

17. DEZEMBER 2025



REWATERCITY – PROJEKTBEWERTUNG

Ergebnisbericht Ökosystemleistungen

ASMAA ELNAGAR

RESILIENTIS GMBH

Schloßgasse 12, 07356 Bad Lobenstein

#jetztklimachen

unterstützt vom



KLIMA
INNOVATIONS
FONDS

The Nature
Conservancy 
Europe

Zusammenfassung

Der Bericht fasst die Bewertung des ReWaterCity-Projekts zusammen und untersucht das Potenzial einer dezentralen, vor-Ort-Abwasseraufbereitung und -wiederverwendung zur Bewässerung urbaner Grünflächen am Beispiel des Stuttgarter Hauptfriedhofs als Pilotstandort. Im Fokus stehen die technische Leistungsfähigkeit des eingesetzten BioTopp-Systems, seine ökologischen Wirkungen sowie die ökonomische Einordnung im Kontext einer klimaangepassten Stadtentwicklung. Die mikrobiologische Qualität des aufbereiteten Wassers erfüllte deutlich die Anforderungen der höchsten Qualitätsklasse der EU-Wasserwiederverwendungsverordnung und ist somit uneingeschränkt für Bewässerungszwecke geeignet.

Mikroklimatische Analysen zeigen, dass die Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser nur moderate Auswirkungen auf Lufttemperatur und -feuchte im Kronenraum hat. Kühlungseffekte traten vor allem tageszeitabhängig während trockener Sommerperioden auf und wurden in Phasen hoher Niederschläge weitgehend von natürlichen Witterungseinflüssen überlagert. Insgesamt wirkte die Bewässerung stabilisierend auf den Wasserhaushalt der Vegetation, konnte den atmosphärischen Wasserbedarf jedoch nicht vollständig kompensieren.

Trotz konservativer monetärer Annahmen zeigt die Kosten-Nutzen-Analyse, dass das Projekt keinen positiven Kapitalwert erreicht. Gleichzeitig verdeutlicht die Bewertung der Ökosystemleistungen, dass Stadtbäume unabhängig von der Bewässerung eine kosteneffiziente und unverzichtbare Leistung für die lokale Klimaregulierung erbringen. Insgesamt bestätigt ReWaterCity die hohe Bedeutung dezentraler Wasserwiederverwendung als strategische Infrastrukturmaßnahme zur Stärkung urbaner Resilienz und nachhaltiger Stadtentwicklung.



Inhaltsverzeichnis

1.	Leistungsfähigkeit der dezentralen Abwasseraufbereitung	3
2.	Ökologische Ausgangsbedingungen der Untersuchungsfläche	3
3.	Klimatische Rahmenbedingungen	4
4.	Mikroklimatische Effekte der Bewässerung	4
5.	Einfluss von Sensorposition, Art und Struktur	5
6.	Wasserbilanz und Bewässerungswirkung	5
7.	Ökosystemleistungen und ökonomische Einordnung	5
8.	Investitions- und Kostenstruktur	6
9.	Systemleistung und kostenrelevante Nutzen	6
10.	Wirtschaftliche Ergebnisse	6
11.	Gesamteinordnung und Schlussfolgerung	7

1. Leistungsfähigkeit der dezentralen Abwasseraufbereitung

Das Pilotprojekt ReWaterCity auf dem Hauptfriedhof in Stuttgart zeigt, dass eine dezentrale Abwasserbehandlung vor Ort technisch zuverlässig und ökologisch effektiv umgesetzt werden kann. Die BioTopp-Anlage erzielte eine sehr hohe Reinigungsleistung und produzierte Bewässerungswasser von außergewöhnlich hoher Qualität. Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) wurde um 99,4 % und der Gesamtstickstoff um 91,6 % reduziert. Eine vollständige Nitrifikation mit unvollständiger Denitrifikation führte zu mäßig erhöhten Nitratwerten, die für die Bewässerung städtischer Grünflächen jedoch unkritisch sind. Die Phosphorelimination von rund 52 % ist zufriedenstellend, weist jedoch Optimierungspotenzial auf.

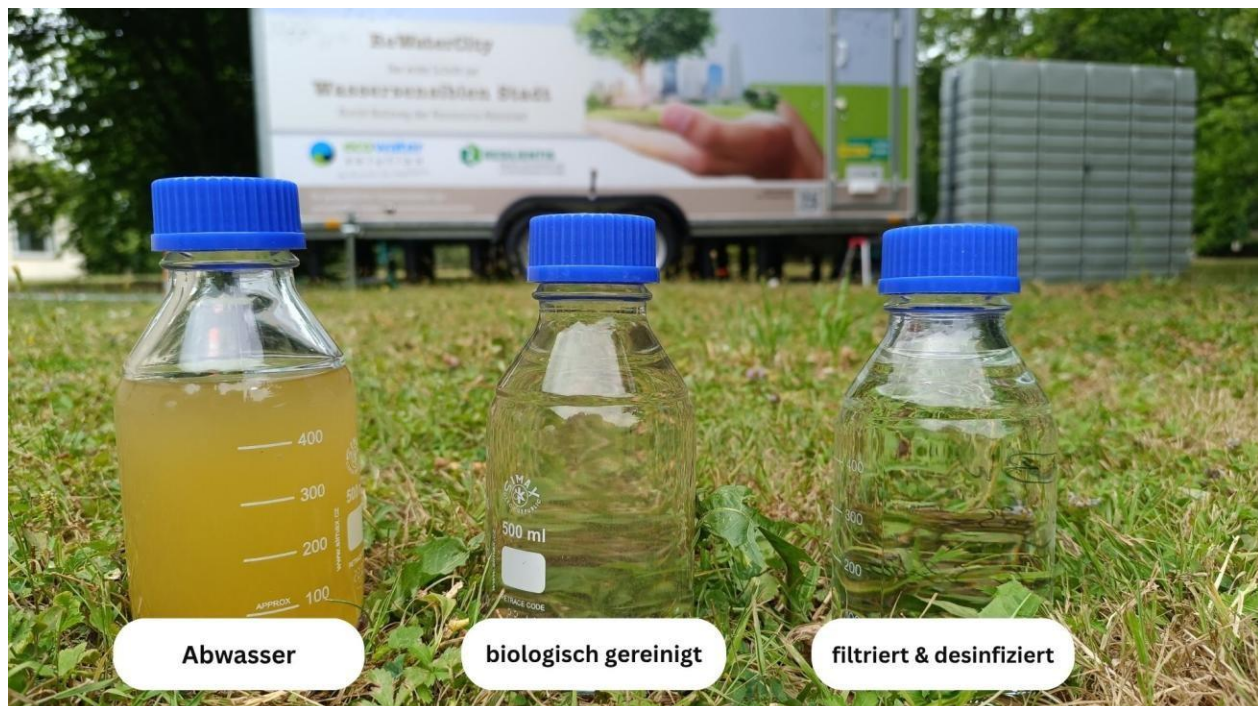


Abbildung 1 Wasserqualität der dezentralen Kläranlage: vom unbehandelten Abwasser auf der linken Seite über „biologisch gereinigt“ bis hin zum kristallklaren „filtriert & desinfiziert“

Besonders hervorzuheben ist die mikrobiologische Qualität des behandelten Wassers. Mit durchschnittlich 5 ± 3 KBE/100 ml E. coli erfüllt das Bewässerungswasser eindeutig die strengste Qualitätsklasse A der EU-Verordnung zur Wiederverwendung von Wasser. Die sehr geringe Trübung (0,4 NTU) unterstreicht die hohe Filter- und Desinfektionsleistung. Insgesamt hat sich das System als robustes, gesetzeskonformes und ressourceneffizientes Element einer wassersensiblen Stadtentwicklung erwiesen.

2. Ökologische Ausgangsbedingungen der Untersuchungsfläche

Die Vegetations- und Zeigerwertanalyse weist auf überwiegend frische, mäßig nährstoffreiche und schwach saure Bodenverhältnisse hin. Die Fläche ist artenreich (mindestens 24 Arten) und wird von Klee- und Gräsergesellschaften dominiert. Die mittlere Feuchtezahl (5,0) deutet auf stabile Bodenwasserverhältnisse ohne ausgeprägten Trockenstress hin, während die Nährstoffzahl (5,9) auf mäßig stickstoffreiche Bedingungen schließen lässt. Diese Ausgangslage

bildet eine geeignete Grundlage zur Untersuchung zusätzlicher Bewässerungseffekte, erklärt aber zugleich, warum starke Bewässerungseffekte im Mikroklima nur begrenzt sichtbar werden.

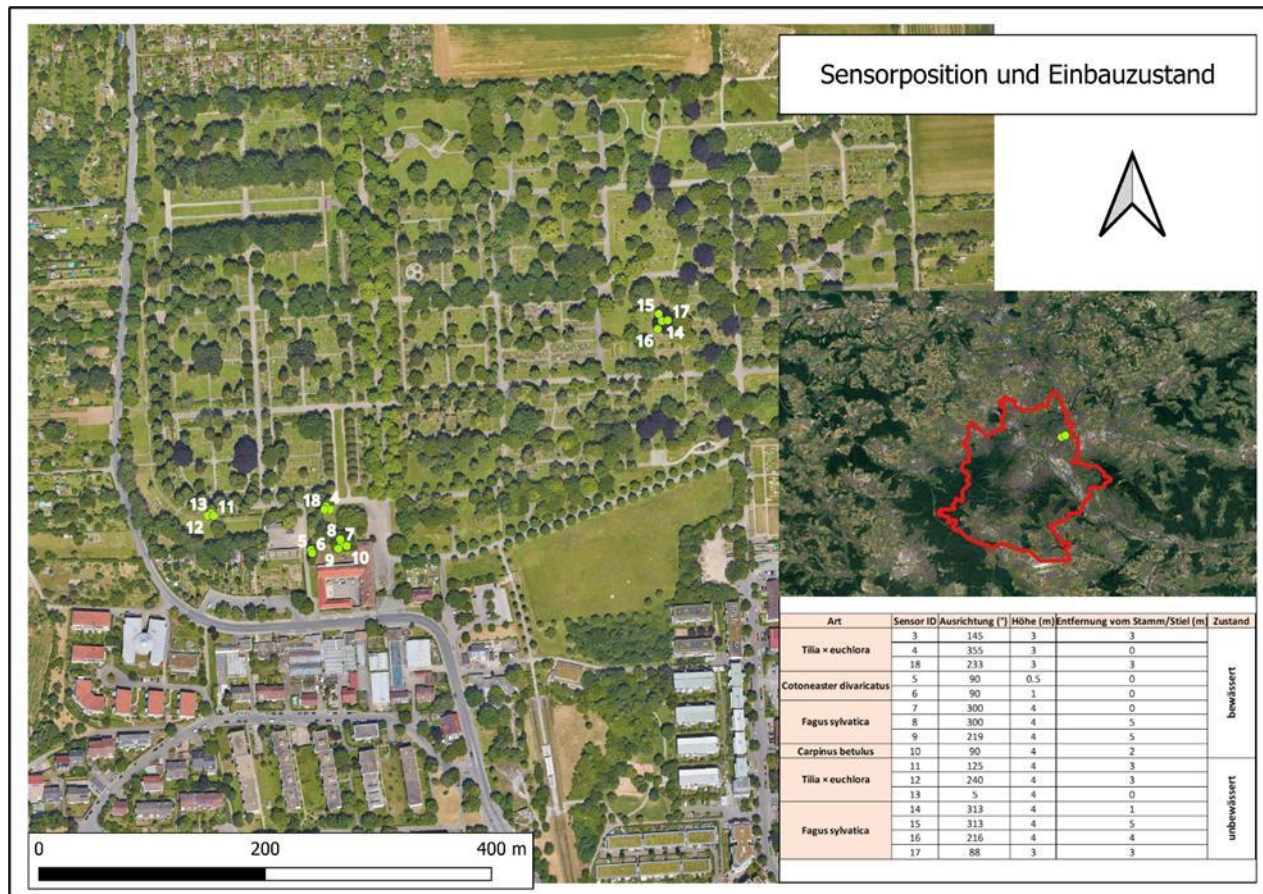


Abbildung 2 Sensorpositionen und Installationsbedingungen innerhalb des Testfeldes.

3. Klimatische Rahmenbedingungen

Der Untersuchungszeitraum war durch überdurchschnittlich hohe Temperaturen und eine stark variierende Niederschlagsverteilung gekennzeichnet. Juni und August waren vergleichsweise trocken und warm, während Juli und insbesondere September deutlich niederschlagsreicher ausfielen. Diese klimatische Heterogenität beeinflusste die Wirkung der Bewässerung maßgeblich und ist entscheidend für die Interpretation der Ergebnisse. In niederschlagsreichen Monaten überlagerten natürliche Witterungseinflüsse die Effekte der Zusatzbewässerung weitgehend.

4. Mikroklimatische Effekte der Bewässerung

Die sensorgestützte Analyse zeigt, dass die Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser nur moderate Auswirkungen auf die Lufttemperatur im Kronenraum der untersuchten Bäume hatte. Zwischen bewässerten und unbewässerten Tilia x euchlora und Fagus sylvatica traten im Monatsmittel meist nur Differenzen im Bereich weniger Zehntel Grad Celsius auf. Signifikante, dauerhaft kühlende Effekte konnten nicht nachgewiesen werden.

Die stärksten Unterschiede zeigten sich tageszeitabhängig, insbesondere in den Mittags- und Nachmittagsstunden der trockeneren Sommermonate. In niederschlagsreichen Phasen (z. B. Juli) verliefen die Temperaturkurven nahezu deckungsgleich. Dies verdeutlicht, dass der Wasserhaushalt des Gesamtsystems – und nicht allein die punktuelle Bewässerung – entscheidend für mikroklimatische Effekte ist.

Auch die Luftfeuchte reagierte nur moderat auf die Bewässerung. Bewässerte Bäume wiesen vor allem in den frühen Morgenstunden leicht erhöhte Feuchtwerte auf. Zur Mittagszeit glichen sich die Werte weitgehend an, da höhere Verdunstungsraten die Unterschiede kompensierten. In feuchten Monaten und im Herbst trat der Bewässerungseffekt nahezu vollständig in den Hintergrund.

5. Einfluss von Sensorposition, Art und Struktur

Die statistischen Analysen (PCA und Korrelationsanalysen) belegen eine sehr hohe Konsistenz der Sensordaten. Unterschiede zwischen einzelnen Sensoren lassen sich überwiegend auf Installationsparameter oder artspezifische Kronenstrukturen zurückführen, nicht auf systematische Messfehler. Die Ausrichtung, Höhe und Distanz der Sensoren hatten insgesamt nur einen geringen Einfluss auf Temperatur- und Feuchtemessungen.

Artspezifische Unterschiede waren jedoch erkennbar: *Tilia × euchlora* zeigte sowohl unter bewässerten als auch unter unbewässerten Bedingungen ein sehr homogenes Kronenmikroklima. *Fagus sylvatica* wies aufgrund seiner komplexeren Kronenstruktur eine höhere räumliche Variabilität auf, insbesondere unter Trockenstress. Diese Ergebnisse unterstreichen, dass Bewässerungseffekte stets im Zusammenspiel mit der Baumart und ihrer Architektur zu bewerten sind.

6. Wasserbilanz und Bewässerungswirkung

Die Wasserbilanz verdeutlicht, dass die im Projekt eingesetzte Bewässerungsmenge den atmosphärischen Wasserbedarf der Vegetation nicht vollständig ausgleichen konnte. Trotz Bewässerung blieb die Bilanz im Jahresverlauf negativ. Die Zusatzbewässerung wirkt daher primär stabilisierend, nicht kompensierend. Sie trägt zur Milderung von Trockenstress bei, ersetzt jedoch keine ausreichenden Niederschläge.

7. Ökosystemleistungen und ökonomische Einordnung

Die Bewertung der Ökosystemleistung „lokale Klimaregulierung“ zeigt, dass Bäume – unabhängig von der Bewässerung – erhebliche Kühlungsleistungen durch Transpiration erbringen. Besonders *Fagus sylvatica* erreicht aufgrund seiner großen Blattfläche sehr hohe theoretische Kühlleistungen. Um diese Kühlung technisch zu ersetzen, wären erhebliche Energiemengen und Kosten erforderlich.

Die spezifischen Kosten pro bereitgestellter Kilowattstunde Kühlleistung liegen bei Bäumen um Größenordnungen unter denen technischer Alternativen oder intensiv gepflegter Rasenflächen. Selbst unter konservativen Annahmen erweist sich der Erhalt und die Bewässerung von Stadtbäumen als äußerst kosteneffiziente Maßnahme der Klimaanpassung.

8. Investitions- und Kostenstruktur

Die Gesamtinvestition (CAPEX) beträgt 42.495 €. Sie setzt sich aus dem BioTopp-Anlagenmodul (36.997 €), Montage und Inbetriebnahme (3.998 €) sowie Planungs- und Genehmigungskosten (1.500 €) zusammen. Logistik, Transport und Schulung sind im Leistungsumfang des Anbieters enthalten. Der Betrachtungszeitraum der Wirtschaftlichkeitsanalyse beträgt 30 Jahre.

Die jährlichen Betriebskosten (OPEX) betragen rund 2.201,22 € pro Jahr und umfassen den Stromverbrauch der Anlage, Verbrauchsmaterialien wie Chemikalien und Filtermedien, Wartung und Service sowie baumspezifische Bewirtschaftungskosten. Die Kosten gelten als relativ stabil, unterliegen jedoch einer moderaten Abhängigkeit von Energiepreis, Inflationsrate (2,3 %) und Diskontierungszinssatz (3,0 %), die in der 30-jährigen Kosten-Nutzen-Analyse berücksichtigt wurden. Das zugrunde liegende Modell stellt ein konservatives Kostenszenario dar, da eine aufwendige Spurenstoffelimination mit Ozonung und Aktivkohle einbezogen ist; bei geringeren Aufbereitungsanforderungen könnten die jährlichen Betriebskosten deutlich niedriger ausfallen und die Amortisationszeit entsprechend verkürzen.

9. Systemleistung und kostenrelevante Nutzen

Das Bewässerungssystem nutzt jährlich rund 378 m³ aufbereitetes Abwasser, das vollständig zur Baumbewässerung eingesetzt wird. Dadurch wird Trinkwasser ersetzt und gleichzeitig werden Nährstoffe im Boden wiederverwertet. Über die Projektlaufzeit von 30 Jahren werden etwa 150 kg Stickstoff und 95 kg Phosphor zurückgewonnen sowie insgesamt 11.340 m³ Süßwasser eingespart.

Auf Basis eines Wasserpreises von 3,56 €/m³ ergibt sich ein jährlicher monetärer Nutzen von rund 1.348 € durch vermiedenen Trinkwasserverbrauch. Zusätzlich werden durch die Nährstoffrückgewinnung etwa 42 € pro Jahr an Düngerkosten eingespart.

Durch das zusätzliche Pflanzenwachstum infolge der Bewässerung wird außerdem Kohlenstoff gebunden. Unter Verwendung eines konservativen Ansatzes ergibt sich ein jährliches Bindungspotenzial von etwa 700–1.700 kg CO₂, was bei einem Referenzpreis von 72 €/t einem monetären Nutzen von rund 50–125 € pro Jahr entspricht. Damit liegt der direkt monetisierbare Gesamtvorteil aus Wasser-, Nährstoff- und CO₂-Einsparung bei ungefähr 1.480 € pro Jahr.

Weitere wirtschaftliche Vorteile entstehen durch Ökosystemleistungen der bewässerten Bäume, insbesondere durch Verdunstungskühlung und mikroklimatische Regulation. Die Kühlleistung wird nach der Ersatzkostenmethode bewertet, indem der Stromverbrauch einer Klimaanlage mit einem Preis von 0,49 €/kWh angesetzt wird.

Eine bewässerte Linde erzeugt dadurch einen jährlichen Nutzen von etwa 557 €, eine Buche etwa 1.405 €. Nach Abzug der jährlichen Bewirtschaftungskosten von rund 115 € pro Baum verbleibt ein Nettonutzen von etwa 442 € pro Linde bzw. 1.290 € pro Buche.

Bei einer maximalen Bewässerungskapazität von 378 m³ pro Jahr können je nach Szenario etwa 7 Linden, 5 Buchen oder eine Mischpflanzung versorgt werden. Dadurch entstehen jährliche Ökosystemleistungen im Bereich mehrerer Tausend Euro, die deutlich über den direkten

Wasser- und Ressourceneinsparungen liegen und den größten Teil des gesamtwirtschaftlichen Nutzens des Systems ausmachen.

10. Wirtschaftliche Ergebnisse

Die Bereitstellung der Ökosystemleistung lokale Klimaregulierung durch Bäume verursacht vergleichsweise geringe Kosten von etwa 80 € pro Baum und Jahr. Die spezifischen Kosten pro erzeugter Kühlleistung liegen bei etwa 0,002 €/kWh für Tilia und 0,0007–0,0008 €/kWh für Fagus, während eine vergleichbare Rasenfläche etwa 0,004 €/kWh kostet.

Um die gleiche Leistung zu erreichen, wären deutlich größere und teurere Rasenflächen erforderlich (bis zu 230 m² pro Buche), wodurch jährliche Mehrkosten von bis zu 460 € entstehen. Bäume sind daher deutlich kosteneffizienter, wobei Buchen nur etwa 17–20 % und Linden etwa 50 % der Kosten der Rasenreferenz benötigen.

Die Messungen von Temperatur und Luftfeuchte zeigen, dass Bewässerung vor allem die Feuchtigkeitsverhältnisse stabilisiert und die mikroklimatische Kühlung unterstützt. Der Einfluss auf die Temperatur ist wetterabhängig und nimmt bei kühleren oder niederschlagsreichen Bedingungen ab. Insgesamt bestätigt die Analyse, dass Bewässerung die Klimaregulation verbessert, ihr Effekt jedoch stark von Wasserverfügbarkeit und Witterung abhängt.

Die Kosten-Nutzen-Analyse über einen Zeitraum von 30 Jahren zeigt deutliche Unterschiede in der Wirtschaftlichkeit der untersuchten Bewässerungsszenarien. Szenario A mit 7 Tilia erreicht mit einem NPV von –538 €, einer BCR von 0,996 und einer Amortisationszeit von etwa 30,5 Jahren nahezu die Wirtschaftlichkeitsschwelle, bleibt jedoch leicht darunter. Szenario B mit 5 Fagus weist mit einem NPV von 90.519 €, einer BCR von 1,66 und einer Amortisationszeit von rund 8,3 Jahren die mit Abstand beste wirtschaftliche Performance auf und erzielt einen deutlichen Kapitalüberschuss. Szenario C mit einer Mischpflanzung aus 5 Tilia und 1 Fagus erreicht einen positiven NPV von 10.478 €, eine BCR von 1,07 und eine Amortisationszeit von etwa 19,1 Jahren und ist damit wirtschaftlich tragfähig, jedoch mit längerer Rückzahlungsdauer. Insgesamt zeigt die Analyse, dass das abwasserbasierte Bewässerungssystem wirtschaftlich umsetzbar ist, wobei das Fagus-Szenario die höchste Rentabilität bietet, während die Mischpflanzung einen ausgewogenen Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und ökologischer Stabilität darstellt.

11. Gesamteinordnung und Schlussfolgerung

Die Temperatúrauswertung zeigte aufgrund fehlerhafter Sensordaten keine statistisch signifikanten Unterschiede, lediglich tageszeitliche Schwankungen durch Sonneneinstrahlung und Gebäudeeinflüsse. Die Standortanalyse weist auf eine helle Fläche mit mittleren Feuchteverhältnissen und leicht saurem bis neutralem Boden hin, was gute Bedingungen für krautige Vegetation bietet. Aufgrund der negativen Niederschlags-Verdunstungs-Bilanz kann eine Bewässerung von Grünflächen sinnvoll sein, wobei ältere, tiefwurzelnende Bäume meist ohne zusätzliche Bewässerung auskommen, während Neuanpflanzungen oder flachwurzelnende Arten davon profitieren. Die Bewertung der Ökosystemleistungen basiert teilweise auf theoretischen Annahmen und Literaturwerten, sodass standortspezifische Kosten abweichen können; dennoch zeigt der Vergleich mit einer Rasen-Referenzfläche, dass Stadtbäume die gleiche Klimaregulationsleistung meist kostengünstiger bereitstellen, wobei die tatsächlichen Leistungen

unter Einbeziehung der Beschattung vermutlich höher wären. Insgesamt erweist sich die Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser als ökologisch und ökonomisch sinnvolle Maßnahme, da sie Hitze, Wasserknappheit und Nährstoffbelastung gleichzeitig reduziert und langfristig wirtschaftlich tragfähig ist. Besonders Szenario B und C zeigen eine gute Wirtschaftlichkeit und tragen zur Verbesserung der städtischen Klimaresilienz bei. Durch die ganzjährige Nutzung des aufbereiteten Wassers kann das System ohne zusätzliche Investitionskosten betrieben werden, wobei höhere Betriebskosten durch Einsparungen bei Trinkwasser und Nährstoffen ausgeglichen werden. Da das Modell von konservativ hohen Betriebskosten ausgeht, könnte bei geringeren Anforderungen an die Abwasseraufbereitung eine deutlich schnellere Amortisation erreicht werden, was die Einführung solcher Systeme in Kommunen zusätzlich erleichtern würde. Die Kostenanalyse zeigt, dass ReWaterCity kein renditeorientiertes Projekt, sondern eine strategische Infrastrukturmaßnahme im öffentlichen Interesse ist. Trotz eines negativen monetären Kapitalwerts weist das System stabile Betriebskosten, ein geringes finanzielles Risiko und erhebliche nicht-monetäre ökologische und klimarelevante Vorteile auf. Die Ergebnisse unterstreichen, dass dezentrale Wasserwiederverwendungssysteme im Kontext von Klimaanpassung und nachhaltiger Stadtentwicklung bewertet werden müssen und sich nur eingeschränkt über klassische Wirtschaftlichkeitskennzahlen abbilden lassen.