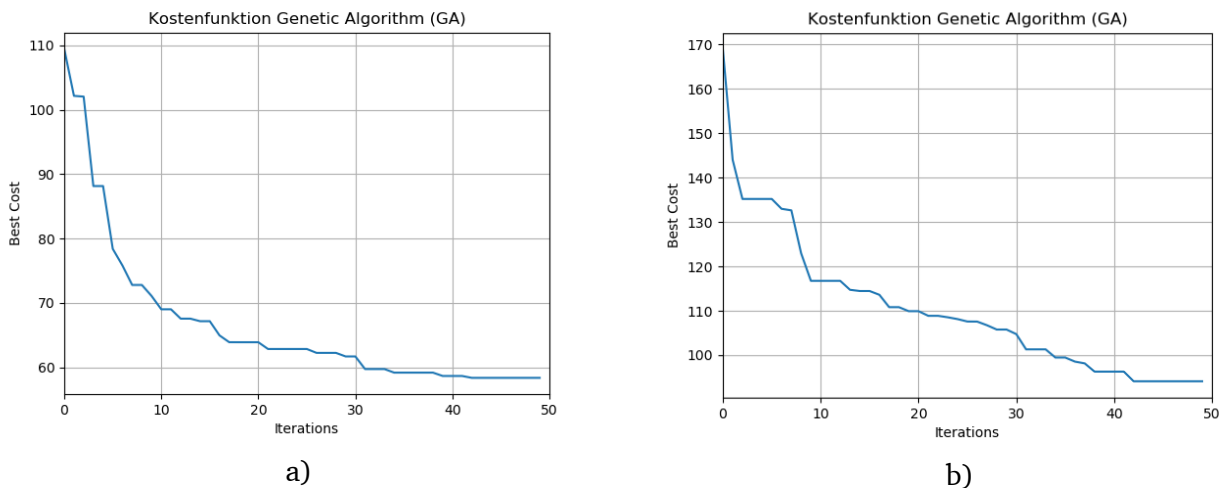


Abbildung 6-27: Kostenverlauf der besten Lösung je Iteration - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access": ohne Redundanz (a); mit Redundanz (b)

Eine Übersicht der ermittelten Rohrtypen für jede Variante sowie deren Leitungslängen enthält Tabelle 6-3.

Tabelle 6-3: Windhoek - Ermittelte Rohrtypen und Leitungslängen für ein Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"

Rohrtyp	Innendurchmesser (mm)	Länge (m) (ohne Redundanz)	Länge (m) (mit Redundanz)
32 PE100 SDR11	26,0	915,7	234,2
63 PE100 SDR11	51,4	624,2	561,2
90 PE100 SDR11	73,6	33,7	659,4
110 PE100 SDR11	90,0	-	118,8

Die hydraulische Überprüfung der Optimierungsergebnisse ohne hydraulische Redundanz enthält Abbildung 6-28. Die Leitungen sind entsprechend ihres Durchmessers eingefärbt, die Fließrichtung ist durch Pfeile dargestellt, sowie die Leitungs-ID am Strang ausgegeben. An den Knoten sind die Drücke farblich in mWS angegeben. Die Abfolge der Durchmesser in Fließrichtung ist abnehmend ohne Zwischengrößen zu überspringen. Weiter ist zu erkennen, dass die Einspeisung in das Netz hauptsächlich über die rechte der beiden vom Reservoir abgehenden Leitungen erfolgt. Die hydraulische Berechnung zeigt, dass die Druckbedingung $p_{\min} \leq p \leq p_{\max}$ an allen Knoten erfüllt wird. Die maximale Fließgeschwindigkeit beträgt $v_{\max} = 1,18\text{m/s}$ (in Strang mit Leitung-ID = 4), die minimale Fließgeschwindigkeit $v_{\min} = 0,19\text{m/s}$ (in Strang mit Leitung-ID = 0). Die Systembeschränkungen sind somit erfüllt. Unter Berücksichtigung der Kostenfunktion (Gleichung (43)) und Beachtung von Tabelle

6-3 reproduziert sich die Fitness der besten Lösung: $915,7 \cdot 0,026 + 624,2 \cdot 0,0514 + 33,7 \cdot 0,0736 = 58,4 (-)$.

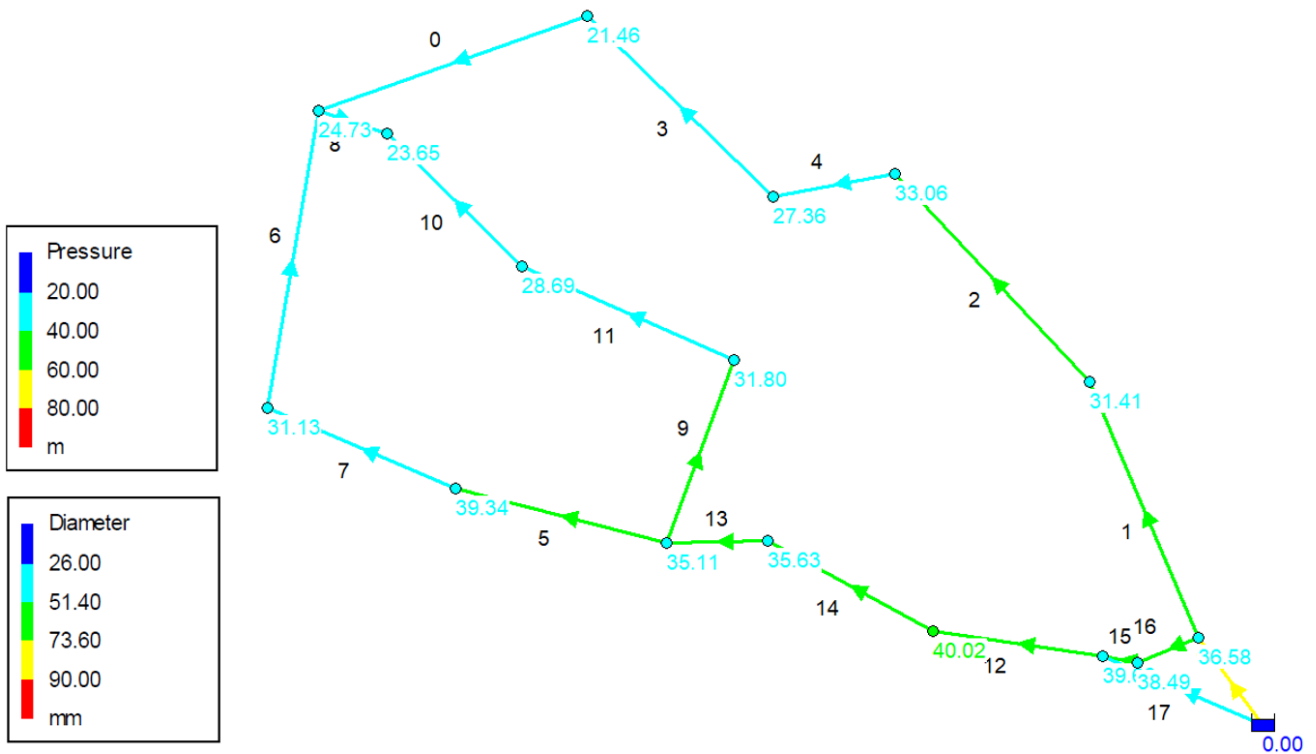


Abbildung 6-28: Ergebnis DN-Optimierung - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" ohne Redundanz

Das Ergebnis der DN-Optimierung für das identische Netz mit Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz enthält Abbildung 6-29. Es wird deutlich, dass im Vergleich größere Durchmesser benötigt werden, um die Systembeschränkungen zu erfüllen. Zur besseren Verständlichkeit der Werte in Tabelle 6-4 sind zusätzlich die Knoten-IDs eingeblendet. Die Drücke in jeder Spalte stellen sich ein, wenn der Strang mit der in der ersten Zeile angegebenen Leitungs-ID außer Betrieb genommen wird. Die Untersuchung dieser Ausfallszenarien zeigt, dass der geringste Druck im Falle eines Ausfalls von Strang mit Leitungs-ID 1 an Knoten 3223 auftritt und 20,3mWs beträgt. Damit wird der Mindestdruck von 20mWs knapp erfüllt. Unter Berücksichtigung der Kostenfunktion (Gleichung (43)) und Beachtung von Tabelle 6-3 reproduziert sich die Fitness der besten Lösung: $234,2 \cdot 0,026 + 561,2 \cdot 0,0514 + 659,4 \cdot 0,0736 + 118,8 \cdot 0,090 = 94,2 (-)$.

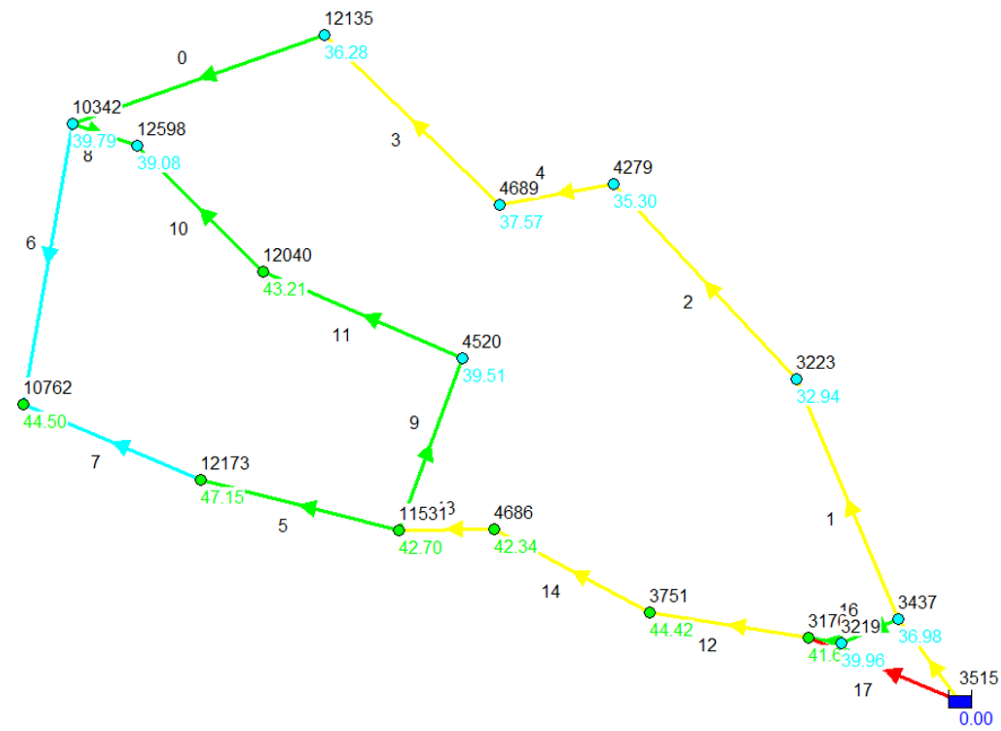
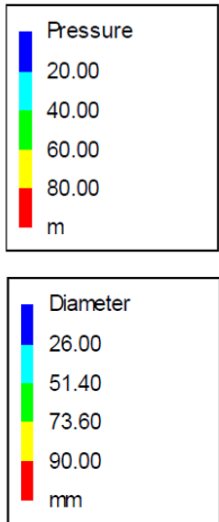


Abbildung 6-29: Ergebnis DN-Optimierung - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" mit Redundanz

Tabelle 6-4: Windhoek - Berechnungsergebnisse Druck unter Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz

Leitungs-ID außer Betrieb	-	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Knoten-ID	geod. Höhe (m)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	
3176	1588,3	41,6	41,6	41,4	41,5	41,5	41,5	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,6	41,7	41,7	41,7	41,6	41,5	40,0	41,0	
3219	1589,9	40,0	39,9	39,8	39,9	39,9	39,9	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	39,9	38,7	39,0	
3223	1596,6	32,9	33,2	20,3	33,4	33,2	33,3	32,9	33,0	32,9	33,1	32,6	32,9	32,8	31,5	32,2	32,0	32,9	33,0	32,4	31,5
3437	1592,9	37,0	37,0	37,1	37,1	37,0	37,1	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	36,8	36,9	36,9	37,0	37,0	36,5	35,5
3751	1585,2	44,4	44,2	43,5	43,8	44,1	43,9	44,5	44,4	44,5	44,3	44,6	44,4	44,5	26,8	44,8	44,8	44,4	44,4	42,9	43,8
4279	1593,9	35,3	35,7	22,9	27,4	35,8	36,0	35,1	35,4	35,2	35,5	34,6	35,2	35,0	32,5	33,7	33,3	35,3	35,3	34,6	34,0
4520	1589,3	39,5	38,5	34,5	36,0	37,9	37,0	39,3	39,6	39,4	38,9	36,2	39,6	40,0	23,4	31,7	29,0	39,5	39,5	38,3	38,6
4686	1587,0	42,3	42,0	40,5	41,1	41,8	41,4	42,5	42,3	42,4	42,1	42,7	42,4	42,5	25,0	42,9	31,0	42,3	42,3	40,9	41,6
4689	1591,6	37,6	38,0	25,3	29,7	38,2	32,3	37,4	37,6	37,5	37,9	36,7	37,5	37,2	34,1	35,7	35,2	37,6	37,6	36,9	36,3
10342	1588,9	39,8	38,1	30,2	33,4	37,1	35,4	39,2	39,9	39,6	40,4	37,3	39,6	38,8	28,3	33,9	32,1	39,8	39,8	38,7	38,7
10762	1583,1	44,5	43,4	36,6	39,2	42,6	41,1	28,6	41,7	39,8	44,6	43,1	44,4	44,1	28,8	37,1	34,5	44,5	44,5	43,2	43,6
11531	1586,5	42,7	42,3	40,5	41,2	42,0	41,6	42,9	42,7	42,8	42,4	43,1	42,8	42,9	25,5	34,3	31,5	42,7	42,7	41,3	42,0
12040	1585,5	43,2	41,8	35,6	38,0	40,9	39,5	42,8	43,3	43,0	42,3	40,2	43,4	42,1	28,8	36,1	33,7	43,2	43,2	42,1	42,2
12135	1592,8	36,3	36,8	24,3	28,6	33,1	31,1	36,0	36,4	36,2	36,6	35,2	36,2	35,8	31,8	33,9	33,2	36,3	36,3	35,5	35,0
12173	1581,9	47,2	46,7	44,7	45,5	46,4	45,9	27,6	47,0	47,3	46,9	47,5	47,2	47,4	30,1	38,8	36,0	47,2	47,1	45,7	46,4
12598	1589,6	39,1	37,5	29,8	32,9	36,4	34,7	38,6	39,2	38,9	38,0	36,4	38,9	38,0	26,7	32,8	30,8	39,1	39,1	38,0	38,0
Res 3515	1630,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 6-5 enthält die Fließgeschwindigkeiten der verschiedenen Szenarien. Die außer Betrieb genommenen Leitungen in jedem Szenario (ein Szenario entspricht einer Spalte der Fließgeschwindigkeit) sind anhand des fehlenden Durchflusswertes zu erkennen (als „-“ ausgewiesen). Die minimale Fließgeschwindigkeit beträgt 0,01m/s und erfüllt damit die definierte Mindestfließgeschwindigkeit $\geq 0,005m/s$. Die maximale Fließgeschwindigkeit beträgt 1,16m/s und erfüllt damit ebenfalls die Anforderungen ($\leq 2m/s$). Die Systembeschränkungen sind damit erfüllt.

Tabelle 6-5: Windhoek – Berechnungsergebnisse Fließgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz

Pipe ID	Innendurchm. mm	Fließgeschwindigkeit																			
		m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
0	51,4	0,23	-	0,59	0,40	0,11	0,26	0,32	0,20	0,26	0,09	0,54	0,26	0,37	1,15	0,82	0,94	0,23	0,24	0,33	0,15
1	73,6	0,40	0,29	-	0,09	0,24	0,16	0,44	0,39	0,42	0,33	0,55	0,41	0,47	0,85	0,69	0,75	0,40	0,40	0,45	0,36
2	73,6	0,31	0,20	0,09	-	0,14	0,07	0,35	0,29	0,32	0,24	0,46	0,32	0,38	0,76	0,59	0,65	0,31	0,31	0,35	0,27
3	73,6	0,16	0,05	0,24	0,14	-	0,07	0,21	0,15	0,18	0,10	0,32	0,18	0,24	0,61	0,45	0,51	0,16	0,17	0,21	0,12
4	73,6	0,23	0,12	0,16	0,07	0,07	-	0,28	0,22	0,25	0,17	0,39	0,25	0,31	0,68	0,52	0,58	0,24	0,24	0,28	0,20
5	51,4	0,22	0,25	0,35	0,32	0,26	0,29	-	0,30	0,13	0,21	0,28	0,23	0,25	0,13	0,18	0,17	0,22	0,22	0,22	0,23
6	26,0	0,28	0,20	0,21	0,07	0,14	0,04	1,16	-	0,67	0,34	0,08	0,27	0,20	0,64	0,45	0,51	0,28	0,28	0,30	0,26
7	26,0	0,38	0,47	0,87	0,74	0,53	0,62	0,49	0,67	-	0,32	0,59	0,40	0,47	0,02	0,22	0,16	0,38	0,38	0,36	0,41
8	51,4	0,15	0,05	0,54	0,38	0,15	0,27	0,02	0,20	0,09	-	0,52	0,19	0,32	0,98	0,70	0,81	0,15	0,16	0,25	0,08
9	51,4	0,37	0,57	1,06	0,90	0,67	0,79	0,50	0,32	0,43	0,52	-	0,33	0,20	0,46	0,18	0,29	0,37	0,36	0,27	0,44
10	51,4	0,03	0,24	0,73	0,57	0,33	0,45	0,17	0,01	0,09	0,19	0,33	-	0,14	0,80	0,52	0,62	0,03	0,02	0,06	0,11
11	51,4	0,17	0,37	0,86	0,70	0,47	0,59	0,30	0,12	0,23	0,32	0,20	0,14	-	0,66	0,38	0,48	0,17	0,16	0,07	0,24
12	73,6	0,45	0,56	0,85	0,76	0,61	0,68	0,41	0,46	0,43	0,52	0,30	0,44	0,38	-	0,16	0,10	0,45	0,44	0,40	0,49
13	73,6	0,29	0,40	0,69	0,59	0,45	0,52	0,24	0,30	0,27	0,36	0,13	0,27	0,22	0,16	-	0,06	0,29	0,28	0,24	0,33
14	73,6	0,35	0,46	0,75	0,65	0,51	0,58	0,30	0,36	0,33	0,41	0,19	0,33	0,28	0,10	0,06	-	0,35	0,34	0,30	0,39
15	51,4	0,01	0,14	0,41	0,33	0,20	0,27	0,06	0,02	0,02	0,09	0,23	0,02	0,11	0,53	0,39	0,44	-	0,15	0,82	0,89
16	51,4	0,15	0,29	0,55	0,48	0,35	0,42	0,08	0,17	0,12	0,24	0,09	0,13	0,04	0,38	0,24	0,30	0,15	-	0,97	0,74
17	90,0	0,30	0,33	0,44	0,40	0,35	0,37	0,29	0,30	0,30	0,32	0,27	0,30	0,29	0,17	0,23	0,21	0,30	0,35	-	0,62
18	73,6	0,47	0,43	0,27	0,33	0,41	0,37	0,48	0,47	0,48	0,45	0,51	0,48	0,49	0,66	0,57	0,60	0,47	0,40	0,92	-

Exkurs: Verwendung des kostenpflichtigen Gurobi-Solvers

Die Verwendung des kostenpflichtigen, leistungsstärkeren Gurobi-Solvers [170] ermöglicht die Betrachtung größerer Upgrading-Areas, die tendenziell zu einem größeren Lösungsraum führen (mehr Hütten, mehr Knoten, mehr potenzielle Versorgungsleitungstrassen). Abbildung 6-30 enthält eine Upgrading-Area mit 731 Hütten auf einer Fläche von ca. 0,15km². Im südwestlichen Bereich ist beispielhaft eine Barriere (rot) ausgewiesen, innerhalb derer zukünftig keine Leitungen verlaufen sollen.

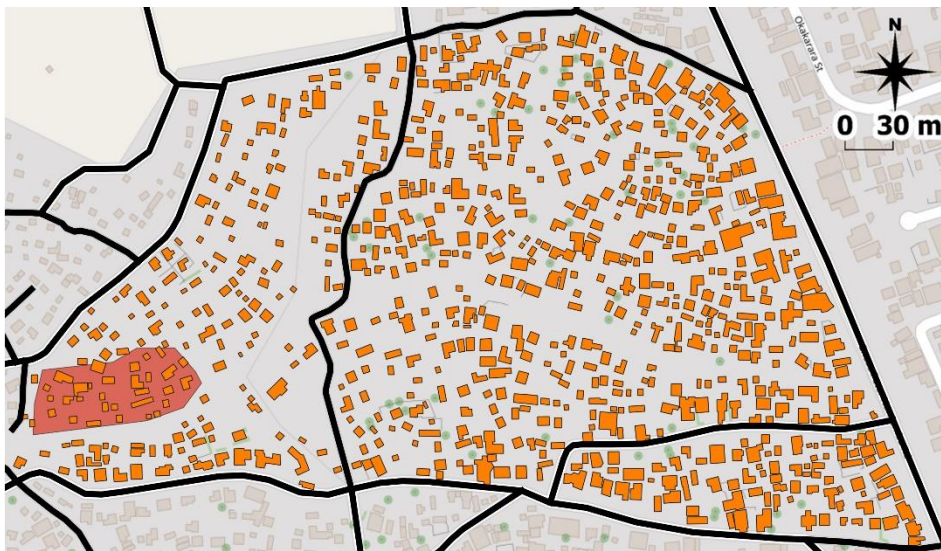


Abbildung 6-30: Exkurs größeres Betrachtungsgebiet – Überblick (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Die Ableitung der potenziellen Versorgungsleitungstrassen aus dem Maximalnetz ergibt, dass der Lösungsraum zur Ermittlung der Anzahl und Position der Entnahmestellen im Netz aus 731 Abnehmern (=Hütten), 686 Knoten und 823 potenziellen Versorgungsleitungstrassen besteht. Mit dem gewählten Open-Source-Solver konnte hierfür keine Lösung gefunden werden. Aus diesem Grund wurde der Code entsprechend erweitert, sodass zwischen verschiedenen Solvern, d.h. auch kostenpflichtigen, wie dem hier genutzten Gurobi-Solver, gewählt werden kann. Soll die maximale Entfernung zu einer

Entnahmestelle z.B. 100m (d.h. 200m für Hin- und Rückweg) betragen (Versorgungskategorie „basic-access“), werden nach Lösung des Location-Set-Covering-Problem durch den Gurobi-Solver 12 Entnahmestellen benötigt. Die anschließende Lokalisation der Entnahmestellen im Netz (Abbildung 6-31) durch Lösung des p-Center-Problem ergibt, dass der am entferntesten wohnende Abnehmer einen Fußweg von 97,7m bis zur nächsten Entnahmestelle zurücklegen muss.



Abbildung 6-31: Exkurs größeres Betrachtungsgebiet - Lokalisierung der Entnahmestellen (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Soll die Erschließung der Upgrading-Area hauptsächlich über das bestehende Straßennetz erfolgen wird der Gewichtungsfaktor f_{street} entsprechend klein gewählt. In der Abbildung 6-32 ist das Ergebnis bei $f_{street} = 0,1$ (-) dargestellt. Das Leitungsnetz umfasst eine Länge von insgesamt 2.116m, wovon 1.598m entlang bestehender Straßen verlaufen. Es wird deutlich, dass nur relativ kurze Leitungselemente zur Anbindung der Standpipes an das Netz abseits bestehender Straßen verlaufen.



Abbildung 6-32: Exkurs größeres Betrachtungsgebiet – Versorgungsnetz bei Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

6.3 Fallbeispiel Lusaka (Sambia)

Auch Lusaka, die Hauptstadt Sambias, steht vor immensen Herausforderungen in Bezug auf die Bereitstellung von Infrastrukturen und Dienstleistungen in den stetig wachsenden informellen Siedlungen. Nach einer Verdreifachung der in informellen Siedlungen lebenden Bevölkerung in den letzten 20 Jahren leben dort heute ca. 1,4 Millionen Menschen, d.h. annähernd 62% der gesamten Stadtbevölkerung [10]. Die Stadt verfügt über relativ große informelle Siedlungsbereiche, die sich zudem durch eine hohe Bevölkerungsdichte auszeichnen [10]. Die Lage der gewählten informellen Siedlung im Stadtgebiet ist in Abbildung 6-33 cyan hervorgehoben. Sie dient zur Validierung der Methodik unter Berücksichtigung der Zielsetzungen in Kapitel 6.1. Die Ausführungen konzentrieren sich auf die Ergebnisse, detailliertere Beschreibungen und Verweise zu jedem Schritt enthält Kapitel 6.2.

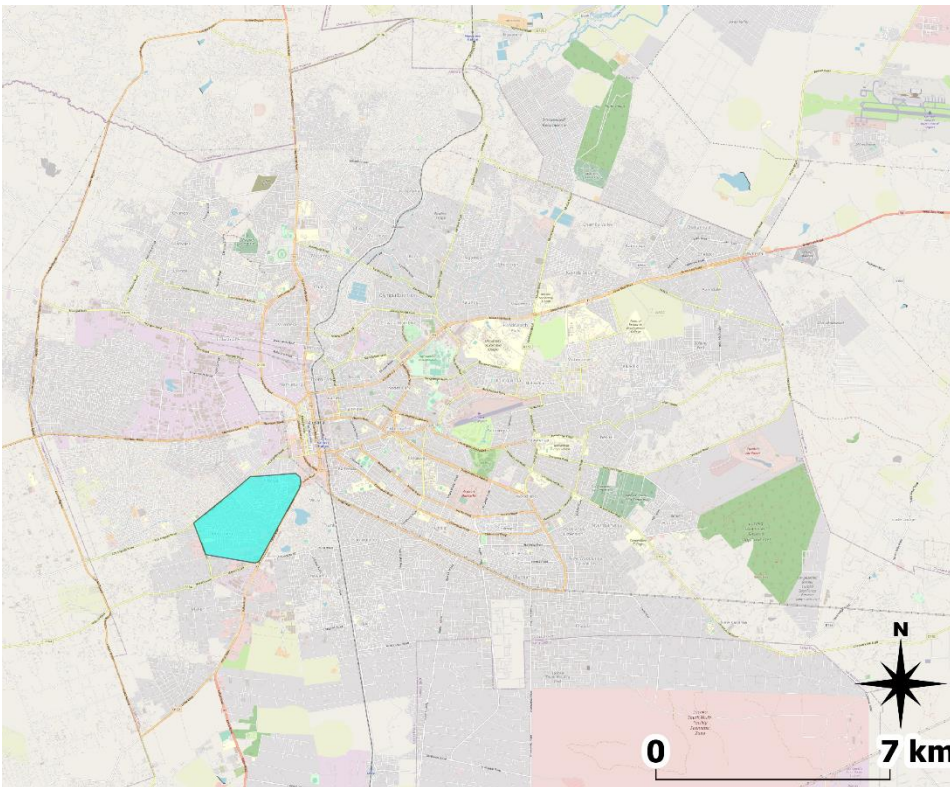


Abbildung 6-33: Stadtgebiet Lusaka und gewählter informeller Siedlungsbereich (Quelle: [193])

6.3.1 Informal Settlement Level

Das Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 6-34a) dargestellt. Es umfasst eine Fläche von ca. 5,84 km² (cyan) mit ca. 14.700 Hütten. Die Bebauung ist orange abgebildet, existierende Straßen bzw. Wege, abweichend zu Tabelle 6-1, zwecks deutlicherem Kontrast zum cyan dargestellten Betrachtungsgebiet, schwarz dargestellt. Am westlichen Rand des Gebiets befinden sich Gewerbeflächen, die in Form von Barrieren (magenta) von der Betrachtung ausgeschlossen sind. Auf eine weitere Differenzierung der Gebäudenutzung innerhalb des Untersuchungsgebiets wird verzichtet. Bei vorhandener Datengrundlage ist die Möglichkeit einer Differenzierung der Gebäudenutzung und Wasserbedarfswerte über die QGIS-Anbindung der Methodik gegeben. Das Gebiet besteht aus Teilflächen der Townships Chibolya und John Laing. Beide Townships zählen zu den ärmsten im Stadtgebiet ohne Zugang zu einer gesicherten Wasserversorgung [196]. Die Verschneidung der Einwohnerzahl-Rasterdaten [187] mit der Gebietsfläche ergibt, dass im Untersuchungsgebiet ca. 50.000 Einwohner leben. Andere Schätzungen

gehen allein in John Laing von ca. 150.000 Einwohnern aus [196]. An diesem Beispiel wird die Problematik frei verfügbarer Daten deutlich. In der Praxis sind genauere Erhebungen aus diesem Grund unumgänglich. In Anlehnung an das Vorgehen in Kapitel 6.2 erfolgt die Aufteilung der Einwohnerzahl auf die einzelnen Hütten anteilig nach Größe der Grundfläche einer Hütte. In Abbildung 6-34b) sind die genutzten Höhendaten als 30x30m Raster dargestellt und entsprechend ihrer Höhenwerte eingefärbt. Der maximale geodätische Höhenunterschied im Betrachtungsgebiet beträgt 32m (min. 1.265m a.s.l., max. 1.297m a.s.l.), sodass er nicht als zusätzliche Randbedingung während der Druckzoneneinteilung im district level berücksichtigt werden muss.

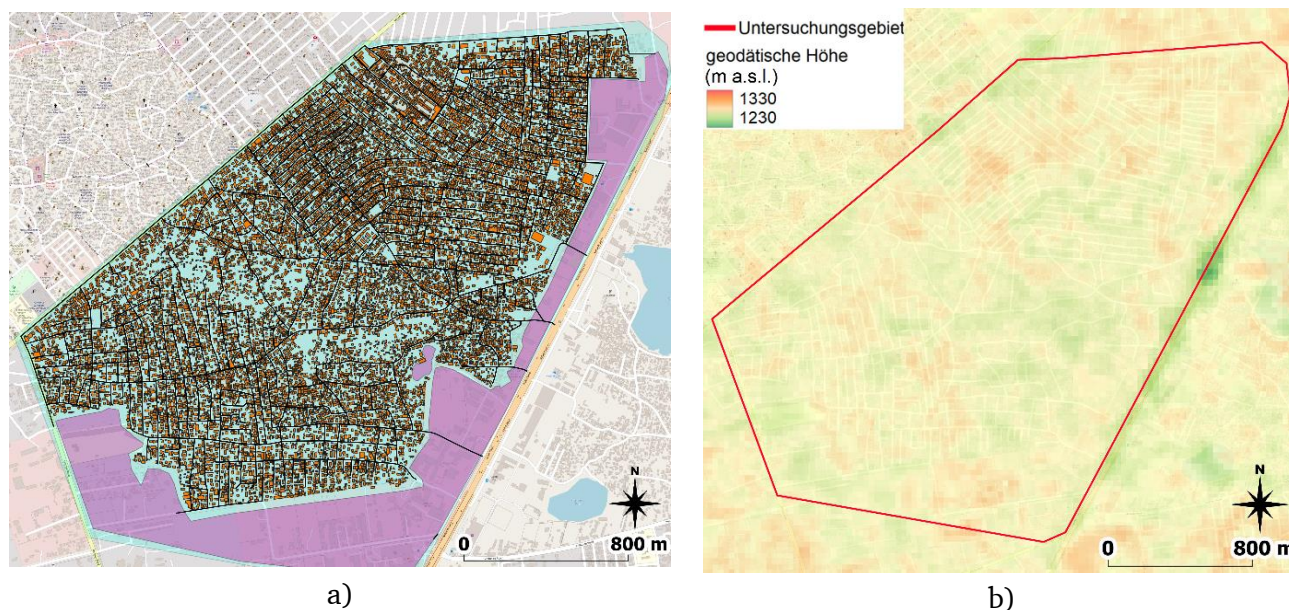


Abbildung 6-34: Lusaka: Untersuchungsgebiet mit Bebauung und Barrieren (a), geodätische Höhen im Untersuchungsgebiet (b) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193], Quelle Höhendaten: [188])

Auf Basis der in Abbildung 6-34 a) dargestellten Elemente wird das Maximalnetz erstellt, woraus unter Berücksichtigung der in Kapitel 6.1 definierten Mindestbreite potenzielle Hauptleitungs- sowie Versorgungsleitungstrassen abgeleitet werden. Die potenziellen Versorgungsleitungstrassen enthält Abbildung 6-35. Die Detailansicht zeigt, dass neben bestehenden Straßen und Wegen selbst in einem relativ dicht besiedelten Gebiet weitere Trassierungsmöglichkeiten existieren. Die Darstellung von isolierten, nicht mit dem restlichen Netz verbundenen Trassenoptionen, bietet darüber hinaus die Möglichkeit, diese in den Entscheidungsprozess einzubeziehen, falls punktuelle Unterschreitungen der Mindestbreite zugelassen oder vereinzelte Umsiedlungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden.

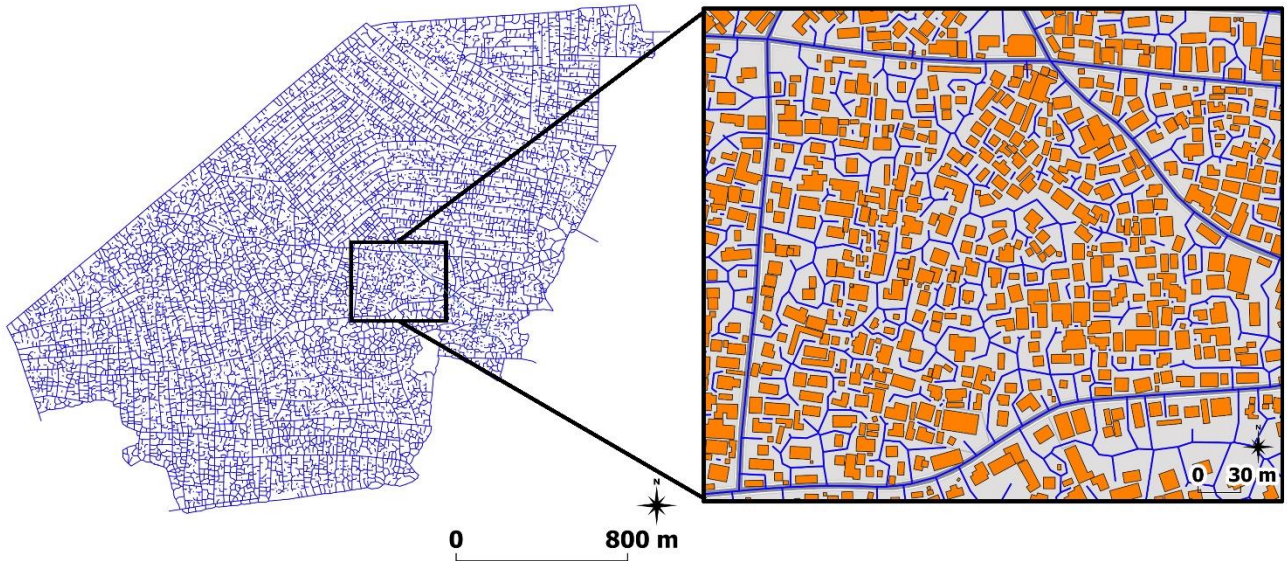


Abbildung 6-35: Potenzielle Versorgungsleitungstrassen und Detailansicht (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

6.3.2 District level

Die Basisgebiete ergeben sich aus dem Verlauf der potenziellen Hauptleitungstrassen. Unter Berücksichtigung des gewählten Mindestabstands von 10m verfügt das Betrachtungsgebiet über 551 Basisgebiete auf einer Fläche von 4,02km² (Abbildung 6-36). Infolge der hohen Bebauungsdichte verlaufen die Haupttrassen im Wesentlichen entlang der bereits existierenden Straßen und Wege (schwarz hervorgehoben). Darüber hinaus wurden hauptsächlich im mittleren Bereich des Gebiets zusätzliche potenzielle Haupttrassen identifiziert (grau dargestellt).

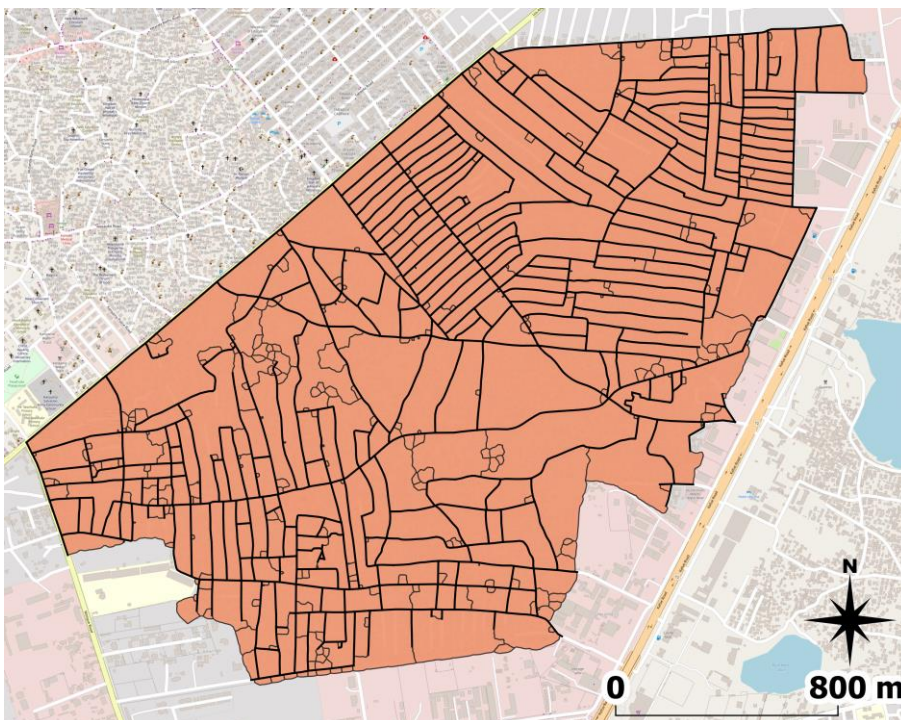


Abbildung 6-36: Lusaka district level – Basisgebiete (Quelle Karte: [193])

Für das gewählte Untersuchungsgebiet besteht das Ziel auf der Ebene des district level in der Einteilung des Gebiets in einzelne Upgrading-Areas (vgl. Kapitel 6.1), d.h. in diesem Beispiel entspricht ein Distrikt einer Upgrading-Area. Je nach gewünschter Größe einer Upgrading-Area muss eine entsprechende Distriktanzahl im rekursiven Partitionierungsalgorithmus gewählt werden. Dabei gilt es zu beachten, dass bei Verwendung der Methodik auf der Ebene des building level die Anzahl der Hütten und Knoten einen limitierenden Faktor darstellen, da sie den Lösungsraum des Location-Set-Covering-Problem und des p-Center-Problem bestimmen. Aus diesem Grund wird das Gesamtgebiet beispielhaft in 40 Distrikte unterteilt, d.h. es entstehen in diesem Fall 40 Upgrading-Areas. Aus der Gesamtfläche und der Distriktanzahl resultiert rechnerisch eine durchschnittliche Distriktfläche von 10,1ha (Balancekriterium). Die Zulässigkeitsbedingung der maximalen Höhendifferenz wird vernachlässigt, da der maximale Höhenunterschied $\Delta h < 50\text{m}$ beträgt.

Die Gebietseinteilung mit Hilfe des rekursiven Partitionierungsalgorithmus erfolgt anhand der implementierten Kompaktheitsmaße. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt analog zu Kapitel 6.2.2 anhand der Länge der inneren Distriktgrenzen. Hier zeigt das Kompaktheitsmaß nach Polsby-Popper das beste Ergebnis bei einer Länge von 30,7km der inneren Distriktgrenzen. Das Ergebnis ist in Abbildung 6-37 (links) dargestellt. Es wird deutlich, dass aufgrund der relativ großen und teilweise länglichen Basisgebiete die Einteilung in einigen Bereichen unter optischen Gesichtspunkten weniger kompakt erscheint. Dies ist auf die Einteilung der Basisgebiete anhand ihres Schwerpunktes zurückzuführen (vgl. Kapitel 5.3.2 und Kapitel 6.2.2). Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, kann dies auch dazu führen, dass das Kontiguitätskriterium weniger Distrikte verletzt wird, wenn kleinere Basisgebiete von relativ großen Basisgebieten umgeben sind. Eine Verletzung des Kontiguitätskriteriums führt tendenziell zu einer schlechteren Kompaktheit und damit schlechteren Bewertung einer Lösung. Ein solches Beispiel ist im nördlichen, orangenen Distrikt zu erkennen, bei dem ein kleines Basisgebiet dem blauen Distrikt zugeordnet wurde. Weiter kann die Separierung des Gebiets entlang von Trenngeraden in den Randbereichen zur Verletzung der Kontiguität führen, wenn das Betrachtungsgebiet Ausläufer besitzt. Dieser Fall tritt im nordöstlichen Bereich bzw. am braun eingefärbten Distrikt auf. Verletzungen der Kontiguität werden durch die interne Verbindung der Basisgebiet-Polygone mit ihren entsprechenden Schwerpunkten über eine gemeinsame ID im Rahmen einer automatisierten Prüfung identifiziert und ausgegeben, sodass der Nutzer über die GIS-Anbindung reagieren kann. Zwecks Erfüllung der Kontiguität und der optischen Kompaktheit werden nachträgliche, manuelle Anpassungen der automatisierten Einteilung in geringem Umfang (3,3% der Fläche) durchgeführt.

Die finale Einteilung des Untersuchungsgebiets in 40 Distrikte bzw. in 40 Upgrading-Areas enthält Abbildung 6-37 (rechts). Die Teilung des braun eingefärbten nordöstlichen Gebiets wird akzeptiert, da beide Hälften groß genug erscheinen, um jeweils eigene Upgrading-Maßnahmen durchzuführen. Bei einer solchen Entscheidung gilt es zu bedenken, dass mit zunehmender manueller Anpassung die Auswirkungen auf das Balancekriterium verstärkt werden. In diesem Beispiel überschreitet die größte Fläche (mittige graue Upgrading-Area, 13,5ha) nach der manuellen Anpassung die zulässige Abweichung (20%) vom Balancekriterium um 13%, während die kleinste Fläche (nord-östliche hellblaue Upgrading-Area, 7,1ha) die zulässige Abweichung um 10% unterschreitet. In welchem Umfang eine Verletzung des Balancekriteriums durch nachträgliche Anpassungen in der Praxis zulässig ist, muss individuell zwischen den Projektbeteiligten abgestimmt werden.

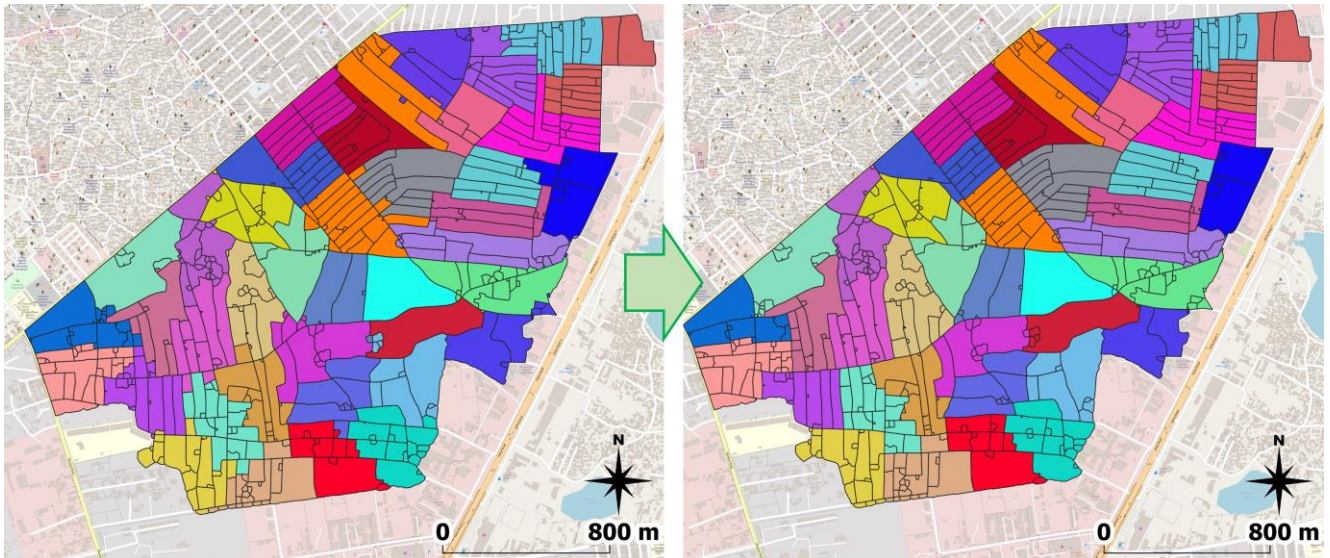


Abbildung 6-37: Ergebnis Gebietseinteilung nach Polsby-Popper (links), finale Gebietseinteilung nach manueller Anpassung (rechts) (Quelle Karte: [193])

6.3.3 Building level

Für eine Upgrading-Area mit 312 Hütten auf einer Fläche von 8,4ha wird im Folgenden ein Vorschlag für die Einführung einer leitungsgebundenen Wasserversorgungsinfrastruktur entwickelt. Die Lage der Upgrading-Area im Betrachtungsgebiet (cyan) sowie eine Detailansicht enthält Abbildung 6-38. Entsprechend der Datenverschneidung in Kapitel 6.3.1 leben in der Upgrading-Area ca. 1.600 Menschen.

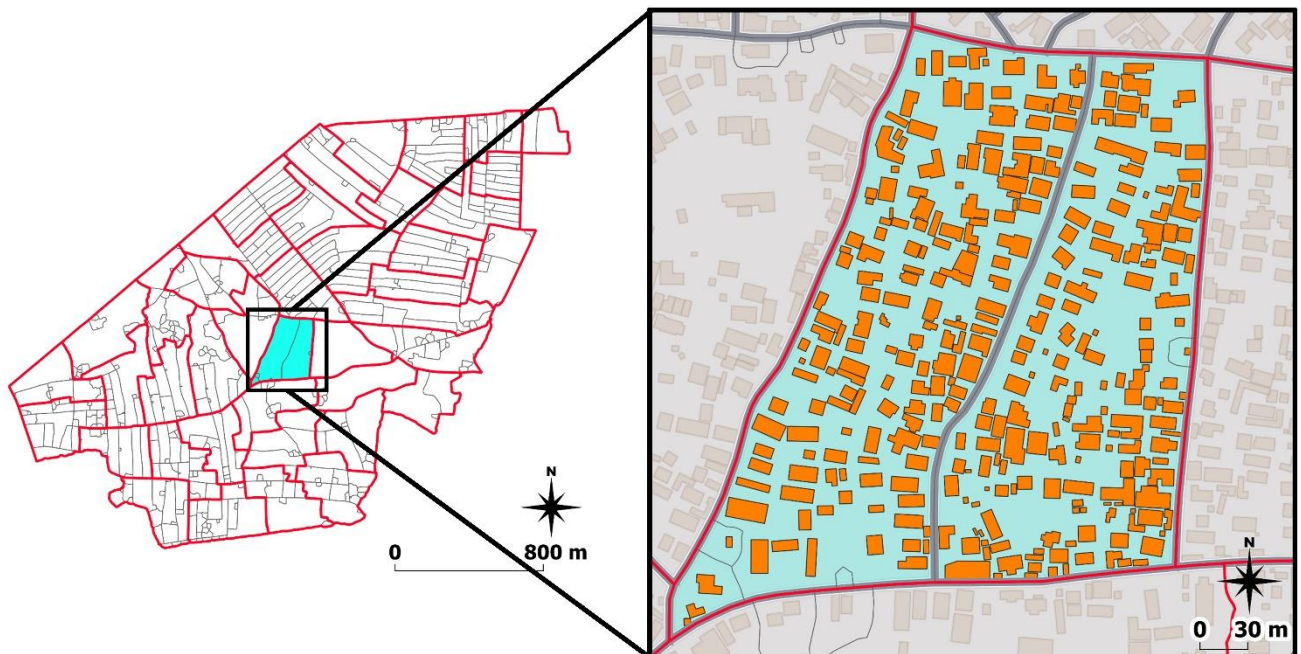


Abbildung 6-38: Lage der Upgrading-Area im Betrachtungsgebiet und Detailansicht (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Das maximale Versorgungsnetz innerhalb der Upgrading-Area enthält Abbildung 6-39 (links). Die Darstellung enthält auch nicht mit dem Hauptnetz verbundene Leitungselemente, um Potenziale bei punktuellen Abweichungen von den Anforderungen aufzuzeigen. In Abbildung 6-39 (rechts) wurde

beispielhaft eine Leitung manuell hinzugefügt, die den Mindestabstand zur Bebauung unterschreitet (rot umkreist). Sie führt zu einem Ringschluss, sodass im Falle eines Ringnetzes zusätzliche Trassierungsmöglichkeiten entstehen. In der Praxis obliegt die Entscheidung über solche Anpassungen bzw. Abweichungen der Planung. Das Netz verfügt über 305 Knoten sowie 361 potenzielle Versorgungsleitungstrassen.

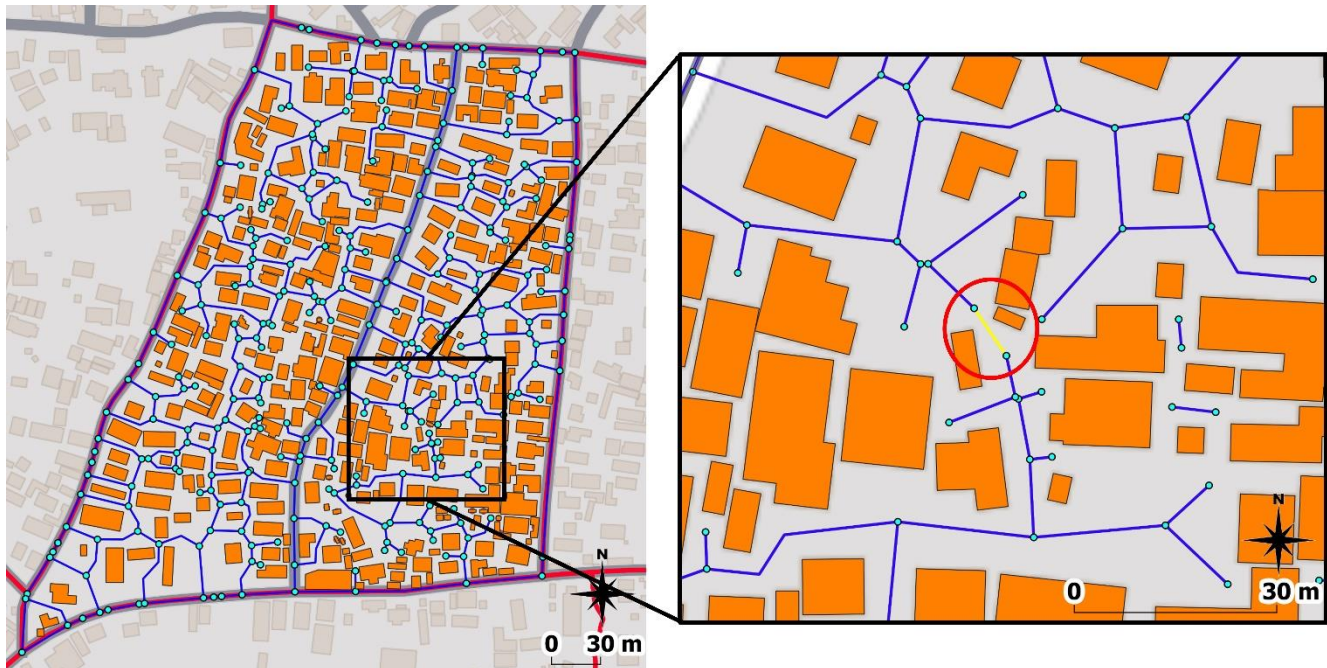


Abbildung 6-39: potenzielle Versorgungsleitungstrassen (links), Detailansicht manuelle Anpassung (rechts) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Die Lösung des Location-Set-Covering-Problem für ein Verästelungsnetz ergibt, dass zur Erreichung der nächstliegenden Entnahmemöglichkeit innerhalb von 300m (d.h. 600m für Hin- und Rückweg) mindestens 2 Entnahmestellen benötigt werden. Entsprechend der Lösung des p-Center-Problem beträgt die maximale Entfernung des am weitesten entfernten Abnehmers in diesem Fall 248,5m bzw. 497m für Hin- und Rückweg. Zur Erreichung der Versorgungskategorie „intermediate access“ werden dagegen mindestens 21 Entnahmestellen benötigt (die maximale Entfernung beträgt in diesem Fall 48m bzw. 96m für Hin- und Rückweg). Abbildung 6-40 enthält die Lösung des p-Center-Problem für verschiedene Entnahmestellenanzahlen für ein Verästelungsnetz.

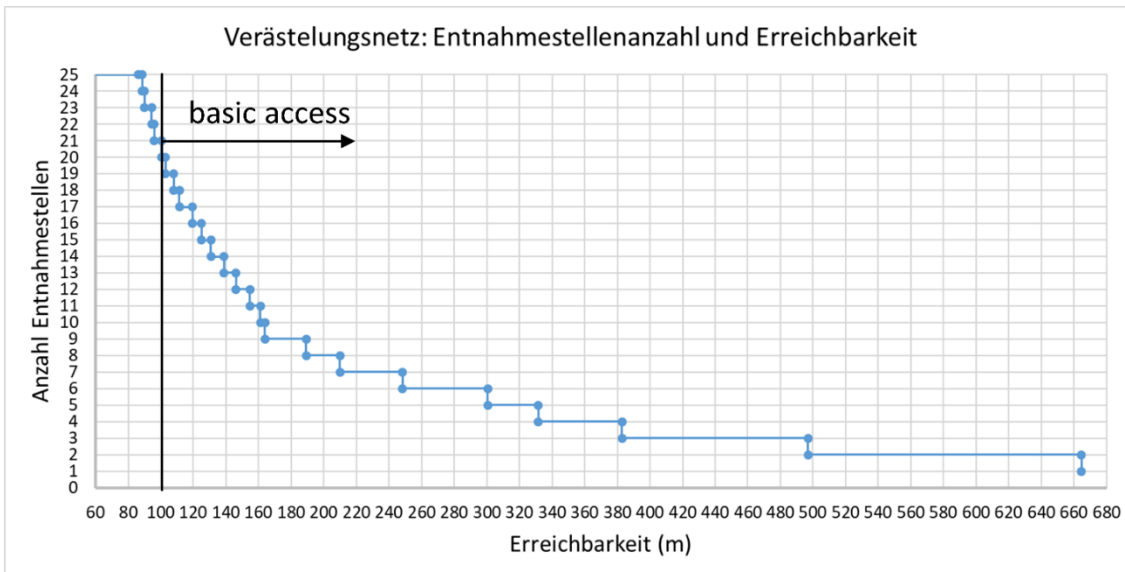


Abbildung 6-40: Lusaka Verästelungsnetz - Anzahl der Entnahmestellen in Abhängigkeit der Erreichbarkeit

Im Falle eines Ringnetzes reduzieren sich die für Entnahmestellen in Frage kommenden Knoten von 305 auf 201 Stück. Wie beim Verästelungsnetz werden mindestens 2 Entnahmestellen zur Gewährleistung einer Entfernung <600m für Hin- und Rückweg benötigt. Die Kriterien der Versorgungskategorie „intermediate access“ können mit einem Ringnetz dagegen nicht erfüllt werden, da bestenfalls eine minimale Entfernung von 100m bzw. 200m für Hin- und Rückweg mit 8 Entnahmestellen erreicht werden kann. Die Ergebnisse des p-Center-Problem für verschiedene Entnahmestellenanzahlen im Ringnetz enthält Abbildung 6-41. Ein Vergleich der Ergebnisse von Verästelungs- und Ringnetz zeigt, dass erst ab 6 Entnahmestellen Unterschiede in der Erreichbarkeit infolge der beschränkten Knotenauswahl im Ringnetz entstehen. Während bei 6 Entnahmestellen die Entfernung des am schlechtesten gestellten Abnehmers im Verästelungsnetz 124m (bzw. 248m für Hin- und Rückweg) beträgt, beträgt sie beim Ringnetz 127m (bzw. 254m für Hin- und Rückweg).

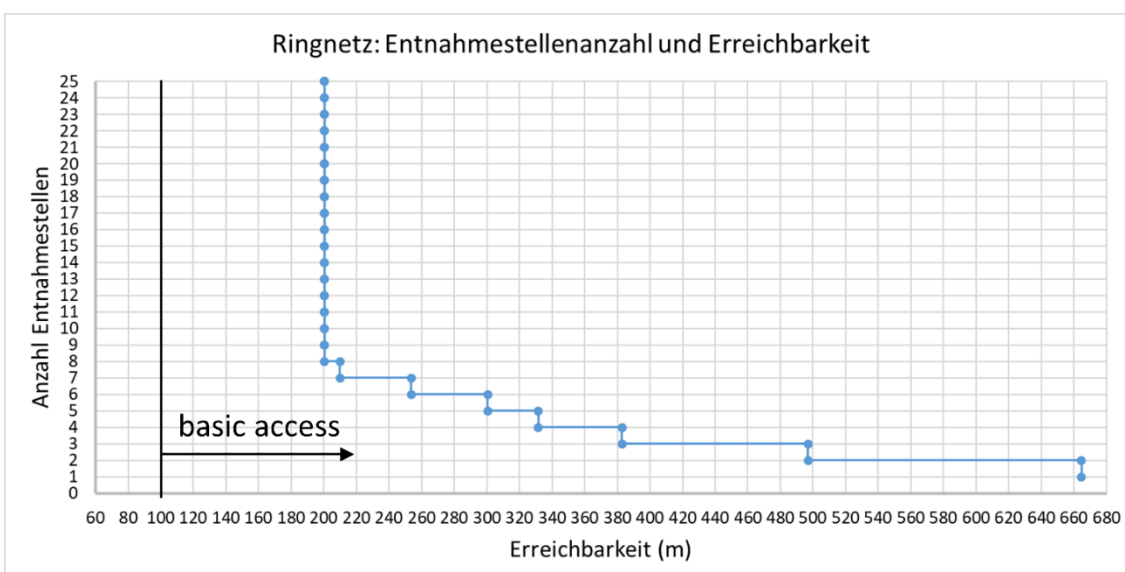


Abbildung 6-41: Lusaka Ringnetz - Anzahl der Entnahmestellen in Abhängigkeit der Erreichbarkeit

Einführung Wasserversorgungsinfrastruktur - Variante „basic access“ – Verästelungsnetz

Die Lokalisation der Entnahmestellen für das Verästelungs- und Ringnetz sind identisch und in Abbildung 6-42 dargestellt. In beiden Fällen liegt der entfernteste Abnehmer 248,5m, bzw. 497m für Hin- und Rückweg, von der nächstliegenden Entnahmestelle entfernt. Die Hütte sowie der Weg zur Entnahmestelle ist gelb dargestellt. In diesem Beispiel soll die Einspeisung in die Upgrading-Area über zwei Übergabestellen erfolgen. Sie sind beispielhaft im südwestlichen und nordöstlichen Bereich angeordnet.

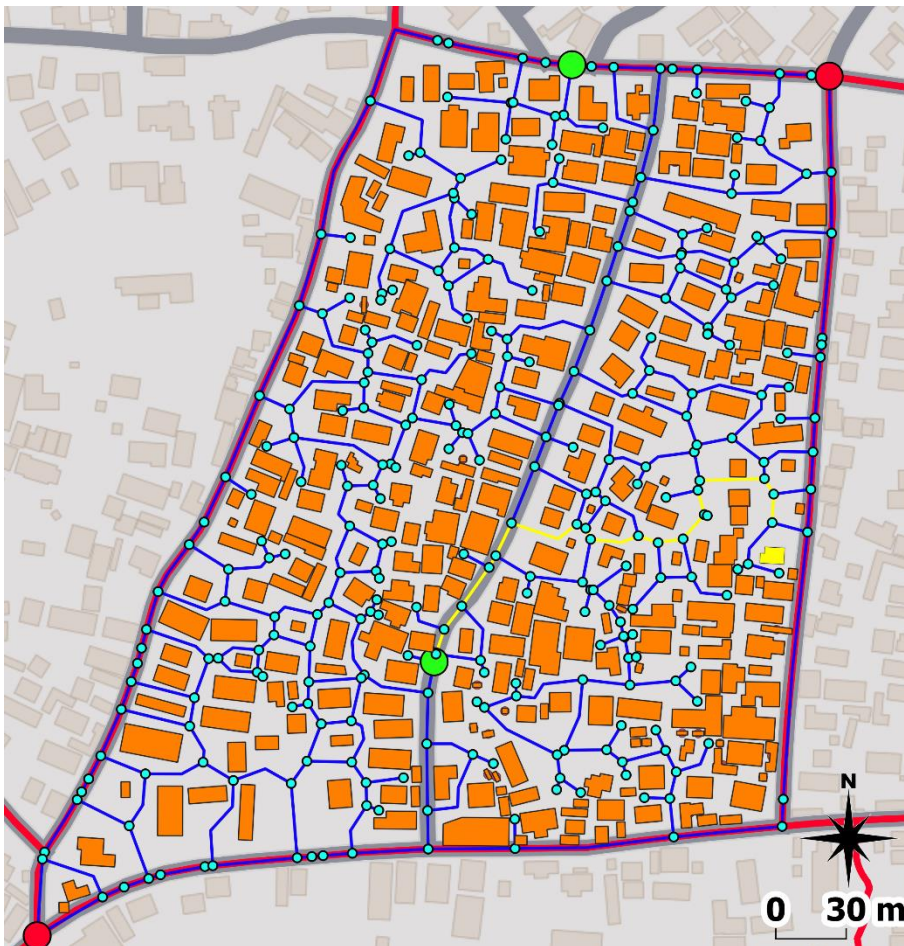


Abbildung 6-42: Versorgungskategorie "basic access" - Entnahmestellen und entferntester Abnehmer (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Topologieoptimierung

Die Ergebnisse der Topologieoptimierung eines Verästelungsnetzes mit unterschiedlicher Gewichtung des Umgebungsfaktors f_{street} enthalten Abbildung 6-43 a) und Abbildung 6-43 b). Ohne Differenzierung der Trassenart besitzt das Verästelungsnetz eine Leitungslänge von 659m, davon verlaufen 495m entlang bestehender Straßen und 164m über Freiflächen. Das Versorgungsnetz mit einem Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ verläuft ausschließlich entlang bestehender Straßen und verfügt über eine Länge 660m. Daraus resultiert ein Kantengewicht von 66m ($= 0,1 \cdot 660m$). Die Verwendung des Steiner-Tree-Ansatzes führt trotz zweier Einspeisepunkte zu einem kostenminimalen, zusammenhängenden Netz. Sind zwei getrennte Teilnetze als Lösung zulässig, kann über die QGIS-Anbindung die verbindende Leitung entfernt werden, sodass das Netz auf Kosten der Versorgungssicherheit hinsichtlich der Leitungsmeter weiter optimiert wird.

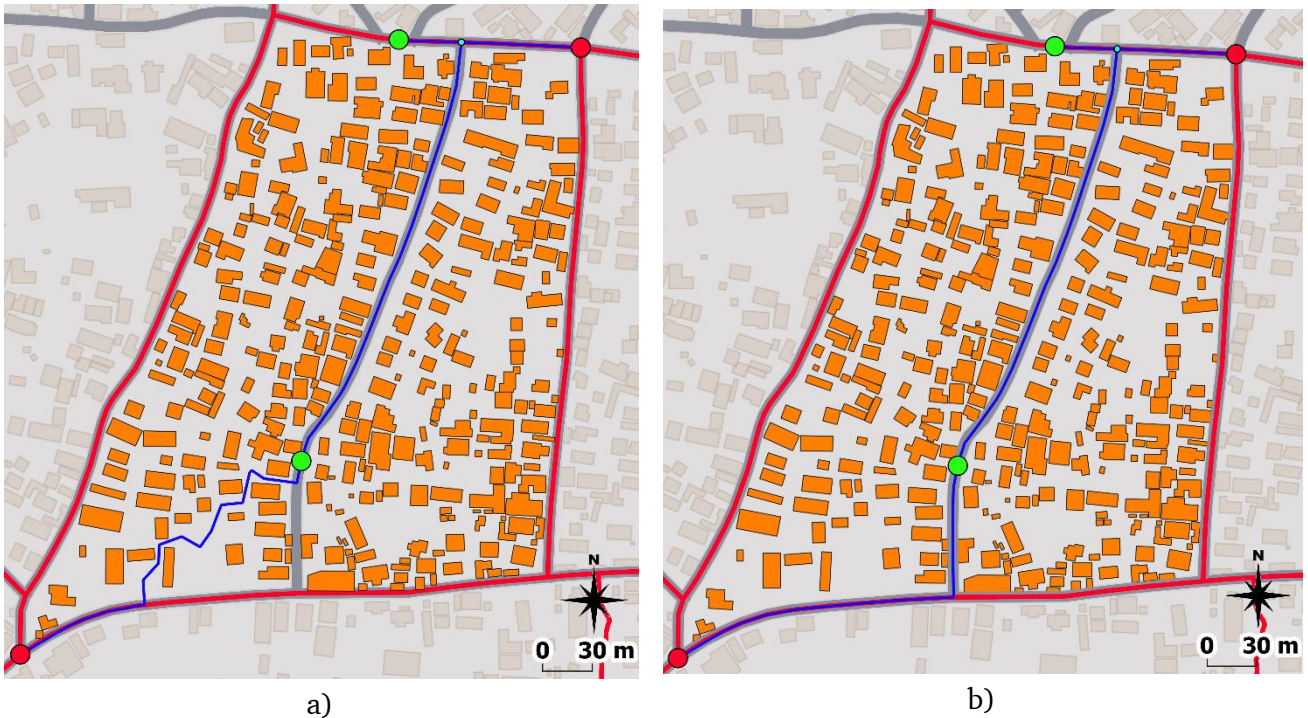


Abbildung 6-43: Lusaka Verästelnetz „basic access“ - ohne Differenzierung der Trassenart (a); mit Straßenfaktor $f_{street} = 0,1$ (b) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Einführung Wasserversorgungsinfrastruktur - Variante „intermediate access“ - Ringnetz

Die Topologieoptimierung des Ringnetzes erfolgt über den GA, basierend auf einer Population = 600 mit 200 Iterationen. Die Mutationswahrscheinlichkeit wird unverändert mit 1% gewählt. Die Berechnungszeit liegt bei ca. 30min. Der Kostenverlauf der besten Lösung einer Iteration für die Varianten mit und ohne Differenzierung des Umgebungsfaktors f_{street} enthalten Abbildung 6-44 a) und b). Die Kosten der besten Lösung ohne Differenzierung betragen 1.231 (-), d.h. das Netz verfügt über eine Leitungslänge von 1.231m. Die Kosten der besten Lösung mit $f_{street} = 0,1$ betragen 235 (-) (= $120m + 0,1 \cdot 1.153m$, d.h. die Netzlänge beträgt 1.273m). In beiden Fällen ist die beste Lösung nach ca. 175 Iterationen gefunden.

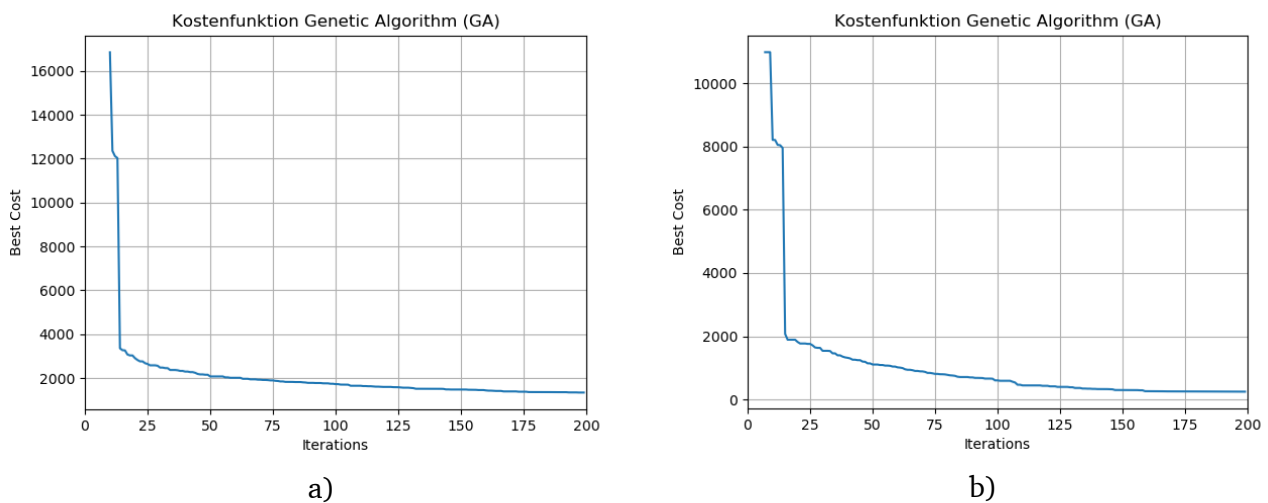


Abbildung 6-44: Lusaka Topologieoptimierung Kostenverlauf GA: Umgebungsfaktor $f_{street} = 1$ (a); Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ (b)

Die Trassenverläufe beider Varianten sind in Abbildung 6-45 a) und b) dargestellt. Die direkte Gegenüberstellung verdeutlicht, dass bei Verwendung des Umgebungsfaktors $f_{\text{street}} = 0,1$ (Abbildung 6-45 b)) Trassenabschnitte, die abseits der Straßen verlaufen bzw. zwei Straßen miteinander verbinden, relativ kurz sind und annähernd im rechten Winkel an die Abschnitte entlang der Straßen anbinden. Im Gegensatz dazu zeigt die Variante ohne Differenzierung des Umgebungsfaktors (d.h. $f_{\text{street}} = 1$), dass längere Abschnitte abseits von Straßen verlaufen, die zu einer geringeren Gesamtlänge der Trasse führen.

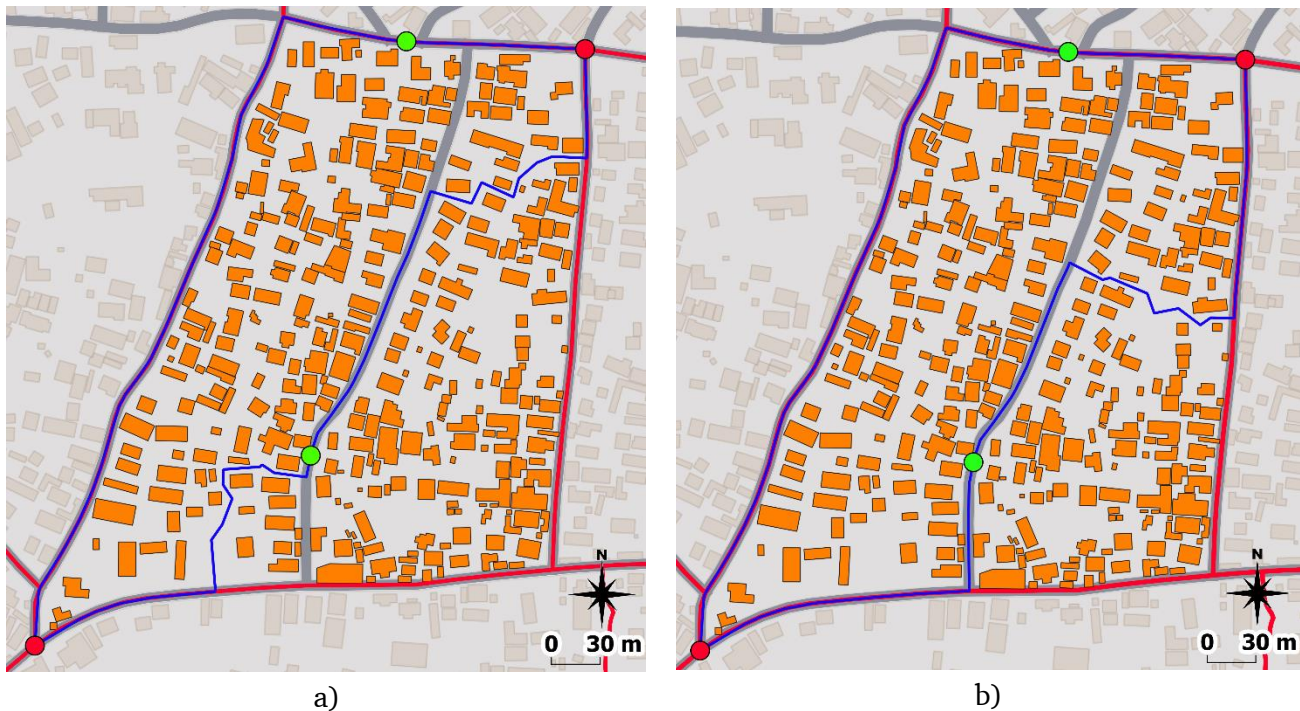


Abbildung 6-45: Lusaka Topologieoptimierung Ringnetz mit 2 Entnahmestellen - Umgebungsfaktor $f_{\text{street}} = 1$ (a); Umgebungsfaktor $f_{\text{street}} = 0,1$ (b) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Auf eine DN-Optimierung wird für die hier vorgestellten Trassierungsvarianten der Versorgungskategorie „basic access“ verzichtet. Sie wird anhand der folgenden Beispiele der Versorgungskategorie „intermediate access“ validiert, die durch eine höhere Anzahl an Entnahmestellen, Strängen und Knoten einen größeren Lösungsraum besitzt und somit einen höheren Komplexitätsgrad aufweist.

Einführung Wasserversorgungsinfrastruktur - Variante „intermediate access“ - Verästelungsnetz

Abbildung 6-40 und Abbildung 6-41 zeigen, dass die Erreichung der Versorgungskategorie „intermediate access“ ohne weitere Maßnahmen (z.B. Umsiedlung, Abweichung von Mindesttrassenbreite, etc.) nur für ein Verästelungsnetz möglich ist. Hierfür werden 21 Entnahmestellen im Netz benötigt. Für das Ringnetz beschränken sich die folgenden Ergebnisse auf ein Netz mit 8 Entnahmestellen, die eine Erreichbarkeit einer Entnahmestelle innerhalb von 100m bzw. 200m für Hin- und Rückweg sicherstellen.

Topologieoptimierung

Abbildung 6-46 a) enthält das Verästelungsnetz ohne Differenzierung des Umgebungsfaktors. Das Netz besitzt eine Gesamtlänge von 1.903m, von denen 560m entlang bestehender Straßen verlaufen. Das

Verästelnetz mit einer bevorzugten Trassierung entlang bestehender Straßen ($f_{\text{street}} = 0,1$) enthält Abbildung 6-46 b). Das Netz besitzt eine Gesamtleitungslänge von 2.097m, wovon 1.348m entlang bestehender Straßen verlaufen. Die bevorzugte Trassierung entlang bestehender Straßen führt dazu, dass im Vergleich 194m mehr Leitungslänge benötigt werden. Gleichzeitig verlaufen, wie gewünscht, nur relativ kurze Leitungsabschnitte zur Anbindung der Entnahmestellen über Freiflächen.

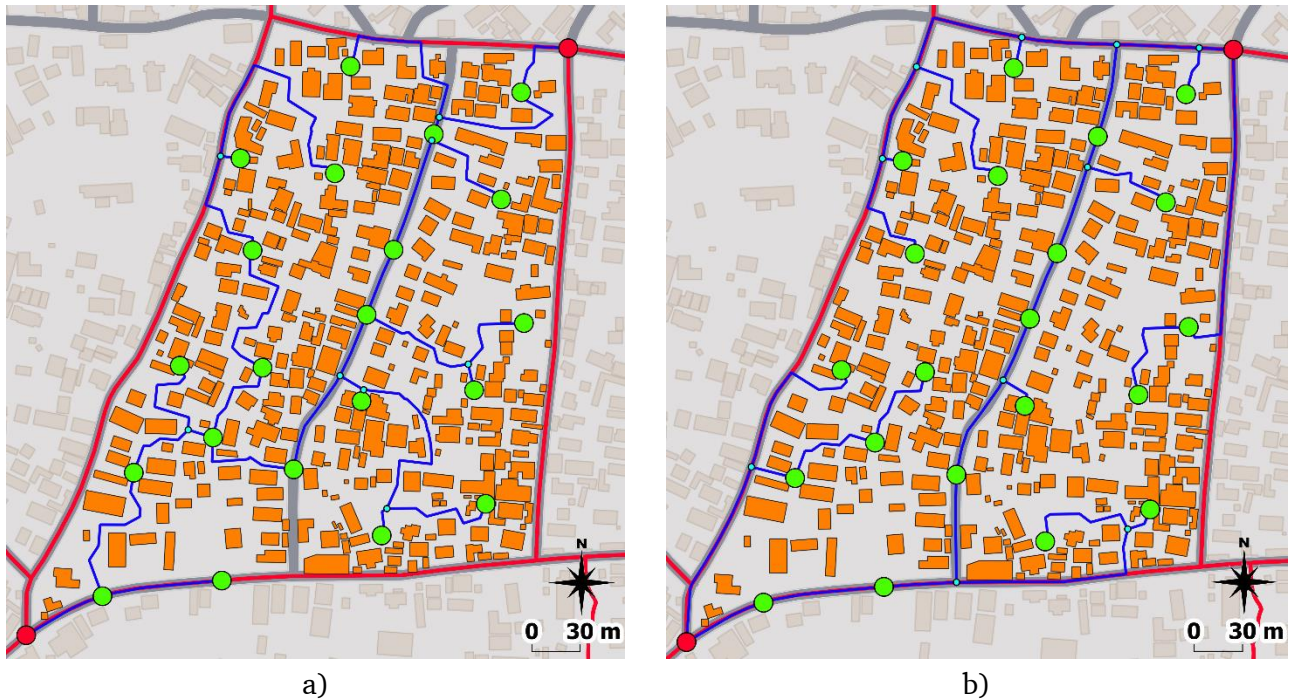


Abbildung 6-46: Lusaka Topologieoptimierung Verästelnetz mit 21 Entnahmestellen – Umgebungsfaktor $f_{\text{street}} = 1$ (a); Umgebungsfaktor $f_{\text{street}} = 0,1$ (b) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Durchmesseroptimierung

Die DN-Optimierung erfolgt exemplarisch für das Netz in Abbildung 6-46 b). Für die Versorgungskategorie „intermediate access“ wird ein Wasserbedarf von 50l pro Einwohner und Tag angesetzt. Bei 1.600 Einwohnern entspricht dies einem Wasserbedarf von $80\text{m}^3/\text{Tag}$. Unter Berücksichtigung von Gleichung (1) folgt $f_h = 5,23$ (-). Damit ergibt sich für den Lastfall Spitzenstunde am Tag des maximalen Bedarfs $Q_{\text{hmax}} = 17.433\text{l/h}$ bzw. $4,84\text{l/s}$ (Gleichung (2)). Die Verbräuche der einzelnen Hütten werden wie in Kapitel 6.2.3 der jeweils zugewiesenen Entnahmestelle zugeordnet. Infolge der zwei Einspeisepunkte mit unterschiedlicher geodätischer Höhe gilt es aufeinander abgestimmte Druckvorgaben zu wählen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass eine der beiden Einspeisungen von der jeweils anderen „überdrückt“ wird. In diesem Beispiel wird daher an beiden Punkten eine gleiche Energiehöhe H (vgl. Gleichung (6)) modelliert. Für den Einspeisepunkt im nordöstlichen Bereich werden beispielhaft ein Druck von $35,7\text{mWs}$ ($\sim 3,5\text{bar}$) bei einer geodätischen Höhe von $1.285,62\text{m}$ angesetzt, woraus eine Energiehöhe $H = 1.321,32\text{m}$ resultiert (Geschwindigkeitshöhe $\frac{v^2}{2g} = 0$). Diese wird auf den Einspeisepunkt im südwestlichen Bereich übertragen, sodass dort bei einer geodätischen Höhe von $1.275,43\text{m}$ mit $45,9\text{mWs}$ ($\sim 4,5\text{bar}$) eingespeist wird. Die Berechnung des GA erfolgt für eine Populationsgröße = 150 und 75 Iterationen. Der Mutationsfaktor wird mit 1% gewählt.

Der Verlauf der Kosten der jeweils besten Lösung einer Iteration enthält Abbildung 6-47. Die Kosten der besten Lösung liegen bei 70 (-). Die Berechnungszeit beträgt ca. 7min.

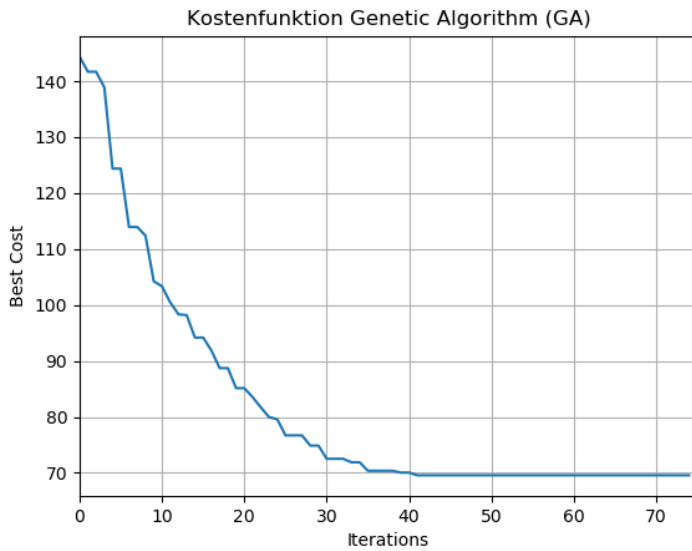


Abbildung 6-47: Kostenverlauf der besten Lösung je Iteration - Verästelungsnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"

Tabelle 6-6 enthält eine Übersicht der ermittelten Rohrtypen sowie deren Leitungslängen. Das Netz besteht demnach aus 2 Rohrtypen in den Nennweitenstufen DN32 und DN63. Der Fitness-Wert der besten Lösung lässt sich über die Fitnessfunktion (Gleichung (43)) reproduzieren: $1.475 \cdot 0,026 + 622 \cdot 0,0514 = 70$ (-)

Tabelle 6-6: Lusaka - Ermittelte Rohrtypen und Leitungslängen für ein Verästelungsnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"

Rohrtyp	Innendurchmesser (mm)	Länge (m)
32 PE100 SDR11	26,0	1.475
63 PE100 SDR11	51,4	622

Anschließend erfolgt die hydraulische Überprüfung der Ergebnisse durch EPANET 2. Sie sind in Abbildung 6-48 dargestellt. Die Leitungen sind entsprechend ihres Durchmessers eingefärbt, die Fließrichtung ist durch Pfeile dargestellt und der Druck an den Knoten in mWs angegeben. Es zeigt sich, dass die Durchmesser in Fließrichtung von beiden Einspeisepunkten zu den Entnahmeknoten abnehmen und die Abfolge der Durchmesser plausibel erscheint (keine großen Sprünge in der Durchmesserabfolge). Die Ausgabe der Drücke an den Knoten zeigt, dass die Druckbedingung $p_{\min} \leq p \leq p_{\max}$ erfüllt wird. Die maximale Fließgeschwindigkeit beträgt $v_{\max} = 1,3\text{m/s}$, die minimale Fließgeschwindigkeit $v_{\min} = 0,03\text{m/s}$ (nicht in Abbildung 6-48 dargestellt). Die Systembeschränkungen (vgl. Kapitel 5.4.3) sind somit für die Lösung erfüllt.

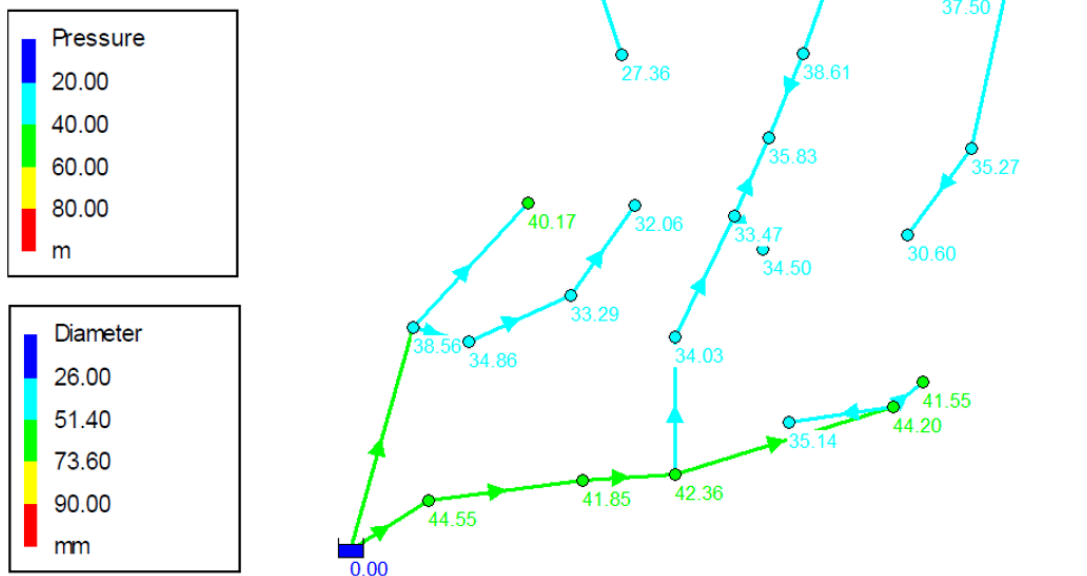


Abbildung 6-48: Ergebnis DN-Optimierung Lusaka - Verastelungsnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"

Einführung Wasserversorgungsinfrastruktur - Variante „intermediate access“ - Ringnetz

Die kürzeste Distanz zwischen dem entferntest liegenden Abnehmer zu einer Entnahmestelle wird bei einem Ringnetz für eine Entnahmestellenanzahl = 8 (vgl. Abbildung 6-41) erreicht. Der Kostenverlauf der besten Lösung einer Iteration für die Varianten ohne und mit Differenzierung des Umgebungsfaktors f_{street} enthalten Abbildung 6-49 a) und b). Die Kosten der besten Lösung ohne Differenzierung betragen 1.848 (-) (d.h. das Netz verfügt über eine Leitungslänge von 1848m). Die Kosten der besten Lösung mit $f_{street} = 0,1$ betragen 675(-) ($675 = 538 + 0,1 * 1.371$, d.h. die Netzlänge beträgt 1.899m).

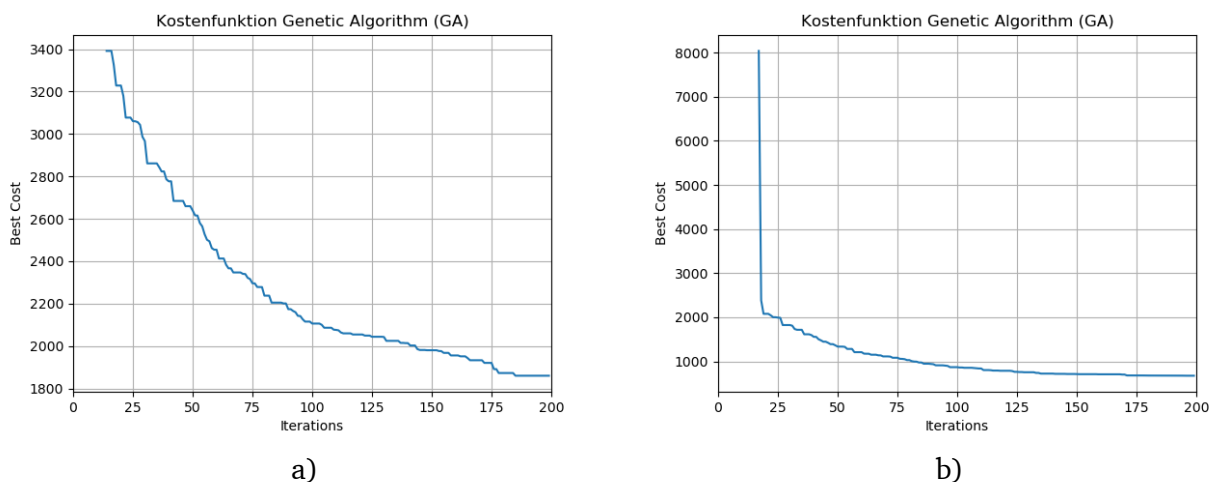


Abbildung 6-49: Lusaka Kostenverlauf GA Ringnetz mit 8 Entnahmestellen - Umgebungsfaktor $f_{street}=1$ (a); Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ (b)

Die Leitungsverläufe der jeweiligen Varianten enthalten Abbildung 6-50 a) und b). Das Netz ohne Differenzierung der Trassierung (Abbildung 6-50 a)) verfügt über eine Leitungslänge von 799m abseits und 1.049m entlang bestehender Straßen, während das Netz mit einer bevorzugten Trassierung entlang bestehender Straßen in Abbildung 6-50 b) über eine Leitungslänge von 538m abseits und 1.371m entlang bestehender Straßen verfügt.

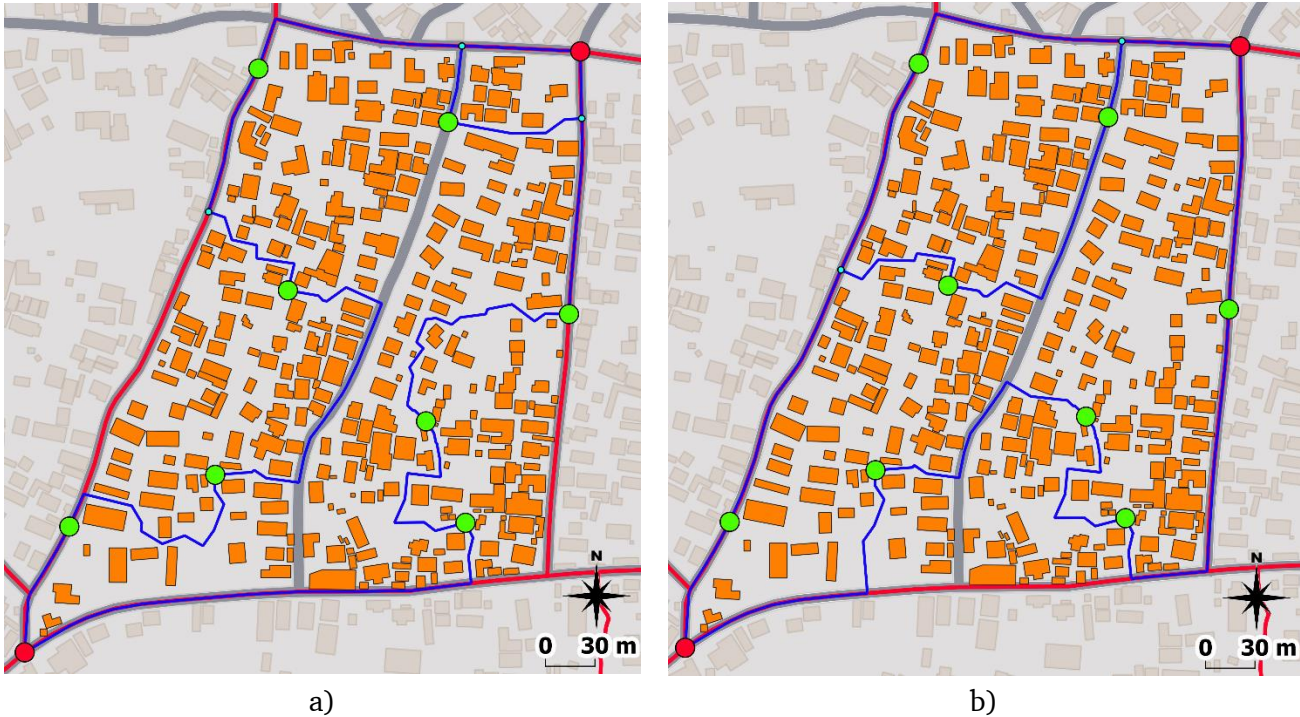


Abbildung 6-50: Lusaka Topologieoptimierung Ringnetz mit 8 Entnahmestellen – Umgebungsfaktor $f_{street} = 1$ (a);
Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ (b) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Durchmesseroptimierung

Die DN-Optimierung erfolgt beispielhaft für das Netz in Abbildung 6-50 b). Die optimalen Durchmesser werden für ein Netz mit hydraulischer Redundanz durch den GA ermittelt. Die Druckvorgaben und Verbräuche werden entsprechend der DN-Optimierung des Verästelungsnetzes gewählt (s.o.). Der Verlauf der Kosten der jeweils besten Lösung einer Iteration enthält Abbildung 6-51. Die Kosten der besten Lösung liegen bei 93,3 (-). Die Berechnungszeit beträgt ca. 30min.

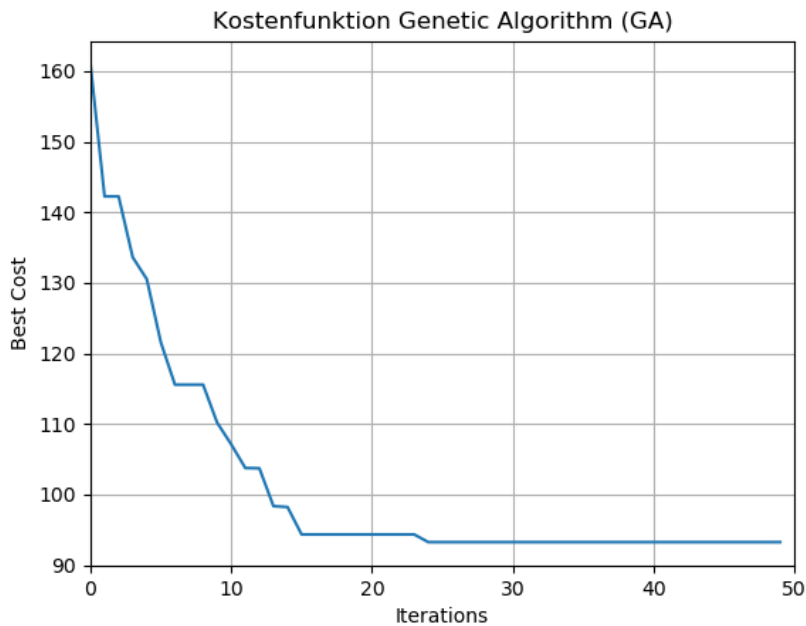


Abbildung 6-51: Kostenverlauf der besten Lösung je Iteration - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" mit Redundanz

Tabelle 6-7 enthält eine Übersicht der ermittelten Rohrtypen sowie deren Leitungslängen. Das Netz besteht demnach aus 3 Rohrtypen in den Nennweitenstufen DN32, DN63 und DN90. Der Fitness-Wert der besten Lösung lässt sich über die Fitnessfunktion (Gleichung (43)) reproduzieren: $292,3 \cdot 0,026 + 1.468,3 \cdot 0,0514 + 138,3 \cdot 0,0736 = 93,3 (-)$

Tabelle 6-7: Lusaka - Ermittelte Rohrtypen und Leitungslängen für ein Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access"

Rohrtyp	Innendurchmesser (mm)	Länge (m)
32 PE100 SDR11	26,0	292,3
63 PE100 SDR11	51,4	1.468,3
90 PE100 SDR11	73,6	138,3

Das in Bezug auf die Leitungsdurchmesser hydraulisch optimierte Netz enthält Abbildung 6-52. An den Knoten sind die Drücke farblich in der Einheit mWS angegeben. Die Leitungen sind entsprechend ihres Durchmessers eingefärbt. Die Fließrichtung ab den beiden Einspeisepunkten ist durch Pfeile dargestellt. Knoten- und Leitungs-IDs sind schwarz dargestellt. Leitungsabschnitte ohne Verzweigungen weisen einheitliche Durchmesser auf. Nur für Leitung 5 wurde ein größerer Durchmesser als für die umliegenden Leitungen ermittelt. Die Analyse von Tabelle 6-8 zeigt, dass der geringste Druck im Falle eines Ausfalls von Leitung 7 an Knoten 117 auftritt und 20,5mWs beträgt. Damit wird der Mindestdruck von 2bar = 20,4mWs knapp erfüllt. In diesem Szenario wird der Knoten 117 über das nordöstliche Reservoir versorgt. Würde für Leitung 5 der nächst kleinere Rohrtyp gewählt, zeigen die Berechnungen, dass der Druck in diesem Fall auf 19,45mWs (=1,91bar) an Knoten 117 sinkt und damit den Mindestdruck unterschreitet. Durch den größeren Durchmesser in Leitung 5 wird der Druckverlust auf der Fließstrecke gerade so viel reduziert, dass die Druckanforderungen eingehalten werden. Hierfür

reicht die Aufweitung des kürzesten und entsprechend der Fitness-Funktion des GA kostengünstigsten Leitungsabschnitts (Leitung 5). Auch wenn in der Praxis sehr wahrscheinlich die gesamte Fließstrecke in einer größeren Nennweite ausgebaut würde, demonstriert dieser Fall die sehr gute Funktionalität des GA unter Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz.

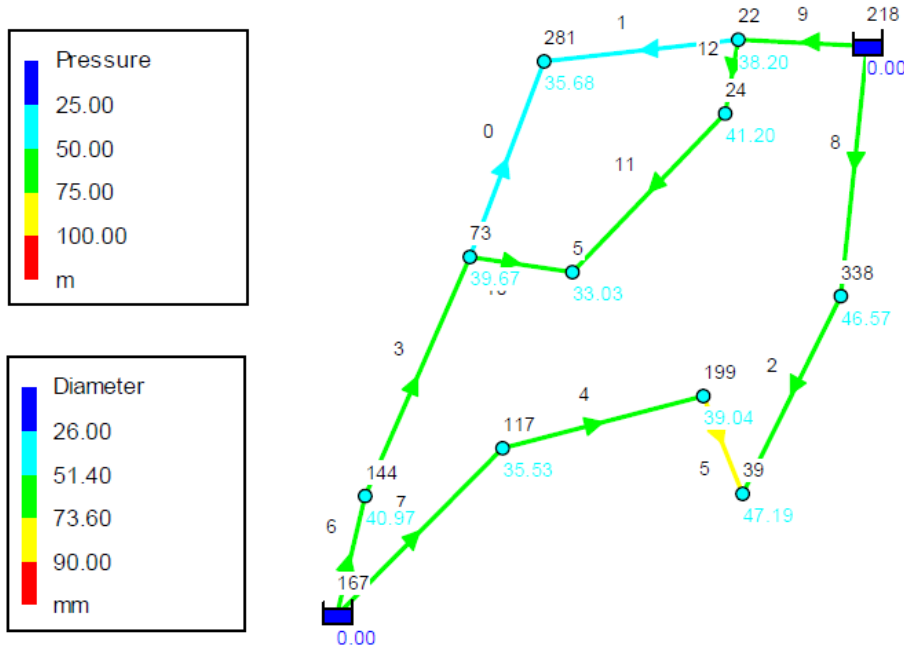


Abbildung 6-52: Ergebnis DN-Optimierung - Ringnetz der Versorgungskategorie "intermediate access" mit Redundanz

Tabelle 6-8: Lusaka - Berechnungsergebnisse Druck unter Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz

Leitungs-ID außer Betrieb		-	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Knoten-ID	geod. Höhe (m)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)	Druck (mWs)
5	1286,8	33,0	33,2	32,8	33,0	31,2	33,0	33,0	26,2	33,0	33,0	24,6	32,4	32,2	27,8
22	1282,2	38,2	38,1	38,3	38,2	37,4	38,2	38,2	35,5	38,2	38,2	27,8	37,9	38,5	39,1
24	1278,8	41,2	41,2	41,2	41,2	40,0	41,2	41,2	37,1	41,2	41,2	31,2	40,8	41,7	35,0
39	1270,8	47,2	47,2	47,2	40,2	47,2	42,9	45,4	47,2	33,7	36,0	47,2	47,2	47,2	47,2
73	1280,2	39,7	39,9	39,4	39,7	37,7	39,7	39,7	32,0	39,7	39,7	32,7	40,1	38,9	35,5
117	1283,0	35,5	35,5	35,5	31,0	35,5	37,3	36,5	35,5	20,5	28,4	35,5	35,5	35,5	35,5
144	1279,3	41,0	41,1	40,8	41,0	41,6	41,0	41,0	32,1	41,0	41,0	37,8	41,2	40,6	39,0
199	1279,0	39,0	39,0	39,0	32,3	39,0	34,7	40,3	39,0	25,4	28,1	39,0	39,0	39,0	39,0
281	1280,6	35,7	24,2	24,9	35,7	34,3	35,7	35,7	30,0	35,7	35,7	26,9	35,8	35,4	33,5
338	1272,9	46,6	46,6	46,6	48,3	46,6	44,5	45,7	46,6	40,4	33,7	46,6	46,6	46,6	46,6
Res167	1321,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Res218	1321,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 6-9 enthält die Fließgeschwindigkeiten der verschiedenen Szenarien. Die außer Betrieb genommenen Leitungen in jedem Szenario (ein Szenario entspricht einer Spalte der Fließgeschwindigkeit) sind anhand des fehlenden Durchflusswertes zu erkennen (als „-“ ausgewiesen). Die minimale Fließgeschwindigkeit beträgt 0,01m/s und erfüllt damit die definierte

Mindestfließgeschwindigkeit $\geq 0,005\text{m/s}$. Die maximale Fließgeschwindigkeit beträgt $1,17\text{m/s}$ und erfüllt damit ebenfalls die Anforderungen ($\leq 2\text{m/s}$). Die Systembeschränkungen sind damit erfüllt.

Tabelle 6-9: Lusaka - Berechnungsergebnisse Fließgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der hydraulischen Redundanz

Pipe ID	Innendurchm. mm	Fließgeschwindigkeit													
		m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
0	26,0	0,52	-	1,06	0,52	0,48	0,52	0,52	0,35	0,52	0,52	0,65	0,55	0,49	0,34
1	26,0	0,53	1,06	-	0,53	0,57	0,53	0,53	0,71	0,53	0,53	0,41	0,51	0,57	0,71
2	51,4	0,39	0,39	0,39	-	0,39	0,64	0,50	0,39	0,99	0,16	0,39	0,39	0,39	0,39
3	51,4	0,22	0,18	0,26	0,22	-	0,22	0,22	0,36	0,22	0,22	0,81	0,14	0,32	0,62
4	51,4	0,25	0,25	0,25	0,64	0,25	-	0,13	0,25	0,36	0,80	0,25	0,25	0,25	0,25
5	73,6	0,06	0,06	0,06	0,25	0,06	0,06	-	0,06	0,24	0,33	0,06	0,06	0,06	0,06
6	51,4	0,58	0,54	0,62	0,58	0,36	0,58	0,58	-	0,58	0,58	1,17	0,50	0,68	0,99
7	51,4	0,61	0,61	0,61	0,99	0,61	0,36	0,49	0,61	-	1,16	0,61	0,61	0,61	0,61
8	51,4	0,55	0,55	0,55	0,16	0,55	0,80	0,67	0,55	1,16	-	0,55	0,55	0,55	0,55
9	51,4	0,59	0,63	0,55	0,59	0,81	0,59	0,59	1,17	0,59	0,59	-	0,67	0,49	0,18
10	51,4	0,08	0,18	0,01	0,08	0,12	0,08	0,08	0,45	0,08	0,08	0,64	-	0,19	0,54
11	51,4	0,11	0,01	0,20	0,11	0,32	0,11	0,11	0,65	0,11	0,11	0,45	0,19	-	0,34
12	51,4	0,45	0,36	0,55	0,45	0,66	0,45	0,45	0,99	0,45	0,45	0,10	0,54	0,34	-

6.4 Übertragbarkeit der Methodik auf eine Siedlung im ländlichen Raum

Eine Netzerstellung auf Grundlage geometrischer Verfahren eröffnet weitere Anwendungsmöglichkeiten der Methodik. In ländlichen Regionen in Subsahara-Afrika verfügen nur 56% der Bevölkerung über einen Zugang zu einer verbesserten Wasserquelle (improved water source) [197], sodass auch hier ein großer Handlungsbedarf zur Verbesserung der Lebensbedingungen der dort lebenden Bevölkerung besteht. Die Verbesserung ländlicher und kleinstädtischer Wasser- und Sanitärversorgung sind Ziele der Entwicklungszusammenarbeit von KfW [198] und GIZ [199]. Hierzu zählen auch ländliche Regionen in Mali.

Im Folgenden wird anhand der ländlichen Siedlung Guani (Mali) mit ca. 3.300 Einwohnern die Übertragbarkeit der Methodik nachgewiesen (Abbildung 6-53 a)). Sämtliche Strukturelemente der Siedlung wurden beispielhaft anhand einer Luftbildaufnahme von Microsoft Bing Maps [194] digitalisiert, ohne Gewähr auf Vollständigkeit (Abbildung 6-53 b)). Zusätzlich wurde die Vegetation als Barriere definiert (grüne Polygone), sodass diese bei der Netzerstellung berücksichtigt wird. Als potenzielle Trassen werden sämtliche aus der Luftbildaufnahme erkennbare Straßen (grau) und Fußpfade (schwarz) im Bereich des Siedlungskerns zugelassen, die die potenziellen Versorgungsleitungstrassen aus der anschließenden Maximalnetzerstellung ergänzen.

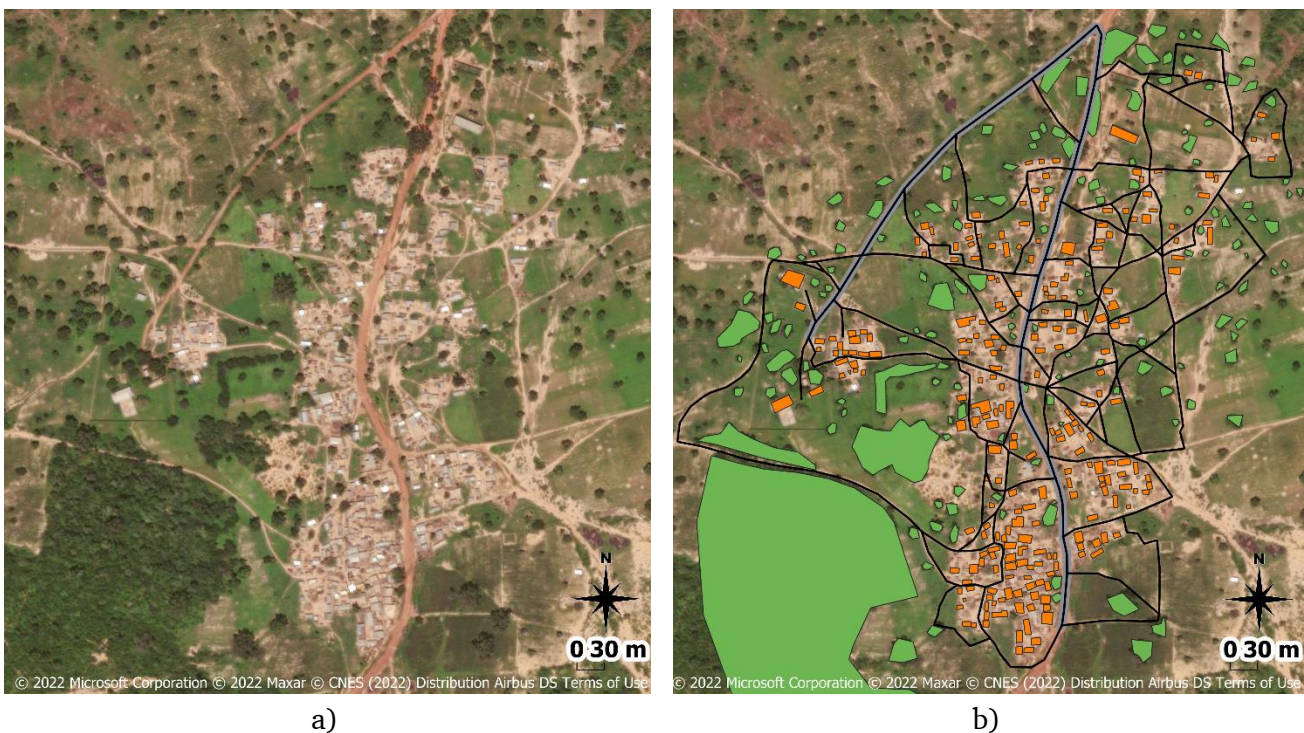


Abbildung 6-53: Luftbildaufnahme ländliche Siedlung Guani (Mali) (a); Luftbildaufnahme Guani und Inputdaten (b) (Quelle Hintergrundkarte: [194], Quelle Straßen: [193])

Zur Erfüllung der Kriterien der Versorgungskategorie „intermediate access“ werden entsprechend des Location-Set-Covering-Problem 29 Entnahmestellen benötigt. Die Positionierung der Entnahmestellen im Gebiet durch das p-Center-Problem ergibt, dass der am weitesten entfernt liegende Abnehmer 49m Fußweg (d.h. 98m für Hin- und Rückweg) zur nächstliegenden Entnahmestelle zurücklegen muss. Die ermittelten Positionen der Entnahmestellen sowie die beispielhaft gewählte Position der Einspeisung im potenziellen Versorgungsnetz enthält Abbildung 6-54a). In diesem Beispiel wird die Trassierung entlang der bestehenden Straße bevorzugt, sodass der Umgebungsfaktor $f_{street} = 0,1$ gesetzt wird. Das Ergebnis

der Topologieoptimierung für ein Verästelungsnetz enthält Abbildung 6-54b). Das Netz verfügt über eine Gesamtleitungslänge von 2.986m.

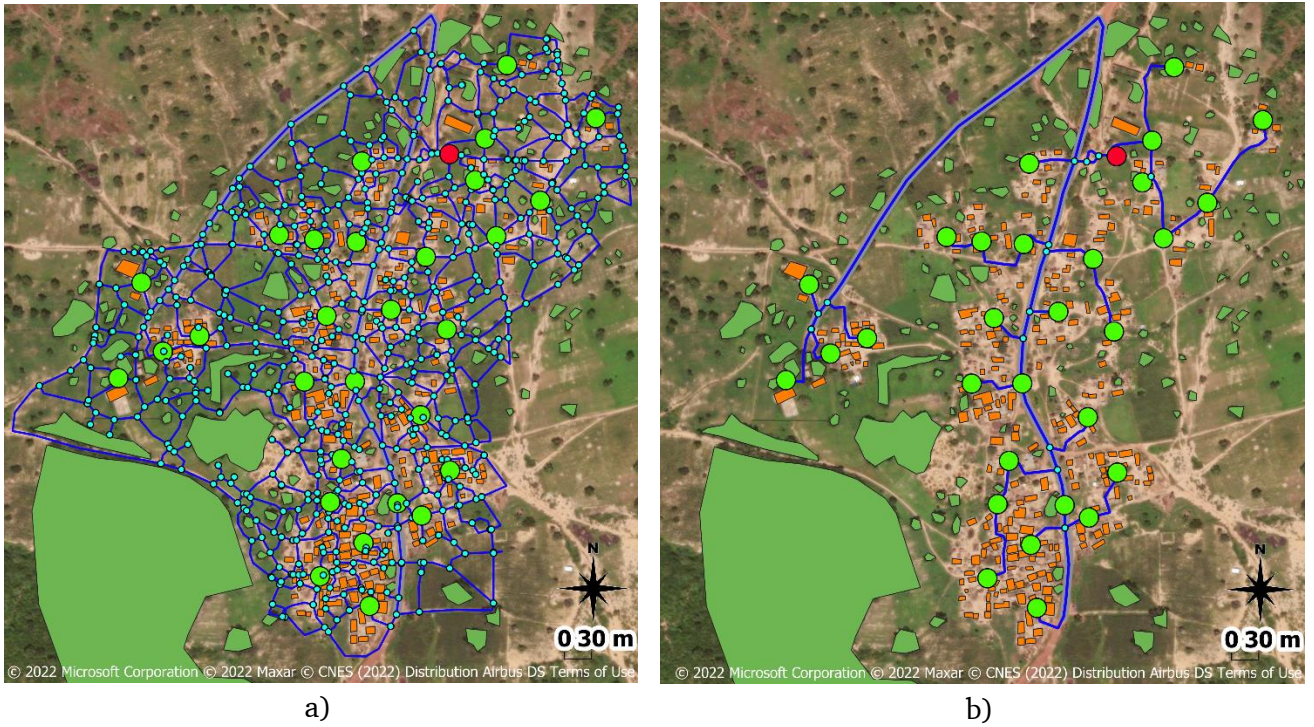


Abbildung 6-54: Position der Entnahmestellen im potenziellen Netz (a); Topologieoptimierung Verästelungsnetz (b) (Quelle Hintergrundkarte: [194], Quelle Bebauung/Straßen: [193])

7 Diskussion

Die in Kapitel 5 entwickelte Methodik mündet in einem Planungsunterstützungswerkzeug zur Einführung einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung in informellen Siedlungen. Sie dient der Planung auf verschiedenen Betrachtungsebenen und eröffnet durch ihren modularen Aufbau unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten. Nachfolgend wird sich kritisch mit der Methodik als auch mit den Ergebnissen aus Kapitel 6 auseinandergesetzt. Anschließend erfolgt die Beantwortung der in Kapitel 1.1 formulierten Forschungsfragen.

7.1 Kritische Betrachtung der Methodik und Ergebnisse

Die Methodik zur Planungsunterstützung ist in drei Ebenen gegliedert, in denen der Detailgrad der Planung stetig zunimmt. Jede Ebene enthält dabei mehrere Module, die aufeinander aufbauend oder auch unabhängig voneinander genutzt werden können. Infolge des modularen Aufbaus besteht die Möglichkeit, manuell in die sonst automatisiert ablaufenden Schritte einzugreifen, sodass über eine enge Kopplung an QGIS jedes Zwischenergebnis visualisiert und, falls gewünscht, korrigiert werden kann. Der Nutzer besitzt auf diese Weise eine sehr hohe Flexibilität bei der Nutzung der Methodik.

Ebene 1

Die Grundlage der gesamten Methodik bildet die Maximalnetzerstellung auf Basis der bestehenden Siedlungsstruktur sowie unüberwindbarer Hindernisse auf der Ebene des *informal settlement level*. Die Fallbeispiele zeigen, dass der geometriebasierte Ansatz gute Ergebnisse bei der Identifizierung potenzieller Trassen in den dicht und unstrukturiert besiedelten Gebieten generiert. Dabei werden bestehende Hindernisse, Straßen oder auch Bestandsleitungen durch entsprechende Verschneidung der Geometrien integriert. Das Maximalnetz enthält zunächst sämtliche potenzielle Trassen. Dazu gehören auch isolierte, nicht mit dem restlichen Netz verbundene Teilabschnitte. Auf diese Weise erhält der Nutzer einen Einblick in weitere Trassierungspotenziale, falls punktuelle Unterschreitungen der Mindestbreite zugelassen oder vereinzelte Umsiedlungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden.

Ebene 2

Auf der Ebene des *district level* liefert ein Zusammenspiel aus Maximalnetzerstellung, Ableitung von Basisgebieten und einem Gebietseinteilungsalgorithmus Planungsvorschläge, die zur gleichzeitigen Gebietsunterteilung und Trassierung der Hauptleitungen genutzt werden. Die Berücksichtigung des tatsächlich zur Verfügung stehenden Raums bei der Abgrenzung der Basisgebiete führt dazu, dass die resultierenden Distriktgrenzen gleichzeitig den Trassen der zukünftigen Hauptleitungen entsprechen können. Auf diese Weise können schon vor der eigentlichen Aufwertung Basisdienstleistungen in den Randbereichen bereitgestellt werden, während die Trassierung gleichzeitig maximale Flexibilität für Einspeisepunkte bei der weiteren Erschließung bietet. Die Aggregation der Basisgebiete zu Distrikten erfolgt entweder manuell, unter Berücksichtigung individueller Kriterien über QGIS oder automatisiert durch Verwendung eines rekursiven Partitionierungsalgorithmus in Anlehnung an Kalcsics [149]. Bei der automatisierten Gebietseinteilung besteht die Herausforderung darin, dass große Gebiete mit vielen einzuteilenden Elementen zu sehr großen kombinatorischen Problemen führen. Bei der Verwendung klassischer Ansätze (z.B. location-allocation) resultieren daraus sehr große Lösungsräume und damit sehr lange Rechenzeiten [149]. Der hier verwendete rekursive Partitionierungsalgorithmus nutzt die zugrundeliegenden geometrischen Informationen der Basisgebiete, erzeugt selbst bei sehr großen

Lösungsräumen Ergebnisse in einer akzeptablen Rechenzeit (innerhalb Sekunden) und ermöglicht durch zahlreiche Eingriffsmöglichkeiten die Generierung verschiedener Planungsvarianten. Sein geometriebasierter Ansatz besitzt gegenüber den klassischen Methoden der Gebietseinteilung den Vorteil, keinen speziellen Solver zu benötigen. Er kann somit ohne Anpassung auf andere Untersuchungsgebiete übertragen werden. Wie die Ergebnisse zeigen, sind jedoch bei einer vollständig automatisierten Gebietseinteilung kleinere, nachträgliche manuelle Anpassungen (in beiden Fallbeispielen $\leq 3,5\%$) empfehlenswert. Die sukzessive Aufteilung des Gebiets ermöglicht die Aufwertung des Gebiets anhand aufeinander aufbauender Planungsebenen. Insbesondere vor dem Hintergrund der sich in einem ständigen Wandel befindlichen informellen Gebiete, bietet das Vorgehen damit eine hohe Flexibilität, um auf strukturelle Veränderungen in der folgenden Planungsebene reagieren zu können. Damit einher geht eine bessere Übersicht über die benötigten materiellen und finanziellen Ressourcen.

Im rekursiven Partitionierungsalgorithmus sind gängige Kompaktheitsmaße implementiert, die allein oder gewichtet und im Zusammenspiel mit der gewünschten Distriktanzahl die Raumorganisation nutzerspezifisch beeinflussen. Das Fehlen eines allgemeinen Bewertungsmaßes für die Kompaktheit führt jedoch zu einer Subjektivität bei der Bewertung, sodass die Ergebnisse trotz automatisierter Gebietseinteilung auch visuell eingeschätzt werden müssen. Hinzu kommt, dass die gewünschten Distriktformen entsprechend den örtlichen Bedingungen variieren können, sodass die Gewichtung der Faktoren in einem iterativen Verfahren ermittelt werden müssen. Auch hier profitiert der Nutzer von der Geschwindigkeit des Algorithmus. Die verschiedenen Einteilungen werden in dieser Arbeit anhand der Distriktgrenzlänge bewertet. Zur weiteren Bearbeitung wird die Lösung mit der geringsten Länge, dies entspricht der geringsten Hauptleitungslänge, gewählt.

Hinsichtlich des späteren Betriebs führt die Integration der geodätischen Höhe in Form einer Zulässigkeitsbedingung zu Distrikten, die über eine Druckzone versorgt werden können. Dies reduziert die Komplexität des Wasserversorgungssystems und damit den Betriebsaufwand. Es gilt jedoch zu bedenken, dass die Trassierung der Versorgungsleitungen innerhalb der einzelnen Distrikte erst im Rahmen der einzelnen Upgrading-Maßnahmen festgelegt wird. Theoretisch können Distrikte gebildet werden, die infolge einer hohen Kompaktheit in Verbindung mit einer hohen Bebauungsdichte keinen Platz für die Einführung einer leitungsgebundenen Wasserversorgungsstruktur bieten. In diesen Fällen können spätere Leitungen nur entlang der Distriktgrenzen verlaufen. Dies ist ein von der Methodik unabhängiges Problem, auf das ohne Umsiedlungsmaßnahmen nicht reagiert werden kann. Eine Lösung könnte ein Zusammenspiel der Methodik mit dem Reblocking-Ansatz von Brelsford et al. [25] sein. Im frühen Planungsstadium der Gebietseinteilung ist ebenfalls noch nicht bekannt, ob eine Versorgungsleitung später tatsächlich entlang der bei der Gebietseinteilung berücksichtigten Hoch- und Tiefpunkte verläuft. Das bedeutet, dass die harte Abbruchbedingung und damit das Backtracking bei Verletzung des maximalen geodätischen Höhenunterschieds ggf. zu streng ausgelegt wird. Da die spätere Trassierung innerhalb der einzelnen Upgrading-Areas im Vorhinein unbekannt ist, ist dies jedoch nicht zu verhindern. In Bezug auf die sukzessive Aufteilung des Gebietes durch den rekursiven Partitionierungsalgorithmus kann es zudem nötig sein, bei sehr großen topologischen Höhenunterschieden höhere Abweichungen für das Balancekriterium zuzulassen. Besteht in einem Untersuchungsgebiet beispielsweise ein Höhenunterschied von 200m, die zulässige Höhendifferenz wird jedoch mit nur 50m definiert, kann der rekursive Partitionierungsalgorithmus keine gültige Lösung für die erste Unterteilung liefern, da für mindestens ein Teilgebiet die Zulässigkeitsbedingung nicht erfüllt werden kann. In diesem Fall müsste entweder eine höhere Abweichung für das Balancekriterium

zugelassen oder das Gebiet zunächst in zwei Abschnitte unterteilt werden, in denen der jeweilige maximale Höhenunterschied 100m nicht überschreitet. Hierfür kann jedoch auch der rekursive Partitionierungsalgorithmus genutzt werden.

Unüberwindbare Hindernisse und damit für potenzielle Leitungstrassen nicht zur Verfügung stehender Raum werden bereits bei der Maximalnetzerstellung und damit vor der Ableitung der Basisgebiete berücksichtigt, sodass sie nicht von Distriktgrenzen oder potenziellen Leitungstrassen geschnitten werden können. Bei der Aggregation der Basisgebiete zu Distrikten finden sie jedoch keine explizite Berücksichtigung. So bleiben Gegebenheiten, die den Raum natürlich unregelmäßig aufteilen (z.B. Flüsse) [39] und zu einer Individualität der einzelnen Gebiete führen, unberücksichtigt. Wird ein Betrachtungsgebiet von einem solchen natürlichen Hindernis (z.B. von einem Fluss) durchquert, kann das Problem jedoch umgangen werden, indem jeweils eine separate Gebietseinteilung auf beiden Seiten des Hindernisses durchgeführt wird, oder das Hindernis wird manuell als Basisgebiet erfasst und auf diese Weise durch den rekursiven Partitionierungsalgorithmus berücksichtigt.

Soziale, kulturelle, ethnologische und wirtschaftliche Kriterien sowie sozial-räumliche Beziehungen werden nicht explizit im automatisierten Prozess berücksichtigt, da sich die Methodik auf die technischen Faktoren der Siedlungsaufwertung bezieht. Die Methodik bietet jedoch die Möglichkeit diese, bei ausreichend guter Datenlage, in den Gebietsplanungsprozess zu integrieren, indem benachbarte Basisgebiete vor der Gebietseinteilung entsprechend zusammengelegt werden können. Auf diese Weise ist garantiert, dass die betroffenen Bewohner nach der Gebietsaufteilung dem gleichen Distrikt zugeordnet sind, während die eigentliche Einteilung anhand eines anderen Kriteriums der Raumplanung (z.B. die Fläche, Hüttenanzahl, etc.) erfolgt.

Ebene 3

Auf der Ebene des *building level* werden Varianten zukünftiger Versorgungsnetze einer Upgrading-Area generiert. Die Ebene ist hierzu in drei Module, zur Standortermittlung zukünftiger Entnahmestellen sowie zur Topologie- und abschließenden Trassenoptimierung, unterteilt. Die Standorte der zukünftigen Entnahmestellen innerhalb einer Upgrading-Area werden aus den Knoten des maximalen Versorgungsnetzes, d.h. unter Berücksichtigung sämtlicher potenzieller Versorgungsleitungstrassen sowie der Position der einzelnen Abnehmer bzw. Hütten bestimmt. Durch die Angabe einer maximal zulässigen Entfernung zwischen Abnehmern und Entnahmestelle, wird über ein Location-Set-Covering-Problem zunächst die nötige Entnahmestellenanzahl ermittelt. Anschließend werden die Entnahmestandorte über ein *p*-Center-Problem bestimmt. Die Standorte sind so gewählt, dass die maximale Entfernung eines Abnehmers zu einer Entnahmestelle minimal ist. Die Art der Entnahmestelle wird dabei nicht festgelegt, sodass das Modul flexibel in Bezug auf die jeweilig vor Ort akzeptierte und bewährte Form der öffentlichen Wasserbereitstellung (vgl. Kapitel 2.3.2) genutzt werden kann. Das Vorgehen kann jedoch dazu führen, dass sich in dichter besiedelten Bereichen mehrere Abnehmer eine Entnahmestelle teilen müssen, sodass es zu Wartezeiten kommen kann. Die Zuweisung der Häuser zu den Entnahmeknoten (z.B. Abbildung 6-19) zeigt eine solche ungleiche Zuweisung. Während manchem Entnahmeknoten nur verhältnismäßig wenig Hütten zugeordnet sind, können anderen eine höhere Hüttenanzahl zugeordnet sein. Eine praxisnahe Lösung ist die Installation mehrerer Entnahmestellen an einem Standort, was durch die QGIS-Anbindung sehr einfach möglich ist. Ein weiterer zu prüfender Ansatz ist die Berücksichtigung von Wartezeiten vor Service-Einrichtungen, durch Integration von Warteschlangentheorie in die Standorttheorie [128] oder die Formulierung eines *capacitated p-Center-Problem*, in dem die Kapazität einer Entnahmestelle über die Personenanzahl bzw. den damit

verbundenen Wasserbedarf ausgedrückt werden könnte. Beide Fälle erhöhen die Komplexität des Optimierungsproblems deutlich. Grundsätzlich sei angemerkt, dass eine mathematisch optimierte Lokalisation nur zielführend ist, wenn es sich um die Planung öffentlicher Entnahmestellen handelt, da ansonsten soziale Faktoren bei der Bildung von Versorgungsgruppen zu berücksichtigen sind. Das modulare Vorgehen unterstützt durch den Zugriff über QGIS aber auch in diesem Fall die Planung, indem die Möglichkeit besteht, Gemeinschaftsentnahmestellen im Netz anzuordnen. Wurden im Rahmen eines partizipativen Ansatzes unter den Bewohnern Gemeinschaften gebildet und der Ort für die gewünschte Entnahmestelle abgestimmt, werden diese über QGIS manuell eingepflegt, sodass im Anschluss die Module zur Topologie- und DN-Optimierung genutzt werden können.

Bei der Trassierung kann zwischen den Netzformen Verästelungs- sowie Ringnetz gewählt werden, sodass auch Faktoren der Versorgungssicherheit berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass für beide Netzformen schnell verschiedene Netzvarianten generiert werden. Aufgrund des NP-schweren Problems ist das Finden eines globalen Optimums durch beide Algorithmen nicht garantiert. In Bezug auf den für Verästelungsnetze genutzten NetworkX-approximate-steiner-tree-solver wird dies am Beispiel einer Lösung für $f_{street} = 0,5$ [-] deutlich. Die Korrektur der Trasse in Abbildung 7-1 rechts (rot) ist um 26,53m (gewichtet) kürzer als vom automatisiert generierten Ergebnis (links). Dies entspricht ca. 1,5% der gesamten Netzlänge. Eine solche Abweichung erscheint aus praktischer Sicht akzeptabel, trotzdem zeigt das Beispiel, dass durch kleine Veränderungen weitere Leitungsmeter gespart werden können. Auch hier wird der Nutzer durch das vorliegende maximale Versorgungsnetz, das sämtliche Trassierungsoptionen innerhalb einer Upgrading-Area enthält, unterstützt.

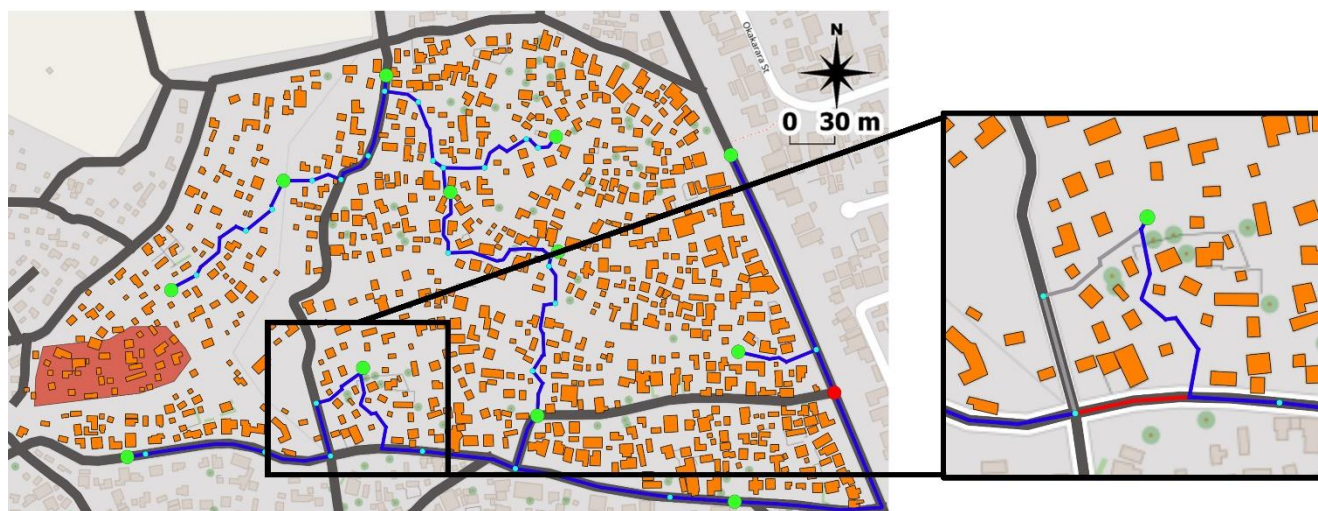


Abbildung 7-1: Automatisiert generiertes Wasserversorgungsnetz mit NetworkX-approximate-steiner-tree-solver (links), manuelle Korrektur (rechts rot bzw. grau) (Quelle Karte/Bebauung/Straßen: [193])

Der entwickelte GA zur Generierung von kantengewichtminimalen Ringnetzen zeigt sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Netztopologie. Die gewählten Beispiele besitzen dabei einen deutlich größeren Lösungsraum als die beträchtlich kleineren Referenznetze aus der Literatur. Durch die Integration des Multiprocessing in den Schritt der Evaluation können Berechnungen parallel auf zur Verfügung stehende Kerne eines Rechners verteilt werden, was zu einer sehr schnellen Berechnung und damit Identifikation einer guten Näherungslösung führt. Bei der Verwendung eines solchen heuristischen Ansatzes gilt es jedoch zu bedenken, dass u.U. unterschiedliche Lösungen bei gleicher Ausgangslage entstehen können, je nachdem in welche Richtung die beste Lösung einer Simulation

konvergiert. Bei der Generierung der Ergebnisse konnten keine bzw. nur sehr geringe Abweichungen der Lösungen zueinander festgestellt werden, sodass dieser Umstand auch als Input für alternative Trassenvarianten gesehen werden kann.

Das Modul der DN-Optimierung steht ebenfalls für Verästelungs- und Ringnetze zur Verfügung. Die Ergebnisse zeigen, dass der in Anlehnung an den GA der Topologieoptimierung entwickelte GA plausible Lösungen generiert, bei denen sämtliche Randbedingungen und Beschränkungen eingehalten werden. Gleichzeitig wird aus Tabelle 6-4, Tabelle 6-5, Tabelle 6-8 und Tabelle 6-9 deutlich, dass die ermittelten Durchmesser die Minimal- bzw. Maximalanforderungen knapp erfüllen. Dies entspricht dem Ziel einer DN-Optimierung. Die Abfolge der Durchmesser in Fließrichtung ist abnehmend und Nennweitensprünge finden nicht statt. Die zusätzliche Möglichkeit zur Berücksichtigung einer hydraulischen Redundanz ermöglicht eine sehr praxisnahe Nutzung. Infolge des modularen Aufbaus kann die Durchmesseranforderung auch unabhängig der vorherigen Schritte auf andere Netze angewendet werden. Damit besteht z.B. die Möglichkeit Optimierungspotenziale in bestehenden Netzen zu identifizieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Methodik leicht übertragbar ist, schnelle Ausbauvarianten generiert und gleichzeitig über ausreichende Schnittstellen zur Integration individueller Planungsentscheidungen verfügt. Trotzdem sei angemerkt, dass einem Netzausbau grundsätzlich eine Prüfung der vorherrschenden hydraulischen Bedingungen und Kapazitäten im Bestandsnetz vorausgeht, da aus diesem ausreichend Wasser zur Deckung des Spitzendurchflusses am Tag des höchsten Wasserbedarfs bzw. der geforderten Löschwassermenge bereitgestellt werden muss. Sind die Kapazitäten nicht ausreichend, kann die Erschließung neuer Bereiche ansonsten das Dienstleistungsniveau drastisch verringern und gar zu einer Verschlechterung der Versorgungsbedingungen führen (z.B. intermittierende Versorgung in Gebieten mit zuvor kontinuierlicher Versorgung, vgl. Kapitel 2.3.3). Des Weiteren muss bedacht werden, dass Infrastrukturverbesserungen, bei denen die willkürliche Landnutzung unangetastet bestehen bleibt, hinsichtlich einer daraus resultierenden ineffizienten Flächennutzung kostspielig sein können bzw. die Integration der Siedlung in den formellen städtischen Bereich erschweren kann. Dieser Abwägungsprozess ist nicht Bestandteil der entwickelten Methodik, da er je nach vorherrschenden Bedingungen individuell und vor allem von der Gemeinschaft getroffen werden muss [24]. Zusammenfassend ersetzt die entwickelte Methodik daher nicht das Expertenwissen vor Ort, sondern dient als unterstützendes Werkzeug im umfassenden Planungsprozess.

7.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Zu Beginn der Arbeit wurden drei Forschungsfragen gestellt, die Anstoß dieser Arbeit waren. Sie können nun wie folgt beantwortet werden:

Forschungsfrage 1: Wie können automatisiert Haupt- und Versorgungsleitungstrassen in den sehr heterogenen, unstrukturierten und dicht bebauten Gebieten identifiziert werden?

Die Herausforderungen bei der Einführung einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung in informellen Siedlungen sowie die Ergebnisse der Literaturrecherche zur automatisierten Netzerstellung zeigen, dass ein Übertrag bestehender Ansätze aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen nicht möglich ist. Die Netzerstellung in der Methodik basiert aus diesem Grund auf den geometrischen Formen und Ausrichtungen der einzelnen, georeferenzierten Objekte im Betrachtungsgebiet bzw. der bestehenden Siedlungsstruktur. Die Siedlungsstrukturdaten müssen hierzu in dem international weit verbreiteten und De-facto-Standard GIS-Dateiformat Shapefile (.shp-Datei) vorliegen. Über eine

Schnittstelle zwischen dem in dieser Arbeit genutzten QGIS und der Eclipse-Entwicklungsumgebung für Python ist der gesamte Prozess der Netzerstellung nach Angabe des Dateipfades sowie Definition einer Mindesttrassenbreite automatisiert. Zunächst werden entlang der jeweiligen Objekthüllen in engen Abständen Hilfspunkte generiert, aus denen unter Berücksichtigung von Abstandsbeziehungen Voronoi-Polygone bzw. Voronoi-Kanten abgeleitet werden. Voronoi-Polygone stammen aus der algorithmischen Geometrie und werden zur Modellierung des Raumes und speziell zur Lösung geometrischer Distanzprobleme genutzt. Anschließend erfolgt eine Verschneidung der Voronoi-Kanten mit den Siedlungsstrukturobjekten, sodass ein Maximalnetz abgeleitet wird. Aus diesem werden durch Angabe einer Mindesttrassenbreite durch den Nutzer potenzielle Haupt- und Versorgungsleitungstrassen identifiziert. Anhand der Fallbeispiele in Kapitel 6 wird deutlich, dass durch den entwickelten Ansatz selbst bei sehr heterogenen Bebauungsstrukturen ohne einheitliche Gebäudeausrichtung potenzielle Trassen gefunden werden. Zusätzlich können bestehende Straßen, Wege sowie Bestandsleitungen einfach integriert und durch die Verwaltung der Elemente in einer Attributtabelle später separat bewertet werden. Der automatisierte und geometriebasierte Ansatz ist leicht auf andere Gebiete übertragbar bzw. ermöglicht dessen Integration in lokale Gegebenheiten.

Forschungsfrage 2: Wie kann eine Sektorierung großer informeller Siedlungsbereiche vorausschauend in die Planung integriert werden, sodass eine hohe Flexibilität in Bezug auf die Erschließung zukünftiger Upgrading-Areas mit einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung erhalten bleibt?

Die Aufteilung großer informeller Bereiche in kleinere Untereinheiten, sog. Distrikte oder Upgrading-Areas, ist gängige Praxis. Es gilt dabei zu bedenken, dass Möglichkeiten zur weiteren Erschließung im Rahmen der Sektorierung geschaffen werden bzw. erhalten bleiben. Die Gebietsunterteilung in dieser Methodik basiert auf einer vorangestellten Ermittlung potenzieller Hauptleitungstrassen. Die von Hauptleitungstrassen umgebenen Flächen werden als Basisgebiete bezeichnet und können entweder manuell oder über einen rekursiven Partitionierungsalgorithmus in eine zu wählende Distriktanzahl zusammengefasst werden. Die Integration verschiedener Kompaktheitsmaße zur Bewertung der Einteilung sowie die Möglichkeit der Aggregation der einzelnen Maße zu einem summenbasierten Kompaktheitsmaß ermöglicht es, Einfluss auf die Distriktformen zu nehmen. Die Integration der geodätischen Höhe in Form einer Zulässigkeitsbedingung gewährleistet bereits bei der Gebietsunterteilung, dass die entstehenden Distrikte über eine Druckzone versorgt werden können. Dies reduziert die Komplexität des späteren Versorgungssystems da eine Verletzung des maximalen Höhenunterschieds die Einführung einer druckbasierten Wasserversorgung aus hydraulischer Sicht erschwert. Das Vorgehen führt dazu, dass die entstehenden Distrikte von Hauptleitungstrassen bzw. Hauptleitungen umgeben sind, über die eine zukünftige Erschließung erfolgen kann bzw. über die flexible Erschließungsmöglichkeiten in Bezug auf die Einspeisestellen existieren. Gleichzeitig bieten die Hauptleitungstrassen die Möglichkeit bereits vor der eigentlichen Aufwertung Basisdienstleistungen in den Randbereichen zur Verfügung zu stellen. Die Literaturrecherche zeigt, dass die Bereitstellung von Basisdienstleistungen entlang von Distriktgrenzen bereits heute gängige Praxis ist [25]. Dieser Ansatz wird durch das Vorgehen weiter gefördert. Die Verwendung einer geometriebasierten Methode und die Integration wasserversorgungsspezifischer Einteilungskriterien ermöglicht eine Gebietseinteilung unter Berücksichtigung der zukünftigen Erschließung. Jeder Distrikt ist vollständig von Hauptleitungstrassen umgeben, sodass eine sehr hohe Flexibilität in Bezug auf die weitere Erschließung gegeben ist.

Forschungsfrage 3: Wie können unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten automatisiert Ausbauvarianten generiert werden, die zudem die Transparenz in der Entscheidungsfindung sowie das Kriterium einer gerechten Erreichbarkeit einer öffentlichen Entnahmestelle unterstützen?

Die Entwicklung von Ausbauvarianten bezieht sich auf die Ebene des *building level* und enthält die Ermittlung von Entnahmestellenanzahl und -standorten sowie eine optimierte Trassierung und Dimensionierung der Leitungen. Die Grundlage bilden die identifizierten potenziellen Versorgungsleitungstrassen bzw. das maximale Versorgungsnetz einer Upgrading-Area. Dem Nutzer werden zunächst sämtliche Trassierungsmöglichkeiten visualisiert. Falls gewünscht können auf diese Weise bereits vor Beginn der eigentlichen Variantenentwicklung Trassen und potenzielle Entnahmeknoten ausgeschlossen oder, falls z.B. punktuelle Unterschreitungen der Mindesttrassenbreite zugelassen werden, hinzugefügt werden. Unter Berücksichtigung des maximalen Versorgungsnetzes und dessen Knoten sowie über die Angabe einer maximal zulässigen Entfernung zwischen Abnehmer und Entnahmestelle wird ein Location-Set-Covering-Problem formuliert. Dieses ermittelt die minimal erforderliche Anzahl an Entnahmestellen zur Sicherstellung der Versorgung aller Abnehmer einer Upgrading-Area innerhalb der definierten Entfernung. Da die Methodik die Planung bei der Einführung öffentlicher Entnahmemöglichkeiten unterstützt bzw. auf die Erreichung der Versorgungskategorien „basic access“ bzw. „intermediate access“ zielt, ist die Einführung von (privaten) Hausanschlüssen nicht vorgesehen. Dies führt dazu, dass infolge der beschränkten Entnahmestellenanzahl deren Erreichbarkeit im Gebiet für die Abnehmer zwangsläufig variiert. Dieser „Ungerechtigkeit“ wird durch die Ermittlung der Entnahmestellenstandorte über die Lösung eines p-Center-Problems entgegengewirkt. Unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Anzahl bestimmt das p-Center-Problem Standorte, an welchen die maximale Entfernung eines Abnehmers zu einer Entnahmestelle minimal ist, d.h. der am weitesten entfernte Abnehmer liegt so nah wie möglich an einer Entnahmestelle. Wie die Literaturrecherche zeigt (vgl. Kapitel 2.3.1), ist der Wasserverbrauch direkt von der Erreichbarkeit bzw. der Entfernung der Entnahmestelle abhängig. Somit ist die Identifikation der Entnahmestandorte über die Formulierung und Lösung eines p-Center-Problems zielführend, da diese insbesondere für Probleme im kommunalen Dienstleistungsbereich genutzt werden, in denen die Nachfrage abhängig von der Entfernung ist, bzw. gegen null fällt falls eine Maximalentfernung überschritten wird [133], [126], [128], [132]. Unabhängig von der ermittelten „optimalen“ Lösung, können je nach lokalen Gegebenheiten manuell weitere Entnahmestellen über die GIS-Anbindung hinzugefügt werden, die anschließend automatisiert von den weiteren Modulen zur Topologie- und DN-Optimierung erkannt und berücksichtigt werden. Dabei gilt es zu bedenken, dass die ermittelten „optimalen“ Standorte nicht allein den Erfolg einer Upgrading-Maßnahme garantieren. Die Ermittlung der Anzahl und Standorte über das Location-Set-Covering-Problem sowie das p-Center-Problem hilft die Auswirkungen unterschiedlicher Abdeckungskriterien in Bezug auf die Erreichbarkeit einer Entnahmestelle zu bestimmen und über die Kopplung an QGIS zu visualisieren. Auf diese Weise werden Entscheidungsträger im Abwägungsprozess unterstützt, während das Vorgehen transparent bleibt. Auf der Suche nach einer finalen Trasse kann der Nutzer im Anschluss zwischen einem Ringnetz oder einem Verästelungsnetz wählen. Dabei können über die Berücksichtigung von Umgebungsfaktoren verschiedene Trassenvarianten erzeugt werden. In beiden Fällen zeigen die Ergebnisse, dass gute Näherungslösungen der NP-schweren Probleme gefunden werden. Auch hier können manuelle Änderungen leicht eingepflegt werden. Die abschließende DN-Optimierung ermittelt unter Berücksichtigung der Verbräuche, hydraulischer Randbedingungen und Systembeschränkungen, Geländetopographie, Netztopologie und Netzform ein hydraulisch optimales Netz. Die Mischung aus automatisierter Netzerstellung, Berücksichtigung verschiedener Umgebungsfaktoren und individuellen

Eingriffsmöglichkeiten zu jedem Zeitpunkt bietet der Planung zahlreiche Möglichkeiten zur Ermittlung von Ausbauvarianten. Die Visualisierung sämtlicher Zwischenschritte führt dabei zu einem transparenten Prozess, während das Problem der „gerechten“ Anordnung der Entnahmestellen aus der Perspektive der Erreichbarkeit unter Berücksichtigung tatsächlicher Wegstrecken über die Formulierung eines mathematischen Optimierungsproblems optimal gelöst wird.

8 Methodenerweiterung und Ausblick

Der interdisziplinäre Ansatz der Methodik enthält vielfältige Anknüpfungspunkte zukünftiger Forschungstätigkeiten. Im Folgenden werden einige dieser potenziellen Anknüpfungspunkte vorgestellt und vorhandene Verbindungen zur Methodik aufgezeigt bzw. auf bestehende Vorarbeiten im Rahmen der Methodik verwiesen.

8.1 Automatisierte Datengenerierung

Sämtliche Schritte der entwickelten Methodik basieren im Wesentlichen auf der Maximalnetzerstellung, dessen Grundlage wiederum die Hütten im Untersuchungsgebiet, abgebildet als georeferenzierte Polygone, sind. Im Rahmen der Fallbeispiele stammen diese Daten aus OpenStreetMaps oder wurden manuell, anhand einer Luftbildaufnahme, digitalisiert. Hinsichtlich der Gewinnung geographischer Informationen nutzen neue Ansätze, wie z.B. der von Rausch et al. [108], [32] und Leonita et al. [200] hochauflösende Luftbildaufnahmen. Generell existieren zur Slumerkennung, ihrer Kartierung und Klassifizierung aus hochauflösenden Luftbildaufnahmen zahlreiche Forschungsansätze [159], [201], [202], [203], [190], [204]. Auch zur automatisierten Kartierung von Straßen und Wegen existieren Forschungsansätze aus dem Bereich Remote Sensing. Wang et al. [205] stellen einige dieser Ansätze vor und zeigen bestehende Herausforderungen auf. Diese Form der Datengenerierung besitzt aufgrund ihres örtlichen Bezugs, Aktualität und Transparenz Vorteile gegenüber der herkömmlichen Datenerhebung. Sie ermöglicht es, schnelle und auf den tatsächlich vorherrschenden Bedingungen basierende Vorplanungen oder zumindest Diskussionsgrundlagen zu generieren, die für darüberhinausgehende Planungen genutzt werden können. Wie Lucci et al. [206] und Leonita et al. [200] zeigen, ist eine traditionelle Datenerhebung (Fragebögen, Zensusdaten, manuelle Erhebungen und Kartierungen, etc.) zudem aus unterschiedlichen Gründen fehleranfällig und kann so eine konsistente Planung erschweren und damit den Erfolg einer Upgrading-Maßnahme gefährden. Die Verwendung von Bilderkennungstechnik ist kein expliziter Bestandteil dieser Arbeit. Es sei jedoch angemerkt, dass georeferenzierte Daten überhaupt erst die Verwendung automatisierter Gebietsplanungsprozesse ermöglichen. Durch Integration von Ansätzen aus dem Bereich Remote Sensing könnte somit zum einen die Aktualität der Datengrundlage, zum anderen der Automatisierungsgrad der Methodik weiter gesteigert werden.

8.2 Dynamik in den Gebieten und Unsicherheiten

Die Einführung einer Wasserversorgung wertet die Lebensbedingungen in den jeweiligen Gebieten deutlich auf. Dies kann dazu führen, dass der Zustrom von Menschen in diese Gebiete verstärkt wird. Die Folge ist, dass die auf einen bestimmten Bedarf dimensionierte Wasserversorgungsstruktur schnell an ihre Grenzen stößt. Die Auslegung einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung ist aus dieser Perspektive mit Unsicherheiten behaftet. Die Betrachtung von Unsicherheiten ist im Bereich der Wasserwirtschaft bereits Gegenstand aktueller Forschungstätigkeiten [207], [17]. Im Hinblick auf die Methodik könnte ein Modul zur Entwicklung von Bevölkerungsszenarien für die jeweils betrachtete Upgrading-Area integriert werden, das die Grundlage zur Auslegung der Versorgungsstruktur bildet. Im Falle eines zu erwartenden Bevölkerungswachstums müsste die Versorgungsstruktur bereits im Vorhinein entsprechend ausgelegt werden. Unter der Annahme, dass die Bevölkerungsdichte innerhalb einer Upgrading-Area gleichmäßig über die Fläche zunimmt, könnte an den Entnahmestellen zusätzlicher Platz für weitere Entnahmemarmaturen vorgesehen werden. Eine andere Möglichkeit wäre

die Integration der Warteschlangentheorie in die Standortplanung der Entnahmestellen[128]. In beiden Fällen müssten jedoch die Versorgungsleitungen entsprechend den zukünftig zu erwartenden Entnahmemengen dimensioniert werden, da eine Neuverlegung der Leitungen in größerer Dimension aus Kostengründen vermieden werden sollte. Rausch [17] beschreibt den Ansatz der Überdimensionierung als ein häufig gewähltes Vorgehen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten. Wird das Netz jedoch vorab mit Leitungen größerer Dimension ausgelegt, steigt die Gefahr von Stagnationsbereichen. Hiervon wären insbesondere Ringnetze betroffen. Um einer Beeinträchtigung der Wasserqualität durch starke Erwärmung und Verkeimung des Wassers infolge Stagnation vorzubeugen, wäre die Einführung eines Verästelungsnetzes zielführender. Die Positionierung der Entnahmestellen am Ende einer Stichleitung führt dazu, dass ähnlich wie bei Hydrantenspülungen ein kontinuierlicher Austausch des Wassers in der Stichleitung stattfindet, sodass die Verweilzeit des Wassers im Netz reduziert würde.

8.3 Implementierung monetärer Kosten

Die Betrachtung verschiedener Kostenarten spielt bei der Planung von Infrastrukturprojekten eine übergeordnete Rolle. Neben den Investitionskosten müssen auch Betriebs-, Instandhaltungs- und Wartungskosten sowie Entsorgungskosten für Betriebsmittel in den Entscheidungsprozess integriert werden. Aufgrund der hohen Investitionskosten für den Bau der (erdverlegten) Trinkwasserinfrastruktur sind an entsprechenden Versorgungsprojekten oftmals Entwicklungs- und Förderbanken wie z.B. Weltbank (Worldbank), Asiatische Entwicklungsbank (ADB), Afrikanische Entwicklungsbank (AfDB), Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) beteiligt. Nach Fertigstellung des Wasserversorgungssystems werden die Kosten aus technischer Sicht u.a. durch die Art und den Umfang der Wassergewinnung und -aufbereitung sowie für Pumpenbetrieb, Armaturenwartung, Leitungssanierung und -erneuerung bestimmt. Das tendenziell geringere Einkommen der in informellen Siedlungen lebenden Bevölkerung führt dazu, dass die konventionelle Refinanzierung sämtlicher Kosten über den Wasserpreis meist schwierig ist. In diesem Zusammenhang muss ein Weg gefunden werden dem knappen Gut durch einen Preis eine gewisse Wertschätzung zukommen zu lassen, während auf der anderen Seite das Kriterium der Erschwinglichkeit steht. Noakes und Franceys [50] stellen verschiedene Tarifsysteme für einkommensschwache Haushalte vor und setzen diese mit technischen Ansätzen zur Wasserbereitstellung in Verbindung. In der Zukunft könnte die Methodik um ein Modul erweitert werden, das durch Integration einer detaillierten Finanzanalyse der verschiedenen Versorgungsmöglichkeiten und Wassertarifstrukturen Fragen potenzieller Refinanzierungsmöglichkeiten bei der Variantenentwicklung mit berücksichtigt.

Grundsätzlich enthält die Methodik derzeit noch keine Betrachtung monetärer Kosten oder verschiedener Kostenarten, sodass hier vielfältige Anknüpfungspunkte existieren. Die Investitionskosten für den Leitungsbau werden über Leitungsmeter bzw. Kantengewichte abgebildet. Sie stehen damit in einem direkten Zusammenhang zu monetären Kosten, da diese prinzipiell mit zunehmender Leitungslänge steigen. Hierbei verursachen die Erdarbeiten bei einer konventionellen Grabenerstellung den Hauptteil der Baukosten, sodass dieser Kostenfaktor einen großen Einfluss auf die Investitionsgesamtkosten hat. Der kantengewichtbasierte Ansatz der Topologieoptimierung ermöglicht jedoch die Mitarbeit der Bevölkerung im Rahmen eines partizipativen Ansatzes bei der Erstellung der Rohrgräben zu berücksichtigen. Hierzu werden Trassen bzw. Rohrgräben, die unter Zuarbeit der Bevölkerung erstellt werden, zunächst in der Attributtabelle gekennzeichnet. Anschließend kann über den Umgebungsfaktor Einfluss auf das Kantengewicht genommen werden, sodass diese Rohrgräben und

damit die Trassen günstiger im Vergleich zu anderen Trassen gestellt werden können. Schwieriger ist hingegen die Betrachtung monetärer Kosten bei der Ermittlung von Anzahl und Position der Entnahmestellen. Zwar ist von höheren Investitionskosten auszugehen, je mehr Entnahmestellen in einem Gebiet geplant werden, doch hat die Position der Entnahmestellen direkten Einfluss auf die Erreichbarkeit und damit auch auf den personenbezogenen täglichen Wasserverbrauch [49]. Die Kosten eines Individuums für den Wasserbezug aus einer entfernteren Quelle sind automatisiert schwer monetär auszudrücken, da es sich um persönliche Kosten handelt, die je nach Gesundheit, familiären Verhältnissen, Arbeitszeiten etc. individuell sind. In der DN-Optimierung können monetäre Kosten dagegen sehr leicht implementiert werden. Derzeit enthält die Kostenfunktion den Wert des jeweiligen Durchmessers in der Einheit mm. Bei vorliegenden Preisen zu Leitungen nach Dimension und Meter könnten diese in die Kostenfunktion übernommen werden.

8.4 Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Moduls der Standortplanung

Löschwasserversorgung

Die Bereitstellung von Löschwasser über das öffentliche Trinkwassernetz ist gängige Praxis in Deutschland. Der Nachweis einer ausreichenden Löschwasservorhaltung ist daher Bestandteil der Bestandsnachweise, die vom Wasserversorgungsunternehmen erbracht werden. Die Anforderungen für die Bereitstellung von Löschwasser durch die öffentliche Trinkwasserversorgung enthält in Deutschland das DVGW-Arbeitsblatt W405 [84]. Darin heißt es, dass der Löschbereich „(...) sämtliche Löschwasserentnahmemöglichkeiten in einem Umkreis (Radius) von 300m um das Brandobjekt [erfasst]“ [84]. Das bedeutet, dass ein Hydrant für die Löschwasserbereitstellung in Betracht gezogen wird, obwohl er sich ggf. in einer parallelen Straße befindet, die durch zwei Reihen mehrstöckiger Gebäude vom Brandort getrennt ist. Trotzdem ist die Berücksichtigung des Radius bei der Löschwassermengenberechnung in entsprechenden Hydraulikprogrammen gängige Praxis (z.B. Stanet). Die Ermittlung optimaler Positionen für Entnahmemöglichkeiten in der Methodik kann 1:1 auf die Positionierung von Hydranten übertragen werden. Der Vorteil ist, dass durch die Berücksichtigung tatsächlicher Weglängen falsche Löschwassernachweise infolge der Berücksichtigung von Radien um ein Brandobjekt vermieden werden. Das Brandobjekt entspricht in diesem Fall der Position der Abnehmer, während das Straßennetz/Fußgängeretz die Grundlage zur Ermittlung der tatsächlichen Weglängen bildet. Die potenziellen Hydrantenstandorte entsprechen modelltechnisch sämtlichen Knoten des Trinkwassernetzes. Falls gewünscht können zusätzliche Knoten entlang der Leitungen in definierten Abständen hinzugefügt werden.

Dezentrale Wassergewinnung/Aufbereitung

Ein ähnlicher Ansatz lässt sich für die Identifizierung von Standorten für Kleinstanlagen bzw. Standorten der dezentralen Wassergewinnung (Brunnen, Quellen, etc.) zur Versorgung von Streusiedlungen dörflicher Art ableiten. Hierzu werden zunächst sämtliche potenzielle Wassergewinnungsstandorte identifiziert und als Knoten modelliert (sie entsprechen den Entnahmestandorten aus Kapitel 5, in diesem Fall würden sie als *Einspeisestandorte* bezeichnet). Die einzelnen Siedlungen entsprechen den Abnehmern und werden als Abnehmerknoten modelliert. Anschließend werden die potenziellen Einspeisestandorte mit den Abnehmerknoten über potenzielle Trassen verbunden und die jeweilige Trassenlänge ermittelt. Es entsteht ein Netz aus Knoten und Strängen, das die Grundlage für die Standortermittlung darstellt. Je nach Zielsetzung kann die Planung im Anschluss ermitteln, wie viele Gewinnungsstandorte nötig sind, um jede Siedlung innerhalb einer definierten Entfernung zu

erschließen (Location-Set-Covering-Problem) oder wo eine definierte Anzahl an Gewinnungsstandorten optimal platziert werden sollte, damit die am weitesten entfernteste Siedlung so nah wie möglich am Gewinnungsstandort liegt. Die Module zur Topologie- und DN-Optimierung ermitteln schließlich eine optimierte Trassierung sowie die zu wählenden Leitungsdurchmesser.

9 Zusammenfassung

Die Einführung einer Trinkwasserversorgungsinfrastruktur in informellen Siedlungen und Slums in Subsahara-Afrika stellt Versorgungsunternehmen schon heute vor große Herausforderungen. Entsprechend den derzeitigen Prognosen wird sich die Situation aufgrund des anhaltenden Bevölkerungswachstums sowie einer anhaltenden Urbanisierung und Landflucht weiter verschärfen. Das Erreichen des Sustainable Development Goal 6: „Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all“ erscheint daher ohne Ergreifung entsprechender Maßnahmen mittelfristig unrealistisch. Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit eine Methodik zur Unterstützung der Planung bei der Einführung einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgungsinfrastruktur in informellen Siedlungen aus technischer Sicht entwickelt.

Im Fokus steht die automatisierte Erkennung potenzieller Haupt- und Versorgungsleitungstrassen auf Grundlage der bestehenden Bebauungs- und Infrastruktur sowie eine darauf aufbauende automatisierte Generierung verschiedener Netzausbauvarianten unter Berücksichtigung individueller Vorgaben zur Erreichung der Versorgungskategorien „basic access“ und „intermediate access“ nach Definition der WHO [1]. Hierzu orientiert sich die Methodik an drei Forschungsfragen, die ihm Rahmen der Arbeit beantwortet werden:

- *Forschungsfrage 1: Wie können automatisiert Haupt- und Versorgungsleitungstrassen in den sehr heterogenen, unstrukturierten und dicht bebauten Gebieten identifiziert werden?*
- *Forschungsfrage 2: Wie kann eine Sektorierung großer informeller Siedlungsbereiche vorausschauend in die Planung integriert werden, sodass eine hohe Flexibilität in Bezug auf die Erschließung zukünftiger Upgrading-Areas mit einer leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung erhalten bleibt?*
- *Forschungsfrage 3: Wie können unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten automatisiert Ausbauvarianten generiert werden, die zudem die Transparenz in der Entscheidungsfindung sowie das Kriterium einer gerechten Erreichbarkeit einer öffentlichen Entnahmestelle unterstützen?*

Das Gerüst der Methodik bildet ein modularer Aufbau, in dem Ansätze der algorithmischen Geometrie, Graphentheorie, Logistik, Gebietsplanung, mathematischen Optimierung und Hydraulik vereinigt werden. Der gesamte Prozess ist automatisiert in der Programmiersprache Python umgesetzt und eng an ein GIS-System (QGIS) gekoppelt. Das Zusammenspiel aus modularem Aufbau und GIS-Anbindung ermöglicht eine flexible Integration individueller Planungsvorgaben, gleichzeitig werden die Auswirkungen von Planungsentscheidungen visualisiert. Die Validierung des Vorgehens erfolgt praxisnah anhand zweier großer informeller Siedlungen in Subsahara-Afrika.

Die Arbeit beginnt mit einem Einblick in bestehende Ansätze aus der Entwicklungszusammenarbeit sowie Grundlagen zur Wasserverteilung, Mathematik, Informatik und Logistik, die innerhalb der einzelnen Module der Methodik aufgegriffen werden. Anschließend beginnt der Aufbau der Methodik. Sie ist in die drei Betrachtungsebenen *informal settlement level*, *district level* und *building level* gegliedert, welche jeweils aus mehreren Modulen bestehen. Einen Überblick enthält Abbildung 5-1.

Die Grundlage bildet ein Maximalnetz auf der Ebene des *informal settlement level*, das im Kontext von Forschungsfrage 1 automatisiert aus georeferenzierten Gebietsdaten über Voronoi-Polygone, einem Ansatz aus der algorithmischen Geometrie, abgeleitet wird. Über die Definition einer Mindestbreite für potenzielle Haupt- und Versorgungsleitungstrassen wird das Maximalnetz anschließend entsprechend

des tatsächlich vorherrschenden Platzangebots reduziert. Sämtliche Attribute der einzelnen Trassenabschnitte werden in einer Attributtabelle dokumentiert, sodass in einer späteren Topologieoptimierung zwischen verschiedenen Trassen (über freie Flächen, entlang bestehender Straßen und Wege sowie Bestandsleitungen) differenziert werden kann.

Auf der Ebene des *district level* erfolgt im Kontext von Forschungsfrage 2 eine Gebietsunterteilung unter Berücksichtigung der zuvor identifizierten potenziellen Hauptleitungstrassen. Hintergrund ist, dass in der Realität die Sektorierung eines informellen Siedlungsbereichs in einzelne Distrikte und die Einführung von Infrastrukturen in starker Abhängigkeit zueinander stehen. Die Gebietsunterteilung erfolgt durch einen rekursiven Partitionierungsalgorithmus unter Berücksichtigung der Kriterien Balance, Kompaktheit, vollständige Zuordnung und Zusammenhang in Anlehnung an Kalcsics [149]. Im Algorithmus sind verschiedene Kompaktheitsmaße implementiert, über welche gewichtet oder ungewichtet Einfluss auf die jeweiligen Distriktformen genommen werden kann. Des Weiteren verfügt der Algorithmus über wasserversorgungsspezifische Kriterien in Form von Zulässigkeitsbedingungen, sodass bereits durch die Gebietsunterteilung betriebliche Herausforderungen aus hydraulischer Sicht in den einzelnen Distrikten vermieden werden. Über die QGIS-Anbindung besteht die Möglichkeit weitere Faktoren (z.B. soziale, kulturelle, ethnologische Faktoren) sowie sozial-räumliche Beziehungen zu integrieren. Das Vorgehen ermöglicht die Bereitstellung von Basisdienstleistungen entlang der generierten Distriktgrenzen, während es gleichzeitig eine hohe Flexibilität für die spätere Erschließung der einzelnen Distrikte in Bezug auf die Einspeisepunkte entlang der Haupttrassen bietet.

Vor dem Hintergrund von Forschungsfrage 3 beschäftigt sich die dritte Ebene, das *building level*, mit der Einführung eines Trinkwasserversorgungsnetzes innerhalb eines Distrikts bzw. einer Upgrading-Area. Zunächst werden sämtliche Möglichkeiten einer zukünftigen Trassierung für eine leitungsgebundene Wasserversorgung aufgezeigt. Diese können zunächst als erste Diskussionsgrundlage im partizipativen Upgrading-Prozess dienen. Die daraus resultierende Frage nach den Standorten der Entnahmestellen wird durch Methoden aus der Logistik unterstützt. Falls nicht individuell vorgegeben, ermittelt ein Location-Set-Covering-Problem in Kombination mit einem p-Center-Problem die minimal erforderliche Entnahmestellenanzahl sowie die optimalen Entnahmestellenstandorte im Netz. Beide werden in Form eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblems (MILP) formuliert und über einen open-source-solver gelöst. Durch Verwendung des p-Center-Problems zur Standortermittlung erfolgt diese unter dem Gesichtspunkt einer möglichst gerechten Erreichbarkeit. Die Erreichbarkeit einer Entnahmestelle wird dabei nicht über einen Radius, sondern anhand der tatsächlichen Wegstrecke, die ein Abnehmer bis zu einer Entnahmestelle zurücklegen muss, bestimmt. Anschließend werden die Entnahmestellen sowie eine beliebige Anzahl von Einspeisestellen im Rahmen einer Topologieoptimierung miteinander verbunden. Hierzu kann zwischen den Netzformen Verästelungs- und Ringnetz gewählt werden. Das kostenminimale Verästelungsnetz wird über ein Steiner-Tree-Problem beschrieben, während das kostenminimale Ringnetz über einen genetischen Algorithmus mit integriertem Multiprocessing angenähert wird. In beiden Fällen besteht die Möglichkeit Trassen entlang von Straßen, Wegen, über Freiflächen oder Bestandsleitungen differenziert zu gewichten, sodass je nach Planungsansatz zahlreiche Ausbauvarianten generiert werden können. Abschließend werden die Leitungen jeder Ausbauvariante dimensioniert, indem die optimalen Leitungsdurchmesser durch einen weiteren genetischen Algorithmus unter Berücksichtigung des Verbrauchs sowie zu wählender Rohrtypen ermittelt werden.

Die anschließende Validierung anhand einer informellen Siedlung in Windhoek (Namibia) und Lusaka (Sambia) zeigt, dass plausible Ausbauvarianten bis hin zur Dimensionierung der Leitungen generiert werden. Der Übertrag der Methodik auf eine Siedlung im ländlichen Raum in Mali verdeutlicht weitere Anwendungspotenziale. Die Visualisierungsmöglichkeit sämtlicher (Zwischen-)Schritte über die QGIS-Anbindung führt zu einem durchgängig nachvollziehbaren Prozess und reproduzierbaren Ergebnis. Dies trägt maßgeblich zur Transparenz in der Entscheidungsfindung bei und liefert somit einen wichtigen Beitrag zur Akzeptanz einer Maßnahme.

Während in dieser Arbeit frei verfügbare Daten zur Validierung der Methodik genutzt wurden, könnten zukünftig aktuelle Luftbildaufnahmen aus Drohnenüberfliegungen in Kombination mit Bilderkennungssoftware integriert werden, sodass tagesgenaue Ausbauoptionen bei der Planung zur Verfügung stünden. Die Anwendbarkeit der Methodik ist durch den Verzicht von kommerzieller Software sowie der Lauffähigkeit auf handelsüblichen Rechnern gegeben. Da zukünftig mit einem anhaltenden Zustrom von Menschen in Slums und informelle Siedlungen in Städten südlich der Sahara zu rechnen ist, sollten möglichst frühzeitig entsprechende Maßnahmen ergriffen werden, um eine auf die vorherrschenden Bedingungen angepasste Infrastruktur zu implementieren. Hierzu kann die hier erarbeitete Methodik, integriert in einen umfassenden Stadtplanungsansatz, einen wichtigen Beitrag liefern.

Literaturverzeichnis

- [1] World Health Organization (Hrsg.) (2020): Domestic water quantity, service level and health. World Health Organization. World Health Organization, Genf, Schweiz.
- [2] United Nations - General Assembly (2010): The human right to water and sanitation. In: Resolution 64/292.
- [3] van Welie, M.J.; Truffer, B.; Gebauer, H. (2019): Innovation challenges of utilities in informal settlements: Combining a capabilities and regime perspective. In: Environmental Innovation and Societal Transitions (33), S. 84-101. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.03.006>.
- [4] United Nations (Hrsg.) (2022): The Sustainable Development Goals – Report 2022. United Nations, New York.
- [5] Deutscher Bundestag (2020): Stand der Urbanisierung in Afrika. WD 2: Auswärtiges, Völkerrecht, wirtschaftliche Zusammenarbeit.
- [6] United Nations (2019): Special edition: progress towards the Sustainable Development Goals – Report of the Secretary-General. Economic and Social Council, New York, NY.
- [7] Skibbe, C. (2017): Wirtschaftliche Aussichten für (Subsahara-)Afrika & die Rolle der Urbanisierung. Abteilung Strategie und entwicklungspolitische Grundsätze, Köln.
- [8] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (Hrsg.) (2022): World Population Prospects 2022: Summary of Results, New York.
- [9] World Bank (2022): Urban population (% of total population) - Sub-Saharan Africa. United Nations Population Division, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?end=2021&locations=ZG&start=1960&view=chart> [Zugriff am: 22.08.2022].
- [10] Chiwele, D.; Lamson-Hall, P.; Wani, S. (2022): Informal Settlements in Lusaka. Policy Brief. International Growth Centre (IGC) and the UN-Habitat.
- [11] Brown, R.; Leder, K.; Wong, T.; French, M.; Diego-Ramirez-Lovering; Chown, S.; Luby, S.; Clasen, T.; Reidpath, D.; El Sioufi, M.; McCarthy, D.; Forbes, A.; Simpson, J.; Allotey, P.; Cahan, B. (2018): Improving human and environmental health in urban informal settlements: the Revitalising Informal Settlements and their Environments (RISE) programme. In: The Lancet Planetary Health (2), S. 29. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30114-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30114-1).
- [12] Reyes Plata, J.A.; Galindo Pérez, M.C. (2018): Access to Basic Services: From Public Benefit Practice to a Sustainable Development Approach. In: Leal Filho, W.; Wall, T.; Azeiteiro, U. et al. (Hrsg.): Good Health and Well-Being, Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer International Publishing, Cham, S. 1-10.
- [13] Brown-Luthango, M.; Reyes, E.; Gubevu, M. (2017): Informal settlement upgrading and safety: experiences from Cape Town, South Africa. In: Journal of Housing and the Built Environment (32), Heft 3, S. 471-493. <https://doi.org/10.1007/s10901-016-9523-4>.
- [14] United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (2007): Enhancing urban safety and security – Global report on human settlements 2007, Earthscan, London.
- [15] United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (2014): A Practical Guide to Designing, Planning, And Executing Citywide Slum Upgrading Programmes, Nairobi.

-
- [16] Abbott, J. (2003): The use of GIS in informal settlement upgrading: its role and impact on the community and on local government. In: *Habitat International* (27), Heft 4, S. 575-593. [https://doi.org/10.1016/S0197-3975\(03\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S0197-3975(03)00006-7).
- [17] Rausch, L. (2019): *Mathematische Optimierung von Wasserversorgungsnetzwerken für informelle Siedlungen in Mega Cities*, Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik Heft 21, Shaker Verlag, Aachen.
- [18] Satterthwaite, D.; Archer, D.; Colenbrander, S.; Dodman, D.; Hardoy, J.; Mitlin, D.; Patel, S. (2020): Building Resilience to Climate Change in Informal Settlements. In: *One Earth*, Heft 2, S. 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.002>.
- [19] Savic, D.; Mala-Jetmarova, H.; Sultanova, N. (2018): History of Optimization in Water Distribution System Analysis. In: *WDSA/CCWI Conference (Hrsg.): Conference Proceedings of WDSA/CCWI Conference 2018*, Kingston, Ontario.
- [20] Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B. (2019): *Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [21] Wekesa, B.W.; Steyn, G.S.; Otieno, F.A.O. (2011): A review of physical and socio-economic characteristics and intervention approaches of informal settlements. In: *Habitat International* (35), Heft 2, S. 238-245. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2010.09.006>.
- [22] Nassar, D.M.; Elsayed, H.G. (2018): From Informal Settlements to sustainable communities. In: *Alexandria Engineering Journal* (57), Heft 4, S. 2367-2376. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.09.004>.
- [23] Abbott, J. (2002): An analysis of informal settlement upgrading and critique of existing methodological approaches. In: *Habitat International* (26), Heft 3, S. 303-315. [https://doi.org/10.1016/S0197-3975\(01\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S0197-3975(01)00049-2).
- [24] United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (2012): *Streets As Tools For Urban Transformation In Slums – A Street-Led Approach to Citywide Slum Upgrading*, Nairobi.
- [25] Brelford, C.; Martin, T.; Hand, J.; Bettencourt, L. (2018): Toward cities without slums: Topology and the spatial evolution of neighborhoods. In: *Science Advances* (4), Heft 8, S. 4644ff. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar4644>.
- [26] Mosbach, J.; Sonnenburg, A.; Fiedler, J.E., Urban, W.. (2022): Development of a New Method to Support a Participatory Planning for Piped Water Supply Infrastructure in Informal Settlements. In: *Water* (14), Heft 8, S. 1316. <https://doi.org/10.3390/w14081316>.
- [27] Mosbach, J.; Krämer, M.; Fiedler, J.E., Sonnenburg, A., Urban, W. (2022): Combined Districting and Main Line Routing—A Method to Implement a Basic Drinking Water Supply Infrastructure in Informal Settlements. In: *Water* (14), Heft 18, S. 2805. <https://doi.org/10.3390/w14182805>.
- [28] United Nations (1997): *Glossary of environment statistics*. United Nations, Studies in methods Heft 67, United Nations, New York.
- [29] United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (2015): *HABITAT III ISSUE PAPERS – 22 – INFORMAL SETTLEMENTS*. United Nations, New York.
- [30] United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (2002): *Expert Group Meeting on Urban Indicators – Secure Tenure, Slums and Global Sample of Cities*. Urban Secretariat & Shelter Branch, Nairobi.

- [31] Mohanty, M. (2019): Squatter Settlements and Slums and Sustainable Development. In: Leal Filho, W.; Azul, A.M.; Brandli, L. et al. (Hrsg.): Sustainable Cities and Communities, Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer International Publishing, Cham, S. 1-12.
- [32] Friesen, J. (2021): Modellierung und Analyse urbaner informeller Siedlungen für infrastrukturelle Planungen. Fachbereich Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt, Dissertation.
- [33] Bah, E.-h.M.; Faye, I.; Geh, Z.F. (2018): Slum Upgrading and Housing Alternatives for the Poor. In: Bah, E.-h.M.; Faye, I.; Geh, Z.F. (Hrsg.): Housing Market Dynamics in Africa. Palgrave Macmillan UK; Palgrave Macmillan, London, S. 215-253.
- [34] United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (2004): Thematic dialogues: Urban resources – Dialogue on urban resources. HSP/WUF/2/7, Barcelona.
- [35] Jaitman, L.; Brakarz, J. (2013): Evaluation of Slum Upgrading Programs: Literature Review and Methodological Approaches. Inter-American Development Bank, Institutions for Development Sector, <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Evaluation-of-Slum-Upgrading-Programs-Literature-Review-and-Methodological-Approaches.pdf> [Zugriff am: 10.03.2022].
- [36] Amado, M.; Poggi, F.; Martins, A.; Vieira, N.; Amado, A. (2018): Transforming Cape Vert Informal Settlements. In: Sustainability (10), Heft 7, S. 1-17, <https://doi.org/10.3390/su10072571>.
- [37] Morrow, E. (2010): Exploring the Concept of a GIS-based Decision Support System for the Upgrading of Informal Settlements in South Africa's North West Province. Planning, Georgia Institute of Technology.
- [38] Weber, B.; Mendelsohn, J. (2017): Informal settlements in Namibia: their nature and growth – Exploring ways to make Namibian urban development more socially just and inclusive. Namibian Chamber of Environment, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- [39] Curdes, G. (1997): Stadtstruktur und Stadtgestaltung. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.
- [40] van Horen, B. (2000): Informal Settlement Upgrading: Bridging the Gap Between the De Facto and the De Jure. In: Journal of Planning Education and Research (19), Heft 4, S. 389-400. <https://doi.org/10.1177/0739456X0001900408>.
- [41] de Lille, P. (2017): City commences super-blocking in Imizamo Yethu, <https://www.capetown.gov.za/Media-and-news/City%20commences%20super-blocking%20in%20Imizamo%20Yethu> [Zugriff am: 21.09.2022].
- [42] Huchzermeyer, M. (2006): The new instrument for upgrading informal settlements in South Africa: Contributions and constraints. In: Huchzermeyer, M.; A.K. (ed.): Informal settlements: A perpetual challenge? UCT Press, Lansdowne, S. 41-62.
- [43] Massey, R.T. (2013): Competing rationalities and informal settlement upgrading in Cape Town, South Africa: a recipe for failure. In: Journal of Housing and the Built Environment (28), Heft 4, S. 605-613. <https://doi.org/10.1007/s10901-013-9346-5>.
- [44] UN Office of the High Commissioner for Human Rights (Hrsg.) (2010): Fact Sheet No. 35, The Right to Water, Genf.

-
- [45] World Health Organization (2022): Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization. World Health Organization, Genf.
- [46] World Health Organization (WHO) and United Nations Children's Fund (2017): Progress on drinking water, sanitation and hygiene: – 2017 update and SDG baselines. World Health Organization, Genf.
- [47] United Nations (2022): Sustainable Development Goals—17 Goals to Transform Our World – SDG6 - Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all. Department of Economic and Social Affairs, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/> [Zugriff am: 04.04.2022].
- [48] World Health Organization (WHO) and United Nations Children's Fund (2021): Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: five years into the SDGs, Genf.
- [49] Cairncross, S. (1987): The benefits of water supply. In: Pickford, J. (Hrsg.): *Developing World Water*. Grosvenor Press, London, S. 46-63.
- [50] Noakes, C.; Franceys, R. (2014): *The Urban Water Supply Guide – Service delivery options for low-income communities*. Water & Sanitation for the Urban Poor (WSUP), <https://www.wsup.com/content/uploads/2017/08/Water-Supply-Options-Guide.pdf> [Zugriff am: 16.08.2022]. .
- [51] Heymans, C.; Eales, K.; Franceys, R. (2014): *The Limits and Possibilities of Prepaid Water in Urban Africa: Lessons from the Field*, World Bank, Washington, DC.
- [52] Sarkar, A. (2019): Can shared standpipes fulfil the Sustainable Development Goal of universal access to safe water for urban poor in Kenya? In: *Water Policy* (21), Heft 5, S. 1034-1049. <https://doi.org/10.2166/wp.2019.047>.
- [53] Simukonda, K.; Farmani, R.; Butler, D. (2018): Intermittent water supply systems: causal factors, problems and solution options. In: *Urban Water Journal* (15), Heft 5, S. 488-500. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1483522>.
- [54] Klingel, P. (2010): *Von intermittierender zu kontinuierlicher Wasserverteilung in Entwicklungsländern*, Fachbereich Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation.
- [55] Kumpel, E.; Nelson, K.L. (2016): Intermittent Water Supply: Prevalence, Practice, and Microbial Water Quality. In: *Environmental science & technology* (50), Heft 2, S. 542-553. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03973>.
- [56] Andey, S.P.; Kelkar, P.S. (2007): Performance of water distribution systems during intermittent versus continuous water supply. In: *Journal - American Water Works Association* (99), Heft 8, S. 99-106. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2007.tb08011.x>.
- [57] Vairavamorthy, K.; Gorantiwar, S.D.; Pathirana, A. (2008): Managing urban water supplies in developing countries – Climate change and water scarcity scenarios. In: *Physics and Chemistry of the Earth* (33), Heft 5, S. 330-339. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.008>.
- [58] Mohapatra, S.; Sargaonkar, A.; Labhasetwar, P.K. (2014): Distribution Network Assessment using EPANET for Intermittent and Continuous Water Supply. In: *Water Resources Management* (28), Heft 11, S. 3745-3759. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0707-y>.

- [59] Taylor, D.D.J.; Slocum, A.H.; Whittle, A.J. (2019): Demand Satisfaction as a Framework for Understanding Intermittent Water Supply Systems. In: *Water Resources Research* (55), Heft 7, S. 5217-5237. <https://doi.org/10.1029/2018WR024124>.
- [60] Klingel, P.; Nestmann, F. (2014): From intermittent to continuous water distribution: a proposed conceptual approach and a case study of Béni Abbès (Algeria). In: *Urban Water Journal* (11), Heft 3, S. 240-251. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.765493>.
- [61] Gottipati, P.V.K.S.V.; Nanduri, U.V. (2014): Equity in water supply in intermittent water distribution networks. In: *Water and Environment Journal* (28), Heft 4, S. 509-515. <https://doi.org/10.1111/wej.12065>.
- [62] Abu-Madi, M.; Trifunovic, N. (2013): Impacts of supply duration on the design and performance of intermittent water distribution systems in the West Bank. In: *Water International* (38), Heft 3, S. 263-282. <https://doi.org/10.1080/02508060.2013.794404>.
- [63] Vairavamoorthy, K.; Akinpelu, E.; Lin, Z.; Ali, M. (2001): Design of Sustainable Water Distribution Systems in Developing Countries. In: Phelps, D.; Shelke, G. (Hrsg.): *Bridging the Gap*. American Society of Civil Engineers, The Rosen Plaza Hotel, Orlando, Florida, S. 1-10.
- [64] United Nations General Assembly (2015): The human rights to safe drinking water and sanitation – resolution 70/169. New York.
- [65] Schouten, M.A.C.; Mathenge, R.W. (2010): Communal sanitation alternatives for slums: A case study of Kibera, Kenya. In: *Physics and Chemistry of the Earth* (35), Heft 14, S. 815-822. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.002>.
- [66] Taing, L.; Armitage, N.; Ashipala, A.; Spiegel, A. (2013): TIPS for sewerage informal settlements: Technology, Institutions, People and Services. Departments of Civil Engineering and Social Anthropology, University of Cape Town, Cape Town.
- [67] Mels, A.; Castellano, D.; Braadbaart, O.; Veenstra, S.; Dijkstra, I.; Meulman, B.; Singels, A.; Wilsenach, J. A.. (2009): Sanitation services for the informal settlements of Cape Town, South Africa. In: *Desalination* (248), Heft 1-3, S. 330-337. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.072>.
- [68] Tsinda, A.; Abbott, P.; Pedley, S.; Charles, K.; Adogo, J.; Okurut, K.; Chenoweth, J. (2013): Challenges to achieving sustainable sanitation in informal settlements of Kigali, Rwanda. In: *International journal of environmental research and public health* (10), Heft 12, S. 6939-6954. <https://doi.org/10.3390/ijerph10126939>.
- [69] Tilley, E.; Ulrich, L.; Lüthi, C.; Reymond, P.; Zurbrügg, C. (2014): *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*, 2nd Revised Edition, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf.
- [70] Mara, D. (2018): 'Top-down' planning for scalable sustainable sanitation in high-density low-income urban areas: is it more appropriate than 'bottom-up' planning? In: *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* (8), Heft 2, S. 165-175. <https://doi.org/10.2166/washdev.2018.101>.
- [71] Nakagiri, A.; Niwagaba, C.; Nyenje, P.; Kulabako, R.; Tumuhairwe, J.; Kansime, F. (2016): Are pit latrines in urban areas of Sub-Saharan Africa performing? A review of usage, filling, insects and odour nuisances. In: *BMC public health* (16), S. 120. <https://doi.org/10.1186/s12889-016-2772-z>.

- [72] Melo, J.C. (2005): The Experience of Condominial Water and Sewerage Systems in Brazil: – Case Studies from Brasilia, Salvador and Parauapebas, Water and Sanitation Program Latin America und World Bank, Lima.
- [73] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 805:2000-03, Wasserversorgung- Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden, Beuth Verlag GmbH Berlin,
- [74] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (2015): DVGW Arbeitsblatt W 400-1: Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 1: Planung, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- [75] Urban, W.; Mosbach, J. (2019): Wasserversorgung. In: Zilch, K.; Diederichs, C.J.; Beckmann, K.J. et al. (Hrsg.): Handbuch für Bauingenieure, Handbuch für Bauingenieure. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 1-59.
- [76] Urban, W.; Zimmermann, M.; Mosbach, J. (2021): Wasserversorgung. In: Lecher, K.; Lühr, H.-P.; Zanke, U. (Hrsg.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft – Grundlagen – Maßnahmen – Planungen. Springer Fachmedien Wiesbaden. Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 875-984.
- [77] Klingel, P. (2021): Modellierung von Wasserverteilungssystemen – Erstellung und Anwendung von Rohrnetzmodellen nach allgemein anerkannten Regeln der Technik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [78] Karger, R.; Hoffmann, F. (2013): Wasserversorgung – Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung, Verteilung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [79] Saleh, S.H.A.; Tanyimboh, T.T. (2013): Coupled Topology and Pipe Size Optimization of Water Distribution Systems. In: Water Resources Management (27), Heft 14, S. 4795-4814. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0439-4>.
- [80] Todini, E.; Pilati, S. (1988): A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. In: Computer applications in water supply (1), S. 1-20.
- [81] U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2000): Epanet 2 Users Manual.
- [82] Parra Sánchez, S. (2020): Verfahren zur Bewertung von Trinkwassernetzen als Grundlage der Anpassungsplanung. München, Universität der Bundeswehr München, Dissertation.
- [83] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (2008): DVGW Arbeitsblatt W 410: Technische Regel Wasserbedarf - Kennwerte und Einflussgrößen, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- [84] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (2008): DVGW Arbeitsblatt W 405: Bereitstellung von Löschwasser durch die öffentliche Trinkwasserversorgung, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- [85] Sela Perelman, L.; Allen, M.; Preis, A.; Iqbal, M.; Whittle, A.J. (2015): Automated sub-zoning of water distribution systems. In: Environmental Modelling & Software (65), S. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.025>.
- [86] Diao, K.; Zhou, Y.; Rauch, W. (2013): Automated Creation of District Metered Area Boundaries in Water Distribution Systems. In: Journal of Water Resources Planning and Management (139), Heft 2, S. 184-190. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000247).

-
- [87] Dawidowicz, J. (2018): Evaluation of a pressure head and pressure zones in water distribution systems by artificial neural networks. In: *Neural computing & applications* (30), Heft 8, S. 2531-2538. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-2844-8>.
- [88] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (2006): DVGW Arbeitsblatt GW 303-1: Berechnung von Gas- und Wasserrohrnetzen - Teil 1: Hydraulische Grundlagen, Netzmodellierung und Berechnung, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- [89] Rossman, L.A. (1999): The EPANET Programmer's Toolkit for Analysis of Water Distribution Systems. In: Wilson (Hg.) – WRPMD'99. American Society of Civil Engineers, S. 1-10.
- [90] United States Environmental Protection Agency (2022): EPANET - Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems , <https://www.epa.gov/water-research/epanet> [Zugriff am: 05.10.2022].
- [91] Mala-Jetmarova, H.; Sultanova, N.; Savic, D. (2018): Lost in Optimisation of Water Distribution Systems? A Literature Review of System Design. In: *Water* (10), Heft 3, S. 307. <https://doi.org/10.3390/w10030307>.
- [92] Walski, T.; Chase, D.; Savić, D.; Grayman, W.; Beckwith, S.; Koelle, E. (2007): *Advanced water distribution modeling and management*. Haestad Methods, Inc. Bentley Institute Press, Exton, PA.
- [93] Bilal; Pant, M. (2020): Parameter Optimization of Water Distribution Network – A Hybrid Metaheuristic Approach. In: *Materials and Manufacturing Processes* (35), Heft 6, S. 737-749. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1711933>.
- [94] Savic, D.A.; Walters, G.A. (2000): Genetic Operators and Constraint Handling for Pipe Network Optimization. In: *AISB Workshop on Evolutionary Computing*, School of Engineering, Exeter, UK.
- [95] Chee, R.; Lansey, K.; Chee, E. (2018): Estimation of Water Pipe Installation Construction Costs. In: *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* (9), Heft 3, S. 4018008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000323](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000323).
- [96] Savic, D.A.; Walters, G.A. (1995): Genetic operators and constraint handling for pipe network optimization. In: Goos, G.; Hartmanis, J.; Leeuwen, J. et al. (Hrsg.): *Evolutionary Computing, Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin, Berlin, S. 154-165.
- [97] Savic, D.A.; Walters, G.A. (1997): Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* (123), Heft 2, S. 67-77. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1997\)123:2\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67)).
- [98] Montesinos, P.; Garcia-Guzman, A.; Ayuso, J.L. (1999): Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm. In: *Water Resources Research* (35), Heft 11, S. 3467-3473.
- [99] Koch, S. (2014): *Genetische Algorithmen für das Order Batching-Problem in manuellen Kommissioniersystemen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [100] Weicker, K. (2015): *Evolutionäre Algorithmen*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [101] Biethahn, J.; Lackner, A.; Range, M. (2004): *Optimierung und Simulation*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.

-
- [102] Rehm, I.-S.; Friesen, J.; Pouls, K.; Busch, C.; Taubenböck, H.; Pelz, P.F. (2021): A Method for Modeling Urban Water Infrastructures Combining Geo-Referenced Data. In: *Water* (13), Heft 16, S. 2299. <https://doi.org/10.3390/w13162299>.
- [103] Sitzenfrei, R. (2016): A Review on Network Generator Algorithms for Water Supply Modelling and Application Studies. In: Pathak, C.S.; Reinhart, D. (Hrsg.): *World Environmental and Water Resources Congress 2016*. American Society of Civil Engineers, West Palm Beach, Florida, S. 505-515.
- [104] Sitzenfrei, R. (2010): *Stochastic Generation of Urban Water Systems for Case Study Analysis*. University of Innsbruck, Innsbruck, Dissertation.
- [105] Sitzenfrei, R.; Möderl, M.; Rauch, W. (2013): Automatic generation of water distribution systems based on GIS data. In: *Environmental modelling & software : with environment data news* (47), S. 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.006>.
- [106] Zischg, J.; Rauch, W.; Sitzenfrei, R. (2018): Morphogenesis of Urban Water Distribution Networks: A Spatiotemporal Planning Approach for Cost-Efficient and Reliable Supply. In: *Entropy* (20), Heft 9. <https://doi.org/10.3390/e20090708>.
- [107] Mair, M.; Zischg, J.; Rauch, W.; Sitzenfrei, R. (2017): Where to Find Water Pipes and Sewers? - On the Correlation of Infrastructure Networks in the Urban Environment. In: *Water* (9), Heft 2, S. 146. <https://doi.org/10.3390/w9020146>.
- [108] Rausch, L.; Friesen, J.; Altherr, L.C.; Meck, M.; Pelz, P.F. (2018): A Holistic Concept to Design Optimal Water Supply Infrastructures for Informal Settlements Using Remote Sensing Data. In: *Remote Sensing* (10), Heft 2, S. 216. <https://doi.org/10.3390/rs10020216>.
- [109] Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R.; Scholl, A. (2015): *Einführung in Operations Research*. 9. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [110] Koop, A.; Mook, H. (2018): *Lineare Optimierung – eine anwendungsorientierte Einführung in Operations Research*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [111] Mönius, K.; Steuding, J.; Stumpf, P. (2021): *Algorithmen in der Graphentheorie – Ein konstruktiver Einstieg in die Diskrete Mathematik*, Springer eBook Collection, Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Spektrum, Wiesbaden.
- [112] Mönius, K.; Steuding, J.; Stumpf, P. (2021): *Einführung in die Graphentheorie - Ein farbenfroher Einstieg in die Diskrete Mathematik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [113] Aigner, M. (2015): *Graphentheorie – Eine Einführung aus dem 4-Farben Problem*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [114] Krumke, S.O.; Noltemeier, H. (2012): *Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- [115] Nitzsche, M. (2009): *Graphen für Einsteiger – Rund um das Haus vom Nikolaus*, Springer eBook Collection, Vieweg+Teubner, Wiesbaden.
- [116] Dijkstra, E.W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik* (1), Heft 1, S. 269-271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>.
- [117] Garey, M.R.; Graham, R.L.; Johnson, D.S. (1977): The Complexity of Computing Steiner Minimal Trees. In: *SIAM Journal on Applied Mathematics*, S. 835-859.

-
- [118] Müller, T.; Schmid, K.; Schuman, D. (2021): Solving Large Steiner Tree Problems in Graphs for Cost-Efficient Fiber-To-The-Home Network Expansion, <https://arxiv.org/pdf/2109.10617v1.pdf>, [Zugriff am: 22.09.2021].
- [119] Sadeghi, A.; Fröhlich, H. (2013): Steiner tree methods for optimal sub-network identification: an empirical study. In: *BMC Bioinformatics* (14), S. 144. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-14-144>.
- [120] Kallrath, J. (2013): *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [121] Gritzmann, P. (2013): *Grundlagen der Mathematischen Optimierung - Diskrete Strukturen, Komplexitätstheorie, Konvexitätstheorie, Lineare Optimierung, Simplex-Algorithmus, Dualität*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [122] Grimme, C.; Bossek, J. (2018): *Einführung in die Optimierung – Konzepte, Methoden und Anwendungen*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [123] Dittes, F.-M. (2015): *Optimierung – Wie man aus allem das Beste macht*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [124] Minieka, E. (1970): The m-Center Problem. In: *SIAM Review* (12), Heft 1, S. 138-139.
- [125] Daskin, M.S. (2013): *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.
- [126] Medrano, F.A. (2020): The complete vertex p-center problem. In: *EURO Journal on Computational Optimization* (8), Heft 3-4, S. 327-343. <https://doi.org/10.1007/s13675-020-00131-y>.
- [127] Laporte, G.; Nickel, S.; Saldanha da Gama, F. (Hrsg.) (2019): *Location Science. 2. Auflage*, Springer International Publishing, Cham.
- [128] Mattfeld, D.; Vahrenkamp, R. (2014): *Logistiknetzwerke – Modelle für Standortwahl und Tourenplanung. 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [129] Chen, H.; Murray, A.T.; Jiang, R. (2021): Open-source approaches for location cover models: capabilities and efficiency. In: *Journal of Geographical Systems* (23), Heft 3, S. 361-380. <https://doi.org/10.1007/s10109-021-00350-w>.
- [130] Calik, H. (2013): *Exact solution methodologies for the p-center problem under single and multiple allocation strategies*, Bilkent University, Ankara, Dissertation.
- [131] Hakimi, S.L. (1965): Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems. In: *Operations Research* (13), Heft 3, S. 462-475. <https://doi.org/10.1287/opre.13.3.462>.
- [132] Calik, H.; Labbé, M.; Yaman, H. (2015): p-Center Problems. In: Laporte, G.; Nickel, S.; Saldanha da Gama, F. (Hrsg.): *Location Science*. Springer International Publishing, Cham, S. 79-92.
- [133] Hakimi, S.L. (1964): Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. In: *Operations Research* (12), Heft 3, S. 450-459. <https://doi.org/10.1287/opre.12.3.450>.

-
- [134] Rezapour, M. (2015): Network Design with Facility Location – Approximation and Exact Techniques. Technischen Universität Berlin, Berlin, Dissertation.
- [135] Daskin, M.S. (1995): Network and discrete location – Models, algorithms, and applications. Wiley InterScience (Online service), Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization, Wiley, New York.
- [136] Toregas, C.; Swain, R.; Revelle, C.; Bergman, L. (1971): The Location of Emergency Service Facilities. In: Operations Research (19), Heft 6, S. 1363-1373.
<https://doi.org/10.1287/opre.19.6.1363>.
- [137] Toregas, C.; Revelle, C. (1972): OPTIMAL LOCATION UNDER TIME OR DISTANCE CONSTRAINTS. In: Papers in Regional Science (28), Heft 1, S. 133-144.
<https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1972.tb01521.x>.
- [138] Kalcsics, J.; Ríos-Mercado, R.Z. (2019): Districting Problems. In: Laporte, G.; Nickel, S.; Saldanha da Gama, F. (Hrsg.): Location Science. Springer International Publishing, Cham.
- [139] Fleischmann, B.; Paraschis, J.N. (1988): Solving a large scale districting problem: a case report. In: Computers & Operations Research (15), Heft 6, S. 521-533. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(88\)90048-2](https://doi.org/10.1016/0305-0548(88)90048-2).
- [140] Butsch, A. (2016): Districting Problems - New Geometrically Motivated Approaches. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Dissertation.
- [141] Caro, F.; Shirabe, T.; Guignard, M.; Weintraub, A. (2004): School redistricting: embedding GIS tools with integer programming. In: Journal of the Operational Research Society (55), Heft 8, S. 836-849. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601729>.
- [142] Ferland, J.A.; Guénette, G. (1990): Decision Support System for the School Districting Problem. In: Operations Research (38), Heft 1, S. 15-21. <https://doi.org/10.1287/opre.38.1.15>.
- [143] Schoepfle, O.B.; Church, R.L. (1989): A Fast, Network-based, Hybrid Heuristic for the Assignment of Students to Schools. In: Journal of the Operational Research Society (40), Heft 11, S. 1029-1040. <https://doi.org/10.1057/jors.1989.176>.
- [144] D'Amico, S.J.; Wang, S.-J.; Batta, R.; Rump, C.M. (2002): A simulated annealing approach to police district design. In: Computers & Operations Research (29), Heft 6, S. 667-684.
[https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(01\)00056-9](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00056-9).
- [145] Liberatore, F.; Camacho-Collados, M.; Vitoriano, B. (2020): Police Districting Problem: Literature Review and Annotated Bibliography. In: Ríos-Mercado, R.Z. (Hrsg.): Optimal Districting and Territory Design, International Series in Operations Research & Management Science. Springer International Publishing, Cham, S. 9-29.
- [146] Bergey, P.K.; Ragsdale, C.T.; Hoskote, M. (2003): A Simulated Annealing Genetic Algorithm for the Electrical Power Districting Problem. In: Annals of Operations Research (121), Heft 1-4, S. 33-55. <https://doi.org/10.1023/A:1023347000978>.
- [147] Ríos-Mercado, R.Z. (2020): Research Trends in Optimization of Districting Systems. In: Ríos-Mercado, R.Z. (Hrsg.): Optimal Districting and Territory Design, International Series in Operations Research & Management Science. Springer International Publishing, Cham, S. 3-8.
- [148] Bender, M.; Kalcsics, J. (2020): Multi-Period Service Territory Design. In: Ríos-Mercado, R.Z. (Hrsg.): Optimal Districting and Territory Design, International Series in Operations Research & Management Science. Springer International Publishing, Cham, S. 129-152.

-
- [149] Kalcsics, J.; Nickel, S.; Schröder, M. (2005): Towards a unified territorial design approach - Applications, algorithms and GIS integration. In: *Top* (13), Heft 1, S. 1-56. <https://doi.org/10.1007/BF02578982>.
- [150] Ricca, F.; Scozzari, A.; Simeone, B. (2013): Political Districting: from classical models to recent approaches. In: *Annals of Operations Research* (204), Heft 1, S. 271-299. <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1267-2>.
- [151] Ulrich, T. (2014): Heuristiken für kombinierte Standort- und Gebietsplanung mit vorgegebenen und zusätzlichen, frei wählbaren Standorten Ausgabe, Institut für Theoretische Informatik, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Diplomarbeit.
- [152] Young, H.P. (1988): Measuring the Compactness of Legislative Districts. In: *Legislative Studies Quarterly* (13), Heft 1, S. 105-115. <https://doi.org/10.2307/439947>.
- [153] Ansolabehere, S.; Palmer, M. (2016): A two-hundred year statistical history of the gerrymander. In: *Ohio State Law Journal* (77), Heft 4, S. 741-762.
- [154] Kaufman, A.R.; King, G.; Komisarchik, M. (2021): Replication Data for: How to Measure Legislative District Compactness If You Only Know It When You See It. In: *American Journal of Political Science* (65), Heft 3, S. 533-550. <https://doi.org/10.7910/DVN/FA8FVF>.
- [155] Reock, E.C., JR. (1961): Measuring Compactness as a Requirement of Legislative Apportionment. In: *Midwest Journal of Political Science* (5), Heft 1, S. 70-74.
- [156] Polsby, D.D.; Popper, R.D. (1991): The Third Criterion: Compactness as a Procedural Safeguard Against Partisan Gerrymandering. In: *Yale Law & Policy Review* (9), Heft 2, S. 301-353.
- [157] Boyce, R.R.; Clark, W.A.V. (1964): The Concept of Shape in Geography. In: *Geographical Review* (54), Heft 4, S. 561-572.
- [158] Schwartzberg, J.E. (1966): Reapportionment, Gerrymanders, and the Notion of Compactness. In: *Minnesota Law Review* (50), Nr. 1, S. 443-452.
- [159] Kohli, D.; Sliuzas, R.; Kerle, N.; Stein, A. (2012): An ontology of slums for image-based classification. In: *Computers, Environment and Urban Systems* (36), Heft 2, S. 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2011.11.001>.
- [160] Taubenböck, H.; Kraff, N.J. (2014): The physical face of slums: a structural comparison of slums in Mumbai, India, based on remotely sensed data. In: *Journal of Housing and the Built Environment* (29), Heft 1, S. 15-38. <https://doi.org/10.1007/s10901-013-9333-x>.
- [161] Hecht, R. (2014): Automatische Klassifizierung von Gebäudegrundrissen – Ein Beitrag zur kleinräumigen Beschreibung der Siedlungsstruktur. Technische Universität Dresden, Dresden, Dissertation, 2013, IÖR-Schriften Heft 63, Rhombos-Verl., Berlin, 2014.
- [162] Arlt, G.; Blum, A.; Gruhler, K.; Lehmann, I. (2010): Siedlungsraumbezogene Strukturtypen. In: Blum, A. (Hrsg.): *Typologien der gebauten Umwelt – Modellierung und Analyse der Siedlungsentwicklung mit dem Strukturtypenansatz*. Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung. Shaker, Aachen, S. 25-38.
- [163] Python Language Reference Version version 3.7 [Software] (2021), <http://www.python.org> [Zugriff am: access 07.12.2021].
- [164] Statista (2022): Die beliebtesten Programmiersprachen weltweit laut PYPL-Index im Oktober 2022. Statista Research Department,

- <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/678732/umfrage/beliebtste-programmiersprachen-weltweit-laut-pypl-index/> [Zugriff am: 06.10.2022].
- [165] Oliphant, T.E. (2007): Python for Scientific Computing. In: *Computing in Science & Engineering* (9), Heft 3, S. 10-20. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.58>.
- [166] QGIS Geographic Information System (2021), <https://www.qgis.org> [Zugriff am: 07.12.2021].
- [167] Hagberg, A.A.; Schult, D.A.; Swart, P.J. (2008): Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. In: Varoquaux, G.; Vaught, T.; Millman, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008)*, Pasadena, CA.
- [168] Google (2019): OR-Tools Version 7.2 [Software]. <https://developers.google.com/optimization/> [Zugriff am: 13.12.2021].
- [169] Bestuzheva, K.; Besançon, M.; Chen, W.-K. et al. (2021): The SCIP Optimization Suite 8.0. Technical Report. *Optimization Online*. http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2021/12/8728.html [Zugriff am: 13.12.2021].
- [170] Gurobi (2022): Gurobi Optimizer Reference Manual. <https://www.gurobi.com> [Zugriff am: 13.02.2022].
- [171] Klise, K.A.; Bynum, M.; Moriarty, D.; Murray, R. (2017): A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. In: *Environmental Modelling & Software* (95), S. 420-431. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.022>.
- [172] Virtanen, P.; Gommers, R.; Oliphant, T.; Haberland, M.; Reddy, T.; Cournapeau, D.; Burovski, E.; Peterson, P.; Weckesser, W.; Bright, J.; van der Walt, S.J.; Brett, M.; Wilson, J.; Millman, K.; Mayorov, N.; Nelson, A.; Jones, E.; Kern, R.; Larson, E.; Carey, C. J.; Polat, İ.; Feng, Y.; Moore, E.; VanderPlas, J.; Laxalde, D.; Perktold, J.; Cimrman, R.; Henriksen, I.; Quintero, E. A.; Harris, C.; Archibald, A.; Ribeiro, A.; Pedregosa, F.; van Mulbregt, P. (2020): SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. In: *Nature methods* (17), Heft 3, S. 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>.
- [173] Lorenz, I.-S.; Pelz, P. (2020): Optimal Resilience Enhancement of Water Distribution Systems. In: *Water*, Heft 12, S. 2602, <https://doi.org/10.26083/tuprints-00019245>.
- [174] Gold, C. M.; Mioc, D.; Anton, F.; Sharma, O.; Dakowicz, M. (2008): A Methodology for Automated Cartographic Data Input, Drawing and Editing Using Kinetic Delaunay/Voronoi Diagrams. In: Gavrilova, M.L. (ed.): *Generalized Voronoi Diagram: A Geometry-Based Approach to Computational Intelligence*, Springer eBook Collection Engineering (158). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [175] Heck, H.-M.; Bobinger, R. (2006): *Netzentwurf und Netzoptimierung*. Projektbericht OptiV, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- [176] Aurenhammer, F.; Klein, R. (2000): Voronoi Diagrams*. In: *Handbook of computational geometry*. Elsevier, New York, S. 201-290.
- [177] Hiyoshi, H. (2008): Intelligent Solutions for Curve Reconstruction Problem. In: Gavrilova, M.L. (ed.): *Generalized Voronoi Diagram: A Geometry-Based Approach to Computational Intelligence*, Springer eBook Collection Engineering (158), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- [178] Lahiouel, Y.; Lahiouel, R.; Beddiaf, S. (2016): Simultaneous layout and pipe size optimization of water distribution networks. In: *International Journal of Current Research* (8), Heft 8, S. 33229-33235.
- [179] Saleh, S.H.A.; Tanyimboh, T.T. (2014): Optimal Design of Water Distribution Systems Based on Entropy and Topology. In: *Water Resources Management* (28), Heft 11, S. 3555-3575. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0687-y>.
- [180] Afshar, M.H.; Jabbari, E. (2008): Simultaneous layout and pipe size optimization of pipe networks using genetic algorithm. In: *ARABIAN JOURNAL FOR SCIENCE AND ENGINEERING* (33), Heft 2B, S. 391-409.
- [181] Morgan, D.R.; Goulter, I.C. (1985): Optimal urban water distribution design. In: *Water Resources Research* (21), Heft 5, S. 642-652. <https://doi.org/10.1029/WR021i005p00642>.
- [182] Prömel, H.J.; Steger, A. (2002): *The Steiner Tree Problem*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- [183] Muranho, J.; Ferreira, A.; Sousa, J.; Gomes, A.; Sá Marques, A. (2012): WaterNetGen: an EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing. In: *Water Science & Technology Water Supply* (12), Heft 1, S. 117-123. <https://doi.org/10.2166/ws.2011.121>.
- [184] Czajkowska, A.M.; Tanyimboh, T.T. (2013): Water distribution network optimization using maximum entropy under multiple loading patterns. In: *Water Science & Technology Water Supply* (13), Heft 5, S. 1265-1271. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.119>.
- [185] Martínez-Bahena, B.; Cruz-Chávez, M.; Ávila-Melgar, E.; Cruz-Rosales, M.; Rivera-Lopez, R. (2018): Using a Genetic Algorithm with a Mathematical Programming Solver to Optimize a Real Water Distribution System. In: *Water* (10), Heft 10, S. 1318. <https://doi.org/10.3390/w10101318>.
- [186] Klise, K.; Murray, R.; Haxton, T. (2018): An overview of the water network tool for resilience (WNTR). In: 1st International WDSA/CCWI 2018 Joint Conference, Juli 23-25. Kingston, Ontario. <https://ojs.library.queensu.ca/index.php/wdsa-ccw/article/view/12150> [Zugriff am: 03.10.2022].
- [187] Bondarenko, M.; Kerr, D.; Sorichetta, A.; Tatem, A. (2020): Census/projection-disaggregated gridded population datasets for 51 countries across sub-Saharan Africa in 2020 using building footprints. University of Southampton.
- [188] NASA Earthdata (2022): NASADEM Version - DEM Global 1 arc second V001, [https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules?p=C1546314043-LPDAAC_ECS&pg\[0\]\[v\]=f&pg\[0\]\[gsk\]=-start_date&q=AST&sb\[0\]=16.43994%2C-23.30006%2C18.16699%2C-21.15601&tl=1650626276!3!!&lat=-23.077411430509983&long=15.622558593750002&zoom=7](https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules?p=C1546314043-LPDAAC_ECS&pg[0][v]=f&pg[0][gsk]=-start_date&q=AST&sb[0]=16.43994%2C-23.30006%2C18.16699%2C-21.15601&tl=1650626276!3!!&lat=-23.077411430509983&long=15.622558593750002&zoom=7) [Zugriff am: 27.06.2022].
- [189] Lewis, E.W.; Staddon, C.; Sirunda, J. (2019): Urban water management challenges and achievements in Windhoek, Namibia. In: *Water Practice and Technology* (14), Heft 3, S. 703-713. <https://doi.org/10.2166/wpt.2019.055>.
- [190] Enk, A.; Wasseige, C. de (2019): Identification of appropriate data sources and analysis software to monitor the growth of informal settlements in Namibia. In: 2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE). IEEE, Vannes, France, 22.05. - 24.05.2019, S. 1-4.

- [191] Republic of Namibia - Ministry of Justice (2017): Responses on the questionnaire of informal settlements and human rights. Republic of Namibia - Ministry of Justice, Windhoek, Namibia. <https://www.ohchr.org/Documents/Issues/Housing/InformalSettlements/Namibia.pdf> [Zugriff am: 12.03.2021].
- [192] Lewis, E.W.; Siyambango, N.; Lendelvo, S. (2018): Assessment of accessibility of safe drinking water: A case study of the Goreangab informal settlement, Windhoek, Namibia. In: *Water Practice and Technology* (13), Heft 4, S. 871-878. <https://doi.org/10.2166/wpt.2018.096>.
- [193] OpenStreetMap contributors (2022): Planet dump, <https://planet.openstreetmap.org/> [Zugriff am: 29.03.2022].
- [194] Microsoft Bing Maps (2022), <https://www.bing.com/maps> [Zugriff am: 01.03.2022].
- [195] Goldberg, D.E.; Deb, K.; Clark, J.H. (1992): Genetic Algorithms, Noise, and the Sizing of Populations. In: *Complex Systems* (6), S. 333-362.
- [196] Wasser für Wasser: Wasserversorgung in John Laing, <https://wfw.ch/projekte/afrika/john-laing-2#/> [Zugriff am: 03.12.2022].
- [197] Martínez-Santos, P.; Cerván, J.; Cano, B.; Díaz-Alcaide, S. (2017): Water versus Wireless Coverage in Rural Mali: Links and Paradoxes. In: *Water* (9), Heft 6, S. 375. <https://doi.org/10.3390/w9060375>.
- [198] Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (2022): Programm kleinstädtische Wasser- und Sanitärversorgung, [https://www.kfw-entwicklungsbank.de/ipfz/Projektdatenbank/Programme-kleinst%C3%A4dtische-Wasser--und-Sanit%C3%A4rversorgung-32219.htm](https://www.kfw-entwicklungsbank.de/ipfz/Projektdatenbank/Programme/kleinst%C3%A4dtische-Wasser--und-Sanit%C3%A4rversorgung-32219.htm) [Zugriff am: 26.10.2022].
- [199] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (2022): Nachhaltige Wasser- und Sanitärversorgung – Sustainable Drinking Water Supply and Sanitation in Mali, https://www.giz.de/projektseiten/projects.action?request_locale=de_DE&pn=201920834 [Zugriff am: 26.10.2022].
- [200] Leonita, G.; Kuffer, M.; Sliuzas, R.; Persello, C. (2018): Machine Learning-Based Slum Mapping in Support of Slum Upgrading Programs: The Case of Bandung City, Indonesia. In: *Remote Sensing* (10), Heft 10, S. 1522. <https://doi.org/10.3390/rs10101522>.
- [201] Kuffer, M.; Pfeffer, K.; Sliuzas, R. (2016): Slums from Space—15 Years of Slum Mapping Using Remote Sensing. In: *Remote Sensing*, Vol. (8), Heft 6, S. 455. <https://doi.org/10.3390/rs8060455>.
- [202] Wurm, M.; Taubenböck, H. (2018): Detecting social groups from space – Assessment of remote sensing-based mapped morphological slums using income data. In: *Remote Sensing Letters* (9), Heft 1, S. 41-50. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2017.1384586>.
- [203] Gram-Hansen, B.; Helber, P.; Varatharajan, I.; Azam, F.; Coca-Castro, A.; Kopackova, V.; Bilinski, P. (2019): Mapping Informal Settlements in Developing Countries using Machine Learning and Low Resolution Multi-spectral Data. In: *AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society (AIES) 2019*.
- [204] Stark, T.; Wurm, M.; Zhu, X. X., Taubenböck, H. (2020): Satellite-Based Mapping of Urban Poverty With Transfer-Learned Slum Morphologies. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* (13), S. 5251-5263. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3018862>.

-
- [205] Wang, W.; Yang, N.; Zhang, Y.; Wang, F.; Cao, T.; Eklund, P. (2016): A review of road extraction from remote sensing images. In: *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* (3), Heft 3, S. 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.05.005>.
- [206] Lucci, P.; Bhatkal, T.; Khan, A. (2018): Are we underestimating urban poverty? In: *World Development* (103), S. 297-310. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.10.022>.
- [207] Urich, C.; Rauch, W. (2014): Exploring critical pathways for urban water management to identify robust strategies under deep uncertainties. In: *Water Research* (66), S. 374-389. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.020>.