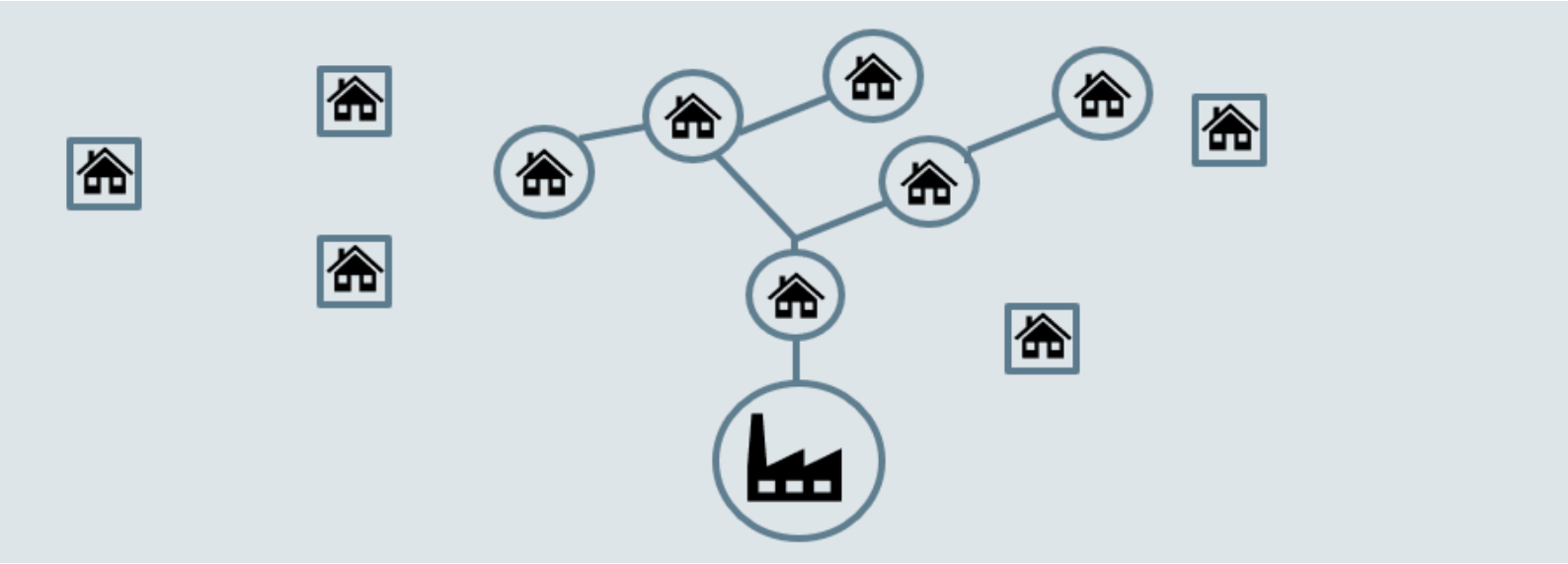
ECOPLAN Forschung und Beratung in Wirtschaft und Politik

FNSNF Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung

73 NRP Sustainable Economy National Research Programme



Technischer Bericht – 17.12.2021

Kosten-Nutzen-Analyse modularer Abwasserreinigungsanlagen

Simulationsmodell COMMIT^2 und Resultate zweier Fallstudien

im Rahmen des Projekts COMIX des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Wirtschaft» (NFP 73) des Schweizerischen Nationalfonds SNF

Impressum

Empfohlene Zitierweise

Autor:	Ecoplan
Titel:	Kosten-Nutzen-Analyse modularer Abwasserreinigungsanlagen
Untertitel:	Simulationsmodell COMMIT^2 und Resultate zweier Fallstudien
Ort:	Bern
Datum:	17.12.2021

Projektteam Ecoplan

André Müller, Projektleiter
Roman Elbel

Mit Begleitung der Kerngruppe des Projektteams COMIX:
Bernhard Truffer, Eawag und Universität Utrecht
Max Maurer, ETH Zürich
Eva Lieberherr, ETH Zürich
Katrin Pakizer, ETH Zürich
Jonas Heiberg, Eawag und Universität Utrecht

Dieses Forschungsprojekt wurde im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Wirtschaft: ressourcenschonend, zukunftsfähig, innovativ» (NFP 73) des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) durchgeführt.

Das NFP 73 hat zum Ziel wissenschaftliche Erkenntnisse über eine nachhaltige Wirtschaft mit schonender Nutzung natürlicher Ressourcen, mehr Wohlfahrt und erhöhter Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes Schweiz zu erarbeiten. Das NFP 73 berücksichtigt dabei die Umwelt, die Wirtschaft und die Gesellschaft, betrachtet sämtliche natürliche Ressourcen und alle Stufen der Wertschöpfungskette.

Weitere Informationen zum Nationalen Forschungsprogramm sind auf www.nfp73.ch zu finden.

ECOPLAN AG

Forschung und Beratung
in Wirtschaft und Politik

www.ecoplan.ch

Monbijoustrasse 14
CH - 3011 Bern
Tel +41 31 356 61 61
bern@ecoplan.ch

Dätwylerstrasse 25
CH - 6460 Altdorf
Tel +41 41 870 90 60
altdorf@ecoplan.ch

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **2**

Das Wichtigste in Kürze **4**

1 Einleitung **5**

2 Ansatz des Simulationsmodells COMMIT² **6**

2.1 Was wollen wir wissen? 6

2.2 Modellansatz 6

3 Aufbau des Modells **7**

3.1 Abbildung des bestehenden Leitungssystems 8
3.1.1 Netz öffentlicher Abwasserleitungen 8
3.1.2 Private Hausanschlüsse 11

3.2 Modellierung zentrale ARA 11

3.3 Modulare Abwassereinigungsanlagen 11

4 Optimierungsprozess und Modelloutput **12**

4.1 Optimierungsregeln 12

4.2 Systemgrenzen 14

4.3 Modelloutputs 14

5 Modellanwendung in zwei Fallstudien **16**

5.1 Übersicht zu den analysierten Umgebungen 16

5.2 Datengrundlagen und Aufbereitung 17
5.2.1 Daten zum Leitungssystem 17
5.2.2 Zentrale und modulare Abwasserreinigungsanlagen 18

5.3 Resultate und Interpretation 19
5.3.1 Optimaler Einsatz modularer Anlagen unter Basisannahmen 19
5.3.2 Optimaler Einsatz modularer Anlagen unter veränderten Annahmen 22

5.4 Fazit Fallstudien 24

6 Abbildung alternativer institutioneller Rahmenbedingungen **25**

6.1 Alternativszenario I «Aufhebung Anschlusspflicht» 25
6.1.1 Institutionelle Rahmenbedingungen 25
6.1.2 Umsetzung und Ergebnisse 26

6.2 Alternativszenario II «Liberalisierung in vorgegebenen Gebieten» 27
6.2.1 Institutionelle Rahmenbedingungen 27
6.2.2 Umsetzung und Ergebnisse 28

7 Schlussfolgerungen 29

Anhang A: Detaillierte Resultatetabellen 31

Anhang B: Auszüge aus COMMIT^2 34

Anhang C: Details zur Modellierung der Analyseperimeter 39

Literaturverzeichnis 43

Das Wichtigste in Kürze

Heute fliesst in der Schweiz praktisch das gesamte Abwasser in ein Leitungssystem und wird in zentralen Abwasserreinigungsanlagen gereinigt. Verschiedene Studien haben aber gezeigt, dass dieses Vorgehen nicht in jedem Fall optimal ist. Speziell in ländlich geprägten oder dünn besiedelten Gebieten könnten dezentral installierte **modulare Abwasserreinigungsanlagen** eine Alternative darstellen. Entsprechende Systeme werden heute bereits in verschiedenen Pilotprojekten in der Schweiz und im angrenzenden Ausland eingesetzt. Der vorliegende Bericht wurde im Rahmen des Forschungsprojekts COMIX erstellt und präsentiert ein neues Simulationsmodell zur Analyse des Potenzials modularer Anlagen in verschiedenen geografischen Kontexten und institutionellen Rahmenbedingungen. Weiter werden die Ergebnisse von zwei Fallstudien (Gartenstadt, Köniz BE, und Schächental UR) vorgestellt, in welcher das Modell angewendet wurde.

Die Resultate der Fallstudien zeigen, dass es in der Schweiz aus einer rein finanziellen Perspektive ein **beträchtliches Potenzial für den Einsatz modularer Anlagen** gibt. Dieses Potenzial geht deutlich über die Anwendung in einzelnen abgelegenen Häusern hinaus. Gesamtwirtschaftlich optimal eingesetzt, fällt der Einsatz modularer Anlagen in ländlichen und suburbanen Gebieten selbst unter relativ konservativen Annahmen teils günstiger aus als die Sanierung und Weiterführung des Anschlusses an die zentrale Abwasserreinigungsanlage. Unterstellt man etwas geringere, aber noch plausible Kosten für zukünftige modulare Anlagen sind insbesondere im Fallbeispiel Schächental UR Kippeffekte zu beobachten, ab welchem der optimale Einsatz modularer Anlagen im gesamten Tal günstiger ausfällt als die Fortführung des zentralen Systems. Weiter haben die Fallstudien gezeigt, dass ein grosser Teil des theoretischen Potenzials modularer Anlagen auch dann realisiert werden kann, wenn vom Kriterium des gesamtwirtschaftlichen Optimums abgewichen wird und stattdessen praxisnahe institutionelle Rahmenbedingungen unterstellt werden. Besonders erfolgsversprechend ist dabei der Ansatz einer kontrollierten Teilliberalisierung, in welcher der Regulator, z.B. Kanton oder Gemeinde, im Rahmen der Generellen Entwässerungsplanung (GEP) Gebiete definiert, in deren der Einsatz modularer Anlagen mittelfristig möglich sein soll und die rechtlichen Grundlagen entsprechend angepasst werden.

Insgesamt lässt die Analyse den Schluss zu, dass modulare Anlagen in ländlichen und suburbanen Gebieten ein **ernst zu nehmendes Disruptionspotenzial** haben. Entsprechend sollte diese Option weiterverfolgt, weitere Untersuchungen vorgenommen werden und das Thema bei der Planung der Abwasserreinigung in Zukunft eine wichtigere Rolle einnehmen. Dies insbesondere vor dem Hintergrund, dass ein wesentlicher Teil der Schweizer Abwasserinfrastruktur in den nächsten Jahrzehnten das Ende seiner Lebensdauer erreicht und deren Sanierung mit hohen und langfristigen Investitionen verbunden ist.

1 Einleitung

Heute fliesst in der Schweiz praktisch das gesamte Abwasser in ein Leitungssystem und wird in zentralen Abwasserreinigungsanlagen gereinigt. Verschiedene Studien haben aber gezeigt, dass dieses Vorgehen nicht in jedem Fall optimal ist. Besonders in ländlichen oder dünn besiedelten Gebieten kann der Anschluss an das zentrale Netz mit hohen Kosten verbunden sein. Hier können kleine, dezentral installierte **modulare Anlagen** eine kosteneffizientere Alternative darstellen.[1] Entsprechende Systeme werden heute bereits in verschiedenen Pilotprojekten in der Schweiz und im angrenzenden Ausland eingesetzt.[2] Dabei spielen neben finanziellen auch ökologische Beweggründe eine Rolle, beispielsweise indem durch modulare Anlagen vermehrt Nährstoffkreisläufe geschlossen werden können.

Auch für die Schweiz stellt sich die Frage, welche Rolle in Zukunft modulare Abwasserreinigungsanlagen spielen sollen. Ein wesentlicher Teil der hiesigen Abwasserinfrastruktur erreicht in den nächsten Jahrzehnten das Ende seiner Lebensdauer.[3] Deren Sanierung ist, besonders in ländlicheren Gebieten, mit hohen langfristigen Investitionen verbunden. Entsprechend wichtig ist es, dass das heutige und mögliche zukünftige Potenzial modularer Anlagen genauer analysiert wird, um teure Fehlinvestitionen und Pfadabhängigkeiten zu vermeiden.

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Wirtschaft» (NRP 73) beschäftigt sich das Projekt **COMIX** (Challenges and Opportunities of Modular water Infrastructures for Greening the Swiss Economy) von Eawag, ETH Zürich und Ecoplan mit der zukünftigen Rolle modularer Anlagen. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse eines Teilprojekts von COMIX zusammen. Dieses Teilprojekt beschäftigt sich mit dem Potenzial modularer Anlagen in der Schweiz aus einer rein finanziellen Perspektive. Dabei geht es schwerpunktmässig um die drei folgenden Fragen:

- Wo und unter welchen Umständen ist der Einsatz modularer Anlagen aus einer Kostenperspektive effizienter als der Anschluss an das zentrale Netz?
- Wie entwickelt sich der gesamtwirtschaftlich optimale Durchdringungsgrad modularer Anlagen in Abhängigkeit von deren Anschaffungs-, Unterhalts und Opportunitätskosten?
- Inwieweit kann das theoretische Potenzial modularer Anlagen realisiert werden, wenn für die Entscheidungsfindung praxisnahe institutionelle Rahmenbedingungen unterstellt werden?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde ein neues Simulationsmodell entwickelt. Im Unterschied zu früheren Studienansätzen[4] analysiert das Modell das Potenzial modularer Anlagen nicht in einem «Grüne-Wiese-Szenario», sondern berücksichtigt die heute bestehende

[1] Vgl. beispielsweise die Potenzialberechnungen von Eggimann; Truffer; Feldmann; u. a. (2018).

[2] Singh; Kazmi; Starkl (2014). Für die Schweiz gibt es u.a. das Beispiel der «Coopérative Equilibre» in Genf.

[3] Gem. Scheidegger; Beutler; Maurer (2013) wurde ein grosser Teil der Kanalisation in den 1960er- und 1970er-Jahren gebaut. Die durchschnittliche Lebenserwartung beträgt einer Leitung beträgt ca. 80 Jahre.

[4] Eggimann; Truffer; Maurer (2015); (2016).

Infrastrukturen des zentralen Entsorgungssystems und dessen Restlaufzeit. Damit werden erstmals auch potenziell relevante Pfadabhängigkeiten durch die bestehende Infrastruktur mitberücksichtigt und eine Brücke zur Anwendung in der Praxis geschlagen. Der vorliegende Bericht gibt einen Einblick in die Funktionsweise des Modells und zeigt die Ergebnisse von zwei durchgeführten Fallstudien.

Konkret ist der Bericht wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 und 3 wird der Modellierungsansatz und der Aufbau des Modells beschrieben. Das darauffolgende Kapitel 4 zeigt die Mechanismen der Optimierung. Die Kapitel 5 und 6 zeigen die Ergebnisse der beiden Fallstudien unter dem Kriterium des gesamtgesellschaftlichen Optimums bzw. praxisnahen institutionellen Rahmenbedingungen. Kapitel 7 zieht ein Fazit zu den gewonnen Erkenntnissen.

2 Ansatz des Simulationsmodells COMMIT^2

2.1 Was wollen wir wissen?

Die Analyse von Eggimann et al. (2015) hat gezeigt, dass bei einem kompletten Neubau eines Abwassersystems («Grüne-Wiese-Szenario») ein vollständig zentrales System nicht in jedem Fall optimal ist. Je nach Ausgangslage ist eine Mischung aus zentralen und modularen Lösungen kosteneffizienter. In der vorliegenden Analyse wird die Ausgangslage der Analyse insofern verändert, dass nicht mehr von einem «Grüne-Wiese-Szenario» ohne bestehende Infrastruktur ausgegangen wird. Für eine praxisnahe Untersuchung des Potenzials modularer Anlagen müssen die bestehende Infrastruktur und die damit verbundenen Pfadabhängigkeiten berücksichtigt werden. Mit anderen Worten möchte diese Analyse nicht nur eruieren, wie die langfristig optimale Kombination zentraler und modularer Systeme aussieht, sondern auch den optimalen Transitionspfad beleuchten: Wie sieht der optimale Übergang vom heutigen zentralen zum langfristig effizienten Hybridsystem aus? Welche Häuser sollen zu welchem Zeitpunkt vom zentralen Netz abgekoppelt werden und auf modulare Lösungen wechseln?

Um den Praxisbezug der Resultate zusätzlich zu stärken, sollen neben der Optimierung des Gesamtsystems aus gesamtwirtschaftlicher Sicht («Sozialer Planer») auch noch Untersuchungen mit alternativen Entscheidungskriterien durchgeführt werden. Damit soll untersucht werden, ob und inwieweit die aus gesamtwirtschaftlicher Sicht effizienten Entscheidungen auch umgesetzt werden, wenn private Hausbesitzerinnen und Hausbesitzer selbst unter verschiedenen institutionellen Rahmbedingungen über den Einsatz modularer Anlagen entscheiden können.

2.2 Modellansatz

Zur Analyse der im vorhergehenden Kapitel aufgeworfenen Fragen wurde mit **COMMIT^2** ein neues Simulationsmodell entwickelt (**C**ost **O**pti**M**izing **M**odular **I**nfrastructure **T**ransition **T**ool).

Die wichtigsten Eigenschaften dieses Transitions-Optimierungs-Modells lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Modell bildet das bestehende zentrale System zur Abwasserreinigung ab, extrapoliert dessen weitere Entwicklung und ergänzt es mit der Möglichkeit des Einsatzes modularer Anlagen. Ein Wechsel wird dann vorgenommen, wenn dieser – je nach Analyse – aus gesamtwirtschaftlicher oder individueller Sicht zu Kostenersparnissen führt.
- Die Optimierung erfolgt aus einer reinen Kostenperspektive.[5] Zur Identifikation der Optimallösung werden die diskontierten Kosten für den Zeitraum der nächsten 100 Jahre minimiert.
- Es werden alle in der Praxis relevanten Kostenfaktoren berücksichtigt. Beispielsweise fliessen neben direkten Kosten für Bau und Unterhalt auch mögliche Opportunitätskosten in die Optimierung ein, welche sich durch den Platzbedarf einer modularen Anlage ergeben.
- Interdependenzen zwischen den verschiedenen Akteuren und dadurch entstehende Transitionskosten fliessen in die Entscheidungsfindung ein. Wird beispielsweise ein grösserer Abwasserproduzent vom zentralen Netz abgekoppelt, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Sanierung der Zuleitung zu den umliegenden Häusern nicht mehr lohnt und letztere ebenfalls auf eine modulare Lösung wechseln.

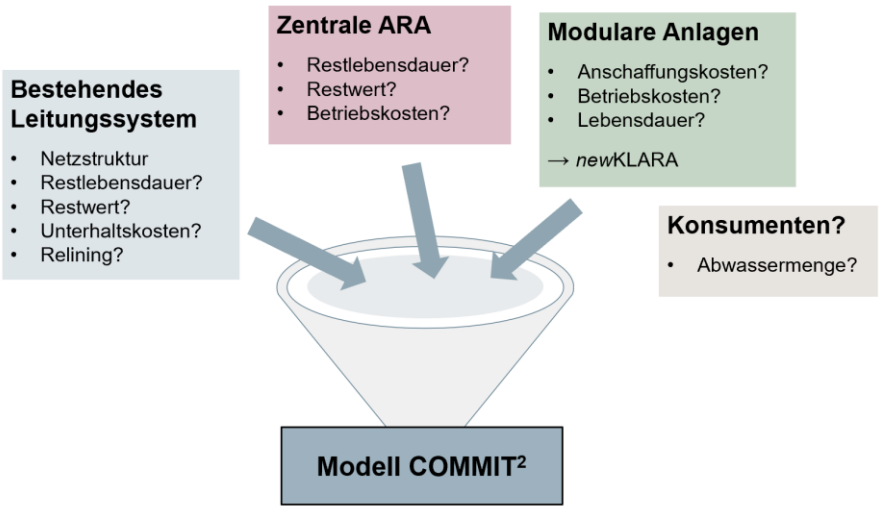
Weitere Details zum Aufbau des Modells (inkl. Systemgrenzen) und zu den Optimierungsregeln geben die nachfolgenden Kapitel 3 und 4.

3 Aufbau des Modells

In das Simulationsmodell COMMIT^2 fliessen verschiedene Inputs ein, wie Abbildung 3-1 zeigt. Nachfolgend wir auf die einzelnen Elemente im Detail eingegangen.

[5] Etwaige nicht-monetäre Aspekte wie z.B. der Nutzen für die Umwelt können berücksichtigt werden, müssen aber monetarisiert in die Kostenfaktoren einfliessen.

Abbildung 3-1: Schematische Übersicht zu den Modellinputs in COMMIT²



Quelle: Eigene Darstellung

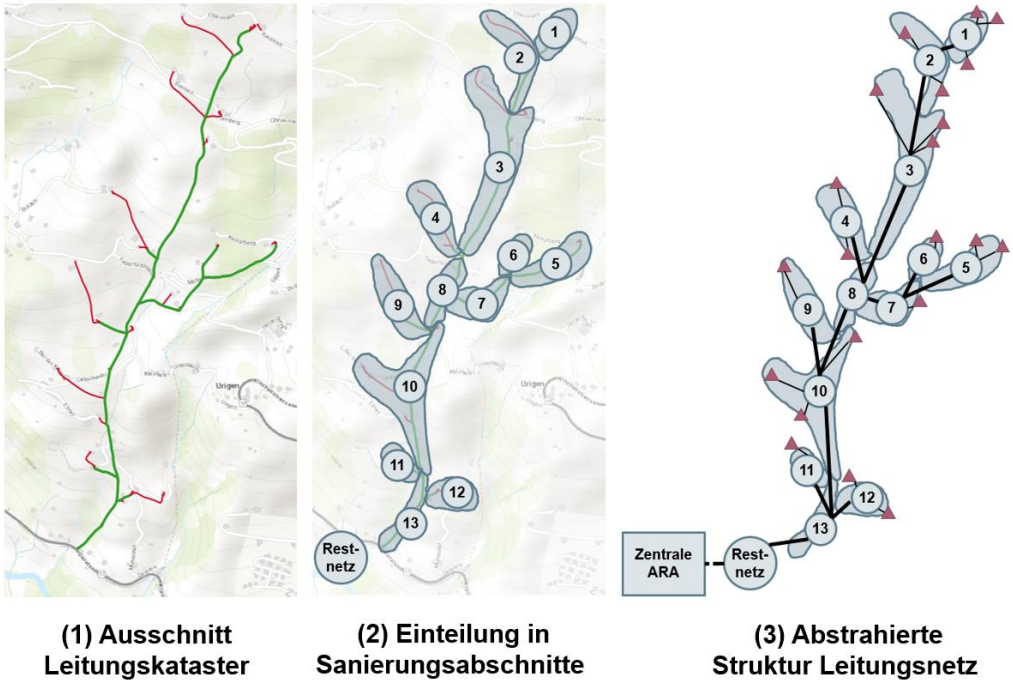
3.1 Abbildung des bestehenden Leitungssystems

Wie erwähnt, beginnt die Analyse mit dem bestehenden zentralen System. Ein wesentliches Element ist das bestehende Leitungssystem, welches durch zwei miteinander interagierende Ebenen modelliert wird: Das bestehende Netz aus öffentlichen Abwasserleitungen (Abschnitt 3.1.1) und die damit verbundenen Hausanschlüsse (Abschnitt 3.1.2).

3.1.1 Netz öffentlicher Abwasserleitungen

Zur Modellierung des Systems öffentlicher Abwasserleitungen wird das reale Leitungssystem des Analyseperimeters in **Sanierungsabschnitte** eingeteilt. Dies sind geografisch und vom Leitungsverlauf zusammengehörende Abschnitte des Leitungssystems. Diese Einteilung erfolgt von Hand unter Berücksichtigung der Gabelungen des Leitungsnetzes und der jeweiligen Restlebensdauer (vgl. Abbildung 3-2).

Abbildung 3-2: Beispiel einer möglichen Abstraktion eines Netz von Abwasserleitungen in drei Schritten



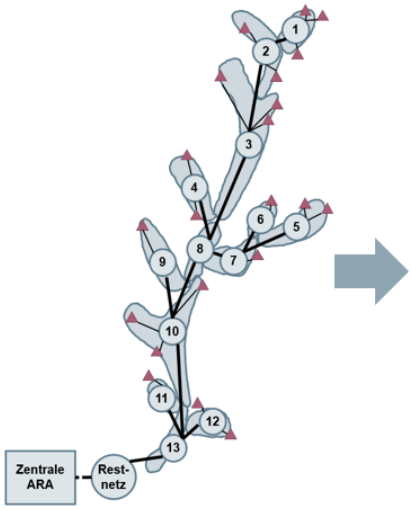
Quelle: Eigene Darstellung, Ausschnitt Leitungskataster aus Geoportal Kanton Uri

Die Sanierungsabschnitte sind die **Analyseeinheit** des Modells auf Ebene des Netzes öffentlicher Abwasserleitungen. In der Modelloptimierung wird für jeden Sanierungsabschnitt entschieden, ob er langfristig bestehen bleibt oder nicht. Aus Performancegründen ist die Modellumgebung auf maximal 14 Sanierungsabschnitte begrenzt.[6] Je nach Umfang und Komplexität des Analyseperimeters muss also ein unterschiedlich starker Abstraktionsgrad gewählt werden. Wird nur ein Teil des Gesamtnetzes analysiert, wird das übrige Netz im Sinne eines Residual-Abschnitts zusammengefasst.

Für die Simulation von grosser Bedeutung ist die **Struktur des Leitungsnetzes**, d.h. inwieweit das Abwasser auf seinem Weg zur zentralen ARA durch nachgelagerte Sanierungsabschnitte fliesst. Die Abbildung dieser Abhängigkeiten ist wichtig, da der Entscheid zur Nicht-Erneuerung eines Abschnitts auch im Netz vorgelagerte Leitungsabschnitte vom zentralen System trennt. Diese potenziellen negativen Externalitäten eines Entscheids müssen im Modell berücksichtigt werden. Die Abbildung der Netzstruktur erfolgt anhand einer 14x14-Abhängigkeitsmatrix, wie Abbildung 3-3 zeigt.

[6] Dies bedeutet insgesamt 2^{14} = 16'384 mögliche Kombinationen auf Ebene öffentliches Leitungsnetz (1/0-Entscheidungen). Hinzu kommen die Abhängigkeiten auf Ebene der Hausanschlüsse.

Abbildung 3-3: Beispiel der Abbildung der abstrahierten Netzstruktur in einer Abhängigkeitsmatrix (Ausschnitt aus COMMIT²)



Abhängigkeitsmatrix, 1 = Anschluss des Spaltenelements ist abhängig vom Zeilenelement, d.h. Abwasser from Spaltenelement passiert das Zeilenelement auf dem Weg zur Kläranlage, 0 = keine Abhängigkeit

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-
8	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Quelle: Eigene Darstellung

Neben den Abhängigkeiten werden für jeden Sanierungsabschnitt verschiedene Merkmale erfasst, welche dessen Restlebenszeit und die Kosten einer möglichen Sanierung definieren. Dabei handelt es sich primär um Angaben, welche in einer typischen Anlagebuchhaltung eines Netzbetreibers vorhanden sind. Dazu zählen insbesondere:

- *Baujahr und Restlebenszeit:* Daraus abgeleitet ergibt sich der Zeitpunkt, wann ein Sanierungsabschnitt saniert werden muss. Zur Modellierung erst in Zukunft gebauter Leitungen kann das Baujahr auch in der Zukunft liegen.
- *Leitungstyp, Länge, Leitungsdurchmesser*: Beeinflusst die Höhe der Unterhaltskosten.
- *Ursprüngliche Baukosten*: Determiniert zusammen mit einem einheitlichen Prozentsatz zur realen Teuerung die zu erwartenden Baukosten bei einer Sanierung.[7] Auch etwaige Subventionen beim Bau können berücksichtigt werden.
- *Sanierungstyp*: Totalsanierung oder Relining; Durch den Einsatz von Schlauchlinern wird die Sanierung günstiger. Entsprechend fallen die Sanierungskosten geringer aus. Je nach Sanierungstyp ergibt sich eine unterschiedlich lange *neue Lebensdauer*.
- *Restwert*: Bestimmt den möglichen Buchverlust im Falle einer vorzeitigen Abkopplung.

Abbildung 7-5 im Anhang zeigt die Eingabemaske aus COMMIT² zum öffentlichen Leitungsnetz und gibt damit einen noch detaillierte Aufstellung der erfassen Merkmale.

[7] Durch eine negative Bauteuerung können auch technische Fortschritte modelliert werden, welche die Baukosten reduzierten.

3.1.2 Private Hausanschlüsse

Zugeordnet zu einem Abschnitt des öffentlichen Leitungssystems sind die jeweils angeschlossenen Hausanschlüsse. Mit wenigen Ausnahmen werden für diese Hauanschlüsse im Modell dieselben Merkmale abgebildet wie beim öffentlichen Leitungssystem). Eine nennenswerte Ausnahme ist, dass innerhalb der Hausanschlüsse keine Abhängigkeiten modelliert werden. Mit anderen Worten wird implizit angenommen, dass die Hausanschlüsse direkt an das öffentliche Leitungsnetzes anschliessen bzw. ein von mehreren Häusern genutzter Anschluss dem öffentlichen Leitungsnetz zugeordnet wird.[8]

Zusätzlich wird zu jedem Hausanschluss die Menge des verbrauchten Trinkwassers modelliert. Das erwartete zukünftige Wachstum dieser Menge ist ebenfalls steuerbar, womit der Effekt zukünftiger wassersparender Technologien abgebildet werden kann. Aus der Menge an Trinkwasser wird die **Abwassermenge** errechnet, indem die Menge Trinkwasser mit einem allgemeinen Faktor multipliziert wird.

Die konkrete Eingabemaske aus COMMIT[2] für die privaten Hauanschlüsse gibt es wiederum im Anhang (Abbildung 7-6).

3.2 Modellierung zentrale ARA

Ein weiteres Element des bestehenden Systems ist die zentrale Abwasserreinigungsanlage (ARA). Analog zum Leitungssystem wird auch diese mit ihrem Baujahr, Restlebensdauer und ursprünglichen Baukosten modelliert. Hinzu kommt die aktuelle und zukünftige Reinigungskapazität der Anlage. Letztere ist so definiert, dass die Anlage bei einer Sanierung exakt so dimensioniert wird, dass die ARA mit der während ihrer Lebenszeit maximal zu erwartenden Abwassermenge zurechtkommt. Mögliche Überkapazitäten als Reserven sind also nicht vorgesehen.

Die Kosten für eine Sanierung der ARA ergeben sich aus den ursprünglichen Baukosten, der entsprechenden realen Bauteuerung sowie (linear) aus der neuen Kapazität.[9]

3.3 Modulare Abwassereinigungsanlagen

Bei der Modellierung der modularen Abwasserreinigungsanlagen wird angenommen, dass die modulare Anlage pro Gebäude eingebaut wird und dort den Hausanschluss an das zentrale

[8] Dieses Vorgehen ist in der Praxis nicht unüblich, wie Anwendung der sogenannten Y-Regel in verschiedenen Schweizer Kantonen zeigt. Die Y-Regel besagt, dass «[…] alle Leitungen innerhalb der Bauzone, die von mehr als einer Liegenschaft genutzt werden, Leitungen mit öffentlicher Funktion und deswegen als Detailerschliessungsleitungen zu erstellen» sind (Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern AWA (2021), S. 8.).

[9] Die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Baukosten und Kapazität einer ARA ist eine Vereinfachung, welche gemäss Abbildung 7-10 im Anhang jedoch nicht unrealistisch ist. Ein möglicher, durch diese Annahme entstehender Analysefehler ist als gering einzustufen.

Leitungsnetz überflüssig macht.[10] Abgesehen von dieser Annahme erlaubt der Modellrahmen eine flexible Abbildung verschiedener Anlagentypen. Konkret werden folgende Merkmale modelliert:

- *Kaufpreis und Installationskosten*: Abhängig von der Grösse der Anlagen, d.h. von der Anzahl angeschlossener Einwohnerwerte (EW). Der technische Fortschritt wird durch positiven oder negativen Kostenfaktor zur Kostenentwicklung abgebildet.
- *Opportunitätskosten*: Entgangener Nutzenverlust durch den Platzbedarf der Anlage.
- *Unterhaltskosten* pauschal pro Jahr
- *Variable Kosten* pro m^3 gereinigtem Abwasser
- *Nicht-monetäre Investitionskosten*: Mögliche Zusatzkosten oder -Nutzen, z.B. durch imperfekte funktionale Äquivalenz bzw. zusätzlicher Eigenschaften in der Strofftrennung (jeweils pro EW).
- *Lebensdauer* in Jahren

Wie eine konkrete modulare ARA in dieser Modellumgebung aussehen könnte, wird in Abschnitt 5.2.2 im Rahmen der Fallstudien aufgezeigt.

4 Optimierungsprozess und Modelloutput

4.1 Optimierungsregeln

Wie bereits erwähnt, beginnt die Analyse mit dem Status quo, d.h. einem vollständig zentralisierten System mit Restlebenszeit. Im nachfolgenden Optimierungsprozess wird nach derjenigen Kombination aus zentralen und modularen Elementen gesucht, aus welcher *aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive* die geringsten Kosten resultieren. Mit anderen Worten erfolgt die Optimierung in einer ersten Phase aus Sicht eines perfekt rationalen **sozialen Planers** mit vollständiger Information und Kontrolle.

Im Rahmen der Optimierung werden eine Vielzahl binärer Entscheidungen getroffen (zentral oder modular). Dabei werden folgende Fragen beantwortet:

- Welche der Sanierungsabschnitte im öffentlichen Leitungsnetz bleiben bestehen, d.h. werden bei Bedarf erneuert, d.h. bleiben am zentralen Netz angekoppelt?
- Welche Häuser bleiben am zentralen Netz angeschlossen, d.h. der Hausanschluss wird bei Bedarf erneuert, welche wechseln auf eine modulare Lösung?

[10] Theoretisch ebenfalls denkbar sind grössere modulare ARA für eine grössere Ansammlung von Häusern. Diese Option ist im Modell nicht abbildbar, da dies den Komplexitätsgrad der Modellumgebung stark erhöht hat. Vgl. auch Kapitel 0 zu Systemgrenzen.

Wichtig zu verstehen ist, dass die beiden Fragen nicht individuell, sondern unter Berücksichtigung all ihrer Externalitäten beantwortet werden. Wird ein Abschnitt des öffentlichen Leitungsnetzes nicht mehr erneuert, werden automatisch alle vorgelagerten Abschnitte und die daran angeschlossenen Hausanschlüsse ebenfalls vom zentralen Netz abgekoppelt. Auch lohnt sich die Sanierung eines Leitungsabschnitts tendenziell weniger, wenn die daran angeschlossenen Häuser bereits von sich aus auf modulare Anlagen gewechselt haben. Diese **Interdependenzen** spielen in der Optimierung eine wichtige Rolle.

Ebenfalls wichtig ist, dass der postulierte soziale Planer als rationales Individuum **keine versunkenen Kosten berücksichtigt**.[11] Darunter fallen insbesondere die Anschaffungskosten für Elemente des zentralen Netzes. Diese fallen unabhängig davon an, ob das entsprechende Element über seine ganze Lebenszeit genutzt wird. Mit anderen Worten stehen die Elemente des zentralen Netzes bis zur ersten nötigen Sanierung quasi gratis zur Verfügung. Dies hat zur Folge, dass die ersten Abkopplungen vom zentralen Netz, wenn überhaupt, erst dann erfolgt, wenn ein erster Sanierungsabschnitt oder Hausanschluss das Ende seiner Lebenszeit erreicht hat.

Von der Annahme eines perfekt rationalen und alles kontrollierenden sozialen Planers wird in Kapitel 6 abgewichen, um auch Entscheidungsfindungen zuzulassen, welche versunkene Kosten nicht ignorieren und nicht alle Externalitäten berücksichtigen. Der Ansatz des sozialen Planers erlaubt es jedoch, den Optimalfall zu analysieren und im Sinne einer Referenz das maximal mögliche Potenzial modularer Anlagen zu beleuchten.

Technischer Exkurs: Wie funktioniert die Optimierung?

Das Modell hat einen maximalen Zeithorizont von 100 Jahren, wobei alle 10 Jahre Entscheide zur Sanierung oder zur Abkopplung gefällt werden können. Der Zielwert ist dabei die Gesamtkosten des Systems, konkret die Annuität des Nettobarwerts aller Ausgaben diskontiert auf den Zeitpunkt t = 0. Dieser Wert wird im Rahmen der Optimierung minimiert.

Die Optimierung kontrolliert direkt den Entscheid, ob ein Sanierungsabschnitt am Ende seiner Lebenszeit saniert wird oder nicht. Dazu wird die optimale Kombination aus den 2^{14} Möglichkeiten gesucht (2 = binäre Entscheidung, 14 Sanierungsabschnitte). Der Entscheid auf Ebene der Hausanschlüsse erfolgt nachgelagert mittels eines Marginalkosten-Ansatzes. Dabei werden alle 10 Jahre die marginalen Kosten eines Beibehalts des Hausanschlusses mit denjenigen des Wechsels auf eine modulare Lösung verglichen. Die Optimierung erfolgt mit dem Excel-Plugin Crystal Ball.

Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8 im Anhang zeigen anhand von Ausschnitten aus COMMIT^2 beispielhaft, wie die Berechnung der für die Optimierung relevanten Werte auf Ebene der Hausanschlüsse bzw. des öffentlichen Leitungsnetzes funktioniert.

[11] Versunkende Kosten (engl. sunk costs) sind Ausgaben, welche sich zu einem Zeitpunkt t unabhängig von der weiteren Entscheidungsfindung anfallen.

4.2 Systemgrenzen

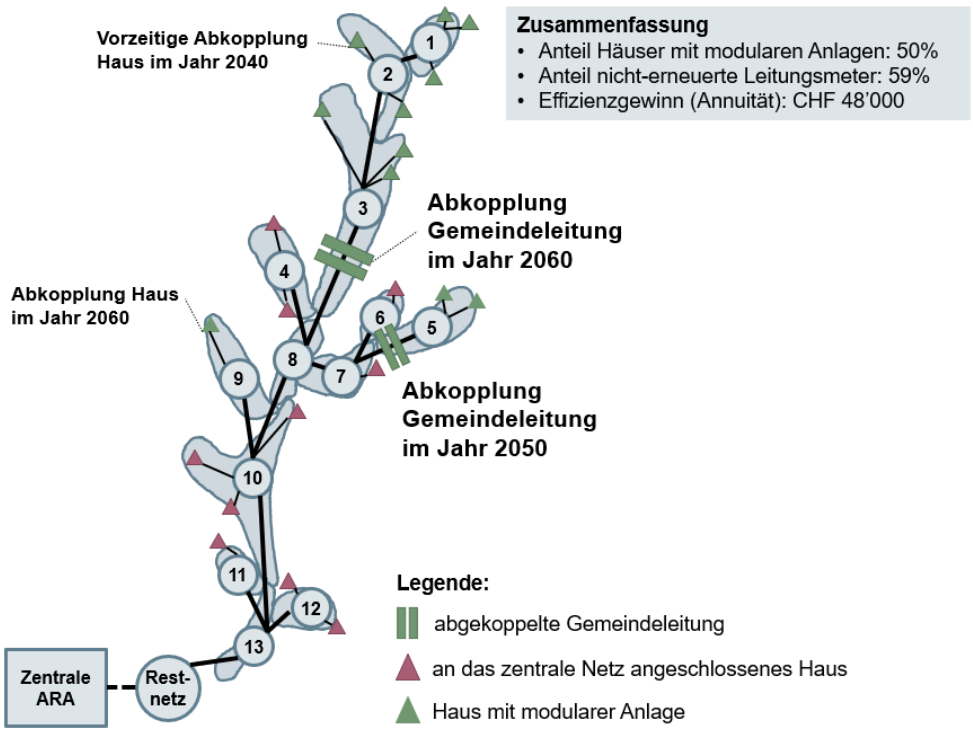
Zur Abbildung des Gesamtsystems und der Optimierung mussten eine Reihe von Annahmen getroffen werden. Dazu zählen insbesondere die folgenden Punkte:

- Modulare Anlagen sind funktional äquivalent zur zentralen Abwasserentsorgung. Mögliche Abweichungen z.B. durch die Aversion von Menschen, sich mit dem Thema Abwasser zu beschäftigen, können aber in monetarisierter Form in die Kalkulation einfliessen (vgl. Kapitel 3.3).
- Modulare Anlagen sind als Einzelanlagen pro Haushalt konzipiert. Gruppenanlagen für mehrere Häuser wären zwar ebenfalls denkbar, können in diesem Modell aber nicht abgebildet werden.
- Leitungen zur Ableitung von Regenwasser werden ignoriert. Es wird von einem Trennsystem von Schmutzabwasser und Regenwasser ausgegangen, bzw. von einem System bei welchem künftig das Regenwasser versickert wird.
- Es wird angenommen, dass das bestehende Netz an Leitungen bei einer Sanierung bestehen bliebe. Andere Leitungsführungen, z.B. zur Entflechtung des Leitungsnetzes können nicht abgebildet werden. Dasselbe gilt für mögliche Zusammenschlüsse kleinerer mit grösseren ARAs.
- Aus Performancegründen ist die Anzahl Sanierungsabschnitte im öffentlichen Leitungsnetz auf 14, die Anzahl Hausanschlüsse auf 2'800 beschränkt.
- Eine Abkopplung vom zentralen System ist endgültig.

4.3 Modelloutputs

Wie erwähnt resultiert aus der Optimierung einerseits für jeden Abschnitt des öffentlichen Leitungssystem die Information, ob er erneuert oder stillgelegt werden soll, und andererseits für jedes Haus die Angabe, ob es am zentralen Netz angeschlossen ist oder eine modulare Lösung einsetzt. Zusätzlich berechnet wird auch der **optimale Transitionspfad**, d.h. der Zeitpunkt, wann ein Element vom zentralen Netz abgekoppelt wird (vgl. auch Abbildung 4-1).

Abbildung 4-1: Illustration eines möglichen Modelloutputs (stilisiertes Beispiel)



Quelle: Eigene Darstellung

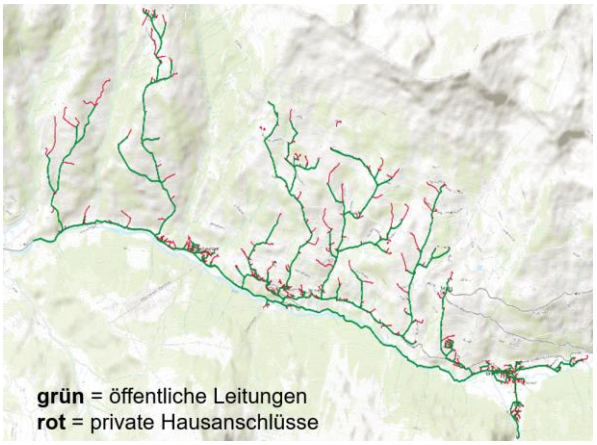
Abgeleitet aus der Optimallösung und dem Transitionspfad ergeben sich zudem der *Durchdringungsgrad modularer Anlagen*, d.h. der Anteil der Häuser deren Abwasser am Ende des Analysehorizonts mit modularen Technologien gereinigt wird und der *Effizienzgewinn*, d.h. die Kostenersparnisse gegenüber dem Fortbestand des zentralen Systems (ausgedrückt als Annuität.).

5 Modellanwendung in zwei Fallstudien

5.1 Übersicht zu den analysierten Umgebungen

Das in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellte Modell wurde im Rahmen von zwei Fallstudien praktisch angewendet. Dazu wurden zwei verschiedene Analyseperimeter ausgewählt. Einerseits ein Randgebiet eines urbanen Zentrums (Quartier Gartenstadt, Köniz, Kanton Bern), andererseits ein grösseres, zusammenhängendes ländliches Berggebiet (Schächental, Kanton Uri), das an eine grössere, zentrale ARA im Tal angeschlossen ist. Abbildung 5-1 zeigt eine geografische Karte der beiden Perimeter sowie Ausschnitte aus den Leitungskatastern.

Abbildung 5-1: Geografische Karte und Leitungskataster der beiden Analyseperimeter

Köniz Gartenstadt, BE	Schächental, UR
Geografische Karte mit analysiertem Ausschnitt	
Ausschnitte aus den Leitungskatastern	
	

Quellen: Swisstopo, Siedlungsentwässerung Köniz, Geoportal Kanton Uri.

Zu beachten sind die Unterschiede zwischen Leitungssystemen in den beiden Analyseperimetern. Das Gebiet Gartenstadt ist ein relativ dicht besiedeltes Einfamilienhausgebiet mit relativ

kurzen öffentlichen und privaten Zuleitungen. Im Gegensatz dazu ist das Schächental dünner besiedelt und zeichnet sich durch lange Zuleitungen zu einigen wenigen Häusern aus. Dies deutet rein intuitiv darauf hin, dass im Schächental das kostenoptimale Potenzial für modulare Anlagen grösser ist, da sich durch den Wegfall der langen Zuleitungen grössere Einsparungen erzielen lassen.

5.2 Datengrundlagen und Aufbereitung

5.2.1 Daten zum Leitungssystem

Die Struktur des Leitungssystems sowie Angaben zu Baujahr, Länge und Breite der einzelnen Elemente stammen aus den GIS-Systemen der beiden Gebiete. Die Daten zum Schächental sind im kantonalen Geoportal öffentlich abrufbar, diejenigen aus Köniz wurden uns durch die Abteilung Siedlungsentwässerung zur Verfügung gestellt. [12] Berücksichtigt wurden jeweils nur Abwasserleitungen und keine Regenwasserleitungen.

Im Rahmen der Aufbereitung der Daten wurde das System, wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, in 13 Sanierungsabschnitte eingeteilt. Der 14. Sanierungsabschnitt umfasst das Restnetz, welches im Sinne einer statischen Analyse per Definition an das zentrale Netz angeschlossen bleibt. Abbildung 5-2 zeigt die entsprechende Einteilung für das Gebiet Schächental. Aufgrund der Restriktion auf maximal 14 Sanierungsabschnitte mussten einige grössere Gebiete zusammengefasst werden. Die Strukturdaten wurden entsprechend aggregiert.[13]

[12] An dieser Stelle besten Dank an Beat Furger der Abwasser Uri AG und Reiner Gitzel von Siedlungsentwässerung Köniz.

[13] Konkret wurde für das Baujahr und dem Leitungsdurchmesser der Median verwendet. Die Länge der Leitungselemente wurde aufsummiert.

Abbildung 5-2: Einteilung in Sanierungsabschnitte im Gebiet Schächental UR

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten aus dem Geoportal Kanton Uri.

Besonders bei den Hauszuleitungen sind die Daten nicht immer vollständig. In diesen Fällen wurden die fehlenden Datenpunkte durch zufälliges Sampling imputiert.[14] Zur Bestimmung der Restlebensdauer eines Sanierungsabschnitts wurde das Baujahr und eine Annahme einer maximalen Lebensdauer herangezogen. Bei öffentlichen Leitungen wurde von einer Lebensdauer von 70 Jahren ausgegangen, bei Hausanschlüssen von 50 Jahren.

Im beiden Perimetern konnten die Restbuchwerte aus den Finanzbuchhaltungen der Netzbetreiber Abwasser Uri und Siedlungsentwässerung Köniz herangezogen werden und so zusammen mit der Restlebensdauer die ursprünglichen Baukosten berechnet werden. Dort wo diese Informationen fehlten, wurden sie basierend auf Annahmen zu den Baukosten pro Meter imputiert. Der Frischwasserverbrauch der Haushalte war nur für Köniz verfügbar und nur ohne Identifikator des dazugehörigen Haushalts. Entsprechend wurden für Häuser beider Perimeter aus der verfügbaren Verteilung ein zufälliger Wert zugewiesen.

Weitere Informationen und Annahmen zur Abbildung des Leitungssystems der Perimeter gibt Anhang C.

5.2.2 Zentrale und modulare Abwasserreinigungsanlagen

Die Angaben zu den zentralen Abwasserreinigungsanlagen ARA Bern und ARA Altdorf wurden den jeweiligen Geschäftsberichten entnommen. Die Modellierung modularer

[14] In einem ersten Schritt wurde der Durchschnitt der Angaben aller übrigen Leitungselemente desselben Sanierungsabschnitts herangezogen. Dort wo aber keine Informationen vorlagen, wurde aus dem gesamten Pool der Leitungselemente mit vollständigen Daten zufällig fünf Werte gezogen und daraus der Durchschnitt gebildet.

Abwasserreinigungsanlagen basiert auf einem hypothetischen, aber plausiblen Produkt *new*Klara, welches von Prof. Max Maurer von der ETH Zürich im Rahmen des COMIX-Projekts entworfen wurde. Grundlage dafür war ein Szenario zur zukünftigen Verbreitung modularer Anlagen, welches im Rahmen eines Workshops mit Fachpersonen aus der Praxis entwickelt wurde. Wie in Kapitel 3.3 bereits erwähnt, werden dabei neben dem Kaufpreis für die Anlage selbst auch Installations-, Service- und Opportunitätskosten berücksichtigt, wobei gewisse Angaben von der Grösse der Anlage bzw. der Anzahl zu versorgender Einwohnerwerte abhängen. Genauere Details gibt Anhang C. Abbildung 5-3 zeigt beispielhaft die Höhe der Kosten für eine Anlage für sechs Einwohnerwerte. Dabei ist zu beachten, dass der Preis der Anlage aufgrund des technischen Fortschritts zwischen 2020 und 2040 sinkt, danach aber konstant bleibt. Weitere Hintergründe zur postulierten modularen Anlage gibt Anhang C.

Abbildung 5-3: Beispiel für Kosten einer modularen Abwasserreinigungsanlage in den Jahren 2020 und 2040

Kosten modulare Anlage (Beispiel für Anlage mit 6 Einwohnerwerte)		
	Im Jahr 2020	*Im Jahr 2040*
Anschaffungskosten	10'100 CHF	4'800 CHF
Installationskosten	4'000 CHF	
Opportunitätskosten (u.a. Platzbedarf)	7'200 CHF	
Total Investitionskosten	**21'300 CHF**	**16'000 CHF**
pro Jahr und EW	207 CHF	155 CHF
Laufende Servicekosten	300 CHF / Jahr	
Lebensdauer Anlage	20 Jahre	

5.3 Resultate und Interpretation

Nachfolgend werden die wichtigsten Resultate aus den beiden Fallstudien vorgestellt. Zuerst werden die Modellresultate ausgehend von den oben diskutieren Basisannahmen beleuchtet. Danach wird aufgezeigt, wie sich die Resultate verändern, wenn von höheren oder tieferen Preisen für modulare Anlagen ausgegangen wird.

5.3.1 Optimaler Einsatz modularer Anlagen unter Basisannahmen

Der obere Teil von Abbildung 5-4 zeigt die angenommenen Kosten für eine modulare Anlage mit sechs Einwohnerwerten, in diesem Fall die im Kapitel 5.2.2 beschriebenen Basisannahmen. Im unteren Teil wird der Durchdringungsgrad mit modularen Anlagen gezeigt («Anteil Häuser mit *new*Klara») sowie der daraus entstehende Effizienzgewinn im Vergleich zu einem Fortbestand des heutigen vollständig zentralen Systems.

Abbildung 5-4: Durchdringung mit *new*Klara und auf den heutigen Zeitpunkt diskontierte Effizienzgewinne nach 100 Jahren unter Basisannahmen in Köniz BE und Schächental UR

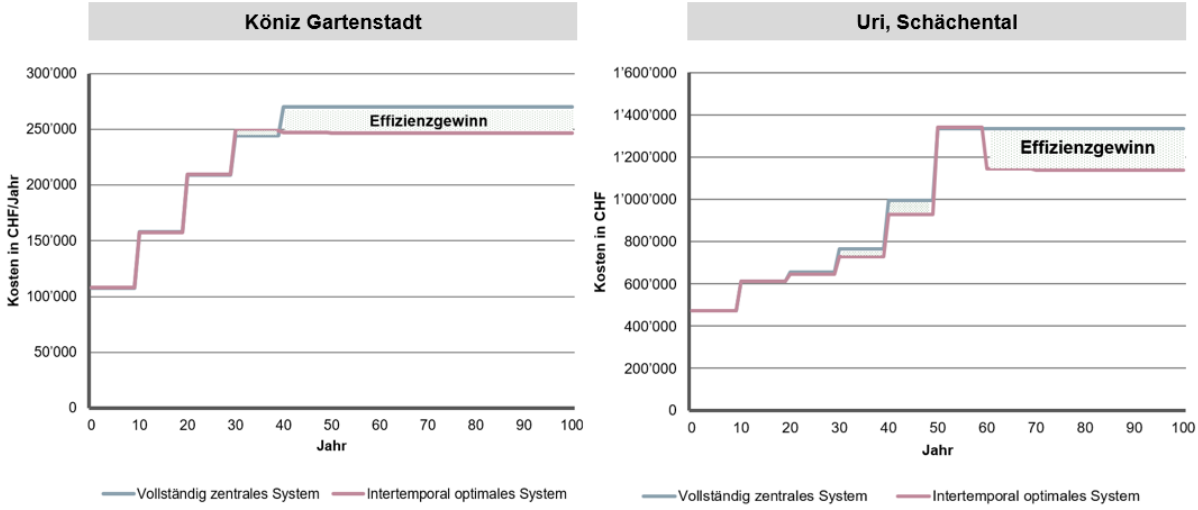
	Köniz Gartenstadt	Uri, Schächental
Koster modularer Anlagen		
Kosten newKlara (für 6 EW)	4'806	4'806
Installationskosten (für 6 EW)	4'000	4'000
Opportunitätskosten für Platzbedarf (für 6 EW)	7'200	7'200
Total Kosten newKlara (für 6 EW)	**16'006**	**16'006**
Einfluss unterschiedlicher Kosten für die modularen Anlagen		
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**4%**	**33%**
Anteil Häuser mit newKlara	**4%**	**18%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*77%*	*84%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*23%*	*16%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**4%**	**6%**
Effizienzgewinn in CHF pro Jahr und Haus im Perimeter	**41**	**97**

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Simulationen mit COMMIT[2].

Die Ergebnisse zeigen, dass laut dem Modell unter den Basisannahmen sowohl in Köniz wie auch im Schächental Abweichungen vom heutigen zentralen System optimal sind, d.h. modulare Anlagen zum Einsatz kommen. In Köniz Gartenstadt kommen langfristig in 4% aller Häuser *new*Klara in Einsatz, im Schächental sogar in 18% aller Fälle. In beiden Gebieten handelt es sich dabei grossmehrheitlich um Häuser aus Gebieten, wo im Modell das öffentliche Leitungssystem nicht mehr erneuert wurde. Es gibt aber auch einige Häuser welche trotz einer noch existierenden öffentlichen Leitung auf eine modulare Anlage umgestiegen sind. In diesen Fällen war diese Lösung günstiger als die Sanierung des Hausanschlusses.

Der Effizienzgewinn gegenüber dem Fortbestand des zentralen Systems erscheint mit 4% bzw. 6% auf den ersten Blick gering. Heruntergebrochen auf einen Jahresbetrag pro Haus ergibt sich aber allein in diesen Analyseperimeter ein **nicht vernachlässigbarer Betrag** zwischen CHF 40 und 100 pro Jahr und Haus. Erwartungsgemäss fällt der Effizienzgewinn im Schächental grösser aus, da dort verschiedene lange und damit teuer zu sanierende Leitungen nicht mehr saniert werden müssen und das Abwasser aus den entsprechenden Häuser stattdessen durch modulare Anlagen gereinigt werden kann.

Abbildung 5-5: Jährliche Kosten für das Szenario des Fortbestand des vollständig zentralen Systems im Vergleich mit dem intertemporal optimalen System (Sozial Planer) in Köniz Gartenstadt und Uri, Schächental.



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Simulationen mit COMMIT[2].

Anmerkung: Zum besseren Verständnis zeigt diese Grafik jährliche Kapital- und Unterhaltskosten aus Sicht der Finanzbuchhaltung. Im Unterschied zur Optimierungsperspektive sind etwaige versunkene Kosten enthalten und sämtliche Angaben sind nicht auf den heutigen Zeitpunkt diskontiert.

Wie sieht der optimale Transitionspfad hin zur langfristig optimalen Lösung aus? Die Antwort auf diese Frage illustriert Abbildung 5-5, welche die jährlichen Kapital- und Unterhaltskosten im Szenario des sozialen Planers den Kosten beim Fortbestand des heutigen vollständig zentralen Systems gegenüberstellt. Im Gebiet Köniz Gartenstadt (linker Teil der Abbildung) weichen die beiden Kurven 30 Jahre nach Analysebeginn das erste Mal voneinander ab. Zu diesem Zeitpunkt erreicht ein Teil des öffentlichen Leitungssystem das Ende seiner Lebenszeit und wird gemäss dem sozialen Planer vom zentralen Netz abgekoppelt. Diese Entscheidung führt temporär zu höheren Kosten als wenn am zentralen System festgehalten worden wäre. Der Grund: Nicht alle im abgekoppelten Gebiet existierenden Hausanschlüsse erreichen zum selben Zeitpunkt wie die öffentliche Leitung das Ende ihrer Lebenszeit. Deshalb mussten sie vorzeitig ausser Betrieb genommen und abgeschrieben werden. Langfristig zahlt sich diese Investition aber aus, da die Kosten damit in den darauffolgenden Jahren tiefer ausfallen als unter dem zentralen System und langfristig Effizienzgewinne erzielt werden können.

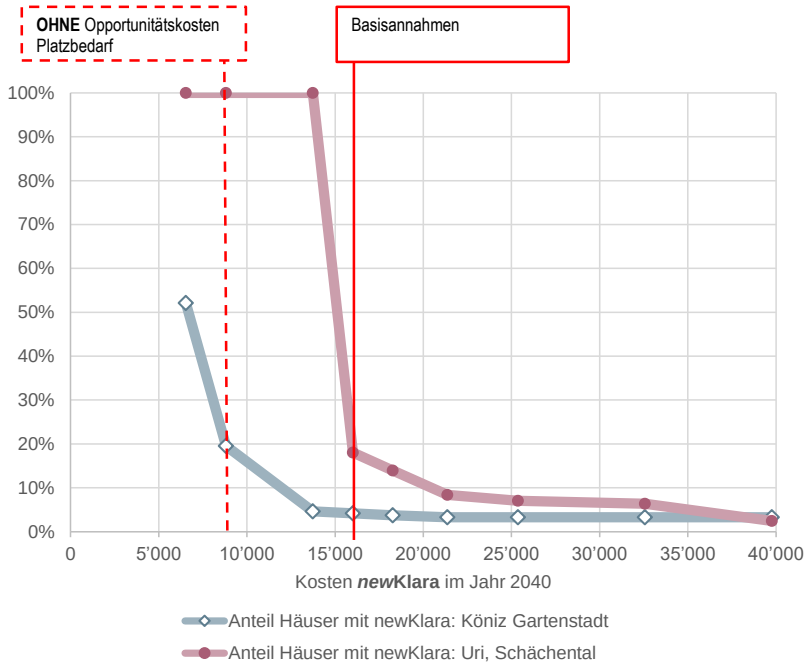
Auch im Schächental (rechter Teil der Abbildung) erfolgt der optimale Übergang gemäss der Simulation schrittweise, getrieben von dem Ende der Lebenszeit öffentlicher Leitungen. Dadurch ergeben sich bereits relativ früh gewisse Effizienzgewinne. Zur Hälfte des Analysezeitraums verschwinden die Kostenersparnisse vorübergehend wieder, da bei der Abkopplung eines Gebiets wiederum Mehrkosten zur vorzeitigen Ausserbetriebnahme von Hausanschlüssen anfallen. Das Beispiel Schächental illustriert damit, noch stärker als Köniz, das allgemein gültige Resultat, dass die Komplexität und die Transitionskosten des Übergangs zum langfristigen Optimum in der Regel zunehmen, wenn die betroffenen öffentlichen und privaten Leitungen eine heterogene Altersstruktur aufweisen. In beiden hier analysierten Beispielen sind die

temporären Mehrkosten aber profitabel, da in den darauffolgenden Jahren genügend hohe Effizienzgewinne möglich sind.

5.3.2 Optimaler Einsatz modularer Anlagen unter veränderten Annahmen

Wie entwickelt sich der optimale Einsatz modularer Anlagen, wenn diese teurer oder günstiger sind als angenommen? Abbildung 5-6 zeigt den optimalen Durchdringungsgrad in Abhängigkeit der Gesamtkosten von *new*Klara. Die im vorgehenden Abschnitt unterstellten Kosten sind als Basisannahmen in der Grafik speziell gekennzeichnet.

Abbildung 5-6: Optimaler Anteil Häuser mit *new*Klara (Durchdringungsgrad) abhängig von den Gesamtkosten modularer Anlagen[15]



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Simulationen mit COMMIT[2]

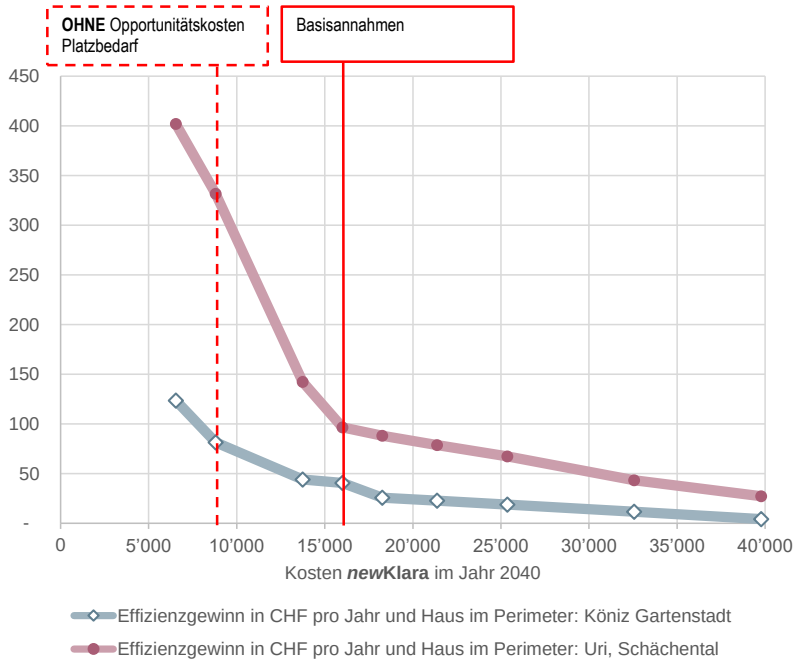
Interessant ist insbesondere, was passiert, wenn der Optimierung geringere Kosten als unter den Basisannahmen unterstellt werden. Sowohl in Köniz wie auch im Schächental sind dann **Kippeffekte** zu beobachten: Ab einem gewissen Kostenniveau steigt der optimale Durchdringungsgrad sprunghaft an. Es ist plötzlich grossflächig effizienter, modulare Anlagen einzusetzen, als den Anschluss an das zentrale Netz beizubehalten. Erwartungsgemäss tritt dieser Effekt im Schächental früher, d.h. bei einem höheren Kostenniveau ein als in Köniz. Bei Kosten für modulare Anlagen von ca. CHF 13'000 lohnt es sich im Schächental gemäss den Simulationen nicht mehr – trotz Berücksichtigung aller Nebeneffekte – die zentrale Zuleitung des Tals

[15] Detaillierte Resultattabellen zu den der Grafik zugrundeliegenden Modellsimulationen zeigt Abbildung 7-1 im Anhang.

in Richtung Altdorf und zur zentralen ARA zu erneuern. Mit anderen Worten müssen modulare Anlagen nur wenig günstiger sein als im Basisszenario angenommen, und sie würden aus Sicht eines sozialen Planers für das gesamte Schächental zur bevorzugten Wahl. Dies ist insbesondere auch deshalb interessant, da Kosten unter 13'000 speziell im Schächental nicht unplausibel erscheinen, beispielsweise wenn man die Opportunitätskosten für den Platzbedarf der Anlagen im ländlich geprägten Analyseperimeter weniger hoch einschätzt.

Fallen die Kosten für modulare Anlagen höher aus als unter den Basisannahmen, sinkt erwartungsgemäss auch der optimale Durchdringungsgrad. Trotzdem bleibt dieser, besonders im Schächental, noch relativ lange im Bereich von 7-15% der Häuser. Auch bei Köniz bleibt der Anteil modularer Anlagen bei höheren Kosten überraschend lange positiv. Selbst bei sehr hohen Kosten wird immer ein öffentlicher Leitungsabschnitt nicht saniert. Dies liegt daran, dass diese eine öffentlicher Leitungsabschnitt einen grossen Durchmesser aufweist und deshalb annahmegemäss ein höherer Kostensatz für die Unterhaltskosten attestiert wird. Auch wenn dieses Einzelresultat nicht überinterpretiert werden darf, zeigt es doch, dass schon nur geringe Kostensteigerungen Teile des zentralen Systems unattraktiv werden lassen.

Abbildung 5-7: Effizienzgewinn durch den Einsatz von *new*Klara abhängig von den Gesamtkosten modularer Anlagen



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Simulationen mit COMMIT[2]

Betrachtet man anstelle des Durchdringungsgrads den daraus entstehenden Effizienzgewinn ist kein klarer Kipppunkt bei der Verbreitung modularer Anlagen sichtbar. Dies ist plausibel: Modulare Anlagen sind zwar bei sinkenden Gesamtkosten relativ bald in vielen Fällen effizienter wie der Anschluss an das zentrale System, der absolute Vorteil bleibt in einer ersten Phase, kurz nach dem Kipppunkt im Durchdringungsgrad, erstmal noch relativ gering. Sinken die

Preise modularer Anlagen weiter, steigen dann auch die Effizienzgewinne an. Gerade im Gebiet Schächental erreicht der Gewinn dabei relativ rasch eine substanzielle Grösse. Betragen die Kosten für modulare Anlagen noch rund CHF 9'000, dann ist das komplett modulare System bereits um rund 22% günstiger als das vollständig zentrale System. Unter denselben Annahmen betragen die Einsparungen in Köniz rund 8% der Kosten des zukünftigen zentralen Systems.

5.4 Fazit Fallstudien

Die beiden diskutierten Fallstudien haben aufgezeigt, dass in der Schweiz bei optimalem Einsatz ein beträchtliches Potenzial für den Einsatz modularer Abwasserreinigungsanlagen besteht. Dieses Potenzial geht deutlich über die Anwendung in einzelnen abgelegenen Häusern hinaus. Wie die beschriebenen Kippeffekte zeigen, haben modulare Anlagen in ländlichen und suburbanen Gebieten ein **ernst zu nehmendes Disruptionspotenzial**. Ab einem nicht unplausiblen Kostenniveau erlaubt der Einsatz modularer Anlagen gegenüber dem heutigen zentralen System wesentliche und sich über die Jahre kumulierende Effizienzgewinne zu erzielen.

Auf der Zeitachse beginnt der Einsatz modularer Anlagen optimalerweise dann, wenn die umliegenden, längeren Abwasserkanäle am Ende ihrer Lebenszeit angelangt sind. Bis zu diesem Zeitpunkt ist es günstiger die ohnehin schon gebaute zentrale Infrastruktur zu nutzen. In der Praxis dürfte der Einsatz modularer Anlagen je nach Altersstruktur des Leitungssystems schon während einer längeren Übergangsphase beginnen, in der keine neuen Investitionen ins zentrale System mehr getätigt werden und bei Bedarf vorzeitig auf modulare Anlagen gesetzt wird.

Die grösste Quelle an Effizienzgewinnen ist üblicherweise der Umstand, dass aufgrund der modularen Alternative Teile des öffentlichen Abwasserleitungssystems und lange Hauszuleitungen nicht mehr erneuert werden müssen. Diese Gewinne fallen erwartungsgemäss umso grösser aus, je günstiger die modularen Anlagen und je aufwendiger die Sanierung der Abwasserkanäle. In diesem Sinne kann der Einsatz von Relining zur Sanierung von Kanälen das individuelle Potenzial modularer Anlagen in einem Gebiet leicht negativ beeinflussen, aber nicht grundsätzlich in Frage stellen. Speziell bei längeren Kanälen kommen die Kostenvorteile modularer Anlagen trotzdem zum Tragen. Zudem ist Relining je nach Zustand der Abwasserleitung nicht in jedem Fall möglich.

An dieser Stelle sei nochmals festzuhalten, dass die bisherigen Berechnungen zum Potenzial modularer Anlagen auf dem Szenario eines sozialen Planers beruhen, welcher alles kontrollieren kann und die Nettogesamtkosten minimiert. Auch wenn viele Netzbetreiber in staatlichem Besitz sind, ist dieses Szenario nicht direkt auf die Praxis anwendbar. Wie im nachfolgenden Kapitel aufgezeigt wird, kann aber ein grosser Teil des errechneten, theoretischen Kostenoptimierungs-Potenzials von modularen Anlagen unter den richtigen institutionellen Bedingungen auch unter realitätsnäheren Umständen realisiert werden.

6 Abbildung alternativer institutioneller Rahmenbedingungen

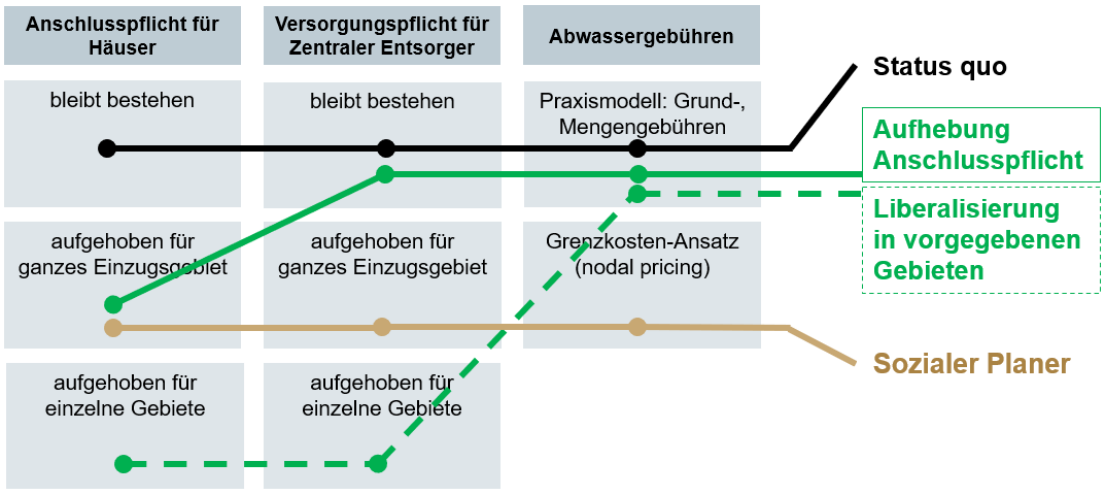
In diesem Kapitel wird aufgezeigt, wie sich die Optimierungsresultate verändern, wenn nicht mehr der soziale Planer, sondern alternative Entscheidungsregeln unterstellt werden. Konkret soll beleuchtet werden, was passiert, wenn die Entscheidungsfindung teilweise den Hausbesitzerinnen und Hausbesitzern überlassen wird und inwieweit das in Kapitel 5 aufgezeigte Potenzial modularer Anlagen unter veränderten institutionellen Rahmenbedingungen abgerufen werden kann.

6.1 Alternativszenario I «Aufhebung Anschlusspflicht»

6.1.1 Institutionelle Rahmenbedingungen

Im ersten Alternativszenario wird der regulatorische Rahmen gegenüber dem Status quo nur geringfügig angepasst. Es wird einzig das heutige de facto Verbot modularer Anlagen aufgehoben, aber keine weiteren Schritte zur Förderung der dezentralen Abwasserentsorgung unternommen. Technisch gesehen wird in diesem Szenario die heute bestehende Pflicht zum Anschluss an das zentrale Netz aufgehoben und durch eine Pflicht zur fachgerechten Entsorgung des Abwassers ersetzt (vgl. auch Abbildung 6-1). Damit wird jedem Hausbesitzer oder Hausbesitzerin einzeln die Wahl gelassen, ob sie ihren Anschluss an das zentrale Netz beibehalten oder eine modulare Lösung verwenden wollen. Keine Änderung gibt es beim Betreiber des zentralen Abwassernetzes: Auf Wunsch muss dieser das Abwasser von allen Häusern weiterhin abnehmen und dafür das nötige öffentliche Leitungsnetz bereitstellen. Die «Versorgungspflicht» auf Seite des Netzbetreibers bleibt damit bestehen.

Abbildung 6-1: Schematische Einordnung von zwei Alternativszenarien im Vergleich zum Status quo und dem Szenario des Sozialen Planers aus Kapitel 5



Quelle: Eigene Darstellung

Hervorzuheben ist, dass in diesem Szenario die Hausbesitzerinnen und Hausbesitzer die Entscheidung «modular oder zentral» selbstständig und unter Berücksichtigung ihrer individuellen Situation treffen können. Anvisiert wird nicht mehr die Minimierung der Gesamtkosten des Systems, sondern die individuelle Minimierung der Kosten aus Sicht jedes einzelnen Hauses. Dies wird im Modell so abgebildet, dass für jeden Hausanschluss die Kosten des Fortbestands des zentralen Anschlusses (inkl. Abwassergebühren) mit dem potenziellen Aufwand für einen Wechsel auf eine modulare Lösung verglichen werden. Abbildung 6-2 zeigt, welche Kosten dabei konkret miteinander verglichen werden.

Abbildung 6-2: Berücksichtigte Kosten bei der Entscheidung des privaten Hausbesitzers zwischen dem Fortbestand eines Hausanschlusses an das zentrale Netz und dem Wechsel auf eine modulare Anlage

Kosten bei Fortbestand zentraler Anschluss	Kosten bei Wechsel auf modulare Anlage
Abwassergebühren: Mengengebühr abhängig von Abwassermenge, Grundgebühr abhängig von Belastungswerten	**Variable Kosten** für Betrieb modulare Anlagen: abhängig von Abwassermenge
Höhe der Tarife: Alle 10 Jahre neu berechnet, sodass Gesamtkosten des Systems vollständig gedeckt werden. Es gilt eine einheitliche Tarifstruktur über das gesamte Einzugsgebiet.	*Höhe des Kostensatzes*: Abhängig von Parametrisierung, aber i.d.R. höher als variable Kosten für zentrale Entsorgung.
Kapitelkosten Hausanschluss: Annuität aus Baukosten für Hausanschluss unter Berücksichtigung der Lebensdauer; eigentlich versunkene Kosten werden mitberücksichtigt (imperfekt-rationale Agenten)	**Kapitelkosten modulare Anlagen**: Annuität aus Baukosten für modulare Anlagen unter Berücksichtigung der Lebensdauer
	Abschreibung Hausanschluss: Einmalzahlung in Höhe des Restwertes; eigentlich versunkene Kosten werden mitberücksichtigt (imperfekt-rationale Agenten)

Wichtig ist zudem, dass neu von nicht perfekt-rationalen Hausbesitzern ausgegangen wird. Diese ignorieren versunkene Kosten *nicht*. Dies bedeutet, dass bei einem Wechsel auf ein modulares System vor dem Ablauf der Lebenszeit des Hausanschlusses, der gesamte buchhalterische Restwert des Anschlusses einmalig fällig wird. Implizit bedeutet diese Annahme, dass ein vorzeitiger Wechsel auf modulare Anlagen, d.h. vor dem Ablauf der Lebenszeit des Hausanschlusses, je nach Baukosten der Anschlussleitung mit Zusatzkosten verbunden und damit weniger attraktiv ist.

6.1.2 Umsetzung und Ergebnisse

Für die Umsetzung dieses Alternativszenarios wurde die Entscheidungsfindung von COMMIT[2] modifiziert. Aufgrund der weiterbestehenden Versorgungspflicht fällt die Optimierung auf Ebene des öffentlichen Leitungsnetzes vollständig weg. Auf Ebene Hausbesitzer ist das Entscheidungskriterium neu der Vergleich zwischen den Kosten für den Fortbestand des

Hauanschlusses und dem finanziellen Aufwand für den Wechsel auf eine modulare Anlage, wie in Abbildung 6-2 beschrieben.

Angesichts des zwingenden Fortbestands des öffentlichen Leitungsnetzes und der privaten Entscheidungsfindung ist es nicht überraschend, dass der Effizienzgewinn in diesem Alternativszenario geringer ausfällt als im Szenario des sozialen Planers. Wie Abbildung 6-3 zeigt, ist die Abweichung in Köniz besonders augenfällig, da dort ein Grossteil des Effizienzgewinns durch eine nicht mehr erneuerte Gemeindeleitungen entstanden ist. Im Schächental gibt es noch mehr längere Hausanschlüsse, welche auch unter dem alternativen Szenario nicht mehr erneuert werden und positiv zum Effizienzgewinn beitragen. In diesem Fall können immerhin rund die Hälfte des Potenzials aus dem Szenario des sozialen Planers realisiert werden.

Abbildung 6-3: Ergebnisse im Szenario «Aufhebung Anschlusspflicht» im Vergleich zum Szenario «Sozialer Planer» unter Basisannahmen für modulare Anlagen (CHF 16'000 für 6 EW im Jahr 2040)

	Köniz Gartenstadt		
Resultate für den betrachteten Perimeter	sozialer Planer	Aufhebung Anschluss-pflicht	Wieviel vom Potenzial wird ausgenutzt?
Effizienzgewinn in CHF/Jahr pro Haus im Perimeter	41	1	3%
	Uri Schächental		
Effizienzgewinn in CHF/Jahr pro Haus im Perimeter	97	43	44%

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Simulationen mit COMMIT[2]

6.2 Alternativszenario II «Liberalisierung in vorgegebenen Gebieten»

6.2.1 Institutionelle Rahmenbedingungen

In diesem zweiten Alternativszenario wird die Rolle des sozialen Planers teilweise beibehalten. Konkret ist vorgesehen, dass der Regulator, in der Regel die Gemeinde, vorgängig bestimmte Gebiete definiert, in welcher der freie Markt über die Anwendung modularer Anlagen entscheiden soll. Dazu werden in diesen Gebieten die bestehenden Regulierungen wie folgt angepasst (vgl. auch Abbildung 6-1 für eine schematische Übersicht):

- Zu einem individuell für jedes Gebiet definierten Zeitpunkt wird die Versorgungspflicht für den Betreiber des zentralen Systems aufgehoben. Er kann damit frei und auf Basis marktwirtschaftlicher Kriterien entscheiden, ob und wo er in den bezeichneten Gebieten das zentrale Netz noch weiterbetreiben will.
- Bereits vorgängig, z.B. per sofort, wird in diesen Gebieten für Hausbesitzerinnen und Hausbesitzer die Pflicht zum Anschluss an das zentrale Netz aufgehoben und - analog zum ersten Alternativszenario - durch eine Pflicht zur fachgerechten Entsorgung des Abwassers

ersetzt. Betroffene Hausbesitzerinnen und Hausbesitzer können damit frei entscheiden, ob sie in Zukunft eine modulare Anlage einsetzen wollen. Diese Wahlfreiheit entfällt, wenn der Betreiber des zentralen Systems beschliesst, das Netz im entsprechenden Gebiet nicht mehr weiter zu betreiben. In diesem Fall sind die Hausbesitzer aufgrund der Entsorgungspflicht gezwungen, auf eine modulare Anlage zu wechseln.

In der Praxis könnten die liberalisierten Gebiete und der Zeitpunkt der Aufhebung der Aufhebung von Anschluss- und Versorgungspflicht im Rahmen der Generellen Abwasserentsorgungsplanung (GEP) festgelegt werden. Im vorliegenden Szenario wird unterstellt, dass der Regulator für die richtige Auswahl dieser Merkmale rational die Minimierung der langfristigen Nettokosten anvisiert.

6.2.2 Umsetzung und Ergebnisse

Auch zur Abbildung dieses Alternativszenarios wurden die Entscheidungsregeln in COMMIT^2 angepasst. Die liberalisierten Gebiete entsprechen denjenigen Abschnitten des öffentlichen Leitungssystems, welche gemäss der Optimierung in Kapitel 5 unter den Basisannahmen nicht mehr saniert werden. Auch die Zeitpunkte zur Abkopplung vom zentralen System werden so festgelegt, wie es die Simulation aus Sicht des sozialen Planers ergeben hat. Die Entscheidungsregel auf Ebene der Hausbesitzerinnen und Hausbesitzer hängt von der Lokalität des Hauses ab. Ausserhalb der liberalisierten Gebiete wird der heutige Status quo, d.h. das vollständig zentrale System fortgeführt. In den liberalisierten Gebiete steht es Hausbesitzerinnen und Hausbesitzer frei, auf eine modulare Anlage zu wechseln. Ob sie dies tun, entscheiden sie nach derselben Kostenabwägung wie im ersten Alternativszenario (vgl. Abbildung 6 2), wobei sie in der Lage sind, den Zeitpunkt einer möglichen späteren Abkopplung ihres Gebiets im Voraus zu antizipieren.

Abbildung 6-4: Ergebnisse im Szenario «Liberalisierung in vorgegebenen Gebieten» im Vergleich zum Szenario «Sozialer Planer»

	Köniz Gartenstadt					
Resultate für den betrachteten Perimeter	sozialer Planer (gegeben tatsächliche Kosten)	Liberalisierung in vorgegebenen Gebieten	Wieviel vom Potenzial wird ausgenutzt?	sozialer Planer (gegeben tatsächliche Kosten)	Liberalisierung in vorgegebenen Gebieten	Wieviel vom Potenzial wird ausgenutzt?
Effizienzgewinn in CHF/Jahr pro Haus im Perimeter	41	39	96%	81	52	64%
	Uri Schächental					
Effizienzgewinn in CHF/Jahr pro Haus im Perimeter	97	85	88%	332	122	37%

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Simulationen mit COMMIT^2

Für die Ergebnisse in diesem Szenario ist von grosser Bedeutung, dass die künftigen Kosten modularer Anlagen richtig antizipiert werden. Werden diese beispielsweise durch den Regulator als zu hoch eingeschätzt, werden tendenziell zu wenige Gebiete für die Liberalisierung freigegeben. Teil A von Abbildung 6-4 (links) zeigt die Resultate der Modellsimulation für den Fall, dass die künftigen Kosten modularer Anlagen richtig antizipiert werden. In diesem Fall kann ein sehr grosser Teil des theoretischen Potenzials modularer Anlagen (Szenario sozialer Planer) realisiert werden. Dies ist nicht weiter erstaunlich, da viele Vorbedingungen vom sozialen Planer übernommen worden sind. Unterschiede in den Resultaten ergeben sich nur dadurch, dass einzelne Häuser aus nicht-liberalisierten Gebieten in diesem Alternativszenario an das zentrale Netz angeschlossen bleiben, während sie unter dem sozialen Planer als einzelne Einheit auf eine modulare Anlage wechseln konnten.

Teil B von Abbildung 6-4 (rechts) zeigt die Resultate der Simulation für den Fall, dass modulare Anlagen günstiger ausfallen als dies der Regulator bei der Definition liberalisierter Gebiete angenommen hat, die künftigen Kosten für die modularen Anlagen also «nicht richtig» antizipiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass dann ein bedeutend kleinerer Teil des Potenzials modularer Anlagen realisiert werden kann. Dies liegt daran, dass zu wenige Gebiete für die Liberalisierung, d.h. für den Einsatz modularer Anlagen, freigegeben werden. Dies weist auf ein Phänomen hin, welches für die Festlegung liberalisierter Gebiete in der Praxis von grosser Wichtigkeit sein kann. Eine zu zögerliche Liberalisierung im Sinne einer Aufhebung von Anschluss- und Versorgungspflicht kann zu wesentlichen Wohlfahrtsverlusten führen. Im Gegensatz dazu ist eine zu umfassende Liberalisierung weniger problematisch. Der Grund: Ist in einem liberalisierten Gebiet das zentrale Netz immer doch deutlich attraktiver als modulare Lösungen, ist es wahrscheinlich, dass der Betreiber des zentralen Netzwerks das Gebiet aus betriebswirtschaftlichen Gründen auch ohne Versorgungspflicht weiter versorgen wird. Das bedeutet, pointiert formuliert, dass das vorsichtige Vorgehen entgegen der ersten Intuition tendenziell darin besteht, mehr Gebiete zu liberalisieren.

7 Schlussfolgerungen

Dieser Bericht befasst sich mit der zukünftigen Rolle dezentral installierter, modularer Abwasserreinigungsanlagen. Es wurde ein neues Simulationsmodell (COMMIT^2) entwickelt, welches Untersuchungen näher an der Praxis als frühere Ansätze ermöglicht, u.a. indem die heute bestehende Infrastruktur in die Analyse miteinbezogen wird und der gesamte Transitionspfad von von einem rein zentralen Abwasserreinigungssystem zu einem hybriden System erfasst wird. Mit COMMIT^2 wurden zwei Fallstudien durchgeführt (Gartenstadt, Köniz BE und im Schächental UR) anhand derer das Potenzial modularer Anlagen in verschiedenen geografischen Kontexten und unter verschiedenen institutionellen Rahmenbedingungen untersucht wurde.

Die Resultate der Fallstudien zeigen, dass es in der Schweiz aus einer rein finanziellen Perspektive ein **beträchtliches Potenzial für den Einsatz modularer Anlagen** gibt. Dieses Potenzial geht deutlich über die Anwendung in einzelnen abgelegenen Häusern hinaus. Gesamtwirtschaftlich optimal eingesetzt, fällt der Einsatz modularer Annahmen in ländlichen und sub-

urbanen Gebieten selbst unter relativ konservativen Annahmen teils günstiger aus als die Sanierung und Weiterführung des Anschlusses an das zentrale Reinigungsnetz. Unterstellt man etwas geringere, aber noch plausible Kosten für zukünftige modulare Anlagen sind insbesondere im Fallbeispiel Schächental UR Kippeffekte zu beobachten, wo der optimale Einsatz modularer Anlagen im gesamten Tal günstiger ausfällt als die Fortführung des zentralen Systems.

Weitere Analysen der Fallstudien haben zudem gezeigt, dass ein grosser Teil des theoretischen Potenzials modularer Anlagen auch dann realisiert werden kann, wenn vom Kriterium des gesamtwirtschaftlichen Optimums abgewichen wird und stattdessen praxisnahe institutionelle Rahmenbedingungen unterstellt werden. Besonders erfolgsversprechend ist dabei der Ansatz einer kontrollierten Teilliberalisierung, in welcher der Regulator, in der Regel die Gemeinde, im Rahmen der Generellen Entwässerungsplanung (GEP) Gebiete definiert, in deren der Einsatz modularer Anlagen mittelfristig möglich sein soll. In diesen Gebieten würde dann einerseits die heutige Anschlusspflicht durch eine Abwasserentsorgungspflicht ersetzt, womit Hausbesitzerinnen und Hausbesitzer von sich aus auf modulare Anlagen wechseln könnten. Andererseits würde in diesen Gebieten dem Betreiber des zentralen Netzes die Wahl überlassen, ob er das zentrale Netz weiterhin aufrecht erhält oder alle Häuser auf modulare Anlagen wechseln müssen. Unter diesen Umständen und mit angemessen definierten liberalisierten Gebieten können in den beiden analysierten Fallbeispielen wesentliche Effizienzgewinne gegenüber dem heutigen zentralen System realisiert werden.

Die modellbasierte Analyse lässt den Schluss zu, dass modulare Anlagen in ländlichen und suburbanen Gebieten ein **ernst zu nehmendes Disruptionspotenzial** haben. Entsprechend sollte diese Option weiterverfolgt, weitere Untersuchungen vorgenommen werden und das Thema bei der Planung der Abwasserreinigung in Zukunft eine wichtigere Rolle einnehmen. Dies insbesondere vor dem Hintergrund, dass ein wesentlicher Teil der Schweizer Abwasserinfrastruktur in den nächsten Jahrzehnten das Ende seiner Lebensdauer erreicht und deren Sanierung mit hohen und langfristigen Investitionen verbunden ist.

Anhang A: Detaillierte Resultatetabellen

Abbildung 7-1: Detaillierte Ergebnisse für den Perimeter Köniz Gartenstadt (oben) und Uri Schächental (unten) im Szenario «Sozialer Planer», Verbreitung modularer Anlagen in Abhängigkeit ihrer Kosten

Köniz Gartenstadt

Unterschiedliche Annahmen zu den Kosten für die modularen Anlagen	grosse Kosten-einsp. / keine Oppor-tunitäts-kosten	keine Oppor-tunitäts-kosten	grosse Kosten-einsp.	**Basis-annahmen**	kleine Kosten-einsp.	keine Kosten-einsp.	keine Kosten-einsp., doppelte Install-kosten	keine Kosten-einsp., doppelte Install-kosten, doppelte Oppor-tunitäts-kosten	keine Kosten-einsp., doppelte Install-kosten, dreifache Oppor-tunitäts-kosten
Kosten newKlara (für 6 EW)	-2'264	-	-2'264	4'806	2'264	5'361	5'361	5'361	5'361
Installationskosten (für 6 EW)	0	0	0	4'000	0	0	4000	4000	4000
Opportunitätskosten für Platzbedarf (für 6 EW)	-7200	-7200	0	7200	0	0	0	7200	14400
Total Kosten newKlara (für 6 EW)	**6'542**	**8'806**	**13'742**	**16'006**	**18'270**	**21'367**	**25'367**	**32'567**	**39'767**
Kosten in % Hauptszenario	*41%*	*55%*	*86%*	*100%*	*114%*	*133%*	*158%*	*203%*	*248%*
Einfluss unterschiedlicher Kosten für die modularen Anlagen									
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**57%**	**15%**	**4%**	**4%**	**4%**	**4%**	**4%**	**4%**	**4%**
Anteil Häuser mit newKlara	**52%**	**20%**	**5%**	**4%**	**4%**	**3%**	**3%**	**3%**	**3%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*91%*	*75%*	*69%*	*77%*	*87%*	*100%*	*100%*	*100%*	*100%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*9%*	*25%*	*31%*	*23%*	*13%*	*0%*	*0%*	*0%*	*0%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**12%**	**8%**	**4%**	**4%**	**2%**	**2%**	**2%**	**1%**	**0%**
Effizienzgewinn in CHF pro Jahr und Haus im Perimeter	**124**	**81**	**44**	**41**	**26**	**23**	**19**	**12**	**4**

Uri, Schächental

Unterschiedliche Annahmen zu den Kosten für die modularen Anlagen	grosse Kosten-einsp. / keine Oppor-tunitäts-kosten	keine Oppor-tunitäts-kosten	grosse Kosten-einsp.	**Basis-annahmen**	kleine Kosten-einsp.	keine Kosten-einsp.	keine Kosten-einsp., doppelte Install-kosten	keine Kosten-einsp., doppelte Install-kosten, doppelte Oppor-tunitäts-kosten	keine Kosten-einsp., doppelte Install-kosten, dreifache Oppor-tunitäts-kosten
Kosten newKlara (für 6 EW)	-2'264	-	-2'264	4'806	2'264	5'361	5'361	5'361	5'361
0	0	0	0	4'000	0	0	4000	4000	4000
Opportunitätskosten für Platzbedarf (für 6 EW)	-7200	-7200	0	7200	0	0	0	7200	14400
Total Kosten newKlara (für 6 EW)	**6'542**	**8'806**	**13'742**	**16'006**	**18'270**	**21'367**	**25'367**	**32'567**	**39'767**
Kosten in % Hauptszenario	*41%*	*55%*	*86%*	*100%*	*114%*	*133%*	*158%*	*203%*	*248%*
Einfluss unterschiedlicher Kosten für die modularen Anlagen									
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**100%**	**100%**	**100%**	**33%**	**27%**	**19%**	**19%**	**19%**	**7%**
Anteil Häuser mit newKlara	**100%**	**100%**	**100%**	**18%**	**14%**	**8%**	**7%**	**6%**	**2%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*100%*	*100%*	*100%*	*84%*	*80%*	*59%*	*71%*	*78%*	*59%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*0%*	*0%*	*0%*	*16%*	*20%*	*41%*	*29%*	*22%*	*41%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**27%**	**22%**	**9%**	**6%**	**6%**	**5%**	**4%**	**3%**	**2%**
Effizienzgewinn in CHF pro Jahr und Haus im Perimeter	**402**	**332**	**142**	**97**	**88**	**79**	**67**	**43**	**27**

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Simulationen mit COMMIT[2]
Bemerkung: Sämtliche Angaben zu Kosten von *new*Klara beziehen sich auf den postulierten Stand im Jahr 2040.

Abbildung 7-2 Detaillierte Ergebnisse für den Perimeter Köniz Gartenstadt (oben) und Uri Schächental (unten) im Szenario «Aufhebung Anschlusspflicht», Verbreitung modularer Anlagen in Abhängigkeit ihrer Kosten

Köniz Gartenstadt				
Unterschiedliche Annahmen zu den Kosten für die modularen Anlagen	grosse Kosten-einsp. / keine Oppor-tunitäts-kosten	keine Oppor-tunitäts-kosten	grosse Kosten-einsp.	**Basis-annahmen**
Total Kosten newKlara (für 6 EW)	**6'542**	**8'806**	**13'742**	**16'006**
Kosten in % Hauptszenario	*41%*	*55%*	*86%*	*100%*
Szenario Sozialer Planer				
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**57%**	**15%**	**4%**	**4%**
Anteil Häuser mit newKlara	**52%**	**20%**	**5%**	**4%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*91%*	*75%*	*69%*	*77%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*9%*	*25%*	*31%*	*23%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**12%**	**8%**	**4%**	**4%**
Effizienzgewinn in CHF/Jahr, Haus im gesamten Perimeter	**124**	**81**	**44**	**41**
Szenario "Aufhebung Anschlusspflicht"				
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**
Anteil Häuser mit newKlara	**17%**	**9%**	**3%**	**2%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*0%*	*0%*	*0%*	*0%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*100%*	*100%*	*100%*	*100%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**2%**	**1%**	**0%**	**0%**
Effizienzgewinn in CHF/Jahr, Haus im gesamten Perimeter	**23**	**12**	**3**	**1.03**
Verlust Effizienzgewinn ggü. Sozialer Planer	**81%**	**86%**	**94%**	**97%**

Uri, Schächental				
Unterschiedliche Annahmen zu den Kosten für die modularen Anlagen	grosse Kosten-einsp. / keine Oppor-tunitäts-kosten	keine Oppor-tunitäts-kosten	grosse Kosten-einsp.	**Basis-annahmen**
Total Kosten newKlara (für 6 EW)	**6'542**	**8'806**	**13'742**	**16'006**
Kosten in % Hauptszenario	*41%*	*55%*	*86%*	*100%*
Szenario Sozialer Planer				
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**100%**	**100%**	**100%**	**33%**
Anteil Häuser mit newKlara	**100%**	**100%**	**100%**	**18%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*100%*	*100%*	*100%*	*84%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*0%*	*0%*	*0%*	*16%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**27%**	**22%**	**9%**	**6%**
Effizienzgewinn in CHF/Jahr, Haus im gesamten Perimeter	**402**	**332**	**142**	**97**
Szenario Zentraler "Aufhebung Anschlusspflicht"				
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**0%**	**0%**	**0%**	**0%**
Anteil Häuser mit newKlara	**27%**	**17%**	**9%**	**7%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*0%*	*0%*	*0%*	*0%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*100%*	*100%*	*100%*	*100%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**9%**	**6%**	**4%**	**3%**
Effizienzgewinn in CHF/Jahr, Haus im gesamten Perimeter	**141**	**96**	**56**	**43**
Verlust Effizienzgewinn ggü. Sozialer Planer	**65%**	**71%**	**61%**	**56%**

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Simulationen mit COMMIT[2]
Bemerkung: Sämtliche Angaben zu Kosten von *new*Klara beziehen sich auf den postulierten Stand im Jahr 2040.

Abbildung 7-3: Detaillierte Ergebnisse für den Perimeter Köniz Gartenstadt (oben) und Uri Schächental (unten) im Szenario «Liberalisierung in vorgegebenen Gebieten», Verbreitung modularer Anlagen in Abhängigkeit ihrer Kosten

Köniz Gartenstadt

Unterschiedliche Annahmen zu den tatsächlichen Kosten für die modularen Anlagen	grosse Kosten-einsp. / keine Oppor-tunitäts-kosten	keine Oppor-tunitäts-kosten	grosse Kosten-einsp.	**Basis-annahmen**
Total Kosten newKlara (für 6 EW)	**6'542**	**8'806**	**13'742**	**16'006**
Kosten in % Hauptszenario	*41%*	*55%*	*86%*	*100%*
Szenario Sozialer Planer				
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**57%**	**15%**	**4%**	**4%**
Anteil Häuser mit newKlara	**52%**	**20%**	**5%**	**4%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*91%*	*75%*	*69%*	*77%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*9%*	*25%*	*31%*	*23%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**12%**	**8%**	**4%**	**4%**
Effizienzgewinn in CHF/Jahr, Haus im gesamten Perimeter	**124**	**81**	**44**	**41**
Szenario "Liberalisierung in vorgegebenen Gebieten"				
***Zentrale Annahme*: Für die Wahl liberalisierter Gebiete wurden immer Kosten für modulare Anlagen in der Höhe der Basisannahmen unterstellt.**				
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**4%**	**4%**	**4%**	**4%**
Anteil Häuser mit newKlara	**3%**	**3%**	**3%**	**3%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*100%*	*100%*	*100%*	*100%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*0%*	*0%*	*0%*	*0%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**5%**	**5%**	**4%**	**4%**
Effizienzgewinn in CHF/Jahr, Haus im gesamten Perimeter	**55**	**52**	**42**	**39**
Verlust Effizienzgewinn ggü. Sozialer Planer	**56%**	**36%**	**6%**	**4%**

Unterschiedliche Annahmen zu den tatsächlichen Kosten für die modularen Anlagen	grosse Kosten-einsp. / keine Oppor-tunitäts-kosten	keine Oppor-tunitäts-kosten	grosse Kosten-einsp.	**Basis-annahmen**
Total Kosten newKlara (für 6 EW)	**6'542**	**8'806**	**13'742**	**16'006**
Kosten in % Hauptszenario	*41%*	*55%*	*86%*	*100%*
Szenario Sozialer Planer				
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**100%**	**100%**	**100%**	**33%**
Anteil Häuser mit newKlara	**100%**	**100%**	**100%**	**18%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*100%*	*100%*	*100%*	*84%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*0%*	*0%*	*0%*	*16%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**27%**	**22%**	**9%**	**6%**
Effizienzgewinn in CHF/Jahr, Haus im gesamten Perimeter	**402**	**332**	**142**	**97**
Szenario "Liberalisierung in vorgegebenen Gebieten"				
***Zentrale Annahme*: Für die Wahl liberalisierter Gebiete wurden immer Kosten für modulare Anlagen in der Höhe der Basisannahmen unterstellt.**				
Anteil nicht mehr erneuerte Leitungsmeter	**33%**	**33%**	**33%**	**33%**
Anteil Häuser mit newKlara	**16%**	**16%**	**16%**	**16%**
- davon Häuser an nicht mehr erneuerten Leitungsabschnitten	*100%*	*100%*	*100%*	*100%*
- davon Häuser an intakten Leitungsabschnitten	*0%*	*0%*	*0%*	*0%*
Effizienzgewinn in % der Kosten des zentralen Systems	**9%**	**8%**	**6%**	**6%**
Effizienzgewinn in CHF/Jahr, Haus im gesamten Perimeter	**135**	**122**	**95**	**85**
Verlust Effizienzgewinn ggü. Sozialer Planer	**66%**	**63%**	**33%**	**12%**

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Simulationen mit COMMIT[2]
Bemerkung: Sämtliche Angaben zu Kosten von *new*Klara beziehen sich auf den postulierten Stand im Jahr 2040.

Anhang B: Auszüge aus COMMIT^2

Abbildung 7-4: Auszug aus COMMIT^2 zu Input für Kostenstrukturen und Nutzungsdauern

Kostenstruktur von Abwasserreinigungssystemen

	Geplante Nutzungsdauer	Variable Kosten	Weitere Kosten	
	[Jahre]	[CHF/m3]		
Zentrales ARA	30	0.35		
Modulare Anlage	20	0		
Kauf Anlage (Jahr 2020)			2700*[EW]^-0.26	CHF pro EW (min. 6 EW)
Installationskosten			3400+100*[EW]	CHF pro Anlage (min. 6 EW)
Unterhaltskosten			300	CHF pro Anlage und Jahr
Opportunitätskosten			147*[EW]^(1/2)	CHF pro Jahr
Nicht-monetäre Invest.Kosten				CHF pro Anlage und EW (min. 6 EW)

reale Teuerung Bau dezentrale Anlage (p.a.)	-3.68%	angewendet bis ins Jahr 2040, danach konstante Kosten

Nutzungsdauer neuer Netzwerkelementen (Art der Sanierung)

Leitungstyp	Abkürzung	Nutzungsdauer nach Art der Sanierung: Totalsanierung (TS) oder Relining (R)	
		TS	R
		[Jahre]	[Jahre]
Hausanschlüsse	HA	50	30
Abwasserkanal	AK	70	30

Unterhaltskosten öffentliches Leitungssystem

Leitungsdurchmesser	Unterhaltskosten
ab [mm]	[CHF/m]
1	0.15
250	0.5
500	0.9
99999999	2

Kostenreduktion von Relining vs. Totalsanierung (%):	75%

Inputs zu Tarifberechnung für Abwasserentsorgung

Ratio Abwassermenge / Wasserverbrauch	1.5	entspricht 2 Q_{TW}
Gebührenanteil jährliche Benutzungsgebühr	100%	
… davon Mengengebühr	50%	
… davon Grundgebühr	50%	

Abbildung 7-5: Auszug aus COMMIT² zu Input für das öffentliche Leitungsnetz (Ebene Sanierungsabschnitte)

		Informationen zu existierenden Netzwerkelementen aus Anlagebuchhaltung												Kostenparameter		1. Sanierung	
Abschnitt Nr.	Existiert bereits?	Typ	Länge Netzwerkelement	Leitungsdurchmesser	Anschaffungsjahr	hist. / gepl. Anschaffungswert	hist. Subventionen	Geplante Nutzungsdauer (Standardwert)	Korrektur Nutzungsdauer	Tatsächliche Nutzungsdauer	Berechneter Restbuchwert	Korrektur Restbuch-wert	Restbuchwert FiBu	Kapitalkosten pro Jahr (Stand heute)	Satz für Unterhaltskosten (Standardwert)	geplantes Erneuerungsjahr	Nächste Sanierung durch Relining?
	1 = ja, 0 = nein		[m]	[mm]		[CHF]	[CHF]	[Jahre]	[+/- Jahre]	[Jahre]	[CHF]	[+/- CHF]	[CHF]	[CHF/Jahr]	[CHF/m]		[R = 1, TS = 0]
1	1	AK	4416	250	2000	2'069'090		70		70	1'477'921		1'477'921	52'109	0.50	2070	0
2	1	AK	1829	250	2000	848'550		70		70	606'107		606'107	21'370	0.50	2070	0
3	1	AK	3143	315	2000	1'499'120		70		70	1'070'800		1'070'800	37'754	0.50	2070	0
4	1	AK	3077	200	2000	1'389'460		70		70	992'471		992'471	34'993	0.15	2070	0
5	1	AK	1993	250	2000	926'580		70		70	661'843		661'843	23'335	0.50	2070	0
6	1	AK	4806	160	2000	2'205'210		70		70	1'575'150		1'575'150	55'537	0.15	2070	0
7	1	AK	3949	200	2000	1'788'990		70		70	1'277'850		1'277'850	45'055	0.15	2070	0
8	1	AK	630	160	2000	307'100		70		70	219'357		219'357	7'734	0.15	2070	0
9	1	AK	2384	315	1990	1'088'410		70		70	621'949		621'949	24'776	0.50	2060	0
10	1	AK	2924	315	1990	1'336'900		70		70	763'943		763'943	30'433	0.50	2060	0
11	1	AK	5034	147	1990	2'228'370		70		70	1'273'354		1'273'354	50'726	0.15	2060	0
12	1	AK	2525	147	1990	1'197'750		70		70	684'429		684'429	27'265	0.15	2060	0
13	1	AK	2092	234	1990	957'370		70		70	547'069		547'069	21'793	0.15	2060	0
14	1	AK	1	200	2000	1		70	80	150	1		1	0	0.15	2150	0
Total			38803.86			17'842'901	-				11'772'244		########	432'879			

Abbildung der 14 Sanierungsabschnitte; der 14. Abschnitt repräsentiert das Restnetz

Möglichkeit zur manuellen Korrektur der Standardwerte für Restlebenszeit und Restbuchwert

Berücksichtigung von der Möglichkeit vom Relining statt Totalsanierung (geringere Lebensdauer)

Abbildung 7-6: Auszug aus COMMIT² zu Input für Hauszuleitungen und Nutzungsparameter (Ebene private Hauszuleitungen)

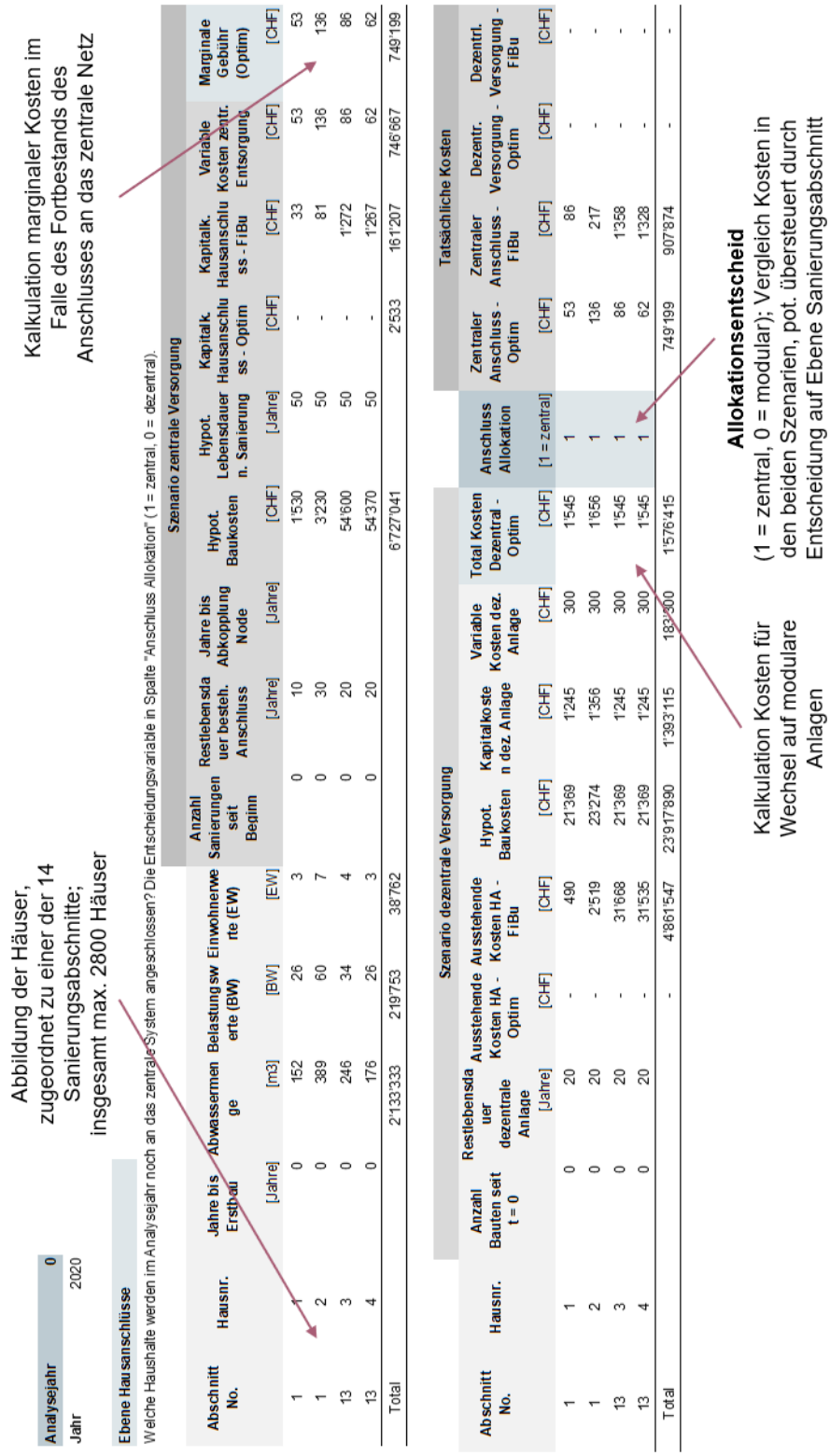
Abbildung der Häuser, zugeordnet zu einer der 14 Sanierungsabschnitte; insgesamt max. 2800 Häuser

				Informationen zu bestehenden und geplanten Hausanschlüssen aus Anlagebuchhaltung											Kosten
Abschnitt No.	Haus-Nr.	Schon gebaut?	Diskontsatz	Länge Leitungselement	hist. / gepl. Anschaffungsjahr	hist. / gepl. Anschaffungswert	hist. / gepl. Subvention	Geplante Nutzungs-dauer (Standard)	Berechnete Restlebensdauer	Korrektur Restlebensdauer	Tatsächliche Restlebensdauer	Berechneter Restbuchwert	Korrektur Restbuchwert	Restbuchwert FiBu	Kapital-kosten t=0
		[1 = ja, 0]	[%]	[m]		[CHF]	[CHF]	[Jahre]	[Jahre]	[+/- Jahre]	[Jahre]	[CHF]	[+/- CHF]	[CHF]	[CHF/Jahr]
1	1	1	1.5%	11.97	1980	1'530		50	10		10	306		306	33
1	2	1	1.5%	11.23	2000	3'230		50	30		30	1'938		1'938	81
1	3	1	1.5%	2.35	2000	840		50	30		30	504		504	21
1	4	1	1.5%	22.02	2000	10'440		50	30		30	6'264		6'264	261
1	5	1	1.5%	2.57	2000	1'470		50	30		30	882		882	37
1	6	1	1.5%	2.65	2000	930		50	30		30	558		558	23
1	7	1	1.5%	42.36	2000	15'360		50	30		30	9'216		9'216	384

		Nutzungs- und Gebührenparameter			
Abschnitt No.	Haus-Nr.	Einwohnerwerte	Nachfrage Trinkwasser	Jährliches Nachfragewachstum	Belastungswerte (BW)
		[EW]	[m3]	[%]	[BW]
1	1	3	152	0.00%	26
1	2	7	389	0.00%	60
1	3	5	266	0.00%	43
1	4	3	184	0.00%	26
1	5	2	137	0.00%	17
1	6	5	256	0.00%	43
1	7	10	540	0.00%	85

Abbildung Einwohnerwerte, Trinkwasserverbrauch und Belastungswerte pro Haus

Abbildung 7-7: Auszug aus COMMIT² zur Bestimmung der Allokation (zentral / modular) auf Ebene Hausanschlüsse (Szenario Sozialer Planer)



Analysejahr	0
Jahr	2020

Ebene Hausanschlüsse

Welche Haushalte werden im Analysejahr noch an das zentrale System angeschlossen? Die Entscheidungsvariable in Spalte "Anschluss Allokation" (1 = zentral, 0 = dezentral).

Abschnitt No.	Hausnr.	Jahre bis Erstbau	Abwassermenge	Belastungswerte (BW)	Einwohnerwerte (EW)	Anzahl Sanierungen seit Beginn	Restlebensdauer besteh. Anschluss	Jahre bis Abkopplung Node	Hypot. Baukosten	Hypot. Lebensdauer n. Sanierung	Kapitalk. Hausanschluss - Optim	Kapitalk. Hausanschluss - FiBu	Variable Kosten zentr. Entsorgung	Marginale Gebühr (Optim)
						Szenario zentrale Versorgung								
		[Jahre]	[m3]	[BW]	[EW]		[Jahre]	[Jahre]	[CHF]	[Jahre]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]
1	1	0	152	26	3	0	10		1'530	50	-	33	53	53
1	2	0	389	60	7	0	30		3'230	50	-	81	136	136
13	3	0	246	34	4	0	20		54'600	50	-	1'272	86	86
13	4	0	176	26	3	0	20		54'370	50	-	1'267	62	62
Total			2'133'333	219'753	38'762				6'727'041		2'533	161'207	746'667	749'199

Abschnitt No.	Hausnr.	Anzahl Bauten seit t = 0	Restlebensdauer dezentrale Anlage	Ausstehende Kosten HA - Optim	Ausstehende Kosten HA - FiBu	Hypot. Baukosten	Kapitalkosten dez. Anlage	Variable Kosten dez. Anlage	Total Kosten Dezentral - Optim	Anschluss Allokation	Zentraler Anschluss - Optim	Zentraler Anschluss - FiBu	Dezentr. Versorgung - Optim	Dezentrl. Versorgung - FiBu
				Szenario dezentrale Versorgung							Tatsächliche Kosten			
			[Jahre]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[1 = zentral]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]
1	1	0	20	-	490	21'369	1'245	300	1'545	1	53	86	-	-
1	2	0	20	-	2'519	23'274	1'356	300	1'656	1	136	217	-	-
13	3	0	20	-	31'668	21'369	1'245	300	1'545	1	86	1'358	-	-
13	4	0	20	-	31'535	21'369	1'245	300	1'545	1	62	1'328	-	-
Total				-	4'861'547	23'917'890	1'393'115	183'300	1'576'415		749'199	907'874	-	-

Abbildung 7-8: Auszug aus COMMIT² zur Bestimmung der Allokation (zentral / modular) auf Ebene Gemeindeleitungen (Szenario Sozialer Planer)

Optimierung berücksichtigt versunkene Kosten nicht, vor erster Sanierung sind Kapitelkosten des bestehenden Netzes null.

Kosten zentrales Leitungsnetz und zentrale ARA

Konsolidierte Kosten der Häuserebene

Analysej	0
Jahr	2020

Ebene zentrales Leitungsnetzwerk (Gemeindeleitungen)

Welche Nodes werden zum Analysejahr (t = 0) an das zentrale System angeschlossen? Die Entscheidungsvariable ist in Spalte "Allokation" (1 = zentral, 0 = dezentral)

	Sanierungs-Mgmt Gemeindeleitungen						Charakteristiken				Kosten Gemeindeleitungen			Kosten Zentrale ARA		Kosten Häuserebene				Total	
Abschnitt No.	Jahre bis Erstbau	Anzahl Sanierungen seit Beginn	Hypoth. Baukosten	Rest-lebens-dauer	Ende Lebenszeit & Optimal Dezentral	Allokation (gg. Abhängigkeiten)	Leitungstyp	Länge Netzwerkelement	Abwasser zentr. Netzwerk (inkl. Regenw.)	Leitungsdurchfluss gg. Abhängigkeiten	Kapital-kosten - Optim	Kapital-kosten - FiBu	Unterhaltskosten	Prop. Kapitalkosten - Optim	Prop. Kapitalkosten - FiBu	Hausanschluss - Optim	Hausanschluss - FiBu	Dezentr. Entsorgung - Optim	Dezentr. Entsorgung - FiBu	Total Kosten - Optim	Total Kosten - FiBu
	[Jahre]		[CHF]	[Jahre]	[1 = Ja]	[1 = zentral]		[m]	[m3]	[m3]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]	[CHF]
1	0	0	2'069'090	50	0	1	AK	4416	59'705	59'705	-	52'109	107'903	-	12'883	14'022	35'057	-	-	121'925	207'951
2	0	0	848'550	50	0	1	AK	1828.58	10'974	10'974	-	21'370	19'156	-	2'368	2'561	14'426	-	-	21'716	57'320
3	0	0	1'499'120	50	0	1	AK	3142.8	465	71'144	-	37'754	83'827	-	100	109	209	-	-	83'936	121'891
4	0	0	1'389'460	50	0	1	AK	3076.61	8'675	8'675	-	34'993	1'199	-	1'872	2'057	19'282	-	-	3'256	57'345
5	0	0	926'580	50	0	1	AK	1993.46	5'327	14'001	-	23'335	23'588	-	1'149	1'243	10'414	-	-	24'831	58'486
6	0	0	2'205'210	50	0	1	AK	4806.22	11'058	11'058	-	55'537	1'942	-	2'386	2'689	29'150	-	-	4'632	89'016
7	0	0	1'788'990	50	0	1	AK	3949.12	15'975	15'975	-	45'055	1'687	-	3'447	3'820	18'752	-	-	5'507	68'941
8	0	0	307'100	50	0	1	AK	629.79	2'303	2'303	-	7'734	201	-	497	537	3'313	-	-	738	11'745
9	0	0	1'088'410	40	0	1	AK	2384.25	27'638	70'974	-	24'776	63'519	-	5'964	7'460	22'593	-	-	70'979	116'851
10	0	0	1'336'900	40	0	1	AK	2924.07	29'448	171'566	-	30'433	121'116	-	6'354	7'375	19'160	-	-	128'491	177'064
11	0	0	2'228'370	40	0	1	AK	5034.33	4'245	4'245	-	50'726	1'762	-	916	1'684	10'154	-	-	3'446	63'558
12	0	0	1'197'750	40	0	1	AK	2525.4	1'844	1'844	-	27'265	780	-	398	430	16'419	-	-	1'210	44'862
13	0	0	957'370	40	0	1	AK	2092.23	999	178'653	-	21'793	1'284	-	216	233	3'963	-	-	1'517	27'255
14	0	0	1	130	0	1	AK	1	3'021'347	3'200'000	-	0	1	-	651'954	704'981	704'981	-	-	704'982	1'356'936
Total			17'842'901						3'200'000	3'821'114	-	432'879	427'965	-	690'504	749'199	907'874	-	-	1'177'164	2'459'221

Abbildung der 14 Sanierungsabschnitte; der 14. Abschnitt repräsentiert das Restnetz

Allokationsentscheid (1 = zentral, 0 = abgekoppelt); exogen vorgegeben durch Solver, welcher Gesamtkosten minimiert. Abhängigkeiten in der Leitungsstruktur werden mitberücksichtigt.

Anhang C: Details zur Modellierung der Analyseperimeter

Annahmen zu modularen Anlagen

a) Modell *new*Klara

Die postulierte modulare Anlage *new*Klara ist ein hypothetisches, aber plausibles Beispiel einer modularen Anlage, wie sie in den nächsten Jahren auf dem Markt verfügbar sein könnte. Abbildung 7-9 zeigt, wie eine solche Anlage in der Praxis aussehen könnte.

Abbildung 7-9: Stilisierte Illustration der postulierten modularen Anlage *new*Klara

Quelle: Präsentation von Max Maurer (ETH Zürich) im Rahmen des zweiten Workshops des Projekts COMIX vom 4. Februar 2021

b) Anschaffungskosten

Die Höhe der Anschaffungskosten hängt von der Grösse des Hauses und dem Jahr der Beschaffung ab. Für das Jahr 2020 gilt folgende Formel:

$$Anschaffungskosten\ pro\ EW_{t=2020} = 2700 * Haushaltsgrösse\ [EW]^{-0.26},$$

wobei eine Anlage für mindestens 6 Einwohnerwerte dimensioniert ist, d.h. Kosten von insgesamt CHF 10'167 (6*1694) mit sich bringt. Zusätzlich wird aufgrund des technischen Fortschritts ein Rückgang der Anschaffungskosten um 35% während der ersten 20 Jahre angenommen. Danach bleiben die Anschaffungskosten konstant.

c) Installationskosten

Die Installationskosten sind ähnlich definiert wie die Anschaffungskosten, d.h. sie hängen von der Grösse des angeschlossenen Hauses ab.

$$Anschaffungskosten\ pro\ Anlage = 3400 + 100 * Haushaltsgrösse\ [EW],$$

wobei auch hier die Mindestgrösse von 6 Einwohnerwerten gilt. Die Installationskosten fallen einmalig an und bleiben während des gesamten Analysezeitraums konstant.

d) Unterhalts- und Opportunitätskosten

Die Unterhaltskosten von CHF 300 pro Jahr sind eine grobe Abschätzung einer Kalkulation der Kosten eines Services alle zwei Jahre und einer kleinen Reparatur alle vier Jahre, jeweils inklusive Personal- und Materialkosten.

Die Opportunitätskosten für den durch die modulare Anlage entgangenen Platzbedarf, z.B. in Kellerräumen, errechnet sich aus folgender Formel:

$$Opportunitätskosten\ pro\ Anlage\ und\ Jahr = 147 * [EW]^{0.5}$$

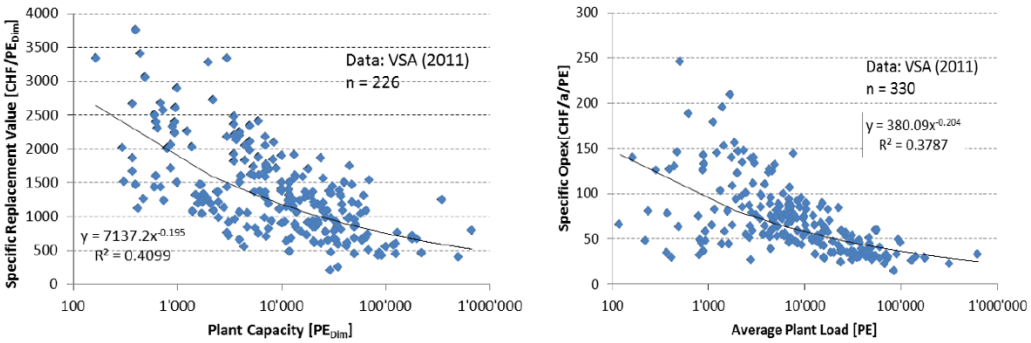
Über eine Laufzeit von 20 Jahren und einer Anlage mit sechs Einwohnerwerten ergeben sich damit Opportunitätskosten von CHF 7'201.

Annahmen zum Leitungsnetz und zur zentralen ARA

Öffentliches Leitungsnetz	
Lebensdauer nach Totalsanierung	70 Jahre
Lebensdauer nach Relining	30 Jahre
Ursprüngliche Baukosten sofern nicht in Anlagenbuchhaltung verfügbar	Random Sampling aus uniformer Verteilung *Schächental*: Vergleichsweise günstig, da Bau primär durch unverbaute Landschaft. • 300-500 CHF/m + 15% für Kontrollschächte für Leitungen 350mm Durchmesser • 600-1'000 CHF/m + 15% für Kontrollschächte für Leitungen >350mm Durchmesser *Köniz*: Etwas teurer, da Bau primär durch bereits verbaute Landschaft • 300-500 CHF/m + 15% für Kontrollschächte für Leitungen 350mm Durchmesser • 600-1'000 CHF/m + 15% für Kontrollschächte für Leitungen >350mm Durchmesser
Rabatt bei Sanierung mit Relining	75%
Unterhaltskosten pro Jahr	*Berechnung mittels Formel* [Durchfliessende Menge Abwasser]$^{[Kostensatz]}$ * [Länge Leitung]/10 *Kostensätze* • 0.15 CHF/m für Leitungen bis 250mm Durchmesser • 0.5 CHF/m für Leitungen mit 250-500mm Durchmesser • 0.9 CHF/m für Leitungen mit >500mm Durchmesser
Diskontfaktor für Kapitalkosten	2.5%

Private Hausanschlüsse	
Lebensdauer nach Totalsanierung	50 Jahre
Lebensdauer nach Relining	30 Jahre
Ursprüngliche Baukosten sofern nicht in Anlagenbuchhaltung verfügbar	Random Sampling aus uniformer Verteilung • *Schächental*: 100-500 CHF/m + 25% für Kontrollschächte • *Köniz*: 300-500 CHF/m + 25% für Kontrollschächte
Rabatt bei Sanierung mit Relining	75%
Unterhaltskosten pro Jahr	Keine
Diskontfaktor für Kapitelkosten	1.5%
Zentrale Abwasserreinigungsanlage (ARA)	
Lebensdauer	30 Jahre
Ursprüngliche und zukünftige Baukosten ARA	*Ursprüngliche Baukosten*: • Schächental: CHF 49 Mio. für 3.2 Mio m3 Kapazität • ARA Bern: CHF 70 Mio für 33.8 Mio m3 Kapazität *Zukünftige Baukosten*: Extrapolation anhand eines linearen Zusammenhangs zwischen Baukosten und der jeweils notwendigen Kapazität. Gem. Abbildung 7-10 ist dies eine plausible Annahme.
Variable Kosten pro m3 Abwasser	0.35 CHF
Diskontfaktor für Kapitelkosten	2.5%

Abbildung 7-10: Verteilung von Kapitalkosten zentraler Abwasserreinigungsanlagen in Abhängigkeit von Kapazität (links) und Auslastung (rechts)



Quelle: Eawag (2015), S. 3+4

Gebührensystem

Bei den Alternativszenarien zur Abbildung anderer institutioneller Rahmenbedingungen wurde ein Gebührensystem unterstellt, welches je zur Hälfte aus Grund- und Mengengebühr besteht. Die beiden Elemente hängen von der Anzahl Belastungswerte bzw. der Abwassermenge der Haushalte ab. Die Tarife wurden alle 10 Jahre so festgelegt, dass das gesamten Gebühreneinnahmen die Kosten des Gesamtsystems decken.

Literaturverzeichnis

Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern AWA (2021): Eigentumsabgrenzung bei Leitungen der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung.

Eawag (2015): Selected Prices and Costs for Swiss Urban Water Infrastructure. Dübendorf.

Eggimann, Sven; Truffer, Bernhard; Feldmann, Ulrike; u. a. (2018): Screening European market potentials for small modular wastewater treatment systems – an inroad to sustainability transitions in urban water management? In: Land Use Policy, 78, 711–725.

Eggimann, Sven; Truffer, Bernhard und Maurer, Max (2015): To connect or not to connect? Modelling the optimal degree of centralisation for wastewater infrastructures. In: Water Research, 84, 218–231.

Eggimann, Sven; Truffer, Bernhard und Maurer, Max (2016): The cost of hybrid waste water systems: A systematic framework for specifying minimum cost-connection rates. In: Water Research, 103, 472–484.

Scheidegger, Andreas; Beutler, Philipp und Maurer, Max (2013): Prognosen zum Sanierungsbedarf. Schweizer Kanalisation - Der Wert guter Daten für Einsichten in die Zukunft. In: Aqua & Gas, 2013, Nr. 1, 16–20.

Singh, Nitin Kumar; Kazmi, A. A. und Starkl, M. (2014): A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: techno-economical approach. In: Water Science and Technology, 71, 4, 468–478.