

17. DEZEMBER 2025



REWATERCITY – PROJEKTBEWERTUNG

Ergebnisbericht Ökosystemleistungen

ASMAA ELNAGAR

RESILIENTIS GMBH

Schloßgasse 12, 07356 Bad Lobenstein

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	6

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.

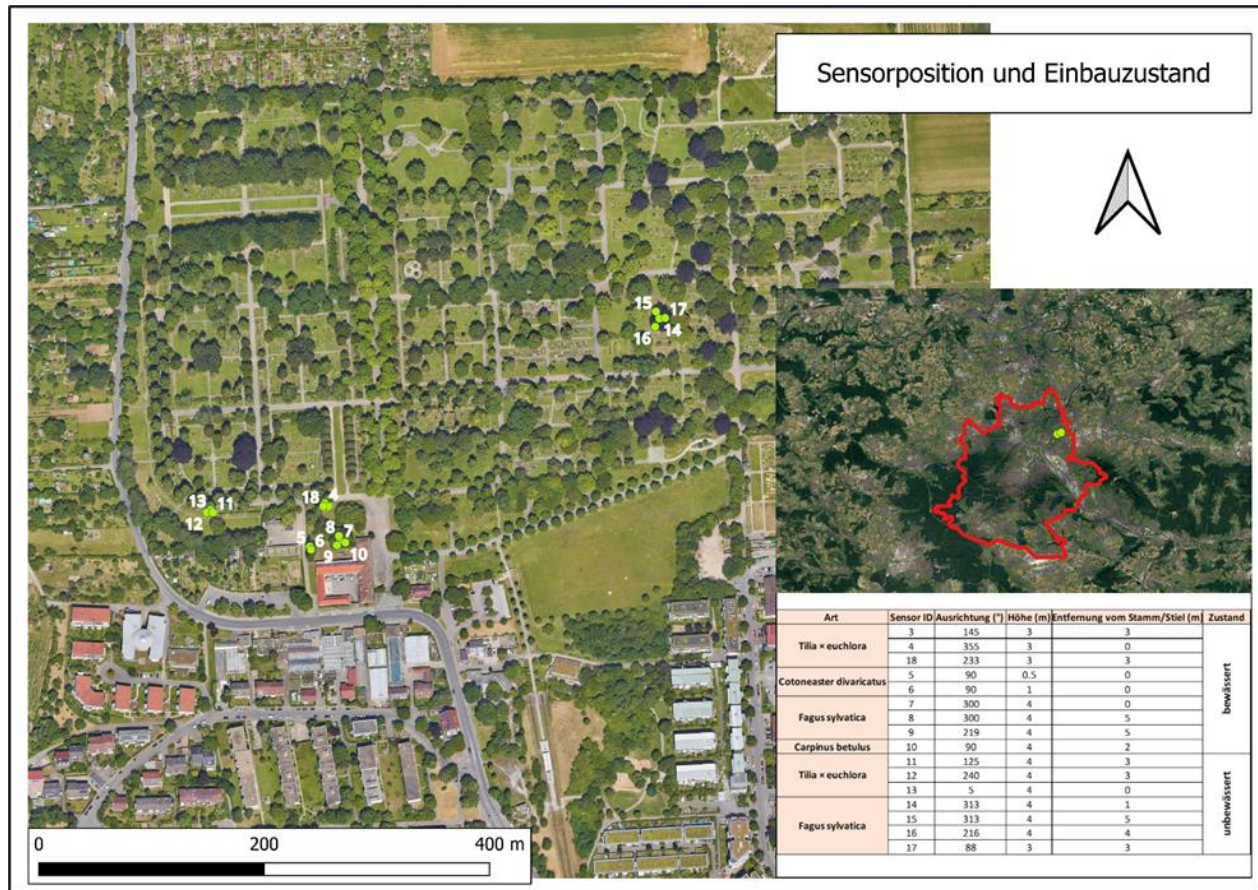


Abbildung 2 Sensorpositionen und Installationsbedingungen innerhalb des Testfeldes.

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 zusammen aus dem BioTopp-Anlagenmodul (36.997 €), Montage und Inbetriebnahme (3.998 €) sowie korrigierten Planungs- und Genehmigungskosten (1.500 €). Logistik, Transport und Schulung sind im Leistungsumfang des Anbieters enthalten. Der Betrachtungszeitraum der Analyse beträgt 20 Jahre. Dabei wird zwischen einer Lebensdauer der baulichen Komponenten (Behälter: ca. 50 Jahre) und der technischen Komponenten (ca. 10 Jahre) unterschieden.

Die jährlichen Betriebskosten (OPEX) belaufen sich auf 2.371 € pro Jahr. Diese umfassen den Stromverbrauch der Anlage (355 €), Verbrauchsmaterialien wie Chemikalien und Filter (1.616 €) sowie Wartung und Service (400 €). Die Betriebskosten gelten als weitgehend stabil, mit einer moderaten Abhängigkeit von der Energiepreisentwicklung.

9. Systemleistung und kostenrelevante Nutzen

Die Anlage behandelt 2,1 m³ Abwasser pro Tag, was einer Jahresmenge von 766,5 m³ entspricht. Durch die lokale Aufbereitung und Wiederverwendung entfallen Kosten für Frischwasser und konventionelle Abwasserentsorgung. Auf Basis der geltenden Abwassergebühr (1,83 €/m³) ergibt sich ein jährlicher monetärer Nutzen aus der Wasserwiederverwendung von 1.403 €.

Zusätzlich entstehen CO₂-Einsparungen, da energieintensive zentrale Reinigungsprozesse vermieden werden. Unter Verwendung eines konservativen Emissionsfaktors (0,485 kg CO₂/m³) und eines CO₂-Preises von 55 €/t ergibt sich ein monetärer Nutzen von rund 20 € pro Jahr.

Ökosystemleistungen umfassen unter anderem die Sicherung der Vegetationsvitalität, die Stabilisierung der Bodenfeuchtigkeit, mikroklimatische Effekte und Verdunstungskühlung. Der zugrunde liegende monetäre Ansatz von 6.600 € pro Jahr wird saisonal angepasst, da Bewässerungs- und Kühleffekte im Winter nicht auftreten. Unter der Annahme einer Wirksamkeit über etwa die Hälfte des Jahres ergibt sich ein korrigierter Jahresnutzen von 3.234 €.

10. Wirtschaftliche Ergebnisse

Der korrigierte Gesamtjahresnutzen beträgt 4.657 €. Nach Abzug der jährlichen Betriebskosten ergibt sich ein Netto-Cashflow von 2.286 € pro Jahr. Über einen Zeitraum von 20 Jahren und bei einem Diskontsatz von 3,5 % beträgt der Barwert der Nutzen rund 32.540 €.

Im Vergleich zur Anfangsinvestition resultiert daraus ein Kapitalwert (NPV) von -9.955 € sowie ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 0,77. Unter rein monetärer und konservativer Betrachtung wird somit kein positiver wirtschaftlicher Ertrag erzielt.

11. Gesamteinordnung und Schlussfolgerung

Zusammenfassend zeigt das ReWaterCity-Projekt, dass die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser eine technisch sichere und ökologisch sinnvolle Ergänzung urbaner Bewässerungsstrategien darstellt. Die direkten mikroklimatischen Effekte auf Temperatur und Luftfeuchte sind zwar moderat, die langfristige Bedeutung liegt jedoch in der Stabilisierung des

Wasserhaushalts, der Sicherung von Ökosystemleistungen und der Stärkung der Resilienz urbaner Grünflächen.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Bewässerung kein isoliertes Instrument zur kurzfristigen Abkühlung ist, sondern Teil eines integrierten Ansatzes aus Wasserwiederverwendung, Vegetationsmanagement und standortangepasster Baumartenwahl sein muss. In diesem Kontext leistet ReWaterCity einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen und klimaangepassten Stadtentwicklung.

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.