

# Dezentrale Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung für Regionen mit saisonalem Trockenstress (DeWaResT)

Jan Schütz<sup>1</sup>, Heribert Rustige<sup>2</sup>, Jeanette Jährig<sup>1</sup>, Ulf Mieke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

<sup>2</sup> AKUT Umweltschutz Ingenieure Burkard und Partner mbB

KEYWORDS: DEZENTRALE ABWASSERREINIGUNG; BEPFLANZTE BODENFILTER; STICKSTOFFENTFERNUNG

## 1 Einleitung

Der Klimawandel stellt die Bewirtschaftung von Wasserressourcen vor neue Herausforderungen. Gerade in niederschlagsarmen Regionen sind Lösungen für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung zu entwickeln. Brandenburg zählt zu den Regionen in Deutschland, die am meisten unter Wasserstress leiden. Die niedrige Niederschlagsmenge (< 600 mm/a, Bundesdurchschnitt ca. 740 mm/a) und Klimaerwärmung führt zu geringer werdenden Grundwasserneubildungsraten. Anhaltende Trockenperioden wie in den Jahren 2018 bis 2022 (durchschnittliche Niederschlagsmenge 488 mm ([1])) verschärfen die Situation zusätzlich. Aufgrund der sandigen Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität ist die Region wenig trockenresilient. Doch nicht nur Brandenburg ist betroffen von anhaltenden Trockenperioden, sondern weite Teile Europas.

Um eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung zu fördern, haben der europäische Rat und das Parlament am 25. Mai 2020 die Verordnung über die Mindestanforderung an die Wasserwiederverwendung beschlossen, welche am 26. Juni 2023 in Kraft trat ([2]). Diese regelt die Wiederverwendung von behandeltem Abwasser für die Landwirtschaft und andere Sektoren und muss noch in nationales Recht überführt werden.

Um einen Beitrag zur dezentralen Abwasseraufbereitung und Wiederverwendung zu leisten, wird im BMBF-geförderten Projekt DeWaResT (02WQ1596B) (Laufzeit: Aug. 2021 – Jan. 2024) ein neuartiger Bepflanzter Boden-Filter (BBF) entwickelt. Als interne Reinigungsziele gelten die Ablaufkonzentration einer GK 4 Kläranlage gemäß der Abwasserverordnung (AbVV [3]) Anhang 1 (CSB < 90 mg/L, BSB<sub>5</sub> < 20 mg/L, NH<sub>4</sub>-N < 10 mg/L, N<sub>anorg</sub> < 18 mg/L, P<sub>ges</sub> < 2 mg/L). Herkömmliche einstufige BBF erreichen die Anforderungen der Reinigungsklasse 4 hinsichtlich des Stickstoffs und Phosphors nicht oder nur bei extrem großem Flächenbedarf. Der Fokus des Projektes liegt daher auf der Optimierung der Stickstoffreduzierung. Zusätzlich wird die Reduzierung von Spurenstoffen innerhalb der BBF sowie in einem nachgeschalteten Aktivkohlefilter (GAK) untersucht.

### Die konkreten Ziele sind:

- die Entwicklung eines zweistufigen Bodenfilters mit reduziertem Flächenbedarf von 1 m<sup>2</sup>/EW durch integrierte aerobe Schlammbehandlung und intermittierende Belüftung;
- die Optimierung der Betriebsweise durch Variation der Rezirkulation, Filtergeschwindigkeit und alternierender Beschickung;
- die Optimierung der Stickstoffentfernung durch belastungsgeregelte, intermittierende Belüftung;
- die Demonstration der Robustheit gegenüber Stoßbelastungen während der gesamten Saison;
- die Demonstration der Stickstoffentfernung auf NH<sub>4</sub>-N < 10 mg/L und N<sub>anorg.</sub> < 25 mg/L sowie der Reduzierung des Phosphatgehalts auf < 2 mg/L P<sub>ges</sub>;
- Direkte Wiederverwendung des gereinigten Abwassers

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Versuchsstandort**

Die Halbinsel Pehlitzwerder im Parsteiner See steht aufgrund ihrer Uferbereiche (Schutzzonen), des alten Baumbestandes und der Klosterruine Mariensee unter Denkmal- und Landschaftsschutz im UNESCO-Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin. Der dramatisch gesunkene Wasserstand im Parsteiner See gefährdet den alten Baumbestand durch Wasserstress. In den letzten Jahren wurden schon erkennbare Trockenschäden an den Bäumen sichtbar. Auf der Halbinsel Pehlitzwerder wird daher ein Konzept zur nachhaltigen Wasserbewirtschaftung im ländlich strukturierten Raum entwickelt. Im Fokus stehen exemplarisch die dezentrale Abwasserbehandlung und Wiederverwendung des auf der Halbinsel befindlichen Natur-Campingplatzes.

### **2.2 Pilotanlage**

Bei dem im Projekt pilotierten BBF handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Französischen Systems (FS). Die Vorteile der integrierten aeroben Schlammstabilisierung, Robustheit gegenüber Stoßbelastungen und hohen CSB- und BSB-Eliminationsraten bleiben dabei erhalten. Aufgrund einer neuen, räumlichen Anordnung der bepflanzen und der aktiv belüfteten Stufe in einer vertikalen Mehrschichtbauweise ist der pilotierte BBF jedoch kompakter. Die sonst separaten Behandlungsprozesse werden in einer gemeinsamen Stufe integriert. Eine Vorklärung oder andere Absetzeinrichtungen sind nicht notwendig. Die am Versuchsstandort installierten BBF haben eine Nettofläche von jeweils 11,1 m<sup>2</sup>. Das Filtervolumen je BBF beträgt ca. 17 m<sup>3</sup>. Das eingestaute Volumen beträgt ca. 12 m<sup>3</sup>, wovon ca. 7 m<sup>3</sup> durch das Trägermaterial eingenommen werden. Als Filtermaterial wird eisenhaltiger Blähton verwendet, welcher in drei Schichten mit unterschiedlichen Korndurchmessern übereinandergeschichtet ist. Die Beschickung der BBF erfolgt je nach Füllstand im Pumpschacht und beträgt

je Hub ca. 53 Liter. Die Rezirkulation erfolgt direkt im Anschluss und wurde während der Versuchszeit zwischen 200 und 400 % variiert. Ein Beschickungszyklus beträgt 3 Tage, danach erfolgt der Wechsel zum zweiten BBF. Somit beträgt ein kompletter Zyklus sechs Tage, wovon die Hälfte der Zeit Regenerationszeit ist. Ein nachgeschalteter LSF sowie ein GAK-Filter stellen eine weitergehende Hygienisierung und eine zusätzliche Spurenstoffentfernung sicher, sodass das gereinigte Abwasser auch hohen Anforderungen an die Wasserwiederverwendung genügt. In Abbildung 1 ist exemplarisch das Prozessfließbild dargestellt.

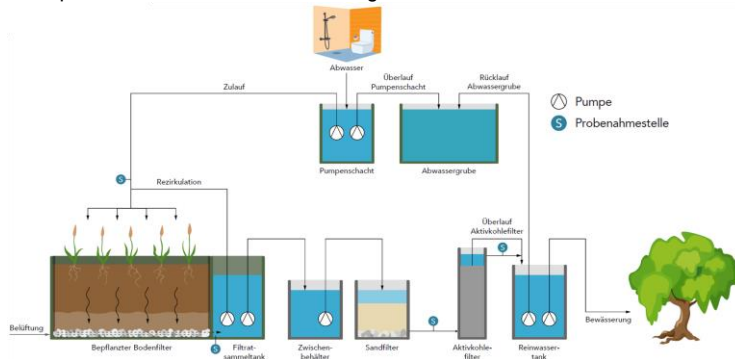


Abbildung 1: Exemplarisches Verfahrensfliessbild der DeWaResT-Pilotanlage

### 2.3 Probenahme und Parameteranalyse

Insgesamt sind für die Beprobung der Bodenfilter 30 Probenahmekampagnen für die Standardparameter (BSB<sub>5</sub>, CSB, CSB<sub>fil</sub>, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, TN, P<sub>ges</sub>, AFS) geplant. Zusätzlich werden 15 mikrobiologische Probenahmekampagnen (Stichproben: E.Coli) durchgeführt. Außerdem sind 13 Probenahmekampagnen für die Untersuchung von 23 Spurenstoffen vorgesehen. Die Auswahl der Spurenstoffe wurde auf Grundlage ihrer biologischen Elimination getroffen und unterteilt sich in leicht, mittel und schwer abbaubare Substanzen. Die Probenahme des Rohzulaufes erfolgt als 72h Mischprobe. Hierdurch soll der dreitägige Beschickungszyklus erfasst werden. Die Ablaufprobenahme erfolgt als 24 h Mischprobe. Die Probenahme für den GAK-Filter erfolgt als korrespondierende Stichprobe jeweils im Zu- und Ablauf des Filters. In Abbildung 2 ist die Probenahmestrategie für die Beprobung des Rohzulaufes und des Ablaufes der BBF exemplarisch dargestellt.

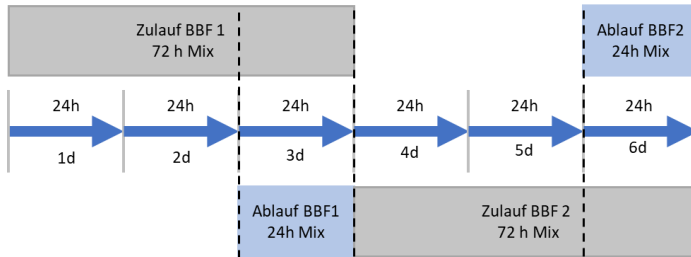


Abbildung 2: Exemplarische Probenahmestrategie über einen Beschickungszyklus und Wechsel der BBF mittels automatischer Probenehmer

### 3 Ergebnisse

In Tabelle 1 sind die gemessenen Rohzulaufkonzentrationen der beiden Versuchszeiträume (Saison 2022 und 2023) zusammenfassend dargestellt. Die hohen Konzentrationen unterscheiden sich deutlich von kommunalem Abwasser und sind auf den geringen spezifischen Wasserverbrauch (< 40 L/P/d) am Versuchsstandort zurückzuführen. Die hohen Standardabweichungen können mit der variablen Auslastung des Campingplatzes begründet werden. Diese schwankt zwischen Wochenenden, Schulferien oder wetterbedingt, deutlich. Aufgrund der hohen Zulaufkonzentrationen wurde die spezifische Beschickung auf 1 m<sup>3</sup>/d Rohzulauf begrenzt, um eine organische Überlastung der Filter zu vermeiden

Tabelle 1: Zusammenfassung der gemessenen Rohzulaufkonzentrationen für beide Versuchszeiträume

	CSB [mg/L]	P <sub>ges</sub> [mg/L]	TN [mg/L]	NH <sub>4</sub> -N [mg/L]
<b>Zulaufkonzentrationen (Versuchszeitraum: 05.2022 – 10.2022)</b>				
Mittelwert	2251 ± 330	26 ± 5	183 ± 41	101 ± 24
Anzahl	12	12	12	13
<b>Zulaufkonzentrationen (Versuchszeitraum: 05.2023 – 07.2023)</b>				
Mittelwert	1727 ± 979	24 ± 11	216 ± 47	137 ± 24
Anzahl	9,0	6,0	8,0	8,0

#### 3.1 Bewertung der Leistungsfähigkeit; erster Versuchszeitraum (Juni – Oktober 2022)

Vom ersten Tag an wurde eine sehr gute CSB-Elimination in den BBF von ca. 97% erreicht. Durch die Optimierung der Belüftung konnte auch die Nitrifikationsleistung gesteigert werden. Bezogen auf die NH<sub>4</sub>-N Zulaufkonzentration (101 mg/L) konnte eine Reduzierung um 87% (12,8 mg/L) erzielt werden. Die Denitrifikationsleistung der BBF ist von weiteren

Parametern bzw. Versuchseinstellungen abhängig, die Gegenstand der Untersuchung sind und von daher stark variieren. Mit einer mittleren  $\text{NO}_3\text{-N}$  Ablaufkonzentration von 44 mg/L wurde das interne Reinigungsziel von  $N_{\text{anorg}} < 25 \text{ mg/L}$  noch deutlich überschritten. In Tabelle 2 sind die Messergebnisse der Ablaufkonzentrationen der beiden BBF zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung der gemessenen BBF Ablaufkonzentrationen für den ersten Versuchszeitraum (05.2022 – 10.2022)

	<b>CSB [mg/L]</b>	<b><math>P_{\text{ges}}</math> [mg/L]</b>	<b>TN [mg/L]</b>	<b><math>\text{NH}_4\text{-N}</math> [mg/L]</b>	<b><math>\text{NO}_3\text{-N}</math> [mg/L]</b>	<b><math>\text{NO}_2\text{-N}</math> [mg/L]</b>
<b>Ablauf BBF 1</b>						
Mittelwert	68 ± 28	1,0 ± 0,7	80 ± 13	14 ± 26	44 ± 30	1,8 ± 2,7
Anzahl	8	8	7	8	8	8
<b>Effizienz [%]</b>	<b>97</b>	<b>96</b>	<b>56</b>	<b>87</b>	-	-
<b>Ablauf BBF 2</b>						
Mittelwert	73 ± 29	0,5 ± 0,3	79 ± 34	12 ± 17	45 ± 29	6 ± 6
Anzahl	9	10	10	11	11	10
<b>Effizienz [%]</b>	<b>97</b>	<b>98</b>	<b>57</b>	<b>89</b>	-	-

In Abbildung 3 sind der zeitliche Verlauf der TN,  $\text{NO}_3\text{-N}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentrationen exemplarisch für beide BBF dargestellt.

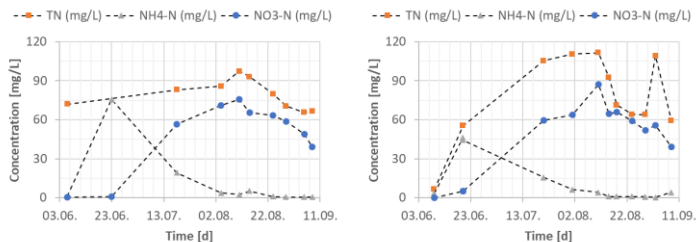


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der gemessenen TN,  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{NO}_3\text{-N}$  Ablaufkonzentrationen für den ersten Versuchszeitraum (06.2022-10.2022); links: BBF1; rechts: BBF2

Bei genauer Betrachtung der dargestellten Konzentrationsverläufe ist zu sehen, dass zu Betriebsbeginn sehr hohe  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentrationen im Ablauf der Filter gemessen wurden. Daher wurde als erste Maßnahme die Belüftungszeit schrittweise von 4 h/d auf 16 h/d gesteigert. Dadurch konnte die  $\text{NH}_4\text{-N}$  Ablaufkonzentrationen deutlich verringert werden. Jedoch steht durch die hohe Belüftungszeit nicht ausreichend Zeit für die Denitrifikation zur Verfügung. Gepaart mit einem ungünstigen C/N-Verhältnis in der Denitrifikationsstufe und einer hohen Belastung in der Zeit von

07.07 - 19.08.2022 (Sommerferien) kam es zu einem deutlichen Anstieg der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen (Maximum: 11.08.2022;  $\text{BBF1} = 75 \text{ mg/L}$ ;  $\text{BBF2} = 87 \text{ mg/L}$ ) im Ablauf beider BBF. Als nächste Maßnahme wurde daher der Belüfter (4  $\text{m}^3/\text{h}$ ) durch einen leistungsfähigeren Belüfter (8  $\text{m}^3/\text{h}$ ) ausgetauscht. Dadurch konnte die Belüftungszeit pro Tag verringert und gezielt in die Nachtstunden verlegt werden. Durch diese zeitliche Entkopplung konnte die Denitrifikationsleistung im Biofilm verbessert werden. Gegen Ende der Betriebssaison 2022 wurde bei einer etwa halbierten Filterbelastung eine Stickstoffkonzentration von  $N_{\text{anorg}} = 48 \text{ mg/L}$  erreicht. Um das interne Ziel von  $N_{\text{anorg}} < 25 \text{ mg/L}$  zu erreichen, liegt der Fokus im zweiten Versuchszeitraum (April 23 - Okt. 23) auf der Optimierung der Denitrifikationsleistung durch Verbesserung der Kohlenstoffverfügbarkeit sowie der Anpassung der Belüftungsregime.

### 3.2 Weitergehende Optimierung der Stickstoffentfernung; vorläufige Ergebnisse zweiter Versuchszeitraum (Mai – Juli 2023)

Zu Beginn der Saison 2023 wurde einer der beiden BBF (BBF2) mit einer vorgeschalteten Hydrolyse/Denitrifikation ausgestattet. Das effektive Volumen des Tanks beträgt 1,7  $\text{m}^3$ . Bei einer spezifischen Beschickung von 1  $\text{m}^3/\text{d}$  Rohzulauf und einem Rezirkulationsverhältnis von 2 beträgt die hydraulische Verweilzeit (HRT) 10,4 h, wobei die HRT maßgeblich von der Auslastung des Campingplatzes beeinflusst ist. Ziel der vorgeschalteten Hydrolyse/Denitrifikation ist neben einer verbesserten Kohlenstoffverfügbarkeit die Konditionierung von Rohzulauf und Filtrat sowie einer zusätzlichen Denitrifikation. Als Belüftungsregime wurden die Einstellungen aus der vorherigen Saison mit einer Belüftungszeit von 12 h/d, übernommen. Die vorläufigen Ergebnisse sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Zusammenfassung der gemessenen BBF Ablaufkonzentrationen für den zweiten Versuchszeitraum (05.2023 – 07.2023)

	CSB [mg/L]	$P_{\text{ges}}$ [mg/L]	TN [mg/L]	$\text{NH}_4\text{-N}$ [mg/L]	$\text{NO}_3\text{-N}$ [mg/L]	$\text{NO}_2\text{-N}$ [mg/L]
<b>Ablauf BBF 1</b>						
Mittelwert	51 ± 11	1,0 ± 0,6	35 ± 6	8 ± 11	17 ± 12	0,5 ± 0,2
Anzahl	4,0	3,0	4,0	4,0	5,0	4,0
<b>Effizienz [%]</b>	<b>97</b>	<b>96</b>	<b>84</b>	<b>94</b>	-	-
<b>Ablauf BBF 2 (mit vorgeschalteter Hydrolyse/Denitrifikation)</b>						
Mittelwert	64 ± 6	1,1 ± 0,6	30 ± 8	9 ± 10	13 ± 12	0,4 ± 0,4
Anzahl	4,0	3,0	4,0	4,0	5,0	5,0
<b>Effizienz [%]</b>	<b>96</b>	<b>95</b>	<b>86</b>	<b>94</b>	-	-

Auch in der zweiten Saison weisen beide BBF eine sehr gute Leistungsfähigkeit bezüglich der Reduzierung von CSB (97%) und  $P_{\text{ges}}$  (96%) auf. Auch die Stickstoffparameter TN (86%) und  $\text{NH}_4\text{-N}$  (94%) zeigen eine

hohe Effizienz bezüglich der Reinigungsleistung. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$  Konzentrationen sind im Mittel unterhalb der Zielstellung von  $N_{\text{anorg}} < 25 \text{ mg/L}$ . Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die bisherige Auslastung des Campingplatzes im Gegensatz zur Saison 2022 geringer war und die belastungsstarke Zeit (Sommerferien) in der Auswertung noch nicht berücksichtigt ist. Um eine genauere Aussage über die Entwicklung der Stickstoffparameter geben zu können, sind in Abbildung 4 die Ablaufkonzentrationen für TN,  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{NO}_3\text{-N}$  zeitlich aufgetragen.

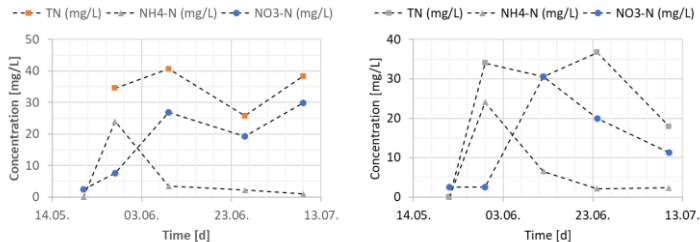


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der gemessenen TN,  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{NO}_3\text{-N}$  Ablaufkonzentrationen für den zweiten Versuchszeitraum (05.2023-07.2023); links: BBF1; rechts: BBF2 mit vorgeschalteter Hydrolyse/Denitrifikation

Auffällig im Vergleich zur vorherigen Saison 2022 ist, dass die TN Ablaufkonzentrationen deutlich niedriger liegen. Analog dazu verhalten sich die  $\text{NO}_3\text{-N}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentrationen. Im direkten Vergleich zwischen BBF1 und BBF2 ist jedoch ein unterschiedliches Verhalten bei der Entwicklung der  $\text{NO}_3\text{-N}$  Konzentrationen zu beobachten. Während beim BBF1 mit steigenden  $\text{NO}_3\text{-N}$  Konzentrationen zu rechnen ist, fallen diese bei BBF2. Sollte sich der Trend bei BBF2 verstetigen, wäre dies ein Indiz für eine Steigerung der Denitrifikationsleistung durch die vorgeschaltete Hydrolyse/Denitrifikation. Zum jetzigen Zeitpunkt (14.07.2023) kann jedoch noch keine abschließende Beurteilung erfolgen, da die hochbelasteten Wochen (Sommerferien) noch bevorstehen. Im weiteren Verlauf der Pilotstudie sollen noch weitere Anpassungen an der Belüftung, der Beschickung sowie des eingestauten Filtervolumen vorgenommen werden. Auch eine bedarfsgerechte Steuerung bzw. Regelung der Belüftung mittels Redox-Onlinemessung soll getestet werden.

## 4 Zusammenfassung

Die im Projekt pilotierten BBF weisen eine hohe Leistungsfähigkeit bezüglich der CSB- und  $P_{\text{ges}}$ - Elimination von ca. 96% auf. Durch die Anpassung der Belüftungsregime wurde auch eine Leistungssteigerung der Nitrifikation (88 – 95%) erzielt. Die Denitrifikationsleistung erreicht aktuell in beiden Filtern Werte von über 80%. Die vorläufigen Ergebnisse der Saison 2023 zeigen, dass durch die Verfahrens- und Prozessoptimierung die

Denitrifikationsleistung deutlich gesteigert wurde. Damit sollte es möglich werden, trotz extrem hoher Zulaufkonzentrationen die angestrebte  $N_{\text{anorg}}$ -Konzentration  $< 25 \text{ mg/L}$  im Ablauf der BBF zu erreichen.

## 5 Literatur

1. UBA, *Trends der Niederschlagshöhe*. 2023, UBA: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>.
2. EU-2020/741, VERORDNUNG (EU) 2020/741 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. Mai 2020 über Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung. 2020: EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION.
3. Justiz, B.f., *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV)*. 1997, Bundesamts für Justiz.