

# Abschlussbericht zum Nereda<sup>®</sup> - Verfahren auf der Kläranlage Altena



Essen, April 2026  
Projektnummer: *Nka3 - 003306*

# UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

## **Abschlussbericht**

### **zum Vorhaben**

*Nereda®-Verfahren auf der KA Altena  
Nka3 - 003306*

### **Zuwendungsempfänger/-in**

*Ruhrverband*

### **Umweltbereich**

*Abwasserbehandlung*

### **Laufzeit des Vorhabens**

*13.03.2019.04.2018 bis 31.12.2025*

### **Autor/-en**

*Dr. Yvonne Schneider, Marcel Dierker, Annika Schönfeld, Christian Schmidt*

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz**

### **Datum der Erstellung**

*21.04.2026*

## **Berichts-Kennblatt**

Aktenzeichen UBA:	Projekt-Nr.: NKa3 - 003306
Titel des Vorhabens: Nereda <sup>®</sup> -Verfahren auf der KA Altena	
Autor/-en (Name, Vorname): Dr. Schneider, Yvonne Dierker, Marcel Schönfeld, Annika Schmidt, Christian	Vorhabenbeginn: 13.03.2019
	Vorhabenende (Abschlussdatum): 31.12.2025
Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift): Ruhrverband Kronprinzenstr. 37 45128 Essen	Veröffentlichungsdatum: 30.04.2026
	Seitenzahl: 111
Gefördert im Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz	
Kurzfassung (max. 1.500 Zeichen):  Der Ruhrverband betreibt im Ruhrgebiet 66 Kläranlagen, darunter die sanierungsbedürftige KA Altena (Baujahr 1984, 35.000 EW), die zur Verbesserung der Reinigungsleistung und der Betriebssicherheit modernisiert werden musste. Nach einer Variantenuntersuchung wurde das innovative Nereda <sup>®</sup> -Verfahren als wirtschaftlichste Lösung ausgewählt. Es basiert auf aerober granularer Biomasse im Sequencing-Batch-Verfahren und ermöglicht eine kompakte, energie- und ressourceneffiziente Abwasserbehandlung mit gleichzeitig ablaufenden biologischen Prozessen zur Stickstoff- und Phosphorelimination. Das Projekt wurde trotz pandemiebedingter Herausforderungen in grenzübergreifender Zusammenarbeit erfolgreich umgesetzt. Seit der Inbetriebnahme 2022 und der Leistungsfahrt 2023 zeigt die Anlage deutlich verbesserte Ablaufwerte beim Ammonium- und Gesamtstickstoff sowie beim Phosphor, wodurch das Gewässer deutlich entlastet wird. Das Vorhaben belegt die hohe Prozessstabilität, Betriebssicherheit und Reinigungsleistung des Verfahrens. Einschränkungen bestehen bei der erhofften Optimierung des Energieverbrauchs: Durch den höheren Verbrauch der Belüftung und des Beschickungspumpwerks stieg der Strombedarf an und verschlechtert die CO <sub>2</sub> -Bilanz. Dieser Mehrverbrauch ist jedoch teilweise standortspezifisch und stellt keine grundsätzliche Charakteristik des Nereda <sup>®</sup> -Verfahrens dar. Die erwarteten Einsparungen bei den Betriebskosten und dem Fällmittelverbrauch konnten bislang noch nicht erreicht werden. Auf der KA Altena wurde das Nereda <sup>®</sup> -Verfahren erstmalig in Deutschland großtechnisch umgesetzt. Das Vorhaben hat Modellcharakter für kommunale Kläranlagen mit begrenztem Platzangebot und Modernisierungsbedarf.	
Schlagwörter: Nereda, AGS, Aerobic granular sludge, aerob granulierter Schlamm	

## Report Coversheet

Reference-No. Federal Environment Agency:	Project–No.: NKa3 - 003306
Report Title: Nereda® process at the Altena wastewater treatment plant	
Author/Authors (Family Name, First Name): Dr. Schneider, Yvonne Dierker, Marcel Schönfeld, Annika Schmidt, Christian	Start of project: 13.03.2019
	End of project: 31.12.2025
Performing Organisation (Name, Address): Ruhrverband Kronprinzenstr. 37 45128 Essen	Publication Date: 30.04.2026
	No. of Pages: 111
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection.	
Summary (max. 1.500 characters):  <p>The Ruhrverband operates 66 wastewater treatment plants in the Ruhr area, including the Altena WWTP (built in 1984, 35,000 PE), which was in need of renovation and had to be modernized to improve its treatment performance and operational safety. After examining various options, the innovative Nereda® process was selected as the most economical solution. It is based on aerobic granular biomass in a sequencing batch process and enables compact, energy- and resource-efficient wastewater treatment with simultaneous biological processes for nitrogen and phosphorus elimination.</p> <p>Despite challenges caused by the pandemic, the project was successfully implemented with cross-border cooperation. Since commissioning in 2022 and the performance run in 2023, the plant has shown significantly improved discharge values for ammonium, total nitrogen, and phosphorus, which significantly reduces the load on the receiving water. The project demonstrates the high process stability, operational reliability, and cleaning performance of the process.</p> <p>There are limitations in terms of the expected optimization of energy consumption: higher consumption by the aeration and feed pump systems has increased power requirements and worsened the CO<sub>2</sub> balance. However, this additional energy consumption is partly site-specific and does not represent a fundamental characteristic of the Nereda® process. The expected savings in operating costs and precipitant consumption have not yet been achieved.</p> <p>The Nereda® process was implemented on a large scale for the first time in Germany at the Altena wastewater treatment plant. The project serves as a model for municipal wastewater treatment plants with limited space and a need for modernization.</p>	
Keywords: Nereda, AGS, Aerobic granular sludge, aerob granulierter Schlamm	

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner .....	1
1.1.1 Ruhrverband .....	1
1.1.2 Projektpartner .....	2
1.2 Ausgangssituation .....	3
1.2.1 Ausgangssituation auf der KA Altena .....	3
1.2.2 Vorhandene Anlagentechnik .....	4
1.2.3 Umweltauswirkungen .....	5
1.2.4 Motivation der Umsetzung.....	6
<b>2. Vorhabenumsetzung</b> .....	<b>6</b>
2.1 Ziel des Vorhabens.....	6
2.1.1 Angestrebte Umweltentlastung.....	6
2.2 Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten).....	7
2.3 Beschreibung der ausgewählten Verfahrenstechnik zur Erneuerung der biologischen Reinigungsstufe (Nereda®-Verfahren) .....	10
2.3.1 Beschreibung der Prozesse und Verfahrensführung zur Granulierung des belebten Schlammes .....	10
2.3.2 Reinigungsleistung .....	12
2.4 Beschreibung der geplanten Umsetzung des Nereda®-Verfahrens auf der KA Altena und der dazu erforderlichen Maßnahmen .....	14
2.5 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen).....	15
2.6 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten .....	17
2.7 Konzeption und Durchführung des Messprogramms .....	19
2.7.1 Onlinemessungen .....	19
2.7.2 Stichproben.....	19
2.7.3 Sondergrößen und Kennwerte: .....	20
<b>3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung</b> .....	<b>20</b>
3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung .....	20
3.1.1 Planung.....	20
3.1.2 Bauphase.....	21
3.1.3 Impfschlammmanlieferung und Inbetriebnahmephase .....	22
3.2 Stoff- und Energiebilanz .....	25
3.2.1 Stoffbilanz (Bewertung der Nährstoffelimination).....	25
3.2.2 Energiebilanz .....	33
3.2.3 Feststoff- und Phosphorbilanz.....	40
3.2.4 TOC, Schwermetalle und Spurenstoffe .....	44

3.2.5 Weitere Betriebskennwerte und Schlammeigenschaften.....	46
3.3 Umweltbilanz .....	49
3.3.1 Emissionen ins Gewässer .....	49
3.3.2 Energie und Betriebshilfsmittel .....	50
3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	52
3.4.1 Wirtschaftlichkeitsgrundsätze beim Ruhrverband .....	52
3.4.2 Variantenuntersuchung und Weiterentwicklung der Vorzugsvariante .....	52
3.4.2 Aktueller Betriebskostenvergleich .....	59
3.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren .....	60
<b>4. Übertragbarkeit .....</b>	<b>63</b>
4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung .....	63
4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts) .....	69
4.2.1 Neuheitswert des Nereda®-Verfahrens/Fortschrittlichkeit gegenüber dem Stand der Technik .....	69
4.2.2 Übertragbarkeit auf gleiche oder andere Branchen .....	70
4.3 Kommunikation der Projektergebnisse .....	72
<b>5. Zusammenfassung.....</b>	<b>74</b>
<b>6. Summary.....</b>	<b>79</b>
<b>7. Literatur .....</b>	<b>83</b>
<b>8. Anhang.....</b>	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
$\alpha$	Verhältnis der Belüftungskoeffizienten unter Betriebs- und Reinwasserbedingungen
AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AGS	Aerob granulierter Schlamm
BauO NRW	Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen
BB	Belebungsbecken
BHKW	Blockheizkraftwerk
BR	Bezirksregierung
BSB <sub>5</sub>	Biologischer Sauerstoffbedarf in fünf Tagen
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
E	Einwohner
EGSB	Expanded Granular Sludge Bed
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
EPS	Extrazelluläre Polymere Substanzen
EW	Einwohnerwerte (in Formel nur als „E“ angegeben)
EZG	Einzugsgebiet
FB	Faulbehälter
FAT	Factory Acceptance Test (Überprüfung der Funktion der Steuerung vor der Inbetriebnahme)
FU	Frequenzumrichter
$f_{\text{int}}$	Faktor zur Erhöhung des Sauerstoffbedarfs bei der intermittierenden Belüftung
GAO	Glykogen-akkumulierende Organismen
$h_D$	Einblastiefe
JAWM	Jahresabwassermenge
KA	Kläranlage
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz in NRW, seit dem 01.04.2025 LANUK: Landesamt für Natur, Umwelt und Klima
LWG	Landeswassergesetz
MAP	Magnesiumammoniumphosphat
MSR	Mess-, Steuer- und Regeltechnik
$\eta$	Wirkungsgrad

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
N <sub>anorg</sub>	Anorganisch gebundener Stickstoff
N <sub>ges</sub>	Gesamt-Stickstoff
NH <sub>4</sub> -N	Ammonium-Stickstoff
NKB	Nachklärbecken
oTS	Organischer Trockensubstanzgehalt (g/l)
OVh	Stündlich Sauerstoffzufuhr
P	Phosphor
PAO	Phosphor-akkumulierende Bakterien
P <sub>ges</sub>	Gesamtphosphor
PO <sub>4</sub> -P	Ortho-Phosphat
PW	Pumpwerk
Q <sub>d</sub>	Mittlerer, täglicher Zufluss
Q <sub>M</sub>	Mischwasserzufluss
Q <sub>T,aM</sub>	Trockenwetterzufluss
RÜB	Regenüberlaufbecken
SAT	Site Acceptance Test (Überprüfung der Funktion der Steuerung auf der Anlage)
SEW	Maschinelle Schlammwässerung
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SSOTR	spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr [g/(m <sub>N</sub> <sup>3</sup> *m)]
TEZG	Teileinzugsgebiet
TKN	Kjeldahlstickstoff (N <sub>org</sub> +NH <sub>4</sub> -N)
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff
TR	Trockenrückstand (g/l)
TS	Trockensubstanzgehalt (g/l)
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
VKB	Vorklärbecken
WiRe	Wirtschaftlichkeitsrechnung
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

# 1. Einleitung

## 1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner

### 1.1.1 Ruhrverband

Der Ruhrverband ist als sondergesetzlicher Wasserverband eine Körperschaft des öffentlichen Rechts auf Grundlage des nordrhein-westfälischen Ruhrverbandsgesetzes (RuhrVG) vom 07.02.1990, zuletzt geändert am 10.12.2024. Kraft dieses Gesetzes obliegt dem Ruhrverband die Aufgabe der Abwasserbehandlung im Einzugsgebiet der Ruhr und des Wassermengenausgleichs in der Ruhr zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung.

Um die Aufgabe der Abwasserbehandlung zu erfüllen, betreibt der Ruhrverband 66 Kläranlagen und reinigt dort die Abwässer von rd. 2,04 Mio. Menschen und zahlreichen Gewerbebetrieben. Außerdem verfügt er über rd. 560 Niederschlagswasserbehandlungsanlagen, 124 Pumpwerke und zahlreiche weitere abwassertechnische Anlagen.

Für die Aufgabe der Wassermengenvirtschaft betreibt der Ruhrverband insgesamt acht Talsperren im Einzugsgebiet mit den erforderlichen peripheren Betriebsanlagen. Er steuert über das 463 Mio. Kubikmeter umfassende Speichersystem den Abfluss in der Ruhr und stellt sicher, dass die ansässigen Trinkwasserunternehmen jederzeit in ausreichender Menge und Qualität Rohwasser zur Aufbereitung und Verteilung vorfinden und gleichzeitig ein ausreichender Mindestabfluss in der Ruhr für die aquatische Umwelt verbleibt.

Abbildung 1 zeigt das Ruhrverbandseinzugsgebiet mit den wesentlichen wasserwirtschaftlichen Anlagen.

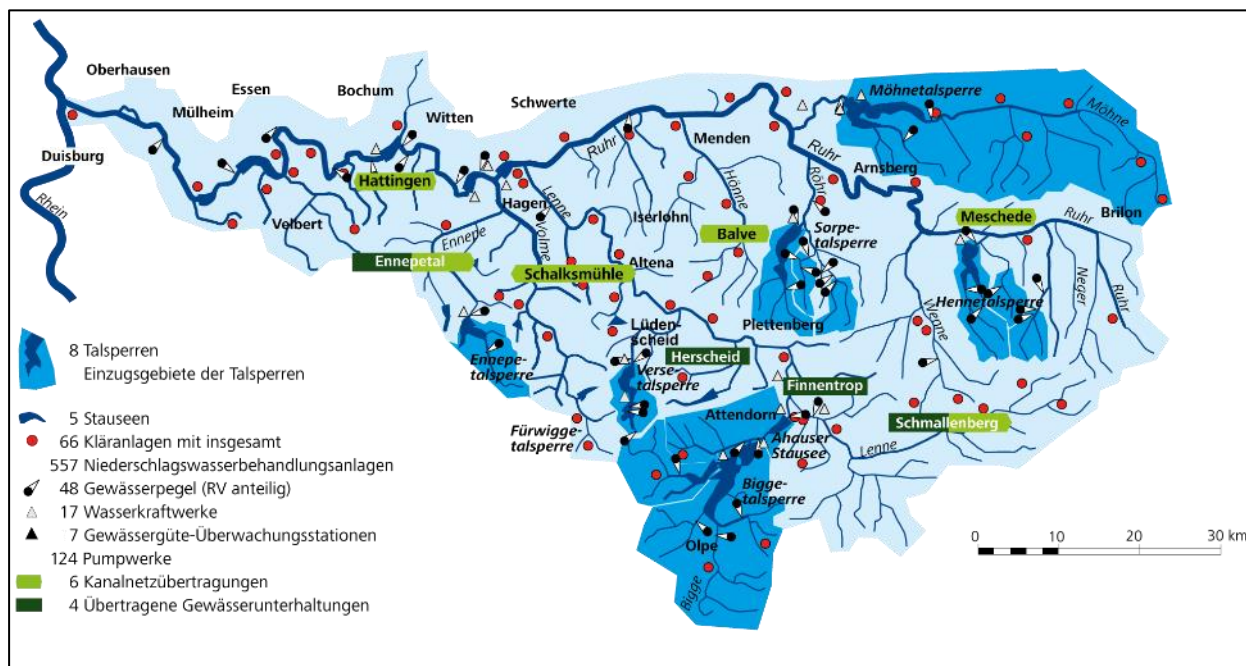


Abbildung 1: Ruhrverband -Verbandsgebiet [Ruhrverband]

Der Ruhrverband finanziert sich über die Beiträge seiner Mitglieder. Zu den Mitgliedern zählen die 60 Städte und Gemeinden im Einzugsgebiet der Ruhr, größere Industrie- und Gewerbebetriebe, die Trinkwasserunternehmen sowie die Besitzer von Wasserkraftanlagen.

Der Ruhrverband agiert unabhängig von politischen Verwaltungseinheiten. Dadurch werden Synergien genutzt, Kosten gesenkt und die Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie umgesetzt.

Der Ruhrverband beschäftigt über 1.000 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen.

### **1.1.2 Projektpartner**

Die auf der Kläranlage (KA) Altena eingesetzte innovative Technologie wurde in den frühen 2000er Jahren in einer Kooperation zwischen der Royal HaskoningDHV (RHDHV), jetzt Haskoning, der Technischen Universität Delft, den Niederländischen Wasserverbänden und der Niederländischen Stiftung für angewandte Wasserforschung (STOWA) unter der Leitung von Professor Mark van Loosdrecht an der Universität Delft entwickelt. Die Zielsetzung lag darin, eine kompaktere und effizientere Technologie zur Reinigung von Abwässern zu entwickeln [1].

Aufgrund des Patents für das Nereda®-Verfahren („Method for the treatment of waste water with sludge granules“, u. a. als EP 1542932 A1 und WO2004024638A1) erfolgte die Erstellung der Vor- und Entwurfsplanung, Konfektionierung und Implementierung einer Steuerung, die Lieferung von Impfschlamm sowie eine Betriebsberatung für das Nereda®-Belebungsverfahren ausschließlich durch den Patentinhaber:

#### Haskoning

Laan 1914 no 35, 3818 EX Amersfoort, Niederlande

Die Erstellung der Ausführungsplanung für die verfahrenstechnische Ausrüstung innerhalb des Nereda®-Reaktors sowie Lieferung und Einbau dieser Aggregate, Inbetriebnahmebegleitung sowie die Prozessgarantie erfolgte durch:

#### WABAG Wassertechnik AG

Bürglistraße 31, CH-8401 Winterthur, Schweiz

Die WABAG war bereits Lizenznehmer für die Schweiz und mit allen Lizenzbedingungen und Geheimhaltungsklauseln vor allem bei den notwendigen Ausschreibungen vertraut. Hinzu kommt, dass dem Ruhrverband ein deutschsprachiger Partner insbesondere bei der Inbetriebnahme zur Verfügung stand.

## 1.2 Ausgangssituation

### 1.2.1 Ausgangssituation auf der KA Altena

Die KA Altena wurde im Jahr 1984 erstmals mit einer Ausbaugröße von 52.000 Einwohnerwerten (EW) in Betrieb genommen. Mit Verschärfung der Mindestanforderungen für das Einleiten von Abwasser in Gewässer wurde auch für Kläranlagen der Größenklasse 4 eine weitergehende Stickstoff- und Phosphorelimination erforderlich (Rahmen-Abwasser-VwV, 1992). Die KA Altena wurde daraufhin im Jahr 1992 durch betriebliche Maßnahmen auf eine weitergehende Nährstoffelimination umgebaut und im Jahr 2003 letztmalig um eine maschinelle Schlammwässerung und ein Blockheizkraftwerk (BHKW) erweitert.

Das fortgeschrittene Alter der Kläranlage erforderte vor allem im Bereich der Maschinen- und Elektrotechnik umfangreiche Ersatzinvestitionen. Vor dem Hintergrund weiterhin rückläufiger Einwohnerzahlen wurde vorab im Rahmen einer Machbarkeitsstudie neben dem Weiterbetrieb der KA Altena auch ein Anschluss an die rd. 10 km entfernte KA Iserlohn-Letmathe untersucht mit dem Ergebnis, dass der Weiterbetrieb der KA Altena die wirtschaftlichere Lösung darstellt. Allerdings setzte der Weiterbetrieb der Kläranlage eine umfangreiche Erneuerung der vorhandenen Anlagentechnik voraus. Die KA Altena liegt zudem im engen Tal der Lenne. Die Platzverhältnisse vor Ort sind sehr begrenzt (s. Abbildung 2), sodass nur kleine Flächen für Baumaßnahmen zur Verfügung stehen. Außerdem ist der Einsatz größerer Baumaschinen nicht möglich, da die Zufahrt allein durch eine schmale Bahndammunterführung erfolgt.



Abbildung 2: Luftbild der KA Altena – vor dem Umbau [Ruhrverband]

## 1.2.2 Vorhandene Anlagentechnik

Die KA Altena weist drei Zulaufkanäle aus dem Stadtgebiet Altena (DN 1600), dem PW Einsal und dem TEZG Knerling (Lennerohrbrücke) sowie dem TEZG Pragpaul auf. Das vorhandene Einlaufpumpwerk besteht aus drei Schneckenpumpen, die den gesamten Mischwasserzufluss heben, wobei eine Schneckenpumpe den Mischwasserabfluss von ursprünglich  $Q_M = 350$  l/s in die Abwasserbehandlungsanlage und die beiden anderen Schneckenpumpen den darüber hinaus anfallenden Mischwasserabfluss in die Niederschlagswasserbehandlungsanlage fördern. Abflüsse, die größer als die Leistungsfähigkeit des Einlaufpumpwerkes sind, werden am vorgelegerten Beckenüberlauf direkt in die Lenne abgeschlagen.

Der in der Kläranlage biologisch zu reinigende Mischwasserabfluss durchfließt zunächst die mechanische Vorreinigung bestehend aus einem Gegenstromrechen (Spaltweite 15 mm), einem belüfteten Sandfang sowie einem Vorklärbecken. Anschließend erfolgte die biologische Reinigung nach dem Belebtschlammverfahren. Der mittels Mikroorganismen belebte Schlamm wurde in den Belebungsbecken mit dem zufließenden Abwasser vermischt und durch Umwälzung und Belüftung in Schwebelage gehalten. So wurden sichtbare Schlammflocken ausgebildet. Diese haben die Eigenschaft, dass sie sich absetzen, sobald keine Bewegungsenergie durch Belüftung oder Umwälzung eingetragen wird. Diesen Effekt machte man sich in den nachgeschalteten Nachklärbecken zunutze, um den belebten Schlamm von dem gereinigten Abwasser wieder zu trennen. Der Schlamm wurde wieder dem Belebungsbecken zugeführt. Da sich die beteiligten Bakterien kontinuierlich vermehren, muss ein kleiner Teil der Bakterienmasse regelmäßig aus dem System entfernt werden (Überschussschlamm).

Der Überschussschlamm wurde in die Vorklärung gepumpt, gemeinsam mit dem Primärschlamm in den Trichterspitzen der Vorklärung eingedickt und als Rohschlamm zur weiteren Behandlung auf einen Faulbehälter gepumpt. Der im Faulbehälter anaerob stabilisierte Schlamm wurde anschließend maschinell entwässert und zur Verbrennung abtransportiert. Das bei der Faulung entstehende Faulgas wurde in einem BHKW zur Stromerzeugung genutzt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Lageplan der Bestandsanlage und Angaben zu den relevanten Bauwerksvolumina sowie Bilder des engen Bahndurchlasses als Zufahrt zur Kläranlage.

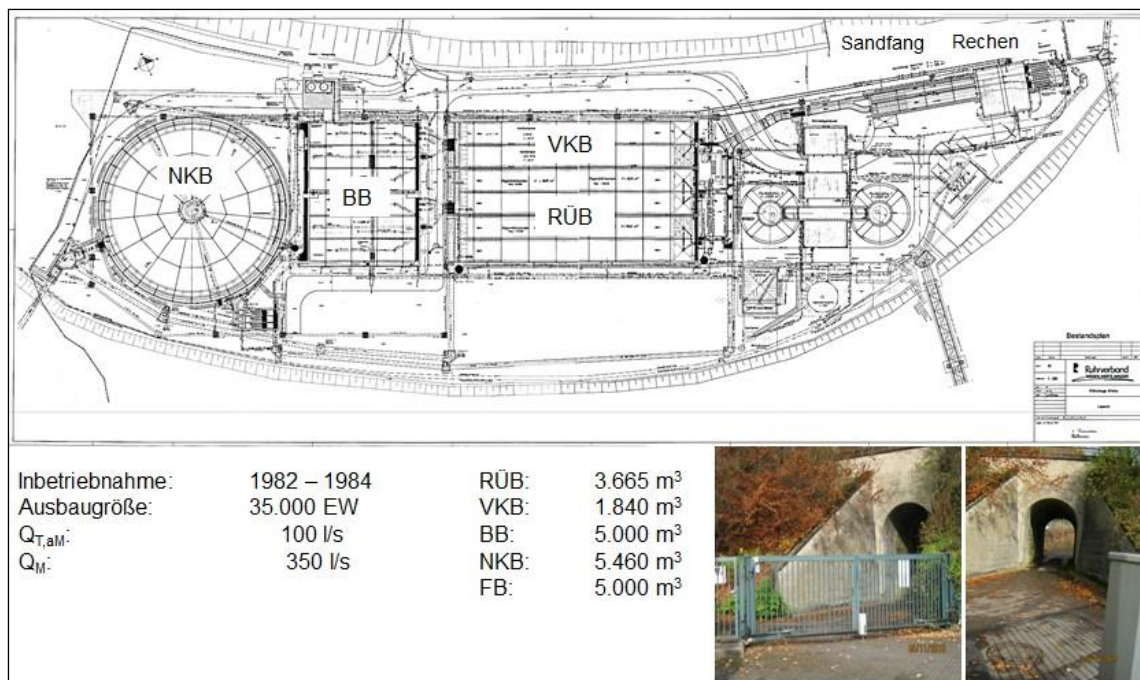


Abbildung 3: Bestand der KA Altena [Ruhrverband]

### 1.2.3 Umweltauswirkungen

Durch die Reinigung des Abwassers werden Umweltbelastungen für das Gewässer vermindert und vermieden. Die Reduktion der Parameter CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf als Indikator für Organische Stoffe), N<sub>ges</sub> (Gesamtstickstoff) und P<sub>ges</sub> (Gesamtphosphor) im Ablauf der Kläranlage ist essenziell für den Schutz von aquatischem Leben sowie zur Vermeidung von negativen Umwelteffekten wie Sauerstoffmangel oder Eutrophierung im Gewässer (hier der Lenne).

Für die Reinigung des Abwassers müssen Energie und Betriebsmittel eingesetzt werden. Die Phosphorentfernung aus dem Abwasser erfolgte durch eine chemische Fällung. Diese trägt zwar durch den Rückhalt von Phosphor zur Entlastung des Gewässers bei, jedoch stellen die eingesetzten Fällmittel durch den Salzeintrag in die Lenne auch eine Umweltbelastung dar.

Der bei der Abwasserbehandlung anfallende Klärschlamm wurde zunächst statisch eingedickt, nach der anschließenden anaeroben Stabilisation im Faulbehälter maschinell entwässert, in einer Monoklärschlammverbrennungsanlage thermisch verwertet und als Klärschlammasche anschließend deponiert. Die Schlammbehandlung sowie die Deponierung der Reststoffe (Asche) sind ebenfalls als eine durch die Abwasserbehandlung induzierte Umweltbelastung einzustufen.

### 1.2.4 Motivation der Umsetzung

Eine grundlegende Modernisierung aufgrund des Anlagenalters war erforderlich. Neben der Bau- substanz gab es auch Erneuerungsbedarf im Bereich der Elektrotechnik sowie der Maschinen- technik. Die Kombination aus Platzersparnis, Energieeffizienz und die Reduktion von Fällmittel sprach für die Auswahl des Nereda®-Verfahrens, von dem man sich versprach, die hohen Anforderungen an die Reinigungsleistung bei einer gleichzeitigen Energieersparnis von 30 % und mehr [2] gegenüber konventionellen Anlagen zu erfüllen. Zudem führt die verstärkte biologische Phosphorelimination zu einem reduzierten Einsatz von Fällmitteln von etwa 75 %. Es wurde davon ausgegangen, dass der Betrieb der Anlage zur signifikanten Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes beiträgt. Neben dieser höheren Kosteneffizienz – sowohl in Bezug auf die Investitions- als auch auf die Betriebskosten – erwies sich der um bis zu 40 % [3] geringe Flächenbedarf durch die kompakte Bauweise der Reaktoren als weiterer Vorteil, insbesondere vor dem Hintergrund des begrenzten Platzes auf dem Kläranlagengelände.

## 2. Vorhabenumsetzung

### 2.1 Ziel des Vorhabens

Im Rahmen der Maßnahme „Erneuerung der Kläranlage Altena“ wurden zwei zentrale Projektziele verfolgt: Erstens sollte durch eine umfassende Sanierung und Modernisierung die langfristige Sicherstellung einer wirtschaftlichen, ressourceneffizienten und betriebssicheren Abwasserbehandlung gewährleistet werden. Zweitens sollte die großtechnische Demonstration dazu dienen, die Eignung und Leistungsfähigkeit des Nereda®-Verfahrens unter den spezifischen Randbedingungen kommunaler Kläranlagen zu verifizieren.

#### 2.1.1 Angestrebte Umweltentlastung

Für die erneuerte KA Altena wurde erwartet, im Vergleich zur Altanlage bessere Reinigungsergebnisse zu erzielen. Angestrebt wurden die folgenden Betriebsmittelwerte im Ablauf der Kläranlage (s. Tabelle 1):

**Tabelle 1: Mittlere Betriebswerte im Ablauf vor dem Umbau bzw. angestrebte nach dem Umbau [Ruhrverband]**

	Mittlere Betriebswerte im Ablauf <u>vor</u> dem Umbau	Erwartete mittlere Betriebswerte im Ablauf <u>nach</u> dem Umbau
	mg/l	mg/l
Chemischer Sauerstoffbedarf CSB	18,0	16,0
Anorganische Stickstoffverbindungen N <sub>anorg</sub>	10,5	10,0
Ammoniumstickstoff NH <sub>4</sub> -N	1,0	0,6
Phosphorverbindungen P <sub>ges</sub>	0,8	0,8

Bei einer erwarteten Jahresabwassermenge von 4.450.600 m<sup>3</sup>/a resultierte eine erwartete Verringerung der Restschmutzfrachten im Ablauf in Höhe von:

CSB: 8.900 kg/a

N<sub>anorg</sub>: 2.225 kg/a

NH<sub>4</sub>-N: 1.780 kg/a

Durch die vermehrte biologische Phosphorelimination wurde prognostiziert, dass sich die Menge der erforderlichen Eisen(III)-Chlorid für die chemische Phosphatfällung um 75 % bzw. 20.000 kg/a (Wirksubstanz) verringert. Dies hätte einen verminderten Salzeintrag (Chlorid) in die Lenne von 38.000 kg/a zur Folge gehabt.

Im Rahmen des Betriebscontrollings für die Jahre 2012 bis 2015 ist ein mittlerer spezifischer Energieverbrauch für die KA Altena von 43 kWh/(E · a) ermittelt worden. Dieser Wert liegt damit rd. 23 % über dem einschlägigen Richtwert, was auf ein Optimierungspotenzial hinweist. Nach Umbau der KA Altena wurde davon ausgegangen, dass durch den Wegfall der Schlammbehandlung, die Installation energieeffizienterer Aggregate und den Betrieb der biologischen Stufe nach dem Nereda®-Verfahren der spezifische Energieverbrauch der KA Altena auf 30 kWh/(E · a) gesenkt werden kann.

Bei einer mittleren Belastung von etwa 17.000 EW ergab dies eine Energieeinsparung von:

$17.000 \text{ E} \cdot (43 \text{ kWh} - 30 \text{ kWh}) / (\text{E} \cdot \text{a}) = \text{rd. } 221.000 \text{ kWh/a.}$

Umgerechnet auf CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung bedeutete dies eine Einsparung von:

130 t CO<sub>2</sub>/a bzw. 7,6 kg CO<sub>2</sub>/(E · a).

Während der Bauphase konnte das Ziel eines vom laufenden Betrieb der Kläranlage unabhängigen Neubaus der Nereda®-Becken erreicht werden. Dadurch konnten die Überwachungswerte in das Gewässer uneingeschränkt eingehalten und die Umweltbelastungen auch in dieser Zeit vermindert werden.

## **2.2 Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)**

Bei dem Vorhaben handelt es sich um ein neuartiges biologisches Verfahren zur Abwasserbehandlung. Konkret sollte das Nereda®-Verfahren erstmalig in Deutschland großtechnisch umgesetzt werden.

Nereda® ist eine innovative Technologie zur biologischen Abwasserbehandlung auf Basis eines Sequencing-Batch-Reactor-Verfahrens, welche die Vorteile der aeroben granularen Biomasse nutzt. Im Gegensatz zum herkömmlichen Belebungsverfahren wachsen die für die biologische Reinigung des Abwassers benötigten Bakterien in kompakten Granulen anstelle von Flocken.

Durch die sehr guten Absetzeigenschaften des aerob granulierten Schlamms sind hohe Biomassenkonzentrationen im Reaktor sowie eine gleichzeitige Beschickung und Entleerung der Reaktoren. Durch den Schlammrückhalt in den Reaktoren kann außerdem auf ein separates Nachklärbecken verzichtet werden. Des Weiteren ist man in der Planung aufgrund der vergleichsweise hohen biologischen Phosphoreliminationsleistung davon ausgegangen, dass weitgehend auf den Einsatz von chemischen Fällmitteln verzichtet werden kann.

Das Nereda®-Verfahren zeichnet sich durch einen deutlich reduzierten Platzbedarf und geringere Investitionskosten aus, wobei gleichzeitig der Energieverbrauch reduziert und die Schlamm Eigenschaften verbessert werden sollen [3]. Die Nereda®-Reaktoren können unabhängig vom laufenden Betrieb der Kläranlage erstellt werden, sodass keine Provisorien genutzt werden müssen und eine Verschlechterung der Ablaufwerte während der Bauphasen ausgeschlossen wird.

Die Kläranlage Altena wurde im Jahr 1984 erstmals mit einer Ausbaugröße von 52.000 EW in Betrieb genommen. Aufgrund der rückläufigen Einwohnerzahlen konnte im Jahr 1992 die Ausbaugröße auf 35.000 EW bei einem Mischwasserzufluss von  $Q_M = 350$  l/s reduziert werden. Im Zuge der Genehmigung des erneuten Umbaus konnte eine weitere Reduzierung auf 20.000 EW und  $Q_M = 300$  l/s erreicht werden.

In Tabelle 2 sind die Auslegungsdaten dargestellt.

**Tabelle 2: Auslegungsdaten [Ruhrverband]**

<b>Trockenwetterzufluss</b>	$Q_{T,d}$	m <sup>3</sup> /d	8640	
<b>max. Zufluss</b>	$Q_M$	m <sup>3</sup> /h	1080	
<b>min. Abwassertemp.</b>	$T_{min}$	°C	7	
			<b>Mittlere Belastung</b>	<b>Auslegung (Spitzenbelastung)</b>
<b>Konzentrationen im Zulauf der KA</b>	<b>CSB</b>	mg/l	278	417
	<b>BSB<sub>5</sub></b>	mg/l	102	139
	<b>TKN</b>	mg/l	30	38
	<b>NO<sub>3</sub>-N</b>	mg/l	6,9	13,9
	<b>AFS</b>	mg/l	174	301
	<b>P<sub>ges</sub></b>	mg/l	4,1	6,9
<b>Frachten im Zulauf der KA</b>	<b>CSB</b>	kg/d	2.400	3.600
	<b>BSB<sub>5</sub></b>	kg/d	880	1.200
	<b>TKN</b>	kg/d	255	325
	<b>NO<sub>3</sub>-N</b>	kg/d	60	120
	<b>AFS</b>	kg/d	1.500	2.600
	<b>P<sub>ges</sub></b>	kg/d	35	60

Zur Umsetzung des Verfahrens wurden das bestehende Vorklärbecken zu einem Zulaufausgleichsbecken und das Nachklärbecken zum Ablaufausgleichsbecken umgebaut. Zusätzlich

wurde der Neubau von zunächst zwei Nereda®-Becken sowie eines Maschinenhauses geplant. Aufgrund einer angestrebten größeren Redundanz im Störfall wurden final drei Reaktoren mit gleichem Gesamtbeckenvolumen von 5.100 m<sup>3</sup> umgesetzt (s. Abbildung 4). Die Reaktoren verfügen über eine innovative Methode zur flächigen Beschickung und zum Überschussschlammabzug, die die Selektion von aeroben Granula durch vermehrten Abzug von schwer absetzbaren, flockigem Belebtschlamm ermöglicht. Der Schlamm wird innerhalb der Reaktoren zurückgehalten, wodurch die Sedimentationsfunktion der Nachklärung nicht mehr erforderlich ist.

Im Anschluss an das Fördervorhaben werden die bestehende Schlammbehandlung (Faulung und maschinelle Entwässerung) sowie das bestehende Betriebsgebäude zurückgebaut und ein bedarfsgerechtes Betriebsgebäude errichtet.

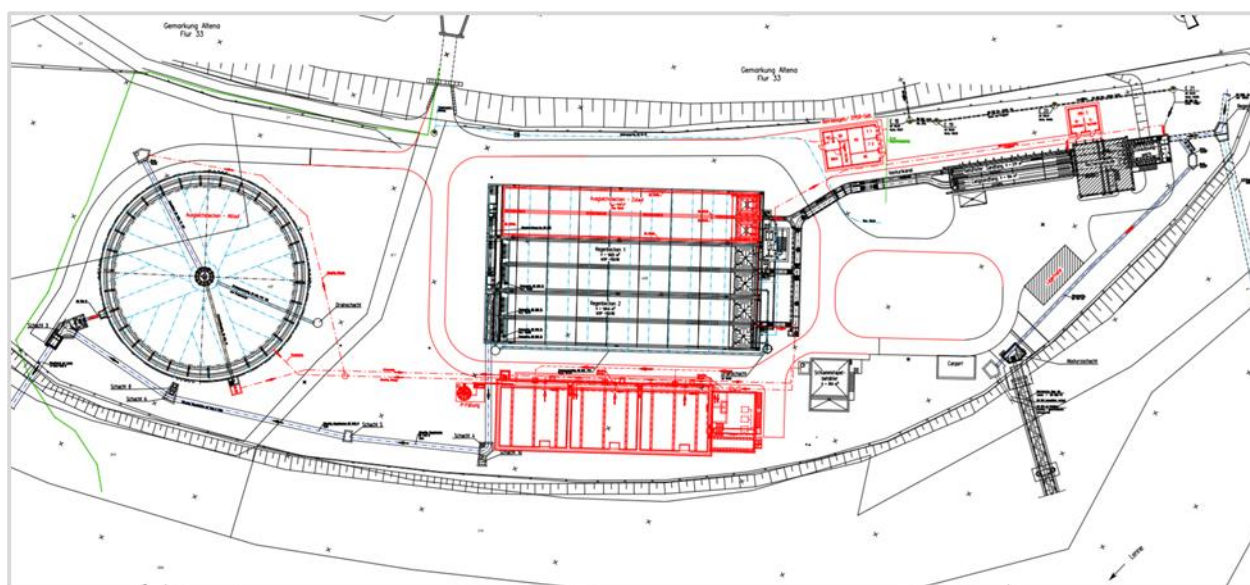


Abbildung 4: Neubau der Biologie nach dem Nereda®-Verfahren [Ruhrverband]

## 2.3 Beschreibung der ausgewählten Verfahrenstechnik zur Erneuerung der biologischen Reinigungsstufe (Nereda®-Verfahren)

### 2.3.1 Beschreibung der Prozesse und Verfahrensführung zur Granulierung des belebten Schlammes

Das patentierte Nereda®-Verfahren ist ein biologisches Verfahren zur Abwasserbehandlung. Es ist als Sequencing Batch Reactor (SBR)-Verfahren einzustufen und basiert im Wesentlichen auf der Bildung gut absetzbarer granulierter Biomasse. Das ankommende Abwasser wird zunächst mechanisch durch Siebung und Sandfang vorgereinigt und in einem Pufferbecken vergleichmäßig. Die anschließende biologische Reinigung im Nereda®-Reaktor verläuft in drei Phasen: kombinierte Beschickungs-/Ablaufphase, Reaktionsphase und Absatzphase (s. Abbildung 5).



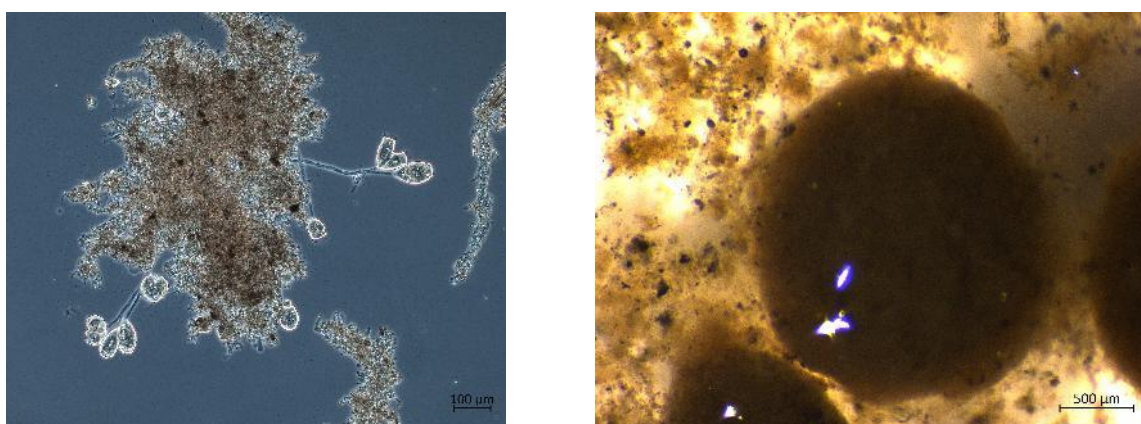
**Abbildung 5: Prinzip-Schema des Nereda®-Verfahrens [Haskoning, [4]]**

Während der Reaktionsphase kann die Länge der belüfteten und unbelüfteten Zeiten je nach Fracht und Umsatzleistung variabel angepasst werden. In dieser Phase erfolgen der Kohlenstoffabbau sowie die Nährstoffelimination (Stickstoff und Phosphor).

Die Prozesssteuerung erfolgt durch die Nereda®-Controller-Software und umfasst die automatische Anpassung der Zykluslänge an den Zulaufvolumenstrom sowie die Anpassung der Belüftungszeiten anhand der gemessenen Prozessdaten (u. a. Ammonium-, Nitrat- und Phosphorkonzentration). Als Ergänzung der biologischen Phosphorelimination wird eine chemische Notfall-Fällung ergänzt.

Mikrobielle Granula stellen eine Sonderform des Biofilms dar, die ohne ein Trägermaterial auskommt. Abbildung 6 sind mikroskopische Bilder einer Belebtschlammflocke aus einer klassischen

Kläranlage und aerobe Granula gegenübergestellt. Wie bei Biofilmen werden auch in Granula die einzelnen Mikroorganismen durch ein Gerüst aus organischen (z. B. Extrazellulären Polymeren Substanzen (EPS)) und anorganischen Verbindungen zusammengehalten und damit in einer räumlichen Struktur fixiert. Entscheidend für die aerobe Granula-Technologie ist der Prozess der Granulabildung, welcher durch das Zusammenwirken mehrerer Faktoren erreicht wird. Zu den wichtigsten Voraussetzungen zählen ein hoher Selektionsdruck durch kurze Absetzphasen, eine hohe Raumbelastung  $> 1 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , starke hydrodynamische Scherkräfte, gute Verfügbarkeit der Kationen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  oder  $\text{Fe}^{3+}$  sowie gut biologisch verfügbares Substrat im Zulauf (s. u. a. [5] [6] [7] [8] [9] [10]).



**Abbildung 6: Mikroskopische Bilder verdeutlichen die Strukturunterschiede: Belebtschlammflocke (links) und aerobe Granula (rechts) [Ruhrverband]**

Verschiedene Strategien zur Granulabildung unter Kombination dieser Faktoren sind labortekhnisch erprobt worden. Großtechnisch dominiert derzeit vor allem die beim Nereda®-Verfahren eingesetzte Methode. Dabei ist die Gestaltung des Zulaufs von besonderer Bedeutung: die Beschickung des Abwassers erfolgt ausschließlich unter anaeroben Bedingungen zu Beginn eines Zyklus und wird als Pfropfenströmung von unten flächig durch das Schlammbett hindurch realisiert [2]. Die anaerobe Beschickungsphase führt zu einer Selektion relativ langsam wachsender Mikroorganismen wie Phosphor-akkumulierende Bakterien (PAO), welche leicht verfügbaren CSB (org. Substrate) unter anaeroben Bedingungen in Form von Speicherpolymeren zunächst zellintern speichern und erst bei Verfügbarkeit von Sauerstoff zum Energiegewinn und Zellwachstum nutzen. Dieses im Vergleich zur direkten Substratverwertung langsamere Wachstumsverhalten führt zur Bildung von kompakten und „glatten“ Biofilmen (hier Granula) [11]. Typischerweise wird ein Teil der Substrate durch diese Bakterien in Extrazelluläre Polymere Substanzen (EPS) umgewandelt, welche als „Leim“ zwischen den agglomerierten Bakterienzellen wirken.

Die Durchströmung des Schlammbeds durch das (unverdünnte) zulaufende Abwasser führt außerdem zu hohen Substratkonzentrationen rund um die Granulen, welche eine Diffusion des Substrats bis ins Innere der Granulen ermöglicht und wiederum zur Bildung kompakter und dichter granulierter Biomasse beiträgt [2]. Die durch das aufsteigende Abwasser sowie die aufsteigenden Luftblasen während der Belüftungsphase erzeugten Scherkräfte tragen zur Glättung und Verdichtung der Granula-Oberflächen und der Ausbildung einer kugelförmigen Struktur bei.

Der Granulierungsprozess wird verfahrenstechnisch unterstützt durch die Einstellung kurzer Sedimentationszeiten und den gezielten Abzug langsam absinkender Schlammpartikel (d. h. Biomasse mit geringer Dichte).

Es entstehen Granula mit einer typischen Schichtfolge der Mikroorganismen:

#### Äußere Schicht (aerob)

Diese Schicht zeichnet sich durch einen hohen Substrat- und Sauerstoffeintrag während der Belüftungsphase aus. Daher siedeln sich hier Bakterien mit aeroben Stoffwechselprozessen (Nitrifikation, Veratmung von organischen Substanzen) an, d.h. die schnell wachsenden heterotrophen Bakterien und Nitrifikanten dominieren in dieser Schicht.

#### Mittlere Schicht (anoxisch)

Der Sauerstoff ist hier bereits stark reduziert und Nitrat aus der Außenzone diffundiert nach innen. Bakterien (Denitrifikanten), die den gebundenen Sauerstoff in Form von Nitrit und Nitrat zur Atmung verwenden können, siedeln überwiegend in der mittleren Schicht. Dadurch wird die simultane Stickstoffelimination in den Granula ermöglicht.

#### Innerer Kern (anaerob)

Die langsam wachsenden Phosphat-akkumulierende Bakterien (PAO), die strikt anaerobe Bedingungen zur Substrataufnahme benötigen, dominieren im inneren Kern der Granula. Hier stehen sie in direkter Substratkonkurrenz mit den ebenfalls langsam wachsenden Glykogen-akkumulierenden Bakterien (GAO), allerdings ohne dass diese selbst Phosphat eliminieren.

### **2.3.2 Reinigungsleistung**

Die biologischen Prozesse unterscheiden sich dabei nicht grundsätzlich von den bisher bekannten Umsatzvorgängen im klassischen Belebungsverfahren, sodass vergleichbare Reinigungsleistungen (Wirkungsgrade) und Ablaufkonzentrationen erreicht werden können. Der Einsatz aerober Granula bietet aber den Vorteil, dass die biologischen Prozesse (Kohlenstoffabbau, Nitrifikation, Denitrifikation und biologische P-Elimination) nicht - wie bei konventionellen Belebungsverfahren

erforderlich - räumlich und zeitlich getrennt werden müssen, sondern gleichzeitig in einem Reaktor ablaufen können. In Kombination mit dem hohen erzielbaren Feststoffgehalt sind damit sehr hohe volumenspezifische Umsatzleistungen erreichbar. An Kläranlagenstandorten mit begrenzter Flächenverfügbarkeit kann damit auch eine biologische P-Elimination eingeführt werden, weil der sonst notwendige zusätzliche Flächenbedarf für eine vorgeschaltete anaerobe Zone entfällt.

Die granulierten Biomasse bietet darüber hinaus den Vorteil einer verbesserten Prozessstabilität:

- die Bildung von Blähschlamm kann durch die gezielte Betriebsführung vermieden werden,
- auch im Winter kann eine stabile Nitrifikation im Gegensatz zu einer konventionellen Belebtschlammanlage gewährleistet werden. Durch die granuläre Struktur kann eine hohe Biomassekonzentration in den Reaktoren gehalten werden kann, in der sich die Nitrifikanten trotz niedriger Wachstumsraten in den äußeren Schichten der Granula anreichern (höhere Retention). Eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentration kann zusätzliche nitrifizierende Biomasse im Inneren der Granula aktivieren,
- aerobe Granula sind hinsichtlich ihrer Struktur und ihrer biologischen Aktivität (Nitrifikation, P-Elimination) im Vergleich zu konventionellen Anlagen relativ unempfindlich gegenüber äußeren Einflüssen, wie z.B. erhöhte Salzkonzentrationen [13], die u.a. im Fall der Schneeschmelze auftreten können.

Die Leistungsfähigkeit des Nereda®-Verfahrens ist bereits in mehreren großtechnischen Anlagen außerhalb Deutschlands nachgewiesen, insbesondere für die Kläranlage Garmerwolde, auf der intensive Untersuchungen stattgefunden haben. [2].

## 2.4 Beschreibung der geplanten Umsetzung des Nereda®-Verfahrens auf der KA Altena und der dazu erforderlichen Maßnahmen

Aufgrund des signifikanten Rückgangs der Bevölkerung und des gewerblich-industriellen Abwasseranteils in diesem Einzugsgebiet wurde der maximale Mischwasserzufluss zur Kläranlage von  $Q_M = 350$  l/s auf  $Q_M = 300$  l/s reduziert. Der Zufluss zur Kläranlage wird über ein erneuertes Schneckenpumpwerk, in die Anlage gehoben. Die vorhandene Rechenanlage wurde aufgrund der Anforderungen des Nereda®-Verfahrens durch eine Siebanlage mit einer Spaltweite (2D) von maximal 6 mm ersetzt. Der nachfolgende belüftete Sandfang ist ausreichend dimensioniert, um Sande der Korngröße 0,16 - 0,2 mm zu 90 - 95 % zu eliminieren, allerdings war eine Betonsanierung sowie einer maschinen- und elektrotechnischen Erneuerung notwendig. Die Sandfanggebläse sowie die Schaltanlagen für die Schneckenpumpen, Rechenanlagen und Sandfanggebläse wurden aufgrund der aktuellen Explosionsschutzverordnungen in einem neuen Maschinenhaus neben dem Rechengebäude aufgestellt.

Das bestehende Vorklärbecken war nicht auftriebssicher und somit als Ausgleichsbecken ohne Umbau nicht nutzbar. Aus diesem Grund wurde in das bestehende Vorklärbecken ein Ausgleichsbecken (Beton) gebaut. Zur Auftriebssicherung wurden beide Becken mit Ankern verbunden, sodass somit das Gewicht der Becken die Auftriebssicherheit gewährleistet. Das Ausgleichsbecken mit einem Volumen von  $V = 1.450$  m<sup>3</sup> erhielt Umwälzaggregate zur Vermeidung von Ablagerungen und Sicherstellung eines ausgeglichenen Zulaufs zu den Nereda®-Becken.

Zur biologischen Reinigung wurden final drei Nereda®-Becken mit einem Volumen von je  $V = 1.700$  m<sup>3</sup> vorgesehen, die wechselweise beschickt werden. Das zufließende Abwasser wird bodennah in die Becken eingeleitet und mittels entsprechender Rohrleitungen gleichmäßig über die Fläche verteilt. Zur Sauerstoffversorgung wurden am Beckenboden Streifenbelüfter installiert. Der Abzug des gereinigten Abwassers erfolgt über mehrere Ablaufrinnen, sodass ein gleichmäßiger Abzug gewährleistet wird. Umwälzaggregate sind nicht erforderlich, da die biologische P-Elimination, die Nitrifikation und die Denitrifikation aufgrund der granulierten Biomasse zeitgleich ablaufen. Während der belüfteten Phasen wird durch den Luftstrom eine ausreichende Durchmischung von Biomasse und Abwasser erzeugt und die Granula in Schwebelage gehalten. Der Abzug des Überschussschlammes erfolgt mittels Schlammabzugsleitungen. Auf die Darstellung konstruktiver Details muss aus Gründen der Geheimhaltung verzichtet werden.

Bestandteil des Nereda®-Verfahrens ist eine moderne Mess-Steuer-Regeltechnik, welche neben der automatisierten Prozesssteuerung auch eine Online-Überwachung sowie Fernzugriff auf wesentliche Steuerelemente erlaubt und damit wesentlich zur Umsetzung der Digitalisierungsstrategie des Ruhrverbandes beiträgt.

Neben den drei Reaktoren wurde ein Maschinenhaus platziert, in dem alle notwendigen Aggregate, wie z. B. Gebläse, Schlammumpfen, Energieversorgung etc. Aufstellung finden. Zur Schlammeindickung und Speicherung stehen der vorhandene Schlammstapelbehälter  $V = 350 \text{ m}^3$  sowie der Trübwasserspeicher  $V = 120 \text{ m}^3$  zur Verfügung. Im Gegensatz zur Altanlage wird der Schlamm zur weiteren Behandlung (anaerobe Stabilisierung, Entwässerung) zur KA Iserlohn-Letmathe abgefahren.

Obwohl bei dem Nereda®-Verfahren die Phosphorentfernung überwiegend biologisch erfolgt, wurde eine Phosphorfällungsanlage mit einem Behälter von  $V = 30 \text{ m}^3$  zur „Notfallfällung“ vorgesehen.

Die vorhandene Stromversorgung erfolgte über ein altes, mittlerweile marodes Kabel, das an keine Ringleitung des Versorgers angeschlossen ist. Aus diesem Grund ist auch ein Notstromaggregat auf der KA Altena fest installiert, welches in der Vergangenheit regelmäßig zum Einsatz kam. Nach Rücksprache mit dem Energieversorger wurde ein neues 10 kV-Kabel über die bestehende Lennerohrbrücke zur Kläranlage verlegt. Ein neues EMSR-Gebäude wurde deshalb im Bereich der Lennebrücke platziert und beinhaltet u. a. die neue Energieversorgung der Kläranlage.

Der Bau der Nereda®-Becken konnte unabhängig vom Betrieb der bestehenden Kläranlage erfolgen. Für den Bau des neuen Betriebs- und EMSR-Gebäudes musste der Gasbehälter und damit das BHKW außer Betrieb genommen werden. Der Abriss der bestehenden Belebungs- sowie der Faulbehälter und des Betriebsgebäudes sowie die Sanierung der Regenüberlaufbecken kann erst nach Inbetriebnahme, Einfahrphase und erfolgreichen Abschluss des großtechnischen Versuchsbetriebs der Nereda®-Becken sowie nach dem Erhalt einer endgültigen Betriebsgenehmigung für die erneuerte Kläranlage durch die Bezirksregierung Arnsberg erfolgen. Dies ist im Anschluss an das hier dargestellte Vorhaben geplant.

## **2.5 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)**

Es waren mehrere Genehmigungen für den Bau und den Betrieb der Kläranlage erforderlich.

Für das Nereda®-Verfahren wurde für die Errichtung und den Betrieb eine wasserrechtliche Genehmigung nach §57 Abs. 2 des Landeswassergesetzes (LWG) NRW eingeholt. Diese Vorschrift stellt sicher, dass die Abwasseranlage den technischen und umweltrechtlichen Anforderungen entspricht.

Aufgrund der Neuartigkeit des Verfahrens wurde zunächst ein zeitlichen befristeter Versuchsbetrieb mit zusätzlichen Auflagen genehmigt.

Folgende spezifischen Nebenbestimmungen hat die Bezirksregierung (außerhalb des UIP-Vorhabens) erlassen:

- 1.1.: Diese Genehmigung ist befristet bis zum 31.12.2026.
- 1.3.: Durchführung eines Probenahme- und Analyseprogramms
- 1.4.: Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse der fortlaufenden Untersuchungen während des großtechnischen Versuchsbetriebes. Halbjährliche Vorlage bei BR Arnsberg und LANUV, Fachbereich 57
- 1.5.: Halbjährliche Besprechungen mit BR Arnsberg zu Versuchsbetrieb und Untersuchungsergebnissen
- 1.6.: Abschlussbericht nach Abschluss des Versuchsbetriebes
- 1.8.: Die konventionelle biologische Abwasserbehandlungsanlage ist bis zum Abschluss des Versuchsbetriebs betriebsbereit vorzuhalten
- 1.16.: Nach der Fertigstellung bzw. der Fertigstellung einzelner Anlagenteile ist der BR Arnsberg Gelegenheit zu geben, im Trockenzustand und nach vollständiger Inbetriebnahme eine Bauzustandsbesichtigung gemäß § 93 LWG durchführen zu lassen. Spätestens 4 Wochen vor der vollständigen Inbetriebnahme der Anlagen oder Teilen hiervon ist die Bauzustandsbesichtigung gemäß § 93 LWG bei der BR zu beantragen
- 1.17.: Werden die Anlagen oder ein Teil hiervon aufgegeben oder geändert, so ist ein Antrag nach § 57 Abs. 2 LWG NRW in der derzeit geltenden Fassung vorzulegen
- 1.18.: Sofern beabsichtigt wird, den Betrieb der geänderten Kläranlage nach dem NEREDA®-Verfahren über den genannten Zeitpunkt hinaus fortzusetzen, ist spätestens ein Jahr vor Ablauf der Befristung nach Nummer 1.1 ein prüffähiger Neuantrag auf Genehmigung der Kläranlage Altena vorzulegen
- 1.19.: Der Umfang des Antrages ist spätestens 2 Jahre vor Ablauf der Befristung dieser Genehmigung mit der BR Arnsberg abzustimmen

Außerdem war für das Maschinenhaus 1, sowie das Maschinenhaus 2 und das EMSR-Gebäude eine Baugenehmigung nach § 74 Abs. 1 BauO NRW erforderlich.

Für den Abriss des Faulbehälters wurde eine Anzeige zur Beseitigung von Anlagen gem. § 62 Abs. 3 BauO NRW 2018 eingereicht.

Für die Einleitung des gereinigten Abwassers aus der KA Altena in das Gewässer ist eine Einleitungserlaubnis erforderlich. Die vorhandene Einleitungserlaubnis ist bis zum 31.05.2027 befristet

und somit noch gültig. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zum Umbau der Kläranlage mit dem Nereda®-Verfahren waren keine Änderungen an der Einleitungserlaubnis erforderlich.

## 2.6 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Zur Steuerung und Überwachung des Abwasserbehandlungsprozesses werden verschiedene Parameter wie  $O_2$ -,  $NH_4$ -N-,  $NO_3$ -N- und  $PO_4$ -P-Konzentration, Trockensubstanzgehalt und Trübung, Redoxpotenzial, pH-Wert, Wasserstand und Temperatur mittels Messsonden bzw. Analyseautomaten in den Becken erfasst (vgl. Abbildung 7 und Kapitel 2.7).

Neben den Messwerten der Online-Sensoren und Analytoren werden die Drücke und Luftmengen im Luftverteilsystem gemessen, sowie die Füllstände in den Verfahrensstufen. Zusätzlich werden die Stellungsrückmeldungen von Schiebern und Klappen, die Betriebsstunden ausgewählter Aggregate, die Leistungsaufnahme aller relevanten Verbraucher, die Verbrauchsdaten eingesetzter Chemikalien und Hilfsmittel (z. B. Essigsäure oder Eisen-III-Chlorid-Lösung) sowie die Durchflussmessungen relevanten Abwasser- und Teilströme, wie beispielsweise der Trübwasserrezirkulation, erfasst. Die Betriebsdaten werden in einem zentralen System (ACRON) als Prozessgrößen archiviert, wobei die kleinste Auflösung 1-Minutenmittelwerte beträgt und bei Bedarf eine höhere Verdichtung möglich ist.

Die Laboranalysen (s. Abbildung 7, Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** f.) werden einerseits durch das Kooperationslabor in einer eigenen Datenbank archiviert, andererseits werden die auf der Anlage erhobenen Messwerte in der betrieblichen Datenbank gespeichert. Die Auswertung der relevanten Kenngrößen erfolgt sowohl im Rahmen des betrieblichen Controllings als auch durch Verfahrenstechniker, die hierfür Kalkulations- und Visualisierungsprogramme wie u.a. Excel oder Tableau einsetzen.

Auch durch den Dienstleister Haskoning erfolgt eine Aufbereitung und Visualisierung zum einen innerhalb des Nereda®-Controllers, bei dem Echtzeitdaten kombiniert mit den Phasenanforderungen des SBR-Zyklus der letzten zwei Wochen dargestellt werden, und zum anderen über eine externe Plattform MyWaterPortal<sup>1</sup>. Hier werden auch betriebliche Kennzahlen gebildet, die es dem Betreiber ermöglichen, das Betriebsverhalten zu bewerten.

Darüber hinaus existiert ein Stromzähler-Messkonzept, nach dem alle größeren Verbraucher der Anlage mit Stromzählern ausgestattet sind. Auf Grundlage dieses Strommessplans wird der Energieverbrauch erfasst und nach der im DWA-Merkblatt M 216 festgelegten Methode durch die Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft (WiW GmbH) eine Energieanalyse durchgeführt.

---

<sup>1</sup>MyWaterPortal: <https://nereda.haskoning.com/en/mywaterportal>



## 2.7 Konzeption und Durchführung des Messprogramms

Zur Erfolgskontrolle wurde nach Abschluss der Inbetriebnahmephase und förmlicher Abnahme der Anlage ein umfangreiches durch das im Rahmen des UIP-Vorhabens in Teilen geförderte Monitoringprogramm gestartet (s. Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** f.). Während der Inbetriebnahmephase waren die beschriebenen Onlinemessungen bereits verfügbar, alle anderen Untersuchungen wurden nach Bedarf für einen effizienten Ablauf der Inbetriebnahme durchgeführt. Das Monitoringprogramm hatte eine Laufzeit von 2 Jahren (entspricht der Laufzeit der Genehmigung als großtechnische Versuchsanlage). Nach dieser Zeit wurde das Monitoring in die übliche Selbstüberwachung der Kläranlage überführt. Die Onlinemessungen verbleiben dauerhaft in geschilderter Form in der Anlage und sind Teil der Prozesssteuerung.

Die Probenahme erfolgte durch das Anlagenpersonal. Für die Mischproben kamen automatische Probenehmer zum Einsatz. Die Analytik wurde durch das Kooperationslabor von Ruhrverband, Emschergenossenschaft und Lippeverband durchgeführt (seit 2015 nach DIN EN ISO 17025 akkreditiert, zugleich zertifiziert und zugelassen als staatliche Untersuchungsstelle der wasser- und abfallrechtlichen Überwachung).

### 2.7.1 Onlinemessungen

#### Onlinesonden (kontinuierliche Messung):

Sauerstoffkonzentration, Redoxpotenzial, Temperatur, Wasserstand, Feststoffkonzentration und Trübung, Nitratmessung (0,5 m unter dem Wasserstand des Reaktors; d. h., während der Befüllungsphase, wenn der Reaktorinhalt nicht durchmischt ist, kann die Ablaufkonzentration gemessen werden, die Messwerte während der Reaktionsphase (durchmischt) dienen der Prozesssteuerung). Die Messungen erfolgen in der Regel im 1-Minuten-Takt.

#### Diskontinuierliche automatische Messung:

Ammonium und Phosphat in 5 - 10 min Intervallen (z. B. Hach Lange; Filtrax, AMTAX und PHOSPHAX) (Probenahmestellen für Ammonium und Phosphat befinden sich 0,5 m unter dem Wasserstand des Reaktors; d. h., während der Befüllungsphase, wenn der Reaktorinhalt nicht durchmischt ist, kann die Ablaufkonzentration gemessen werden; die Messwerte während der Reaktionsphase (durchmischt) dienen der Prozesssteuerung).

### 2.7.2 Stichproben

- Wöchentliche Probenahme zur Bestimmung der Biomassenkonzentration und Größenverteilung der Biomassenpartikel im Reaktor (Probenahme während Durchmischung oder während

Sedimentationsphase in verschiedenen Tiefen), Bestimmung der Größenverteilung über Siebung (212 und 600 µm Siebe), Bestimmung der Trockensubstanz- (TS) und organischen Trockensubstanz (oTS), Schlammindex (ISV) nach DIN-Verfahren.

- Monatliche Probenahme zur Bestimmung der Biomassenkonzentration und Größenverteilung der Biomassenpartikel im ÜSS.
- Wöchentliche 24 h-Mischprobe im Zulauf und Ablauf KA (Einleitstelle) zur Bestimmung der Konzentrationen für NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, N<sub>ges</sub>, P<sub>ges</sub> und CSB.
- Monatliche qualifizierte Stichproben im Ablauf des Nereda®-Reaktors und Bestimmung der Konzentrationen für NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, N<sub>ges</sub>, P<sub>ges</sub> und CSB.
- Wöchentliche Probenahme zur Bestimmung des TR und oTR im eingedickten Schlamm.

### 2.7.3 Sondergrößen und Kennwerte:

- Intensivmesswoche zur Bilanzierung von abfiltrierbaren Stoffen (täglich mengenproportionale Mischproben aus Zu- und Ablauf eines Behandlungszyklus für beide Reaktoren).
- Getrennte Aufzeichnung der Stromabnahme aller relevanten Aggregate (Zulaufpumpen, Gebläse) und frachtspezifische Auswertung; daraus Berechnung der eingetragenen Luftmengen.
- Aufzeichnung der eingesetzten Fällmittelmenge und Auswertung der biologisch bzw. chemisch eliminierten P-Fracht.
- 6x/Jahr Probenahme während der belüfteten Phase und Bestimmung der Nitrifikationsleistung (Batchtest) und Bestimmung der Biomassenzusammensetzung (FISH-Analytik).

## 3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

### 3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung

#### 3.1.1 Planung

Das Projekt war durch komplexe Schnittstellen zwischen den beteiligten Partnern geprägt, die sich über drei Ländergrenzen erstreckten und sprachliche Barrieren überwinden mussten.

Da das Nereda®-Verfahren patentrechtlich geschützt ist, hat der Patentinhaber Haskoning (Niederlande) im Rahmen detaillierter vertraglicher Vereinbarungen die Erstellung der Vor- und Entwurfsplanung, die Konzeption und Implementierung der Steuerung, die Lieferung von Impfschlamm sowie die Betriebsberatung übernommen.

Als Lizenznehmerin für die Schweiz war die WABAG Wassertechnik AG für die Ausführungsplanung, Lieferung und Montage der verfahrenstechnischen Ausrüstung im Nereda®-Reaktor sowie

für Abnahme, Inbetriebnahme und die maschinentechnische Prozessgarantie verantwortlich. Durch ihre Rolle als Lizenznehmerin war sie mit den Lizenzbedingungen und Geheimhaltungsklauseln vertraut und stand dem Ruhrverband zudem als deutschsprachiger Partner zur Seite.

Die Genehmigungs- und bauseitige Ausführungsplanung sowie Ausschreibungen, Vergaben und die Bauleitung wurden vom Ruhrverband weitgehend in Eigenleistung durchgeführt.

In der Planungsabteilung des Ruhrverbandes werden die HOAI-Leistungsphasen 1 bis 5 durchgeführt, weshalb ein weiteres Ziel darin bestand, das Know-How zur Planung des Nereda®-Verfahrens für zukünftige weitere Umsetzungen aufzubauen. In der Regel liegt aber die gesamte Ausführungsplanung in der Hand der Lizenznehmer von Haskoning, wodurch sich bei der Planung durch den Ruhrverband einige Schwierigkeiten ergaben. Die von Haskoning bereitgestellten Planungsdokumente lagen ausschließlich in englischer Sprache vor und mussten vorab übersetzt werden. Zudem waren die Unterlagen in ihrer Detailtiefe auf die Durchführung durch die Lizenznehmer ausgelegt, was - verglichen mit dem herkömmlichen Vorgehen - einen intensiveren Austausch zwischen den drei Projektpartnern Haskoning, WABAG und Ruhrverband erforderte.

### 3.1.2 Bauphase

Der Umbau erfolgte in mehreren Bauphasen, die nachfolgend beschrieben sind.

In **Bauphase 0** begann das Projekt mit dem Abriss eines Faulbehälters und dem Neubau eines EMSR-Gebäudes mit Stromversorgung sowie eines Maschinenhauses für die elektrotechnische Versorgung des Zulaufbereiches und einem Aufstellort für die Sandfanggebläse.

In **Bauphase 1** wurden die Zulaufschnecken und Rechen erneuert sowie das Ausgleichsbecken zur Zwischenspeicherung in die bestehenden Vorklär- und Ausgleichsbecken integriert, um Auftriebssicherheit zu gewährleisten.

Darauf folgte der Bau der drei Reaktoren und die interne Ausstattung u.a. mit Rohrleitungen, Belüfterelementen und Ablaufrinnen für den gleichmäßigen Abwasserabzug in der **Bauphase 2**. Direkt angrenzend an die Reaktoren entstand das Maschinenhaus 2 mit allen für den Nereda®-Prozess erforderlichen Aggregaten sowie zwei Überschussschlamm-Voreindickern. Das bestehende Nachklärbecken wird nicht mehr als solches benötigt und erhält zur Abflussregulierung einen Drosselschieber. Trotz Corona-Pandemie verlief die Bauphase nahezu reibungsfrei, so dass nach dem Baubeginn im November 2019 der Umbau Mitte 2022 beendet war.



Abbildung 8: Nereda®-Reaktoren inkl. Voreindicker und Maschinenhaus nach der Fertigstellung [Ruhrverband]

### 3.1.3 Impfschlammanlieferung und Inbetriebnahmephase

Nach Abschluss der baulichen Arbeiten sowie der maschinen- und elektrotechnischen Ausstattung aller Anlagenteile führte Haskoning sowohl den Factory Acceptance Test (FAT) als auch den Site Acceptance Test (SAT) durch. Der FAT ist eine strukturierte Abnahme beim Hersteller vor der Auslieferung, während der SAT eine Abnahmeprüfung vor Ort nach Installation und Inbetriebnahme umfasst. Im Zuge dessen wurde der Nereda®-Controller in das zentrale Steuerungssystem der Kläranlage integriert. Die Tests wurden im 2. Quartal 2022 erfolgreich abgeschlossen.

Im Juli und August 2022 folgte eine dreiwöchige Impfschlammkampagne, bei der die drei Nereda®-Reaktoren wie geplant mit granularem Schlamm auf eine TS-Konzentration von 6 g/l angeimpft wurden. Der aufkonzentrierte Impfschlamm wurde aus den niederländischen Anlagen Utrecht und Dinxperlo angeliefert (TR ca. 3 %) und vom Pumpwagen in einen Anhänger mit Vakuumpumpe verladen und mit einem Traktor auf das Kläranlagengelände transportiert, um die Granula-Struktur zu erhalten. Diese Maßnahme war notwendig, da aufgrund der beengten Zufahrt die Pumpwagen das Anlagengelände nicht befahren konnten. Vor Ort wurden die Lieferungen stichprobenartig auf TR-Gehalt und Absetzverhalten geprüft. Während der dreiwöchigen Kampagne war eine intermittierende Belüftung notwendig, eine Substratzufuhr jedoch nicht.



**Abbildung 9: Impfschlammanlieferung [Ruhrverband]**

Am 22.08.2022 begann die achtwöchige Einfahrphase, in der die Reaktoren bereits den gesamten Abwasserstrom behandelten. In dieser Zeit hat sich der granuliert Schlamm an die Zulaufzusammensetzung in Altena adaptiert und sein volles Leistungsvermögen erreicht. Zur sicheren Einhaltung aller Überwachungswerte wurde der Ablauf der Nereda®-Reaktoren in dieser Phase über die bestehenden Belebungsbecken geführt. Nach Abschluss der Einfahr- und Inbetriebnahmephase sowie der förmlichen Abnahme der Anlage erfolgte eine 60-tägige Leistungsfahrt. Diese wurde im 2. Quartal 2023 durchgeführt, da eine bemessungsrelevante Abwassertemperatur von 12 °C während der Leistungsfahrt einzuhalten war. Die vorgegebenen Zielwerte wurden überwiegend mit sehr guten Ergebnissen erreicht (vgl. Tabelle 3 und Tabelle 4). Sämtliche Messwerte lagen deutlich unter den geforderten Grenzwerten, mit Ausnahme des CSB-Betriebsmittelwertes, der aufgrund einer Unterschätzung des gelösten refraktären CSB im Abwasser nicht vollständig eingehalten werden konnte. Auch weil der CSB-Betriebsmittelwert im Ablauf nur geringen Schwankungen unterlag, ist das erzielte Ergebnis aus Betreibersicht dennoch zufriedenstellend. Diese positiven Ergebnisse haben sich auch in den folgenden beiden Betriebsjahren bzw. im zweijährigen Demonstrationsbetrieb, der vom 14.06.2023 bis zum 13.06.2025 erfolgte, bestätigt (siehe dazu Kapitel 3.2.1).

**Tabelle 3: Einhaltung des Überwachungswertes während der 60-tägigen Leistungsfahrt [Ruhrverband]**

Parameter	Einheit	Geforderter Überwachungswert	Maximalwert aller qual. Stichproben	Anzahl der Analysen
<b>CSB</b>	mg/l	45	29,4	67
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	mg/l	3	1,6	68
<b>N<sub>anorg</sub></b>	mg/l	17	10,7	66
<b>P<sub>ges</sub></b>	mg/l	1	1,0	65

**Tabelle 4: Einhaltung des Betriebsmittelwertes während der 60-tägigen Leistungsfahrt [Ruhrverband]**

Parameter	Einheit	Geforderter Betriebsmittelwert	Betriebsmittelwert	Anzahl der Analysen
<b>CSB</b>	mg/l	15,0	19,5	42
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	mg/l	0,4	0,3	44
<b>N<sub>anorg</sub></b>	mg/l	10,0	5,4	40
<b>P<sub>ges</sub></b>	mg/l	0,8	0,58	42

Die Inbetriebnahme verlief damit grundsätzlich sehr positiv. Dennoch sind auch betriebliche Probleme z.B. im Bereich der Programmierung im Schnittstellenbereich zwischen dem Nereda®-Controller und der Anlagensteuerung oder durch gestörte Aggregate (z.B. Rechen, Luftklappen) aufgetreten, die im Verlauf der Inbetriebnahme behoben werden mussten. Ein ausführlicher Erfahrungsbericht ist im Kapitel 4.1 zu finden.

## 3.2 Stoff- und Energiebilanz

### 3.2.1 Stoffbilanz (Bewertung der Nährstoffelimination)

#### Vergleich der Ablaufqualität bzw. -konzentrationen (Betriebsmittelwerte)

Für den Zustand nach der Erneuerung und Umstellung auf das Nereda®-Verfahren wurden gemäß Förderantrag die folgenden Ablaufkonzentrationen erwartet:

CSB:	16 mg/l
N <sub>anorg</sub> :	10 mg/l
NH <sub>4</sub> -N:	0,6 mg/l
P <sub>ges</sub> :	0,8 mg/l

Die dargestellten Werte für die Parameter N<sub>anorg</sub>, NH<sub>4</sub>-N und P<sub>ges</sub> werden darüber hinaus als zukünftig einzuhaltende Betriebsmittelwerte definiert. Die Vorgaben beruhen auf einer durch die Bezirksregierung Arnsberg durchgeführten Mischrechnung und sind neben den Überwachungswerten einzuhalten.

Für die Überprüfung werden die Betriebsergebnisse aus dem Zeitraum des Demonstrationsbetriebes der neuen Anlage (14.06.2023 bis 13.06.2025, s.) mit einem Vergleichszeitraum (2019-2021, s. Tabelle 5) der Altanlage verglichen.

**Tabelle 5: Ablaufkonzentrationen der KA Altena vor der Verfahrensumstellung [Ruhrverband]**

2019-2021	Zulauf KA	Zulauf Belebung	Ablauf KA
Konzentrationen	mg/l	mg/l	mg/l
CSB	151,3	89,9	15,9
CSB <sub>filtriert</sub>	-	38,7	-
N <sub>ges</sub>	20,9	23,5	8,8
TKN	17,2	19,6	1,0
P <sub>ges</sub>	2,4	1,9	0,7
NH <sub>4</sub> -N	-	-	0,7
Q <sub>d</sub> [m <sup>3</sup> /d]		11.629	
JAWM [m <sup>3</sup> /a]		4.244.555	

**Tabelle 6: Ablaufkonzentrationen der KA Altena nach der Verfahrensumstellung [Ruhrverband]**

06/2023/06-2025	Zulauf KA	Zulauf Belebung (Nereda®)	Ablauf Belebung (Nereda®)	Ablauf KA
Konzentrationen	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
<b>CSB</b>	153,8	153,3	23,6	15,8
<b>CSB<sub>filtriert</sub></b>	31,5	33,7	15,4	13,8
<b>N<sub>ges</sub></b>	18,9	18,4	4,8	4,9
<b>TKN</b>	15,0	15,0	1,4	1,0
<b>N<sub>anorg</sub></b>	12,9	12,2	-	4,4
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	-	-	0,33	0,36
<b>P<sub>ges</sub></b>	2,6	2,7	0,81	0,54
<b>AFS</b>	120,9	124,5	12,9	3,5
<b>Q<sub>d</sub> [m<sup>3</sup>/d]</b>		15.278		
<b>JAWM [m<sup>3</sup>/a]*</b>		5.473.406		

\*Mittelwert der Jahre 2023 und 2024

Hier ist festzuhalten, dass alle Zielvorgaben bzgl. der Ablaufkonzentrationen erreicht worden sind. Insbesondere bei den Stickstoffparametern (NH<sub>4</sub>-N und N<sub>anorg</sub>) wurden die Vorgaben sogar deutlich übertroffen. Die Ammoniumablaufkonzentration wurde mit 0,36 mg/l im Vergleich zur Altanlage um ca. 50 % reduziert und der Vorfluter damit deutlich entlastet. Die Reduktion der Ablaufkonzentration des Gesamtstickstoffs (-3,9 mg/l) ist zudem maßgeblich auf die bessere Denitrifikationsleistung, also den Abbau von Nitrat-Stickstoff, zurückzuführen.

Beim CSB wirkt sich der zusätzliche Rückhalt an partikulären Stoffen in dem beibehaltenen Nachklärbecken aus, welches für das Verfahren optional ist. Anzumerken ist jedoch, dass der hier angesetzte Zielwert mit 16 mg/l bei konventionellen Belebtschlammanlagen ohne Filterstufe üblicherweise nicht sicher erreicht werden kann. In Belebtschlammverfahren ist davon auszugehen, dass der abbaubare CSB vollständig eliminiert wird, wodurch die Restfraktion als inert (nicht abbaubar) angesehen werden kann. Die inerte Restfraktion ist dann i.d.R. abhängig von der kläranlagenspezifischen Zulaufzusammensetzung, worauf der Anlagenbetreiber keinen Einfluss hat. Zum anderen stößt man in diesem niedrigen Messbereich an Grenzen. Diese Auswertung kombiniert die Ergebnisse von Küvettenanalysen nach ISO 15705 mit einem Messbereich von 5 bis 60 mg/l und titrimetrischen Laboranalysen nach der DIN 38409-41:1980-12 mit einem unteren Messbereich von 15 mg/l. Bei der Bestimmung des arithmetischen Mittelwerts wird bei Unterschreitung des unteren Messbereichs dieser Wert verwendet. Dadurch kann es zu Verschiebungen bei der Auswertung kommen und zu einem überhöhten Mittelwert führen.

Die Rückhaltewirkung für partikuläre Stoffe in der Nachklärung wirkt sich ebenso auf den Parameter Gesamtphosphor aus. Während die Ablaufkonzentration im Ablauf der Nereda®-Reaktoren mit 0,81 mg/l nur knapp über dem Zielwert liegt, führt die Absetzwirkung zu einer weiteren deutlichen Reduktion auf 0,54 mg/l. Um Fällmittel einzusparen, wurde das Betriebsziel im Ablauf der Nereda®-Reaktoren höher angesetzt, da die Rückhaltewirkung durch die Nachklärung ausgenutzt wird. Durch eine Erhöhung des internen Betriebsziels (Sollwerte) kann die Ablaufkonzentration der Nereda®-Reaktoren theoretisch weiter gesenkt werden.

### **Betrachtung der Frachtelimination und des Abbaugrads**

Bei einem Vergleich der Zulauffrachten zwischen dem Vergleichszeitraum der Altanlage (s. Tabelle 7) und dem Zeitraum des Demonstrationsbetriebs (s. Tabelle 8) fällt auf, dass die frachtmäßige Belastung sehr ähnlich ist. Ein größerer Unterschied ergibt sich bei der Zulaufmenge zur Kläranlage, die im Demonstrationszeitraum aufgrund der hohen Niederschlagsmengen um etwa 29 % höher ausfällt. Durch die höhere Wassermenge wird die Zulaufkonzentration stärker verdünnt. Die erreichten Eliminationsraten sind unter Berücksichtigung der höheren Zuflussmengen zu diskutieren, da die Steuerung im Betrieb auf die zu erreichenden Ablaufkonzentrationen reagiert. Bei erhöhter Verdünnung im Zulauf wird also tendenziell eine geringere Fracht eliminiert und der Abbaugrad ist geringer bzw. weniger gut vergleichbar.

Für die Reduzierung der Restschmutzfrachten im Ablauf der Kläranlage wurden Erwartungswerte im Förderantrag formuliert, die sich wie folgt unter Berücksichtigung der Jahresabwassermenge 4.450.600 m<sup>3</sup>/a ergeben:

CSB: 8.900 kg/a

N<sub>anorg</sub>: 2.225 kg/a

NH<sub>4</sub>-N: 1.780 kg/a

### **CSB-Frachten**

Im Vergleichszeitraum wird eine CSB-Fracht von 1.574,4 kg/d bzw. 574.656 kg/a eliminiert. Demgegenüber steht eine Frachtelimination von 1.533,9 kg/d bzw. 560.640 kg/a auf zwar einem ähnlichen Niveau, bilanziell ist dies jedoch eine Verringerung um 14.016 kg/a. Bei der Bewertung ist hier der oben beschriebene Effekt zu berücksichtigen, dass hier zwar eine größere Wassermenge, aber eine vergleichbare Fracht behandelt wurde. Neben dem Einfluss der analytischen Methoden ist damit zu erklären, dass es bilanziell trotz einer gleichbleibenden und für Anlagen ohne Filterstufe sehr geringen CSB-Ablaufkonzentration von unter 16 mg/l zu einer geringeren Frachtelimination kommt (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 6).

### Stickstofffrachten

Bei der Frachtelimination des Gesamtstickstoffs zeigt sich trotz der höheren Wassermenge im Demonstrationszeitraum ein anderes Bild. Es wurde eine Gesamtstickstofffracht von 160,6 kg/d bzw. 58.700 kg/a eliminiert. Im Vergleichszeitraum der Altanlage betrug die Frachtelimination 140,5 kg/d bzw. 51.286 kg/a. Damit wird der Erwartungswert von 2.225 kg/a bei der Reduktion des anorganischen Stickstoffs mit 7.414 kg/a deutlich übertroffen. Die Steigerung zeigt sich auch an einem um 11,4 % verbesserten Abbaugrad beim Gesamtstickstoff. Dies ist insbesondere auf eine verbesserte Denitrifikationsleistung, also den Abbau von Nitrat-Stickstoff, zurückzuführen. Auch beim Ammoniumabbau hat sich eine Verbesserung eingestellt. Im Vergleich beträgt die Verringerung der Ablauffracht etwa 3,1 kg/d bzw. 1.133 kg/a, liegt damit aber etwas unterhalb des Erwartungswertes aus dem Förderantrag. Auch hier ist aber festzuhalten, dass sich bzgl. der Ablaufkonzentrationen eine deutliche Verbesserung eingestellt hat und eine weitere Absenkung der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentration nicht das Betriebsziel war. Zudem ist es auch fraglich, ob dies unter den gegebenen Umständen ohne erheblichen Mehraufwand bzw. Eingriff in die Betriebsweise erreichbar ist. Aus Betreibersicht sind die erreichten Ablaufwerte sehr zufriedenstellend.

### Phosphorelimination und Abfiltrierbare Stoffe

Bei der Phosphorelimination ergibt sich trotz Verbesserung bei der Ablaufkonzentration aufgrund der höheren Wassermenge eine moderate Verbesserung bei der Frachtelimination von 0,4 kg/d bzw. 146 kg/a. Dies ist insbesondere auf die oben beschriebene Rückhaltewirkung der partikulären Stoffe in der weiterhin durchflossenen Nachklärung zurückzuführen. So beträgt die Elimination der abfiltrierbaren Stoffe durch die Nachklärung immerhin 127,5 kg/d bzw. 46.600 kg/a und hat damit einen bedeutenden Anteil an der Reduzierung der Restschmutzfrachten.

**Tabelle 7: Zu- und Ablauffrachten der Altanlage im Vergleichszeitraum [Ruhrverband]**

2019-2021	Zulauf KA	Zulauf Belebung	Ablauf KA	Abbaugrad Belebung	Abbaugrad Gesamt
Frachten	kg/d	kg/d	kg/d	%	%
<b>CSB</b>	1.759,6	1046	185,2	82,3	89,5
<b>CSB<sub>filtriert</sub></b>		450	-	-	-
<b>N<sub>ges</sub></b>	242,7	273	102,2	62,6	57,9
<b>TKN</b>	199,7	228	11,6	94,9	94,2
<b>P<sub>ges</sub></b>	28,0	22	8,1	63,2	71,1
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	-	-	8,1	-	-
<b>Q<sub>d</sub> [m<sup>3</sup>/d]</b>		11.629			
<b>JAWM [m<sup>3</sup>/a]</b>		4.244.555			

**Tabelle 8: Zu- und Abauffrachten der Nereda®-Anlage im Demonstrationszeitraum [Ruhrverband]**

06/2023-06/2025	Zulauf KA	Zulauf Belebung (Nereda®)	Ablauf Belebung (Nereda®)	Ablauf KA	Abbaugrad Belebung/ Nereda®	Abbaugrad Gesamt (Zulauf/Ablauf KA)
Frachten	kg/d	kg/d	kg/d	kg/d	%	%
<b>CSB</b>	1.756,1	1903,8	320,1	222,2	83,2	87,3
<b>CSB<sub>filtriert</sub></b>	405,2	407,0	208,7	196,4	48,7	51,5
<b>N<sub>ges</sub></b>	231,7	223,2	69,9	71,1	68,7	69,3
<b>TKN</b>	172,9	175,0	18,6	13,8	89,4	92,0
<b>N<sub>anorg</sub></b>	164,8	146,1	60,0	63,8		
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	-	-	4,99	5,05		
<b>P<sub>ges</sub></b>	31,4	32,7	11,2	7,7	65,8	75,4
<b>AFS</b>	1417,7	1611,7	178,0	50,5	89,0	96,4
<b>Q<sub>d</sub> [m³/d]</b>		15.278				
<b>JAWM* [m³/a]</b>		5.473.406				

\*Mittelwert der Jahre 2023 und 2024

### Überwachungswerte

Die behördliche Überwachung der Ablaufkonzentration erfolgt nicht anhand einer zuflussproportionalen Mischprobe über 24 Stunden, sondern anhand einer qualifizierten Stichprobe<sup>2</sup>. Die KA Altena (Größenklasse 4) hat gemäß der Einleitungserlaubnis die in Tabelle 9 aufgeführten (alten) Überwachungswerte einzuhalten. Die bestehende Einleitungserlaubnis ist bis zum 31.05.2027 befristet. Für die Zeit danach wurden ebenfalls bereits die einzuhaltenden (neuen) Überwachungswerte in Abstimmung mit der Bezirksregierung Arnsberg definiert.

**Tabelle 9: Alte und neue (angestrebte) Überwachungswerte für die Ablaufkonzentration in der qualifizierten Stichprobe<sup>2</sup> [Ruhrverband]**

Parameter	Alte Überwachungswerte [mg/l]	Neue Überwachungswerte [mg/l]
<b>CSB</b>	45,0	45,0
<b>BSB<sub>5</sub></b>	19,0	-
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	9,0	5,0
<b>N<sub>anorg</sub></b>	17,0	17,0
<b>P<sub>ges</sub></b>	1,8	1,8

<sup>2</sup> Eine **qualifizierte Stichprobe** ist eine Mischprobe, die aus mindestens fünf Einzelproben besteht, die in einem Zeitraum von höchstens zwei Stunden entnommen und gemischt werden. Der Abstand zwischen den einzelnen Probenahmen sollte dabei nicht weniger als zwei Minuten betragen.

### Stickstoff-Überwachungswerte

Ein Vorher-Nachher-Vergleich der gemessenen Stickstoffkonzentration im Ablauf der Kläranlage mittels qualifizierter Stichprobe (vgl. Abbildung 10 und Abbildung 11) dokumentiert die deutliche Verbesserung bei der Nährstoffelimination. Beim anorganischen Stickstoff ( $N_{anorg} = NH_4-N + NO_3-N + NO_2-N$ ) waren die Konzentrationen breiter gestreut und die Werte lagen oftmals zwischen 6 und 12 mg/l, wohingegen nach dem Umbau häufig eine Konzentration von 4 mg/l unterschritten und ein Maximalwert von 7 mg/l nur sehr selten überschritten wird. Auch die Ammoniumkonzentration wies in der Vergangenheit eine breitere Streuung auf, sodass häufig Ablaufkonzentrationen von bis zu 2 mg/l gemessen wurden. Nach der Umstellung wird nur noch selten eine Ablaufkonzentration von 0,5 mg/l überschritten. Für die Stickstoffparameter zeigt sich demnach ein positiver Effekt, indem deutlich geringere Ablaufkonzentrationen sicher eingehalten werden. Dies entlastet das Gewässer und senkt das Risiko für eine Überschreitung von Überwachungswerten.

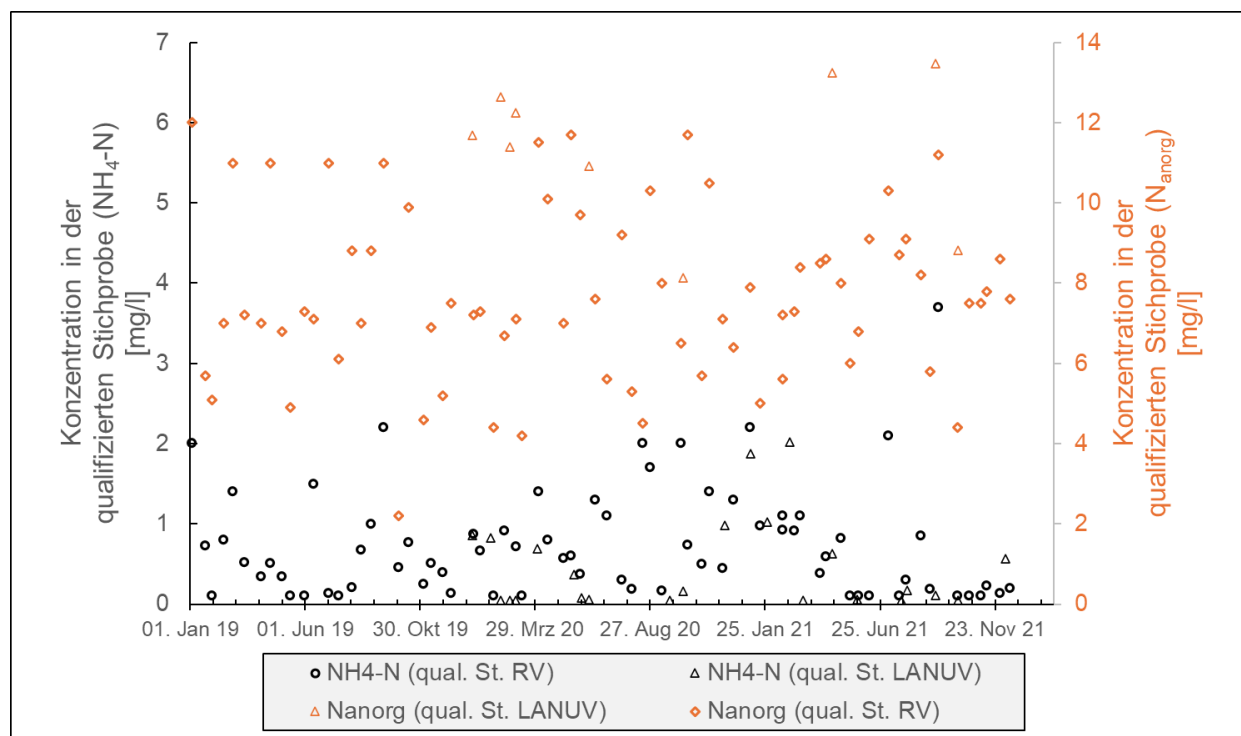


Abbildung 10: Ergebnisse der qualifizierten Stichprobe für die Stickstoffparameter im Ablauf der Kläranlage im Zeitraum 2019-2021 (RV=Analytik durch Ruhrverbandslabor; LANUV= Analytik durch LANUV) [Ruhrverband]

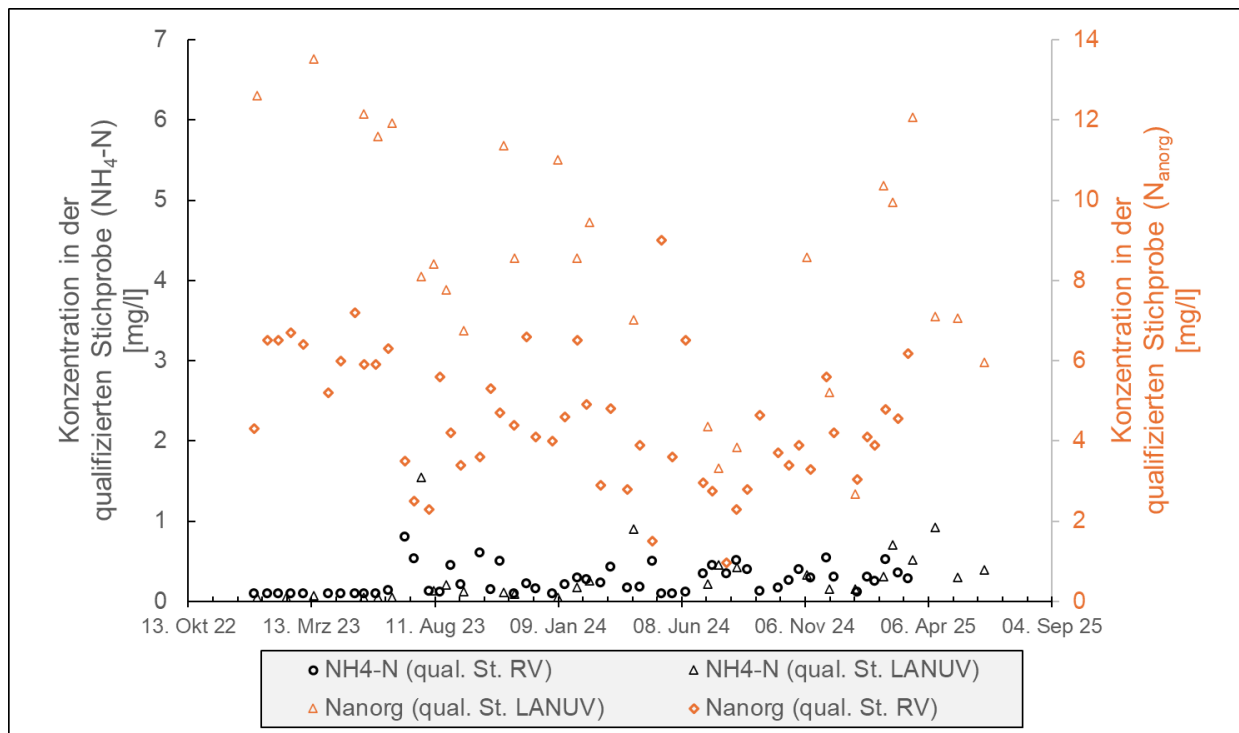


Abbildung 11: Ergebnisse der qualifizierten Stichprobe für die Stickstoffparameter im Ablauf der Kläranlage im Zeitraum 2023 – Mitte 2025 (RV=Analytik durch Ruhrverbandslabor; LANUV= Analytik durch LANUV) [Ruhrverband]

### CSB- und Gesamtphosphor-Überwachungswerte

Der Vorher-Nachher-Vergleich der CSB- und Phosphorkonzentration in der qualifizierten Stichprobe (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 13) zeigt ein nahezu unverändertes Bild. Die Überwachungswerte können auch mit dem neuen Verfahren sicher eingehalten werden. Beim Gesamtphosphor sind aufgrund des strengeren Betriebsziels von 0,8 mg/l im Mittel geringere Ablaufkonzentrationen erkennbar. Zur Erreichung dieser Ablaufkonzentration kommt nach wie vor Fällmittel zum Einsatz, so dass diese Verbesserung nicht mit dem neuen Verfahren begründet werden kann.

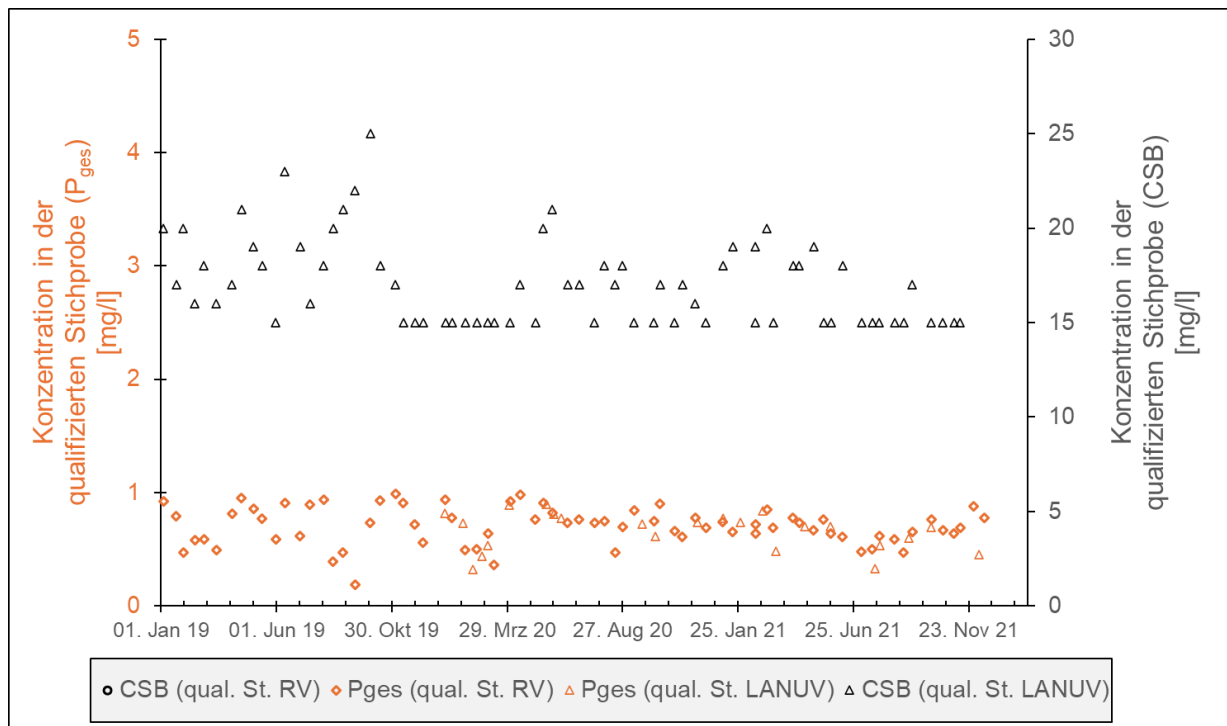


Abbildung 12: Ergebnisse der qualifizierten Stichprobe für CSB und Gesamtphosphor im Ablauf der Kläranlage im Zeitraum 2019-2021 (RV=Analytik durch Ruhrverbandslabor; LANUV= Analytik durch LANUV) [Ruhrverband]

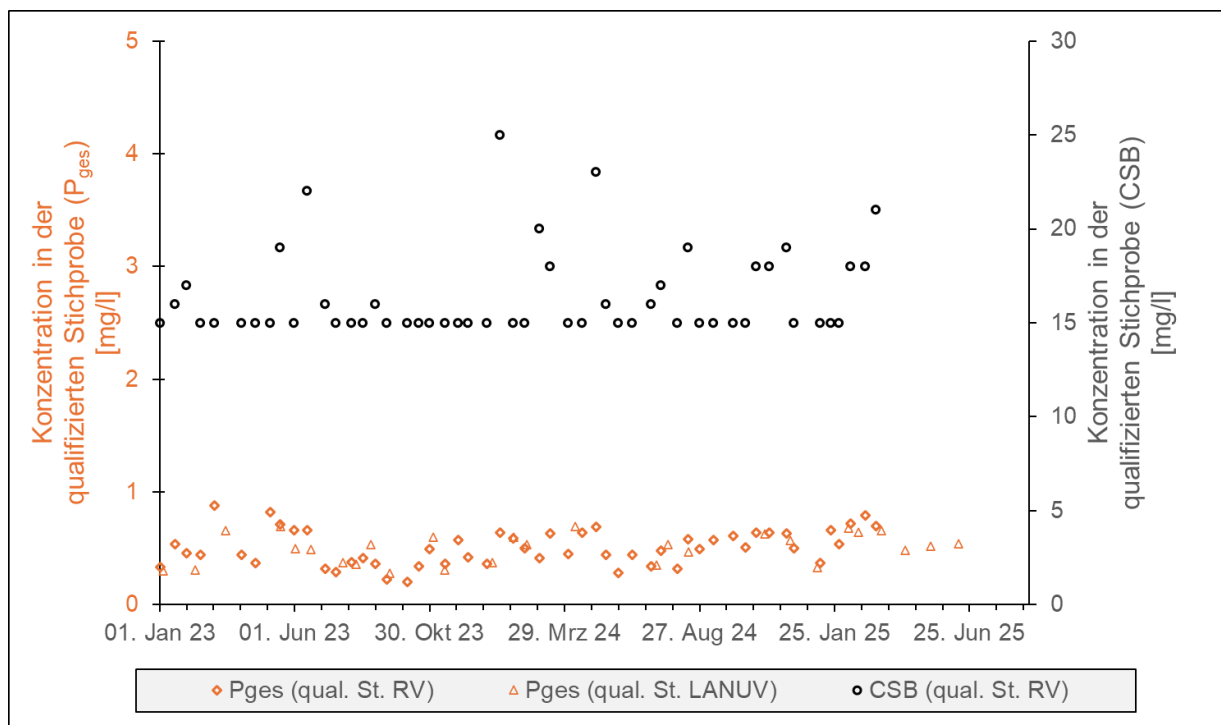


Abbildung 13: Ergebnisse der qualifizierten Stichprobe für CSB und Gesamtphosphor im Ablauf der Kläranlage im Zeitraum 2023 – Mitte 2025 (RV=Analytik durch Ruhrverbandslabor; LANUV= Analytik durch LANUV) [Ruhrverband]

### 3.2.2 Energiebilanz

Zur Bewertung des Energiebedarfs wurde durch die Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft eine Energieanalyse nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 durchgeführt. Dabei wurde der Energiebedarf der Bestandsanlage aus dem Untersuchungsjahr 2019 [14] mit dem Energiebedarf für den Zustand aus dem Jahr 2024 [15] verglichen. Dafür wurde ein Strommesskonzept für die neue Anlage entwickelt und umgesetzt.

Es lässt sich festhalten, dass die biologische Stufe bei diesem pauschalen Vergleich nach dem Umbau weitaus mehr Energie verbraucht als zuvor (vgl. Tabelle 10). Sowohl für die Belüftung als auch für das Pumpen von Abwasser werden in Summe 228.000 kWh/a mehr verbraucht als vor dem Umbau. Demzufolge hat sich der Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage um 233.000 kWh/a erhöht. Berücksichtigt man die entfallenen Verbräuche für die Schlammbehandlung hat sich der Energiebedarf sogar um 317.800 kWh/a erhöht. Die fehlende Schlammbehandlung bedeutet auch, dass die vormals erzeugte Energie von 347.250 kWh/a nicht mehr zur Abdeckung des Energiebedarfs zur Verfügung steht, da der entwässerte Überschussschlamm zu 2/3 auf einer Nachbarkläranlage (Iserlohn-Letmathe) stabilisiert wird. Der Energiegehalt von Primärschlamm (700 Nm<sup>3</sup>/t oTS) unterscheidet sich von dem Energiegehalt im Überschussschlamm (290 Nm<sup>3</sup>/t oTS), da Überschussschlamm größtenteils aus Proteinen besteht, die im Vergleich schlechter abbaubar sind [16]. Auf Basis einer Beispielrechnung<sup>3</sup> ist in Altena davon auszugehen, dass der abgezogene Überschussschlamm ein um ca. 90.000 kWh/a geringeres Energieerzeugungspotential hat. Da auf der Bestandsanlage Primär- und Überschussschlamm gemeinsam als Rohschlamm abgezogen wurden, wurde eine gemitteltes Klärgaspotential von 500 Nm<sup>3</sup>/t oTS angenommen. Eine Auswertung des Klärgasanfalls und der Stromproduktion durch die BHKW auf der Nachbaranlage Iserlohn-Letmathe, wo 2/3 des Überschussschlamms mitbehandelt wird, zeigt jedoch, dass es dort weder zu einem Anstieg der Klärgasproduktion noch zu einer erhöhten Stromproduktion gekommen ist (s. Abbildung 14). Die fehlende Energieerzeugung bedeutet für den Standort Altena insgesamt einen um etwa 174 % erhöhten Strombezug aus dem Netz.

<sup>3</sup>  $E_{\text{BHKW, theor}} = \text{Rohschlammfracht} * \text{Glühverlust} * \text{Gasproduktion} * \text{Heizwert} * \text{el. Wirkungsgrad BHKW}$

$E_{\text{BHKW, Bestand, theor.}} = 451 \text{ t TR/a} * 0,75 * 500 \text{ Nm}^3/\text{t oTS} * 6,4 \text{ kWh/Nm}^3 * 0,3 = 324.720 \text{ kWh/a}$

$E_{\text{BHKW, Neu, theor.}} = 561 \text{ t TR/a} * 0,75 * 290 \text{ Nm}^3/\text{t oTS} * 6,4 \text{ kWh/Nm}^3 * 0,3 = 234.274 \text{ kWh/a}$

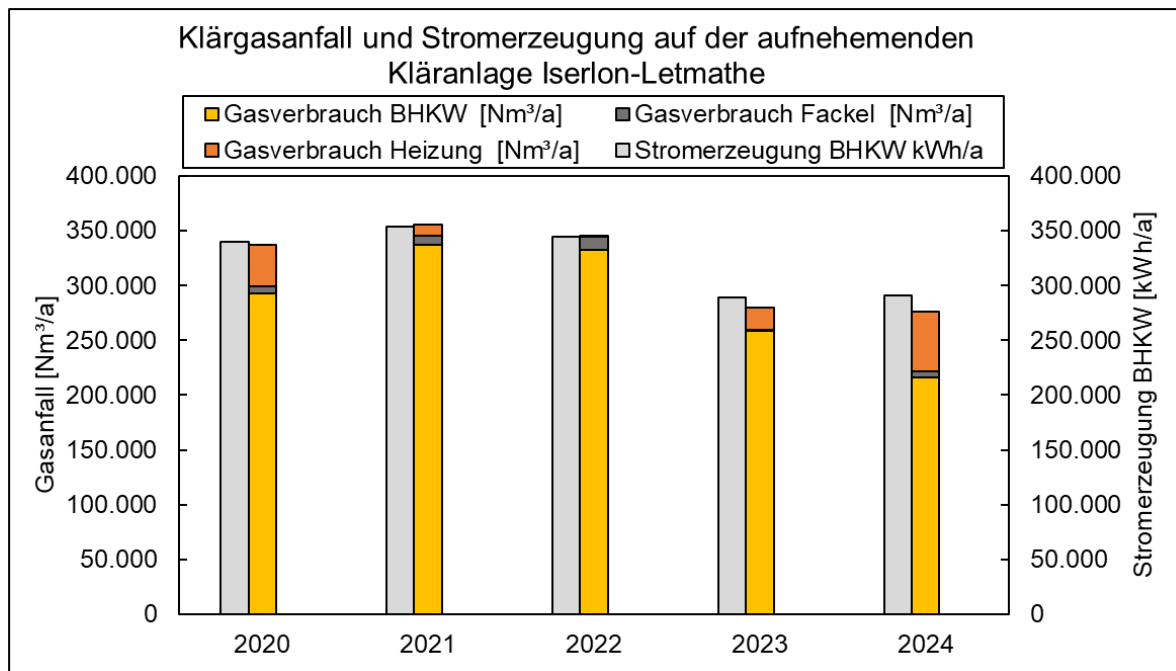


Abbildung 14: Stromerzeugung und Klärgasanfall auf der KA Iserlohn-Letmathe, wo 2/3 des Überschussschlammes aus Altena mitbehandelt werden. [Ruhrverband]

Damit ist kritisch zu hinterfragen, ob das in der Literatur für das Nereda®-Verfahren genannte Energieeinsparpotential in der biologischen Stufe von mehr als 50 % [2] oder die daraus im Förderantrag abgeleitete 30 %ige Energieersparnis für den Standort Altena zu verwirklichen ist. Im Folgenden werden daher die Energieverbräuche diskutiert, da sie aufgrund der erheblichen Verfahrensunterschiede nicht unmittelbar vergleichbar sind und hinsichtlich der Randbedingungen am Standort eingeordnet werden müssen.

**Tabelle 10: Vorher-Nachher-Vergleich des Energieverbrauchs für ausgewählte Bereiche anhand der durchgeführten Energieanalysen ( [14], [15]) [Ruhrverband]**

Jahr	Bereich	Energieverbrauch absolut [kWh/a]	EW-spez. Energieverbrauch kWh/(E*a)	
2019	<b>Gesamte Anlage</b>	718.092	49,60	
	<b>Biologie</b>	340.489	23,39	
	davon	<b>Belüftung</b>	188.552	12,90
		<b>Umwälzung im BB</b>	95.150	6,57
		<b>Rücklaufschlamm-pumpen</b>	56.787	3,92
	<b>Schlammbehandlung</b>	84.851	5,86	
	davon	<b>Faulbehälter</b>	49.851	3,44
		<b>Entwässerung</b>	35.000	2,42
	<b>Stromerzeugung</b>	347.254		
	<b>Strombezug aus dem Netz</b>	370.838		
2024	<b>Gesamte Anlage</b>	951.038	68,64	
	<b>Biologie</b>	658.919	47,56	
	davon	<b>Belüftung</b>	269.973	19,49
		<b>Umwälzung im Ausgleichsbecken</b>	34.939	2,52
		<b>Beschickungs-pumpen</b>	263.724	19,03
		<b>Sonstige (Antriebe, Pumpen Voreindicker, Kompressor, ...)</b>	90.283	6,52
	<b>Strombezug aus dem Netz</b>	951.038		

### Belüftungsenergie

Absolut gesehen wird durch die Belüftung 81.400 kWh/a bzw. 43 % mehr Energie als vorher verbraucht. Der spezifische Verbrauch ist mit 19,5 kWh/(E\*a) sehr hoch, wenn man den Wert mit anderen Ruhrverbandsanlagen mit Belebtschlammverfahren vergleicht, die einen spezifischen Verbrauch von z.T. weniger als 10 kWh/(E\*a) aufweisen.

Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass ein Vergleich aufgrund der fehlenden Vorklä- rung im neuen Verfahren nur bedingt möglich ist. Durch eine Vorklä- rung wird je nach Aufenthalts- zeit 20-35 % der ankommenden CSB-Fracht als Primärschlamm abgezogen. Das Nereda®-Ver- fahren kommt an diesem Standort ohne eine Vorklä- rung aus und nutzt die höhere CSB-Fracht in der biologischen Stufe, um ausreichend organisches Substrat für die Phosphat-akkumulierenden

Organismen bei der anaeroben P-Rücklösung zur Verfügung zu stellen. Damit muss das Verfahren energetisch eher mit aerob-stabilisierenden Kläranlagen verglichen werden, die ebenfalls ohne Vorklärung auskommen.

Bei Betrachtung der CSB-Zulaufmengen und der Elimination durch die biologische Stufe werden die Unterschiede deutlich. Aufgrund der hohen CSB-Eliminationsleistung in der ehemaligen Vorklärung von 40 % wird vor dem Umbau die Fracht in der biologischen Stufe verringert, sodass dort noch eine CSB-Fracht von 860 kg CSB/d biologisch eliminiert worden ist. Das Nereda®-Verfahren ohne die Vorklärung kommt in der biologischen Stufe (ohne zusätzlichen Absetzvorgang in der Nachklärung) auf eine CSB-Elimination von 1.584 kg CSB/d. Es wird also etwa die doppelte CSB-Fracht eliminiert, wodurch auch ein deutlich höherer Sauerstoffbedarf resultiert. Bezieht man die eingesetzte Belüftungsenergie auf die eliminierte CSB-Fracht kann die biologische Stufe besser miteinander verglichen werden. Vor dem Umbau liegt der Kennwert mit 0,60 kWh/(kg CSB<sub>elim.</sub>) höher als beim Nereda®-Verfahren mit 0,46 kWh/(kg CSB<sub>elim.</sub>). Diese Betrachtung zeigt, dass die biologische Frachtelimination durchaus effizienter sein kann als im Belebtschlammverfahren. Diesen Vorteil wiegt die fehlende CSB-Elimination in der Vorklärung bei der Betrachtung des absoluten Energieverbrauchs aber nicht auf.

Speziell für die Belüftungsenergie wird aufgrund der größeren Tiefe der Nereda®-Reaktoren von hier 7,5 m im Vergleich zu maximal 6 m im Belebtschlammverfahren ein Einsparpotential von 5-10 % genannt [2], da aufgrund der höheren Wassertiefe eine bessere Sauerstoffausnutzung aus den eingetragenen Luftblasen angenommen wird. Demgegenüber steht aber der höhere statische Gegendruck durch die größere Wassertiefe, der durch die Druckluftheizer überwunden werden muss. Eine Beispielrechnung<sup>4</sup> des notwendigen Leistungsbedarfs für die Gebläse bei den verschiedenen Wassertiefen ergibt einen theoretischen Mehrbedarf etwa 20 % für das Nereda®-Verfahren in Altena. Hier ist eine 10 %ige Reduzierung des Luftbedarfs aufgrund der längeren Aufenthaltszeiten der Luftblasen bereits eingerechnet.

Als weitere Randbedingung ist zu berücksichtigen, dass nach der Verfahrensumstellung die Belüftung intermittierend stattfindet und eine modernisierte und effizientere Belüftungstechnik zum Einsatz kommt. Es müssen also sehr verschiedene Einflussfaktoren betrachtet werden. Daher ist eine Vergleichsrechnung angestellt worden, welche die tatsächlichen Sauerstoffbedarfe der biologischen Stufen und die verschiedenen Randbedingungen der Verfahren wie die Wassertiefe,

---

<sup>4</sup> Beispielrechnung:

Spez. Gebläseleistung: 40 Wh/(m<sup>3</sup>N\*bar);

Luftmenge Becken a): 1.000 m<sup>3</sup>N/h;

Luftmenge Becken b): 910 m<sup>3</sup>N/h;

Leistungsbedarf Becken a): 26 kW

Leistungsbedarf Becken b): 31 kW

Tiefe Becken a): 5,5 m (ca. 650 mbar inkl. Verluste)

Tiefe Becken b): 7,5 m (ca. 850 mbar inkl. Verluste)

die Betriebsweise, die eingesetzte Maschinenteknik und weitere Faktoren berücksichtigt (s. Tabelle 11). Aus dieser Vergleichsrechnung resultiert, dass das Nereda®-Verfahren in Altena trotz moderner Maschinenteknik aufgrund des höheren Sauerstoffbedarfs ( $OV_h$ ) auch theoretisch kein Einsparpotential bei der Belüftungsenergie aufweist. Unterstellt man eine vergleichbare Eintragungseffizienz des Sauerstoffs durch die alten und neuen Belüfter (SSOTR) ergibt sich theoretisch sogar ein Mehraufwand von 21,7 % für das Nereda®-Verfahren am Standort Altena. Die tatsächlichen Energieverbräuche (s. Tabelle 10) bewegen sich in ähnlicher Größenordnung, weshalb davon auszugehen ist, dass gegenwärtig auch kein Einsparpotential bei der Belüftungsenergie vorhanden ist.

**Tabelle 11: Vergleichsrechnung für den Energieverbrauch der Belüftung nach dem Merkblatt DWA-M 229-1 [17] [Ruhrverband]**

Variante (Vergleichsrechnung)	Theoretischer Energiebedarf kWh/a	Einsparpotential	Annahmen
<b>Alte KA mit alter Maschinenteknik</b>	<b>213.843</b>		$OV_h=51,4 \text{ kgO}_2/h$ , $\alpha=0,75$ , SSOTR = 18 $\text{gO}_2/\text{Nm}^3/\text{m}$ , $p_{\text{geb}}=48 \text{ Wh}/\text{Nm}^3/\text{bar}$ , $hD = 4 \text{ m}$
Alte KA mit alter Maschinenteknik und ohne Vorklärung	291.226	36,2%	$OV_h=70 \text{ kgO}_2/h$ , $\alpha=0,75$ , SSOTR = 18 $\text{gO}_2/\text{Nm}^3/\text{m}$ , $p_{\text{geb}}=48 \text{ Wh}/\text{Nm}^3/\text{bar}$ , $hD = 4 \text{ m}$
Alte KA mit neuen Gebläse und alten Belüftern	155.927	-27,1%	$OV_h=51,4 \text{ kgO}_2/h$ , $\alpha=0,75$ , SSOTR = 18 $\text{gO}_2/\text{Nm}^3/\text{m}$ , $p_{\text{geb}}=35 \text{ Wh}/\text{Nm}^3/\text{bar}$ , $hD = 4 \text{ m}$
Alte KA mit neuer Maschinenteknik (Gebläse+Belüfter)	127.577	-40,3%	$OV_h=51,4 \text{ kgO}_2/h$ , $\alpha=0,75$ , SSOTR = 22 $\text{gO}_2/\text{Nm}^3/\text{m}$ , $p_{\text{geb}}=48 \text{ Wh}/\text{Nm}^3/\text{bar}$ , $hD = 4 \text{ m}$
Nereda mit alter Maschinenteknik	356.897	66,9%	$OV_h=70 \text{ kgO}_2/h$ , $\alpha=0,65$ , SSOTR = 18 $\text{gO}_2/\text{Nm}^3/\text{m}$ , $p_{\text{geb}}=48 \text{ Wh}/\text{Nm}^3/\text{bar}$ , $hD = 7,45 \text{ m}$ , $f_{\text{int}} = 1,6$
<b>Nereda mit neuen Gebläse und alten Belüftern</b>	<b>260.237</b>	<b>21,7%</b>	$OV_h=70 \text{ kgO}_2/h$ , $\alpha=0,65$ , SSOTR = 18 $\text{gO}_2/\text{Nm}^3/\text{m}$ , $p_{\text{geb}}=35 \text{ Wh}/\text{Nm}^3/\text{bar}$ , $hD = 7,45 \text{ m}$ , $f_{\text{int}} = 1,6$
Nereda mit neuer Maschinenteknik (Gebläse+Belüfter)	212.921	-0,4%	$OV_h=70 \text{ kgO}_2/h$ , $\alpha=0,65$ , SSOTR = 22 $\text{gO}_2/\text{Nm}^3/\text{m}$ , $p_{\text{geb}}=35 \text{ Wh}/\text{Nm}^3/\text{bar}$ , $hD = 7,45 \text{ m}$ , $f_{\text{int}} = 1,6$
<b>Energieverbrauch Belüftung in 2019</b>	186.552		Betriebsdatenauswertung; Vergleichswert
<b>Energieverbrauch Belüftung in 2024</b>	254.355	36,3%	Betriebsdatenauswertung (auf 1 Jahr hochgerechnet); Vergleichswert

### Pumpenergie

Am Standort Altena wird das ehemalige Nachklärbecken zur hydraulischen Vergleichmäßigung des diskontinuierlichen Ablaufs genutzt und nicht um den Belebtschlamm im System zurückzuhalten. Ein Betrieb des Rücklaufschlammumpferks ist nicht mehr erforderlich und führt zu einer Energieersparnis von 56.787 kWh/a. Demgegenüber steht aber der sehr hohe Energiebedarf für die Beschickung der Nereda®-Reaktoren, die überwiegend oberirdisch aufgestellt wurden. Eine Beschickung mittels Pumpen ist beim Nereda®-Verfahren häufig erforderlich, da nur durch die flächige Beschickung über die am Reaktorboden verbauten Beschickungsleitungen die gewünschte flächige und vertikale Pfropfenströmung erreicht wird. Diese Strömung ist essenziell für

das Granulenwachstum und die Selektion des feinflockigen Überschussschlammes. Hinzukommt, dass am Standort der KA Altena das Hochwasserrisiko bei der Bauweise berücksichtigt wurde, was ebenfalls Einfluss auf den Energieverbrauch der Beschickungspumpen hat. Bilanziell beträgt der Mehrenergiebedarf nach der Umstellung 207.000 kWh/a für das Pumpen von Abwasser. Auffällig ist, dass der Energiebedarf für das Beschickungspumpwerk der Nereda®-Reaktoren in etwa so hoch ist wie der für die Belüftung (Tabelle 10). Während der erhöhte Belüftungsenergieverbrauch durch die Mitbehandlung des Primärschlammes erklärbar ist, resultiert der Energiebedarf für die Beschickung hauptsächlich aus der erforderlichen statischen Förderhöhe von durchschnittlich sechs Metern. Anzumerken ist auch, dass in Altena ein sehr hoher Fremdwasseranteil vorhanden ist. Bezogen auf die Jahresabwassermenge fallen in Altena etwa 1.020 l/(E\*d) und bezogen auf die Jahresschmutzwassermenge 740 l/(E\*d) an, was um ein Vielfaches über dem typischen pro Kopf Wasserverbrauch von 120 l/(E\*d) liegt. Zudem haben die sehr hohen Niederschlagsmengen in dem betrachteten Zeitraum zu einer um 1,23 Mio. m<sup>3</sup>/a (+29 %) höheren Jahresabwassermenge im Vergleich zu den Vorjahren geführt. Diese großen Wassermengen müssen gefördert werden und steigern den Energieverbrauch der Pumpen. Da die Reaktoren aus Hochwasserschutzgründen und aufgrund ihrer Lage in direkter Nähe zur Lenne nicht tiefer gebaut werden konnten (s. Abbildung 15), war eine wirtschaftlichere Bauweise an diesem Standort nicht umsetzbar. An anderen Standorten mit günstigeren Bedingungen (z.B. geringerem Fremdwassereintrag) führt eine geringere Förderhöhe jedoch zu deutlichen Energieeinsparungen [18].



Abbildung 15: Oberirdischer Bau der Reaktoren [Ruhrverband]

Eine Druckmessung an verschiedenen Positionen hat ergeben, dass die Beschickungsleitung ausreichend dimensioniert ist und keine unnötig hohen Reibungsverluste auftreten. Die eingesetzten Pumpen weisen einen hohen Wirkungsgrad auf. Da im Betriebspunkt aber immer zwei Pumpen parallel betrieben werden, ist der Wirkungsgrad reduziert. Der theoretische Leistungsbedarf wurde nachgerechnet und mit dem im Betrieb gemessenen Leistung verglichen (s. Tabelle 12). Daraus ergibt sich, dass der theoretische Leistungsbedarf mit ca. 45 kW aufgrund des Gesamtwirkungsgrads von 0,61 nur um 10 % von der gemessenen Leistung abweicht. Dies entspricht einem geringen absoluten Einsparpotential von ca. 28.000 kWh/a. Ein höheres Einsparpotential ergibt sich, wenn statt Parallelbetrieb die Beschickung durch eine größere Pumpe erfolgen kann. Der höhere Gesamtwirkungsgrad von 0,705 hat ein theoretischen Leistungsbedarf von 38,9 kW bzw. ein Energieeinsparpotential von 58.553 kWh/a zur Folge.

**Tabelle 12: Plausibilisierung des Leistungsbedarfs der Beschickungspumpen [Ruhrverband]**

Zufuss Q	323 l/s
Zufluss Q	1162,8 m <sup>3</sup> /h
Massenstrom $\dot{m}$	323 kg/s
Statische Druckhöhe $h_{stat}$	7,37 m WS
Erf. Leistung zur Überwindung	
geod. Anteil $P_{geod}$	<b>23,35 kW</b>
Durchmesser d	0,60 m
Rohrquerschnitt	0,28 m <sup>2</sup>
Geschwindigkeit v	1,15 m/s
H <sub>dyn</sub>	0,07 m WS
Dyn. Anteil $P_{dyn}$	<b>0,21 kW</b>
Druckverlust pro Meter Rohrleitung	1,79 mbar/m
Gesamtrohrlänge	70 m
geschätzter Gesamtwandreibungsverlust	0,125 bar
geschätzter Gesamtwandreibungsverlust	1,275 m WS
Verlustanteil $P_{ver}$	<b>4,04 kW</b>
$P_{geod+dyn+verl}$	<b>27,61 kW</b>
Wirkungsgrad Pumpe $\eta_{Pumpe}$ (Parallelbetrieb)	0,722 -
Motorwirkungsgrad $\eta_{Motor}$ (Datenblatt)	0,894 -
Wirkungsgrad FU (geschätzt)	0,95 -
Gesamtwirkungsgrad $\eta_{ges}$ (Datenblatt)	0,613 -
$P_{ges,theo}$	<b>45,02 kW</b>
$P_{gemessen}$	<b>50,00 kW</b>
$\Delta P$	4,98 kW
tatsächlicher Wirkungsgrad $\eta_{ges}$	0,552 -
Betriebszeit Pumpen	5275 h/a
Einsparung	<b>26.265 kWh/a</b>

### 3.2.3 Feststoff- und Phosphorbilanz

#### Phosphor

Das AGS-Verfahren setzt, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, auf eine vermehrte biologische Phosphorelimination, da dies aufgrund der EPS-Produktion die Granulabildung ermöglicht bzw. positiv beeinflusst. Daher bestand die Erwartung, dass es auch zu einer Einsparung der Chemikalienverbrauchs für die Fällmittel kommt.

Um die Phosphorelimination bewerten zu können, wurden die eingesetzten Fällmittelmengen aufgezeichnet, der Verbleib von Phosphor durch Bestimmungen des Phosphorgehalts im Überschussschlamm und die Phosphorkonzentration im Zu- und Ablauf der Verfahrensstufen analysiert.

Der Fällmittelverbrauch beim Nereda®-Verfahren liegt im Vergleich zu den Vorjahren mit 25,4 m³/a (Eisen-III-Chlorid) gleichauf oder knapp unter dem Verbrauch der alten Kläranlage. Darüber hinaus haben betriebliche Entscheidungen und ein großes Sicherheitsbedürfnis des Betreibers dazu geführt, dass die alte Dosieranlage zeitweise betrieben wurde. Damit ist auch noch ein signifikanter Fällmittelverbrauch durch die Altanlage zu verzeichnen. Wie aber Tabelle 6 zu entnehmen ist, wird der Zielwert für die Ablaufkonzentration von P<sub>ges</sub> bereits im Ablauf der Nereda®-Reaktoren erreicht, sodass diese Zusatzdosierung zukünftig nicht mehr benötigt wird und spätestens mit dem Erlöschen der TÜV-Zulassung ab Ende 2025 nicht mehr betrieben wird.

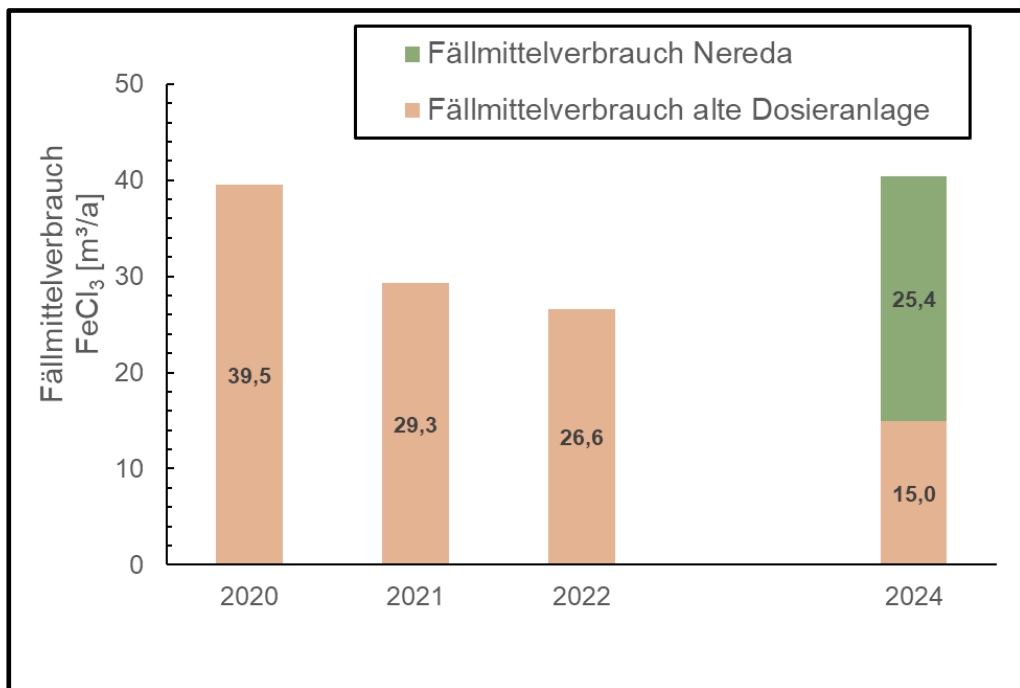


Abbildung 16: Fällmittelverbrauch [Ruhrverband]

Anhand der Bestimmung des Phosphorgehalts im Überschussschlamm (vgl. Tabelle 13) kann nachgewiesen werden, dass die bilanziell eliminierte P-Fracht (24,9 kg P/d) auch im Überschussschlamm wiedergefunden wird (24,4 kg P/d). Diese Messung erlaubt jedoch keine Gewichtung der biologisch abgebauten und der chemisch eliminierten Anteile, da im Überschussschlamm sowohl belebter Schlamm als auch Fällschlamm zu finden ist. Der Phosphoranteil von etwa 1,6 % im Überschussschlamm liegt unter dem Literaturwert von 2,5 - 5 % [19], der für Anlagen mit biologischer Phosphorelimination angegeben wird. Hier ist jedoch anzumerken, dass die biologische P-Elimination beim AGS-Verfahren innerhalb der Granulen stattfindet und der abgezogene Überschussschlamm vorwiegend aus schnell wachsendem, flockigem Belebtschlamm besteht.

**Tabelle 13: Phosphorgehalt im Überschussschlamm (2024) [Ruhrverband]**

<b>Phosphorgehalt im Überschussschlamm</b>	14,45 g P/kg
<b>Phosphorgehalt im eingedickten Überschussschlamm</b>	15,90 g P/kg
<b>Jährl. Überschussschlamm-Fracht (eingedickt)</b>	561 t TR/a
<b>Tägl. Überschussschlamm-Fracht (eingedickt)</b>	1.532,79 kg TR/d
<b>Eliminierte Phosphorfracht durch den Überschussschlamm</b>	24,37 kg P/d
<b>Eliminierte Phosphorfracht aus Bilanzierung (Zulauf Nereda/Ablauf KA)</b>	24,9 kg P/d
<b>Eliminierte Phosphorfracht aus Bilanzierung (Zulauf Nereda/Ablauf Nereda)</b>	21,4 kg P/d

Zur Bewertung des Fällungsprozess wird häufig der  $\beta$ -Wert gebildet, welcher die eingesetzte Stoffmenge des Metalls auf die Stoffmenge des eliminierten Phosphors bezieht. Bei der Auswertung des  $\beta$ -Werts im Nereda®-Verfahren wird berücksichtigt, dass ein Teil des zulaufenden Phosphors in die Biomasse eingebaut wird (0,5 % vom CSB im Zulauf [20]) und ein Teil auf biologischem Wege eliminiert werden kann (0,6 % vom CSB im Zulauf [20]). Da vorab nicht klar ist, wie hoch die biologische Phosphorelimination ist, wurde eine Fallunterscheidung vorgenommen und der  $\beta$ -Wert zum einen gänzlich ohne und zum anderen mit vollständiger biologischer Phosphorelimination berechnet (s. Abbildung 17).

Die Berechnung mit vollständiger biologischer Phosphorelimination führt zu einem unrealistisch hohen  $\beta$ -Wert von 16,5 mol Fe/mol P. Daher ist davon auszugehen, dass die biologische P-Elimination nicht sehr stark ausgeprägt ist. Da der  $\beta$ -Wert mit 0,64 mol Fe/mol P für die alternative

Berechnung deutlich unterhalb des stöchiometrischen Minimums von 1 mol Fe/mol P liegt, sind wiederum Hinweise gegeben, dass doch ein signifikanter Anteil der P-Fracht biologisch eliminiert wird. Eigene Rücklöseversuche durch das Kooperationslabor liefern leider keine belastbaren Ergebnisse, da diese Versuche zu unplausiblen und sehr geringen P-Rücklöseraten und P-Aufnahmeraten von < 1,0 mg PO<sub>4</sub>-P/(gTS\*h) führten. Bisher nicht veröffentlichte Ergebnisse des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kassel zeigen in Altena dagegen sehr hohe Rücklöseraten > 7 mg PO<sub>4</sub>-P/(gTS\*h) und Aufnahmeraten von > 7,5 mg PO<sub>4</sub>-P/(gTS\*h).

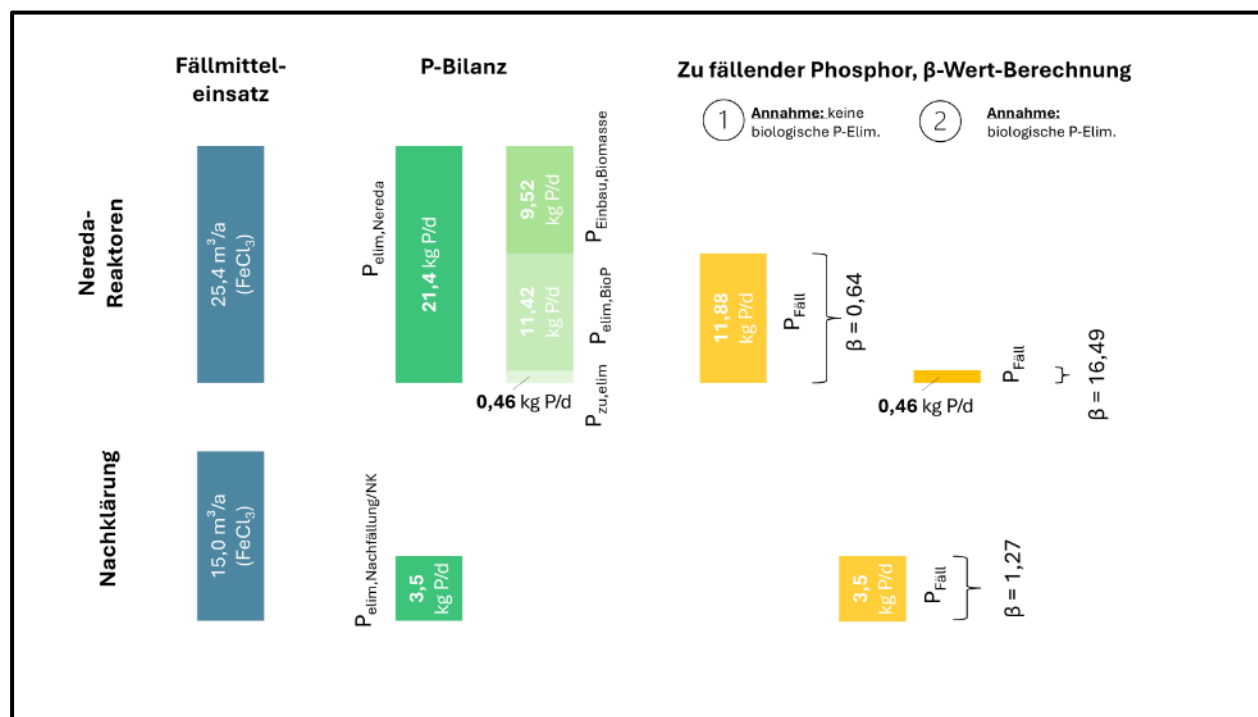


Abbildung 17: Phosphor-Bilanz [Ruhrverband]

Festzuhalten ist, dass es bisher zu keiner signifikanten Einsparung beim Fällmitteleinsatz gekommen ist, sondern der Verbrauch unter Berücksichtigung von jährlichen Schwankungen mit den Vorjahren vergleichbar ist. Bei der Fällmitteldosierung wird noch eine betriebliche Optimierung verfolgt. Die anfangs favorisierte Dosierung in die Reaktoren soll abgelöst werden durch die Dosierstelle unmittelbar am Ablauf der Nereda®-Reaktoren, da hier nach betrieblicher Einschätzung die beste Einmischung und Wirksamkeit für das Fällmittel gegeben ist. Diese Dosierung ist in Altena möglich, da bei der Umsetzung des Nereda®-Verfahrens die Nachklärung beibehalten wurde und der Fällschlamm dort zurückgehalten werden kann. Der Betrieb der Bestandsdosieranlage mit einer Fällmittelzugabe direkt vor der Nachklärung wurde dann aufgegeben, spätestens aber nach Erlöschen der TÜV-Zulassung Ende 2025.

### Feststoffbilanz

Die im Förderantrag geplante Intensivmesswoche zur Bilanzierung von abfiltrierbaren Stoffen sah die Analyse von täglich mengenproportionale Mischproben aus Zu- und Ablauf eines Behandlungszyklus für alle Reaktoren vor. Das Ziel war die Rückhaltewirkung von abfiltrierbaren Stoffen durch die Reaktoren nachzuweisen. In der Praxis konnte das Untersuchungsvorhaben in dieser Form nicht umgesetzt werden. Das liegt zum einen an den langen Zyklusdauern von > 7 Stunden bei Trockenwetter. Dies hätte das Untersuchungsprogramm sehr zeitaufwändig gemacht und aufgrund der drei zu untersuchenden Reaktoren einen 24-h-Schichtbetrieb erfordert. Zudem gibt es keine Möglichkeit der Kommunikation zwischen dem Controller und den Probenehmern, um eine gezielte Beprobung der Zyklen zu ermöglichen. Erschwerend kommt hinzu, dass das behandelte Abwasser eines beendeten Zyklus aufgrund des SBR-Betriebs erst beim nachfolgenden Zyklus zum Ablauf kommt.

Daher wurde ein alternatives Messprogramm erarbeitet (s. Tabelle 14), welches 24-h-Mischproben im Zu- und Ablauf der Behandlungsstufen vorsieht und darüber hinaus stichprobenartige Analysen einzelner Schlamm- und Abwasserströme mit Auswertungen der Online-TS- und Durchflussmessungen einbezieht. Dies ermöglicht eine Bilanzierung der abfiltrierbaren Stoffe über die Verfahrensstufen hinweg.

**Tabelle 14: Untersuchungsplan während der AFS-Intensivmesswoche [Ruhrverband]**

Messstellennr.	Messstelle	Probenart	Parameter	Anzahl
1	Zulauf Nereda-Reaktoren	24-h-Mischprobe	AFS	1/d
2	Ablauf Nereda-Reaktoren	24-h-Mischprobe	AFS, CSB, CSBfiltr	1/d
3	Ablauf Kläranlage	24-h-Mischprobe	AFS, CSB, CSBfiltr	1/d
4.1	Reaktor 1	Stichprobe	AFS	1/d
4.2	Reaktor 2	Stichprobe	AFS	1/d
4.3	Reaktor 3	Stichprobe	AFS	1/d
5	ÜSS-Vorlagebehälter in Bandeindicker	Online-TS und MID	AFS	Online
6	Trübwasser von Voreindicker	Mischprobe (3 Stichproben von Beginn, Mitte und Ende des Dekantierens)	AFS, CSB, CSBfiltr.	1/d
			AFS, CSB, CSBfiltr.	
			AFS, CSB, CSBfiltr.	
7	Bandeindicker in ÜSS-Stapelbehälter	Online-TS und MID	AFS	Online
8	Trübwasser von Bandeindeindicker	Stichprobe	AFS, CSB, CSBfiltr.	1/d

Das Untersuchungsprogramm wurde an 5 Tagen im November 2024 durchgeführt bzw. ausgewertet (siehe Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Beispielhaft werden die Ergebnisse der Bilanzierung für den 3. Messtag diskutiert (s. Abbildung 18). Durch die an diesem Tag sehr niedrigen Ablaufkonzentrationen < 6 mg/l von AFS im Ablauf der Nereda®-Reaktoren und im Ablauf der Kläranlage wird die gute Rückhaltewirkung durch die Reaktoren dokumentiert. Betrachtet man die Ablaufkonzentrationen während des

zweijährigen Demonstrationszeitraum, ist festzustellen, dass die Nachklärung noch einen signifikanten Rückhalteeffekt hat (vgl. Kapitel 3.2.1, Tabelle 6), der innerhalb der Untersuchung nur an Tag 2 nachgewiesen worden ist. Bei der Bilanzierung des Überschussschlamms und der Eindickung kann es aufgrund der verfügbaren Messsignale zu Unstimmigkeiten kommen, die das Schließen der Bilanz nicht ermöglichen. Näherungsweise kann die abgezogene Schlammfracht aus den Reaktoren aber im eingedickten Zustand im Stapelbehälter wiedergefunden werden. Die Abscheideleistung des Bandedickers wird als sehr gut bewertet, was zu einer geringen AFS-Rückbelastung führt.

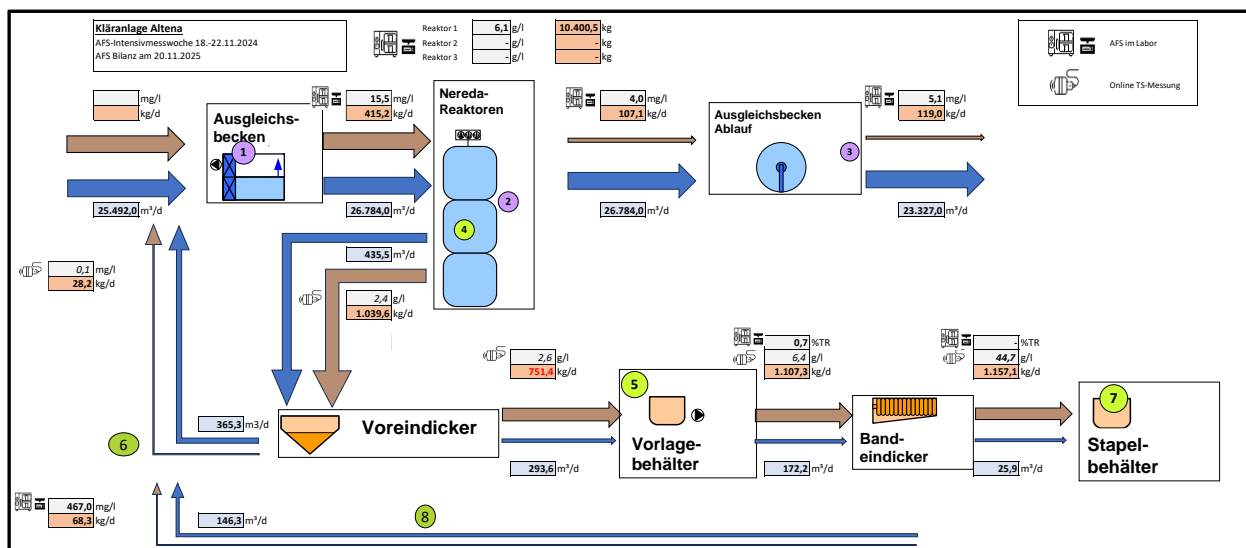


Abbildung 18: AFS-Bilanz an Tag 3 der Intensivmesswoche (20.11.2024) [Ruhrverband]

### 3.2.4 TOC, Schwermetalle und Spurenstoffe

Die Spurenstoffuntersuchungen wurden im ca. zweimonatlichen Rhythmus im Kläranlagenzu- und -ablauf in Form von 24-Stunden-Mischproben durchgeführt. Vor der Inbetriebnahme erfolgten dabei neun und seit Inbetriebnahme zehn Probenahmen.

In den Ergebnistabellen (Tabelle 15, sowie Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. bis Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. im Anhang) sind die Mittelwerte der berechneten Eliminationsleistungen in den beiden Vergleichszeiträumen ausgewiesen. Zudem wurden die Differenzen der mittleren Ablaufkonzentrationen und Eliminationen angegeben, wobei grün hinterlegte Zellen für den Zeitraum seit Inbetriebnahme des Nereda®-Verfahrens niedrigere Ablaufkonzentrationen bzw. höhere Eliminationen im Vergleich zu der Zeit vor Inbetriebnahme bedeuten. Bei der Berechnung der Eliminationsleistung wurden nur Kenngrößen berücksichtigt, deren Mittelwerte sowohl im Zu- als auch im Ablauf über der jeweiligen Bestimmungsgrenze liegen.

Tendenziell ergeben sich für den Zeitraum seit Inbetriebnahme der Nereda®-Anlage für die Leitparameter nach der neuen EU-Kommunalabwasserrichtlinie (KARL) niedrigere Ablaufkonzentrationen und höhere Eliminationsraten. Die in KARL geforderte mittlere Eliminationsrate von 80 % wird aber mit Abstand nicht erreicht (vgl. Tabelle 15).

**Tabelle 15: Spurenstoffrückhalt vor und nach Umsetzung des Nereda®-Verfahrens (Leitsubstanzen KARL)**

	Zeitraum		vor Nereda	seit Nereda	vor Nereda	seit Nereda	nachher - vorher	vor Nereda	seit Nereda
			10.08.21-21.06.22	24.04.23-11.12.24	10.08.21-21.06.22	24.04.23-11.12.24		10.08.21-21.06.22	24.04.23-11.12.24
	Anzahl Untersuchungen		9	10	9	10		9	10
Gruppe	Parameter	Einheit	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Differenz	Elimination %	Elimination %
			Zulauf	Zulauf	Ablauf	Ablauf		Ablauf	
Leitsubstanzen KARL	Amisulprid	µg/l	0,26	0,22	0,2	0,22	0,02	23,1	0,0
Leitsubstanzen KARL	Candesartan	µg/l	1,0	0,82	0,99	0,72	-0,27	1,0	12,2
Leitsubstanzen KARL	Carbamazepin	µg/l	0,43	0,16	0,31	0,22	-0,09	27,9	-37,5
Leitsubstanzen KARL	Citalopram	µg/l	0,074	0,052	0,078	0,051	-0,027	-5,4	1,9
Leitsubstanzen KARL	Diclofenac	µg/l	1,0	1,1	0,98	0,75	-0,23	2,0	31,8
Leitsubstanzen KARL	Hydrochlorothiazid	µg/l	1,0	0,68	0,96	0,54	-0,42	4,0	20,6
Leitsubstanzen KARL	Irbesartan	µg/l	0,18	0,11	0,18	0,094	-0,086	0,0	14,5
Leitsubstanzen KARL	Metoprolol	µg/l	0,86	0,75	0,77	0,49	-0,28	10,5	34,7
Leitsubstanzen KARL	Venlafaxin	µg/l	0,37	0,15	0,24	0,14	-0,1	35,1	6,7
Leitsubstanzen KARL	Clarithromycin	µg/l	<0,1	<0,1	0,18	0,086	-0,094		
Leitsubstanzen KARL	1H-Benzotriazol	µg/l	4,2	1,3	4,0	1,1	-2,9	4,8	15,4
Leitsubstanzen KARL	4-Methyl-1H-Benzotriazol	µg/l	0,43	0,45	0,46	0,27	-0,19	-7,0	40,0
Leitsubstanzen KARL	5-Methyl-1H-Benzotriazol	µg/l	0,33	0,19	0,4	0,15	-0,25	-21,2	21,1
Leitsubstanzen KARL	4/5-Methyl-1H-Benzotriazol	µg/l		0,3		0,24	0,24		20,0

Außerdem hat das Messprogramm Analysen zur Bewertung des Rückhalts von Schwermetallen beinhaltet. Dabei wurden wöchentlich die Zu- und Abläufe der Verfahrensstufen auf Schwermetalle und zusätzlich den gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) untersucht. Zur Bewertung des Verbleibs der Schwermetalle wurden im zweiwöchigen Rhythmus die Metallgehalte im Überschussschlamm analysiert.

Die Ergebnisse für den Schwermetallrückhalt und die Konzentration in der Biomasse sind Tabelle 16 und Tabelle 17 zu entnehmen. Auch hier ist festzuhalten, dass der Rückhalt an Schwermetallen vergleichbar mit dem einer konventionellen Kläranlage ist.

**Tabelle 16: Schwermetalle im Zu- und Ablauf von Nereda® bzw. der KA [Ruhverband]**

Parameter	Einheit	Zulauf Rechen	Ablauf Sandfang	Zulauf Nereda	Ablauf Nereda	Ablauf Nachklärung	Rückhalt Zulauf/ Ablauf KA	Rückhalt Sandfang/ Ablauf KA
Chlorid	mg/l	95,2	116,81	90,93	89,65	96,09	-0,9%	17,7%
Sulfat	mg/l	32,22	36,6	33,02	32,76	33,29	-3,3%	9,0%
Blei	mg/l	3,87	6,46	4,04	0,68	0,51	86,8%	92,1%
Kupfer	mg/l	18,6	19,4	19,27	3,18	2,1	88,7%	89,2%
Aluminium	µg/l	755,26	1043,59	946,64	145,09	156,06	79,3%	85,0%
Antimon	µg/l		2					
Arsen	µg/l		50					
Cadmium	µg/l	0,16	0,28	0,23	0,11	0,07	56,3%	75,0%
Chrom	µg/l	2,86	2,26	3,37	1,07	1	65,0%	55,8%
Eisen	µg/l	1717,35	2925,69	2236,99	383,26	222,63	87,0%	92,4%
Nickel	µg/l	6,93	5,16	5,92	1,95	1,63	76,5%	68,4%
Selen	µg/l		10					
Zink	µg/l	89,13	84,76	65,36	26,02	18,38	79,4%	78,3%
pH-Wert		7,41	8,8	7,39	6,91	7,11		
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	682,33	840,66	660,64	592,85	620,84		
Kohlenstoff, gesamt organisch gebundener	mg/l	58,43		59,07	7,77	5,27	91,0%	
Säurekapazität	mmol/l	2,31	3,3	2,35	1,75	1,69		

**Tabelle 17: Phosphor und Schwermetalle im Überschussschlamm vor und nach der Eindickung [Ruhverband]**

Parameter	Einheit	5_Voreindicker	6_Stapelbehälter
Glühverlust 550°C Trockenrückstand	%	64,4	62,9
Trockenrückstand	%	8,9	13
Aluminium Trockenrückstand	mg/kg	10.811,70	9.864,30
Blei Trockenrückstand	mg/kg	693,3	726,8
Cadmium Trockenrückstand	mg/kg	889,9	434,8
Chrom Trockenrückstand	mg/kg	64,7	65,5
Eisen Trockenrückstand	mg/kg	18.712,20	22.255,30
Kupfer Trockenrückstand	mg/kg	287,6	306,3
Naphthalin Trockenrückstand	mg/kg	810	160,8
Nickel Trockenrückstand	mg/kg	951	1.065,50
Phosphor Trockenrückstand	mg/kg	14.454,70	15.897,20
Zink Trockenrückstand	mg/kg	691,2	720,6

### 3.2.5 Weitere Betriebskennwerte und Schlammeigenschaften

Es zeigt sich, dass die CSB-Belastung insbesondere in den letzten 1 ½ Jahren eher rückläufig ist (Tabelle 18). Die eher geringe CSB-Belastung in Kombination mit den sehr geringen CSB-Zulaufkonzentrationen von im Mittel etwa 150 mg/l (vgl. Tabelle 6) führen auch zu der sehr geringen Schlammbelastung, die für AGS-Verfahren eher untypisch ist. Im Vorfeld war nicht klar, ob diese geringe Schlammbelastung ausreichen würde, um für die Granula-bildenden Prozesse ausreichend abbaubares Substrat zur Verfügung zu stellen.

**Tabelle 18: Weitere Betriebskennzahlen [Ruhrverband]**

Parameter	Einheit	2023	2024	01 bis 06.2025
CSB-Fracht im Zulauf der KA	kg CSB/d	2.215	1.646	1.446
CSB-Fracht im Zulauf Nereda	kg CSB/d	1.807	2.089	1.897
Einwohnerwert (im Zulauf der KA)	E	18.460	13.713	12.052
Mittlerer TS von Reaktor 1-3	g/l	7,1	6,8	6,9
ISV <sub>5min</sub> von Reaktor 1-3	ml/g	58,4	57,3	60,6
ISV <sub>30min</sub> von Reaktor 1-3	ml/g	39,9	37,3	39,8
Schlammbelastung	kg CSB/(kg TS*d)	0,050	0,060	0,054
Raumbelastung	kg CSB/(m <sup>3</sup> *d)	0,354	0,410	0,372
Überschuss-schlammanfall	t TWa	564,9	560,72	-

Wie der Tabelle 18 zu entnehmen ist, konnte innerhalb des Demonstrationsbetrieb die gewünscht hohe TS-Konzentration von ca. 7 g/l eingestellt und gehalten werden, ohne dass ein nennenswerter Schlammabtrieb im Ablauf der Reaktoren beobachtet wurde. Zur Beurteilung der Schlammigenschaften wurde regelmäßig der Schlammindex nach 5 Minuten Absetzzeit mit dem Schlammindex nach 30 Minuten Absetzzeit verglichen. Mit Werten von < 60 ml/g (ISV<sub>5</sub>) bzw. < 40 ml/g (ISV<sub>30</sub>) werden die guten Absetzeigenschaften des granulierten Schlammes bestätigt.

Dabei kann es zwischen den Reaktoren zu Unterschieden bei den Schlammigenschaften kommen, obwohl diese annähernd gleich beschickt und identisch betrieben werden (s. Tabelle 19). Es wurde beispielweise beobachtet, dass sich in Reaktor 2 ein geringerer Trockensubstanzgehalt einstellt und es dadurch auch zu einem leicht höheren Schlammindex kommt. Diese Unterschiede hatten jedoch keine merkliche Auswirkung auf den Prozess oder die Abbauleistung dieses Reaktors.



**Abbildung 19: Nasssiegung zur Ermittlung der Granulengrößenverteilung (Siebgrößen von links nach rechts: 1,8 mm; 1,4 mm; 1,0 mm; 0,6 mm; 0,2 mm) [Ruhrverband]**

Weiterhin wurden regelmäßig die Trockensubstanzgehalte der Granulafractionen ermittelt, um Veränderungen in der Zusammensetzung überwachen zu können (vgl. Abbildung 19 und Tabelle 19). Auch hier kommt es zu Unterschieden zwischen den Reaktoren. Reaktor 1 und 3 kommen im Mittel auf einen Granulenteil von > 80 % bezogen auf den Gesamt-Trockensubstanzgehalt, wobei diese sich zumeist aus großen Granulen mit einem Durchmesser von mehr als 1,8 mm zusammensetzten (ca. 60 % bezogen auf den gran. TS). Bei Reaktor 2 treten größere Schwankungen in der Granulengrößenverteilung auf. Der Anteil der größeren Granulen ist mit teilweise 40-50 % (bezogen auf den gran. TS) geringer. Dieser Unterschied scheint sich im ersten Halbjahr 2025 jedoch ausgeglichen zu haben. So war auch der granulierten Anteil am Gesamt-TS etwas geringer bei etwa 70 %, wobei auch hier eine Angleichung stattfindet. Insgesamt sind die Unterschiede aber gering und haben in der Vergangenheit keinen Betriebseingriff erfordert, um manuell die TS-Gehalte in den Reaktoren anzugleichen. Über den gesamten Demonstrationszeitraum zeigte sich eine stabile Granulation und ein guter Rückhalt der abfiltrierbaren Stoffe in den Reaktoren.

Tabelle 19: Schlammeigenschaften [Ruhrverband]

Reaktor	Parameter	Einheit	2023	2024	1.HJ 2025
Reaktor 1	<b>Granulierter TS</b>	g/l	5,9	4,6	5,6
	Anteil davon > 1,8 mm	%	61,9%	56,6%	64,3%
	Anteil davon < 1,8 mm	%	38,1%	43,4%	35,7%
	<b>Gesamt-TS</b>	g/l	7,5	6,9	6,8
	Anteil gran. TS an Ges.-TS	%	78,6%	67,2%	82,3%
	ISV <sub>5min</sub>	ml/g	51,7	54,7	59,9
	ISV <sub>30min</sub>	ml/g	37,3	35,9	38,9
	ISV <sub>5</sub> /ISV <sub>30</sub>	-	0,72	0,66	0,65
Reaktor 2	<b>Granulierter TS</b>	g/l	4,3	4,4	5,3
	Anteil davon > 1,8 mm	%	48,5%	36,4%	59,4%
	Anteil davon < 1,8 mm	%	51,5%	63,6%	40,6%
	<b>Gesamt-TS</b>	g/l	6,4	6,1	7,1
	Anteil gran. TS an Ges.-TS	%	67,3%	72,1%	75,2%
	ISV <sub>5min</sub>	ml/g	74,37	64,6	60,19
	ISV <sub>30min</sub>	ml/g	47,33	40,78	39,62
	ISV <sub>5</sub> /ISV <sub>30</sub>	-	0,64	0,63	0,66
Reaktor 3	<b>Granulierter TS</b>	g/l	6,3	5,5	5,7
	Anteil davon > 1,8 mm	%	58,4%	51,4%	63,2%
	Anteil davon < 1,8 mm	%	41,6%	48,6%	36,8%
	<b>Gesamt-TS</b>	g/l	7,4	7,3	6,8
	Anteil gran. TS an Ges.-TS	%	85,6%	74,8%	82,8%
	ISV <sub>5min</sub>	ml/g	49,2	52,47	61,57
	ISV <sub>30min</sub>	ml/g	35,08	35,05	40,9
	ISV <sub>5</sub> /ISV <sub>30</sub>	-	0,71	0,67	0,66

Die geringen CSB-Schlammbelastungen haben im Vorfeld der Inbetriebnahme zu einer Unsicherheit geführt, ob die Substratversorgung der Granulen in der anaeroben Beschickungsphase ausreicht. Hinzu kommen die nennenswerten Nitratfrachten im Zulauf der Kläranlage durch metallverarbeitendes Gewerbe im Einzugsgebiet. Durch den Nitratreintrag kann es innerhalb der Beschickungsphase zu einer Konkurrenzsituation um das verfügbare Substrat zwischen den denitrifizierenden und den Phosphor-akkumulierenden Organismen (PAO) kommen. Bevor die Rücklösung der PAOs einsetzt, muss der Nitrat-Stickstoff weitgehend abgebaut werden. Aus diesem Grund wurde die Dosierung der Kohlenstoffquelle beibehalten bzw. die Dosierstelle in das Zulaufausgleichsbecken verlegt. Die Abbildung 20 zeigt, dass insbesondere während der Einfahrphase (Q4 2022 und Q1 2023) eine höhere Dosiermenge eingesetzt wurde, damit während dieser Zeit keine Nährstofflimitierung auftritt. Nach der Einfahrphase wurde die Dosierung wieder reduziert, sodass das Niveau in der Folgezeit etwa auf dem der alten Anlage liegt. Zukünftig ist eine weitere Reduzierung geplant und eine vollständige Abschaltung der Kohlenstoffdosierung wird

getestet. So wurde ab Juli 2025 keine Kohlenstoffquelle hinzugegeben. Negative Veränderungen im Prozess und bei der Granulabildung wurden im darauffolgenden Halbjahr nicht beobachtet. Ob die Abschaltung der Dosierung ganzjährig möglich ist, wird der Langzeittest zeigen.

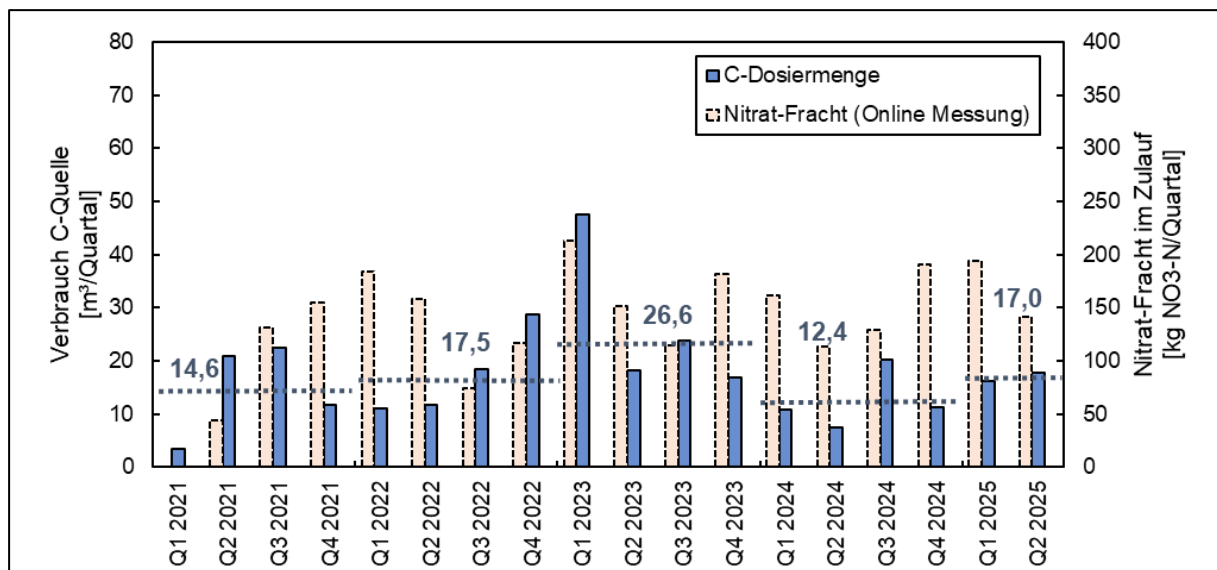


Abbildung 20: Kohlenstoffverbrauch auf der KA Altena [Ruhrverband]

### 3.3 Umweltbilanz

#### 3.3.1 Emissionen ins Gewässer

Bei den Emissionen ins Gewässer lassen sich deutliche Veränderungen bei den Stickstoff- und Phosphorverbindungen sowie beim chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) beobachten. Bei den anorganischen Stickstoffverbindungen ( $N_{\text{anorg}}$ ) liegt die mittlere Konzentration im Ablauf bei 4,4 mg/l und damit deutlich unter dem angestrebten Zielwert von 10 mg/l. Dies spiegelt sich auch in der jährlichen Frachtreduktion wider, die mit 7.414 kg/a den angestrebten Wert von 1.780 kg/a deutlich übertrifft. Ähnlich positiv gestaltet sich die Situation beim Ammoniumstickstoff ( $NH_4\text{-N}$ ): Mit einer Ablaufkonzentration von 0,36 mg/l wird der Zielwert von 0,6 mg/l klar unterschritten. Auch die Frachtreduktion fällt mit 1.133 kg/a deutlich aus, liegt jedoch leicht unter dem angestrebten Wert von 1.780 kg/a.

Weniger deutlich ist die Entwicklung beim chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), was jedoch z.T. auf den niederschlagsreichen Zeitraum zurückgeführt werden (vgl. Kapitel 3.2.1). Hier liegt die Ablaufkonzentration mit 15,8 mg/l knapp unter dem Zielwert von 16 mg/l. Gleichzeitig zeigt sich jedoch eine Frachterhöhung um 14.016 kg/a, was den Zielwert von 8.900 kg/a überschreitet.

Positiv hervorzuheben ist hingegen die Situation bei den Phosphorverbindungen ( $P_{\text{ges}}$ ). Mit einer Ablaufkonzentration von 0,54 mg/l wird der Zielwert von 0,8 mg/l klar unterschritten. Zudem konnte eine Frachtreduktion um 146 kg/a erreicht werden, wobei für diesen Parameter kein expliziter Zielwert definiert wurde.

#### Anorganische Stickstoffverbindungen $N_{\text{anorg}}$ :

- 4,4 mg/l im Ablauf (Zielwert 10 mg/l),
- Frachtreduktion um - 7.414 kg/a (Zielwert 1.780 kg/a)

#### Ammoniumstickstoff $NH_4\text{-N}$ :

- 0,36 mg/l im Ablauf (Zielwert: 0,6 mg/l)
- Frachtreduktion um - 1.133 kg/a (Zielwert: 1.780 kg/a)

#### Chemischer Sauerstoffbedarf CSB:

- 15,8 mg/l im Ablauf (Zielwert: 16 mg/l),
- Frachterhöhung um +14.016 kg/a (Zielwert: 8.900 kg/a)

#### Phosphorverbindungen $P_{\text{ges}}$ :

- 0,54 mg/l im Ablauf (Zielwert: 0,8 mg/l),
- Frachtreduktion um -146 kg/a (Zielwert: -)

### 3.3.2 Energie und Betriebshilfsmittel

Im Bereich Energie zeigt sich ein abweichendes Bild zwischen den gesteckten Zielen und der tatsächlichen Entwicklung. Während ursprünglich eine Reduktion des Energieverbrauchs um 221.000 kWh pro Jahr mit einer damit verbundenen  $CO_2$ -Minderung von rund 130 Tonnen pro Jahr angestrebt wurde, kam es stattdessen zu einer Erhöhung des Gesamtverbrauchs um 233.000 kWh pro Jahr. Dies führte zu einem zusätzlichen  $CO_2$ -Ausstoß von 81,3 Tonnen pro Jahr. Aufgrund der fehlenden Energieerzeugung vor Ort steigt der tatsächliche Energiebezug um 580.200 kWh jährlich, was einer zusätzlichen Emission von etwa 210,6 Tonnen  $CO_2$  entspricht.

Auch beim Einsatz von Fällmitteln (Eisen(III)-Chlorid) konnte das Ziel einer Reduktion um 75 % nicht erreicht werden. Stattdessen zeigte sich im Vergleich zu den Jahren 2021/2022 eine Erhöhung des Verbrauchs um rund 40 %, während im Vergleich zu 2020 ein stagnierendes Niveau festgestellt werden konnte. Dieser Mehrverbrauch ist jedoch auf die vorsichtige Betriebsweise in der Anfangszeit zurückzuführen. Bei der Fällung werden weitere Optimierungsmaßnahmen angestrebt, die künftig eine Reduzierung erwarten lassen (vgl. Kapitel 3.2.3).

Der Kohlenstoffverbrauch blieb im Wesentlichen unverändert und weist, abgesehen von leichten Schwankungen im ersten Halbjahr nach Inbetriebnahme, eine Stagnation auf. Auch hier ist die Zugabe von Essigsäure als Kohlenstoffquelle eher auf die vorsichtige Betriebsweise zurückzu-

führen. Aktuelle Betriebsergebnisse zeigen, dass in der Sommerperiode auf eine Zugabe verzichtet werden kann. Künftig ist auch hier mit einer Reduktion des Essigsäureverbrauchs zu rechnen.

Zusätzliche Belastungen ergeben sich hingegen beim Schlammtransport. Durch das Erfordernis, jährlich rund 7.252 m<sup>3</sup> Nassschlamm abzutransportieren, erhöht sich die CO<sub>2</sub>-Bilanz um weitere 35,26 Tonnen pro Jahr. Diese Entwicklung hätte gleichermaßen für die alternativen Varianten eingesetzt und ist auf die strategische Entscheidung zurückzuführen, den Standort zukünftig vorwiegend ferngesteuert und daher ohne Schlammbehandlung betreiben zu wollen.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die gesetzten Energie- und Emissionsziele insbesondere im Bereich Stromverbrauch verfehlt wurden. Lediglich beim Fällmittel- und Kohlenstoffverbrauch konnte eine stabile Entwicklung verzeichnet werden. Zukünftige betriebliche Optimierungsmaßnahmen lassen einen reduzierten Verbrauch der Betriebshilfsmittel erwarten. Der zusätzliche Schlammtransport hat die Gesamtbilanz weiter verschlechtert.

#### **Energie:**

Zielwert:	Reduktion um 221.000 kWh/a Reduktion um 130 t CO <sub>2</sub> /a
Gesamtverbrauch:	Erhöhung um 232.946 kWh/a Erhöhung um 81,3 t CO <sub>2</sub> /a <sup>5</sup>
Externer Bezug:	Erhöhung um 580.200 kWh/a Erhöhung um 210,6 t CO <sub>2</sub> /a <sup>5</sup>

#### **Fällmittel:**

Zielwert:	Reduktion um 75 %
Tatsächlich:	Erhöhung um 40 % im Vergleich zu 2021/2022 Stagnation +/- 0 % im Vergleich zu 2020

#### **Kohlenstoffverbrauch:**

Zielwert:	keiner
Tatsächlich:	Stagnation +/- 0 % (mit Ausnahme des 1. Halbjahres nach Inbetriebnahme)

#### **Schlammtransport:**

Zusätzliche erforderlicher Transport von 7.252 m<sup>3</sup> Nassschlamm/a  
CO<sub>2</sub>-Emissionssteigerung<sup>6</sup> von 35,26 t CO<sub>2</sub>/a

<sup>5</sup> Annahme: deutscher Mix 363 g CO<sub>2</sub>/kWh

<sup>6</sup> 10 t pro Fahrt (Ladung 6,5 m<sup>3</sup> inkl. Fahrzeug) 3 Touren (6 Fahrten) pro Tag a 14 km/d an 365 Tagen = 30.660 km/a  
0,115 kg CO<sub>2</sub>/(km\*t) \* 30.660 km/a \* 10 t = + 35,26 t CO<sub>2</sub>/a

### **3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse**

#### **3.4.1 Wirtschaftlichkeitsgrundsätze beim Ruhrverband**

Der Ruhrverband ist ein öffentlich-rechtliches Wasserwirtschaftsunternehmen ohne Gewinnerzielungsabsichten. Er erfüllt die ihm nach dem Ruhrverbandsgesetz übertragenen hoheitlichen Aufgaben, im Zusammenhang mit diesem Projekt insbesondere die Aufgabe der Abwasserbeseitigung im natürlichen Einzugsgebiet der Ruhr. Der Ruhrverband verpflichtet sich, der Erfüllung seiner Aufgaben, die aus Gebühren finanziert wird, auf möglichst wirtschaftliche und nachhaltige Art und Weise nachzukommen. Dementsprechend werden mit dem beschriebenen Projekt keine Gewinne erzielt.

#### **3.4.2 Variantenuntersuchung und Weiterentwicklung der Vorzugsvariante**

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde neben der Ertüchtigung der KA Altena an dem Standort der Anschluss an die rd. 10 km entfernte KA Iserlohn-Letmathe untersucht. Aufgrund der Topografie wäre jedoch die Verlegung des notwendigen Abwassersammlers in weiten Teilen nur in der Bundesstraße B 236, die eine hohe verkehrstechnische Bedeutung in dieser Region hat, möglich. Bei Investitionskosten von rd. 20 Mio. € für den Abwasserkanal zur KA Iserlohn-Letmathe führte die Machbarkeitsstudie zu dem Ergebnis, dass der Weiterbetrieb der KA Altena trotz umfangreicher Erneuerungen der vorhandenen Anlagentechnik die wirtschaftlichere Lösung darstellt.

Im Rahmen der Vorplanung wurden drei Varianten zur Ertüchtigung des Standorts untersucht. Aufgrund der rückläufigen Einwohnerzahl wurden in Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde eine zukünftige Ausbaugröße von 20.000 EW bei einem maximal zu behandelnden Mischwasserzufluss von  $Q_M = 300$  l/s festgelegt. Diese Kapazitätsanpassung wurde in die Variantenuntersuchung einbezogen. Zudem wurde berücksichtigt, dass die Kläranlage künftig als unbesetzte Satellitenanlage betrieben wird. In diesem Zusammenhang wurde entschieden, den personalintensiven Betrieb der Schlammbehandlung (Faulung, maschinelle Entwässerung) einschließlich der BHKW-Anlage am Standort einzustellen. Der anfallende Schlamm soll zukünftig auf der Kläranlage Iserlohn-Letmathe mitbehandelt werden. Hierzu wird der Schlamm auf der KA Altena erst statisch sowie anschließend mit einem Bandeindicker maschinell eingedickt und mit rund 5 % TS abgefahren.

### **Variante 1: Sanierung der KA Altena und Stilllegung der Schlammbehandlung**

Aufgrund des Alters der Kläranlage war eine grundlegende Erneuerung der Maschinen- und Elektrotechnik sowie umfangreiche Betonsanierungsarbeiten notwendig, damit eine Nutzung der Kläranlage für weitere 30 Jahre gewährleistet werden kann. Aufgrund der Aufgabe der weitergehenden Schlammbehandlung an diesem Standort sollte der anfallende Primärschlamm in den Trichterspitzen der Vorklärung eingedickt werden. Der Überschussschlamm wäre getrennt in einer neu zu errichtenden maschinellen Eindickung auf ca. 6 % eingedickt und gemeinsam mit dem Primärschlamm nach Zwischenspeicherung im bestehenden Schlammstapelbehälter zur weiteren Behandlung zur KA Iserlohn-Letmathe transportiert worden. In Abbildung 21 sind die Umbaumaßnahmen dargestellt.

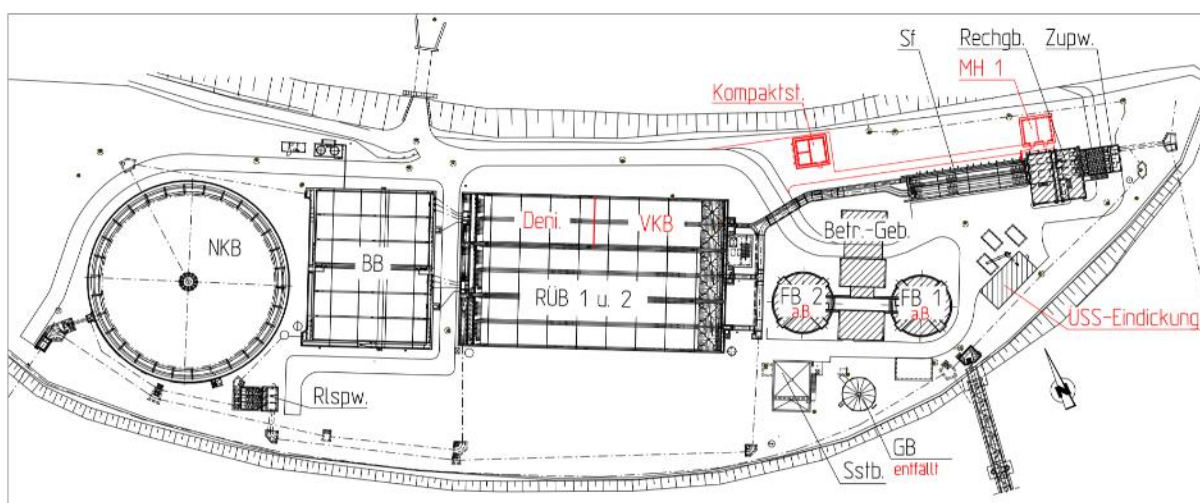


Abbildung 21: Variante 1: Sanierung der bestehenden KA Altena [Ruhrverband]

### **Variante 2: Neubau der Biologie als Kombibecken (intermittierende Denitrifikation) und Stilllegung der Schlammbehandlung**

Wie auch bei der Variante 1 sollte die Kläranlage künftig als unbesetzte Satellitenanlage betrieben werden. Die mechanische Reinigungsstufe benötigte auch in dieser Variante eine umfangreiche bau-, maschinen- und elektrotechnischen Sanierung. Die Biologie sollte in Form von zwei Kombibecken neu errichtet werden. Als biologisches Reinigungsverfahren wurde die intermittierende Denitrifikation gewählt. Die Umbaumaßnahmen der Variante 2 sind in der Abbildung 22 dargestellt. Die Überschussschlamm-Eindickung und die weitere Schlammbehandlung erfolgen wie in Variante 1 beschrieben.

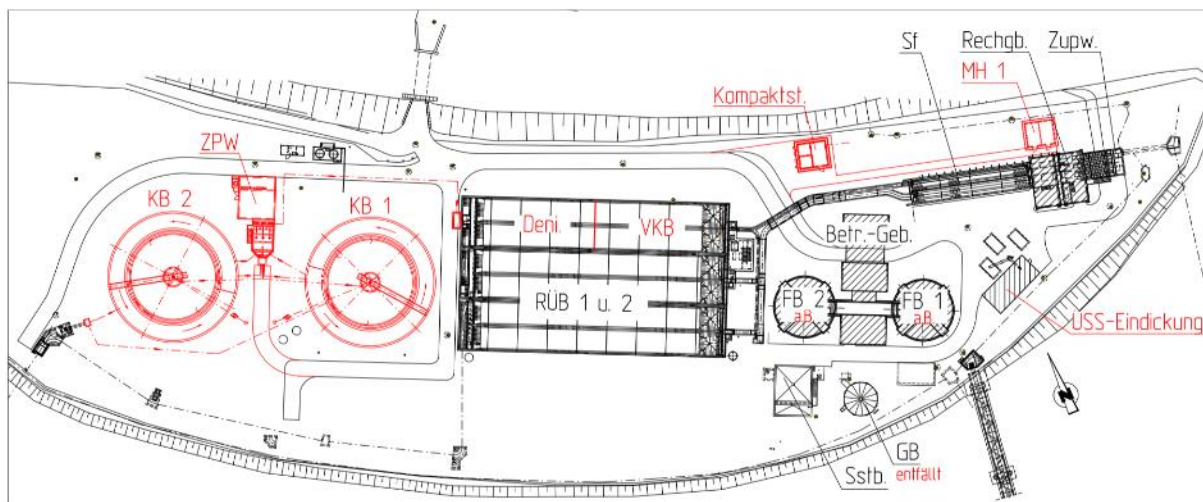


Abbildung 22: Variante 2: Neubau der Biologie [Ruhrverband]

**Variante 3: Neubau Biologie – Nereda® und Abriss der Schlammbehandlung**

Alternativ zum Bau zweier Kombibecken wurde der Neubau der Biologie nach dem Nereda®-Verfahren untersucht.

Zur Umsetzung des Verfahrens sollte das bestehende Vorklärbecken zu einem Zulaufausgleichsbecken und das Nachklärbecken zum Ablaufausgleichsbecken umgebaut werden. Zusätzlich war der Neubau zweier Nereda®-Becken sowie eines Maschinenhauses geplant. Die bestehende Schlammbehandlung (Faulung und maschinelle Entwässerung) sowie das bestehende Betriebsgebäude sollten zurückgebaut und ein bedarfsgerechtes Betriebsgebäude neu errichtet werden. Die Überschussschlamm-Eindickung erfolgt statisch sowie maschinell. Anschließend erfolgt die Weiterbehandlung des Schlamms auf der KA Iserlohn-Letmathe. Die Umbaumaßnahmen sind in der **Abbildung 23** dargestellt.

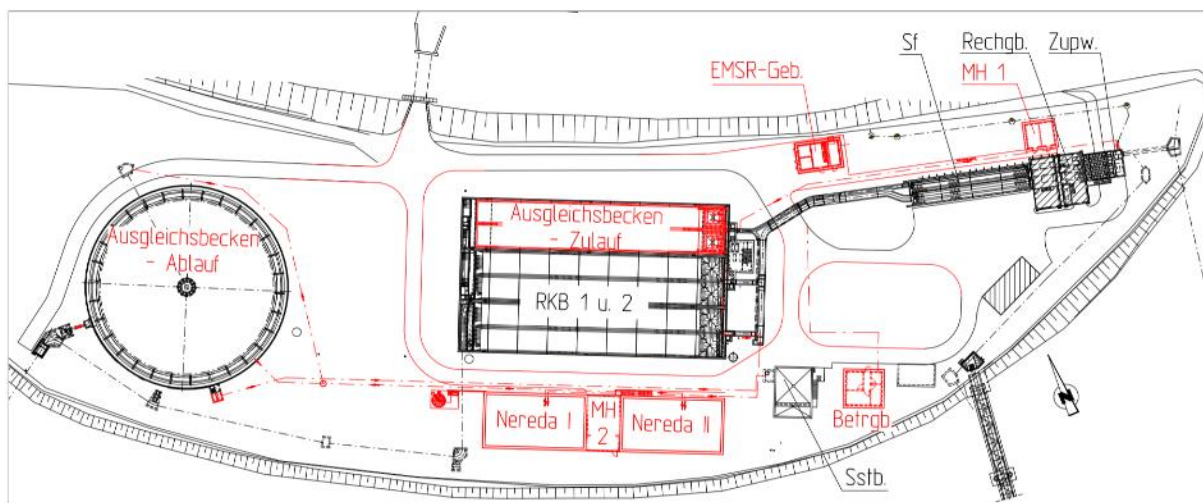


Abbildung 23: Variante 3: Neubau der Biologie nach dem Nereda®-Verfahren [Ruhrverband]

Die beschriebenen Varianten wurden einer Wirtschaftlichkeitsberechnung, basierend auf einer angenommenen Nutzungsdauer von 30 Jahre, unterzogen.

### **Variante 1: Sanierung der KA Altena**

Für die Maßnahmen zum Weiterbetrieb der Kläranlage für die nächsten 30 Jahre wurden in der Wirtschaftlichkeitsberechnung Kosten veranschlagt in Höhe von:

Bautechnik (brutto):	1.800.000 €
Maschinentechnik (brutto):	2.987.000 €
E-Technik (brutto):	1.701.000 €
Rückbau von Altanlageanteilen:	12.000 €
<b>Gesamtkosten (brutto):</b>	<b>6.500.000 €</b>

Die Betriebskosten wurden den Ergebnissen aus dem betrieblichen Controlling (Betriebsinfo) der Jahre 2011 bis 2015 entnommen. Durch Einsatz wirtschaftlicher Aggregate bei der Erneuerung der Maschinentechnik sowie durch die energetischen Verbesserungsmaßnahmen wurde eine Reduzierung des Energiebedarfs um 10 % ermittelt, sodass für diese Variante Betriebskosten in Höhe von rd. 954.000 €/a in Ansatz gebracht wurden.

### **Variante 2: Neubau der Biologie als Kombibecken (intermittierende Denitrifikation)**

Für diese Maßnahmen wurden Kosten veranschlagt in Höhe von:

Bautechnik (brutto):	4.535.000 €
Maschinentechnik (brutto):	2.430.000 €
E-Technik (brutto):	1.690.000 €
Rückbau von Altanlageanteilen:	12.000 €
<b>Gesamtkosten (brutto):</b>	<b>8.667.000 €</b>

Die Betriebskosten wurden auf Basis der Ergebnisse aus dem betrieblichen Controlling (Betriebsinfo) der Jahre 2011 bis 2015 ermittelt. Durch Einsatz wirtschaftlicher Aggregate bei der Erneuerung der Maschinentechnik sowie durch das Verfahren der intermittierenden Denitrifikation wurde bei dieser Variante ebenfalls eine Reduzierung des Energiebedarfs um 10 % ermittelt, sodass für diese Variante Betriebskosten in Höhe von rd. 933.000 €/a in Ansatz gebracht wurden.

### **Variante 3: Neubau Biologie - Nereda®**

Zur Umsetzung der Erneuerung der KA Altena nach dem Nereda®-Verfahren wurden Kosten veranschlagt in Höhe von:

Bautechnik (brutto):	3.001.000 €
Maschinentechnik (brutto):	2.825.000 €
E-Technik (brutto):	1.848.000 €
Rückbau von Altanlageanteilen:	250.000 €
Impf Schlamm:	117.000 €
<b>Gesamtkosten (brutto):</b>	<b>8.041.000 €</b>

Die Betriebskosten wurden auf Basis der Ergebnisse aus dem betrieblichen Controlling (Betriebsinfo) der Jahre 2011 bis 2015 ermittelt. Durch Einsatz wirtschaftlicher Aggregate bei der Erneuerung der Maschinentechnik sowie durch das Nereda®-Verfahren wurde eine Reduzierung des Energiebedarfs um 20 % ermittelt, sodass für diese Variante Betriebskosten (einschließlich Abwasserabgabe) in Höhe von rd. 795.000 €/a in Ansatz gebracht wurden.

### **Wirtschaftlichkeitsvergleich der Varianten**

Für alle Varianten wurden sowohl die Investitions- und Reinvestitionskosten als auch die Instandhaltungs- und Betriebskosten ermittelt und in einer Wirtschaftlichkeitsberechnung gegenübergestellt.

Es wurden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

Planungshorizont:		30 Jahre
Nutzungsdauer	Bautechnik:	30 Jahre
	Maschinentechnik:	20 Jahre
	Elektrotechnik:	10 Jahre
Instandhaltung	Bautechnik:	0,5 %/a der Investitionskosten
	M+E-Technik:	2,0 %/a der Investitionskosten

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung sind in der nachfolgenden Tabelle 20 zusammengefasst.

**Tabelle 20: Zusammenstellung der Projektkostenbarwerte [Ruhrverband]**

<b>Variante</b>	<b>Variante1</b> Sanierung KA Altena	<b>Variante 2</b> Neubau Biologie intermittierende Deni	<b>Variante 3</b> Neubau Biologie Nereda®-Verfahren
<b>Projektkostenbarwert</b>	<b>30.666.254 €</b>	<b>31.080.566 €</b>	<b>28.053.066 €</b>
Investitionen	5.380.112 €	7.177.077 €	6.363.840 €
Re-Investitionen	3.524.828 €	3.203.194 €	3.412.323 €
Betriebskosten	21.761.314 €	20.700.295 €	18.276.904 €
<b>Differenz Barwert</b>		<b>+ 414.312 €</b>	<b>- 2.613.188 €</b>
		<b>+ 1,4 %</b>	<b>- 8,5 %</b>

Der Vergleich der Projektkostenbarwerte zeigt, dass der Neubau der Biologie nach dem Nereda®-Verfahren mit einem Projektkostenbarwertvorteil von 8,5 % die wirtschaftlichste Variante darstellte. Somit hat sich das innovative Verfahren gegenüber konventionellen Verfahren durchgesetzt. Daher wurde diese Variante weiter ausgearbeitet und zur Genehmigung eingereicht.

Im Rahmen der weiteren Projektbearbeitung wurde die Vorzugsvariante einer vertieften Detailplanung unterzogen. Da in Deutschland zum Zeitpunkt der Planung keine Betriebserfahrungen vorlagen, wurde im Zuge der Entwurfsplanung entschieden, anstelle der zunächst vorgesehenen zwei Nereda®-Reaktoren mit je 2.550 m<sup>3</sup> insgesamt drei Reaktoren mit einem Volumen von jeweils 1.700 m<sup>3</sup> einzuplanen. Diese Anpassung trägt maßgeblich zur Erhöhung der Betriebssicherheit bei und stellt sicher, dass die deutschen strengeren gesetzlichen Anforderungen (qualifizierte Stichprobe bzw. 2h-Mischprobe und 4 aus 5 Regel) an den Kläranlagenablauf erfüllt werden können. In den meisten EU-Ländern wird der Betriebsmittelwert als Überwachungswert genutzt. Durch die Erweiterung der Anlage um einen dritten Nereda®-Reaktor kann auch in einem Revisionsfall gewährleistet werden, dass die Ablaufwerte zu jedem Zeitpunkt, unabhängig von den Zulaufbedingungen eingehalten werden können. Zwischen den Variantenuntersuchungen und dem Abschluss der Detailplanung lagen zudem mehr als zwei Jahre, was zu einer zusätzlichen marktbedingten Erhöhung der Baukosten von rund 25 %, aber auch zu einer Kostenerhöhung für die Maschinen- und Elektrotechnik führte. In Kombination ergaben sich in der Detailplanung aus erhöhten marktbedingten Baukosten und der Erweiterung um ein drittes Becken für einige Posten (z. B. Zuleitungen zu den Nereda®-Reaktoren, Grundstücke, Belebung) Kostenerhöhungen zwischen 20 und 49 %, was entsprechend Tabelle 21 insgesamt zu einer Kostenerhöhung um 48 % führte.

**Tabelle 21: Entwicklung der Kosten**

	<b>Kosten (T€) Berechnung 2017</b>	<b>Kosten (T€) Berechnung 2019</b>	<b>Kostenerhöhung</b>
Summe Bautechnik brutto	2.924	4.358	49%
Summe M-Technik brutto	2.825	3.632	29%
Summe E-Technik brutto	1.848	2.218	20%
Summe Sonstige Kosten brutto	862	835	-3%
<b>Summe Kosten brutto</b>	<b>8.459</b>	<b>11.044</b>	<b>31%</b>
RV-Eigenleistung	<b>1.250</b>	<b>3.346</b>	<b>168%</b>
Kosten Monitoring	<b>77</b>	<b>77</b>	<b>0%</b>
Kosten Messprogramm UBA	<b>33</b>	<b>33</b>	<b>0%</b>
<b>Gesamtkosten brutto</b>	<b>9.819</b>	<b>14.500</b>	<b>48%</b>

Die Investitionskosten sind im Rahmen der Detailplanung der Vorzugsvariante signifikant gestiegen. Während die Vorzugsvariante weiterentwickelt wurde, sind die anderen Varianten nach der Entscheidung über die Vorzugsvariante auf Stand der Variantenuntersuchung belassen worden. Daher ist ein unmittelbarer Kostenvergleich zu den konventionellen Varianten nicht mehr gegeben. Es ist jedoch anzumerken, dass auch diese anderen Varianten von der Kostensteigerung betroffen wären. Die Preise für Bau-, Maschinen- und Elektrotechnik sind in den letzten Jahren deutlich angestiegen, und auch bei den konventionellen Varianten hätten notwendige Anpassungen in der Detailplanung zu Investitionskostenerhöhungen geführt, da in dieser Phase häufig zusätzliche Anforderungen, technische Anpassungen und ungeklärte Planungspunkte auftreten. Nach dem Baubeginn 2019 kam es zu weiteren Preissteigerungen, infolge der Covid-19-Pandemie und Lieferengpässen, die vor allem durch Materialknappheit und gestörte globale Lieferketten verursacht wurden.

Die Gesamtausgaben betragen Stand Dezember 2025 13,8 Mio. €. Es stehen noch Restmaßnahmen aus, die aber ohne Einfluss auf den Betrieb des Nereda®-Verfahrens sind. Es handelt sich ausschließlich um nicht zuwendungsfähige Ausgaben. Entgegen der ursprünglichen Planung wurde die Ausrüstung der Regenüberlaufbecken mit Spülkippen verworfen, hier erfolgt stattdessen eine Erneuerung der Räumlichkeiten. Eine weitere Änderung ist der geplante Abriss des vorhandenen Betriebsgebäudes. Weitere noch offene Restarbeiten sind der Wege- und Straßenbau sowie der Abriss der Altanlage. Der Rückbau der Altanlage kann jedoch erst nach erfolgter Genehmigung im Jahr 2026 erfolgen, da eine der Nebenbestimmungen war die Altanlage während des Versuchsbetriebes betriebsbereit vorzuhalten. Somit ist der Beginn des Rückbaus für 2027 geplant.

### 3.4.2 Aktueller Betriebskostenvergleich

Insgesamt ergeben sich derzeit höhere Betriebskosten zur Bestandsanlage (s. Tabelle 22). Die Verbräuche für Betriebschemikalien bewegen sich weiterhin auf einem ähnlichen Niveau, sind jedoch deutlich von den Preissteigerungen der letzten Jahre betroffen. Diese resultieren aus höheren Beschaffungskosten, gestiegenen Energiepreisen sowie Lieferengpässen infolge geopolitischer Veränderungen. Die Kosten für Fällmittel sind in den vergangenen vier Jahren um rund 50 % gestiegen.

Der Personalaufwand konnte während des Demonstrationsbetriebs noch nicht wie geplant reduziert werden, da dieser notwendig für den Einfahrprozess, die betriebliche Optimierung und die Durchführung des Messprogramms war. Auch hier fallen aufgrund der Lohnkostensteigerung etwas höhere Kosten an. Zusätzliche jährliche Kosten fallen durch die optionale externe Betriebsunterstützung durch den Lizenzgeber und die Nutzungsgebühren für den externen Controller an, wodurch regelmäßige Updates garantiert werden.

Auffällig ist, dass bei der neuen Anlage höhere Instandhaltungskosten angefallen sind als vor dem Umbau. Dies ist neben den Preissteigerungen und erhöhten Lohnkosten vor allem auf die zahlreichen Ausfälle der maschinellen Ausstattung zurückzuführen. Hier sind vor allem der wartungsintensive Lochblechrechen sowie Reparaturen an den Luftklappen und Kompressoren zu nennen, die zu den erhöhten Kosten führten.

Der gesteigerte Energiebedarf für die Belüftung und das Beschickungspumpwerk bei gleichzeitigem Wegfall der Eigenerzeugung durch die anaerobe Schlammstabilisierung führt zu einer Verdopplung der Energiekosten. Die gesteigerten Kosten für die Energie gehen auf die Betriebsumstellung zurück, während die Kosten für Schlamm Entsorgung vor allem auf die strategische Entscheidung zurückzuführen ist, am Standort keine Faulung mehr zu betreiben. Die maschinelle Eindickung des Überschussschlamm führt zu einem TR-Gehalt von etwa 6,9 %, wodurch ein Gesamtvolumen von 8.154 m<sup>3</sup> Nassschlamm/Jahr anfallen, die mittels Pumpwagen auf die Nachbaranlagen zur anaeroben Behandlung transportiert werden müssen. Demgegenüber steht im Vergleichsjahr aufgrund der Entwässerung des stabilisierten Schlamm (27,5 % TR) nur ein abzutransportierendes Volumen von 902 m<sup>3</sup>/a. Die höheren Kosten sind demzufolge auf die erhöhten Transportkosten zurückzuführen. Eine alternative Berechnung für die (virtuellen) Schlamm Entsorgungskosten zeigt, dass die Kosten ähnlich hoch ausfallen, wenn günstigere bzw. marktübliche Transportkosten von 10 statt 26 €/m<sup>3</sup> und die bei der Klärschlammverbrennung anfallenden Entsorgungskosten mitberücksichtigt werden. Hier ist zu beachten, dass die Entsorgungskosten (Verbrennung) ebenfalls einer deutlichen Preissteigerung unterliegen.

Durch die guten Betriebsergebnisse kommt es bei der Abwasserabgabe voraussichtlich dennoch zu einer deutlichen Einsparung.

**Tabelle 22: Betriebskostenvergleich vorher nachher [Ruhrverband]**

Kostenart	Einheit	2019	2024
<b>Energiekosten</b>	€/a	67.843	114.000
<b>Personalaufwand</b>	€/a	170.412	202.722
<b>Abwasserabgabe <sup>*1</sup></b>	€/a	85.455	56.917
<b>Betriebschemikalien</b>	€/a	36.796	52.487
<b>Instandhaltung</b>	€/a	169.402	183.896
<b>Reststoffentsorgung (Sandfang, Rechengut)</b>	€/a	9.815	25.193
<b>Betriebsunterstützung durch Lizenzgeber und Nutzungsgebühren für den Controller</b>	€/a	0	25.000
<b>Schlammmentsorgung</b>	€/a	80.894	214.359
davon Transport zu anderen KA <sup>*2</sup>	€/a	0	214.359
davon Verbrennungskosten	€/a	70.191	0
davon Transport zu Verbrennungsanlage	€/a	10.703	0
<b>Schlammmentsorgung (virtuell) <sup>*3</sup></b>		-	229.855
davon Transport zu anderen KA <sup>*4</sup>		-	81.540
davon Verbrennungskosten <sup>*5</sup>		-	124.037
davon Transport zur Verbrennungsanlage <sup>*6</sup>		-	24.278
<b>Summe</b>	€/a	620.618	874.573
<b>Summe (mit virt. Schlammmentsorgung)</b>	€/a	620.618	890.069

\*1 Abwasserabgabe für 2024 entspricht einer Prognose, da die Verrechnung rückwirkend erfolgt

\*2 aufgrund der beengten Zufahrt und nur einem verfügbaren Wettbewerber musste hohe Transportkosten von 26 €/m<sup>3</sup> bezahlt werden

\*3 zur besseren Vergleichbarkeit wird mit marktüblichen Transportkosten und einschl. Entsorgungskosten für die Verbrennung gerechnet

\*4 Annahme von marktüblicheren Preisen für Transport von 10 €/m<sup>3</sup>

\*5 Entsorgungskosten sind von 280 €/t TR in 2019 auf 330 €/t TR in 2024 gestiegen  
Annahme TR-Reduktion um 1/3 von 561 t TR/a

\*6 Annahme 12€/t Transport zur Verbrennungsanlage; Annahme: TR von 27,5% erreicht

### 3.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Um das Verfahren mit den konventionellen bzw. etablierten Verfahren vergleichen zu können, wurden wesentliche Verfahrensmerkmale in Tabelle 23 einander gegenübergestellt. Demnach ist das Verfahren als SBR-Verfahren einzustufen, welches analog zu aeroben Schlammstabilisierung auf eine Vorklärung verzichtet. Dies geschieht, wie in Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben ist, damit der granulare Schlamm bei der Reaktorbeschickung einer hohen organischen Substratkonzentration ausgesetzt wird. Dadurch haben die langsam wachsenden Organismen (PAO, GAO) einen Wettbewerbsvorteil bei der Aufnahme des leicht verfügbaren Kohlenstoffs und tragen durch die Produktion von EPS zur Bildung der Granula bei. Zusätzlich wird durch kurze Sedimentationsphasen ein hoher Selektionsdruck aufrechterhalten. Der Hauptunterschied zum SBR-Verfahren liegt demnach in einer höheren Reaktorschlammkonzentration von etwa 8 g/l und in der

Beschaffenheit des Schlammes, der hier eine kompakte, granulare Struktur aufweist. Die gute Absetzleistung des Schlammes im Vergleich zu konventionellem belebtem Schlamm erlaubt einen optimierten SBR-Betrieb. Durch die geringe Auftriebsgeschwindigkeit während der flächigen Beschickung über die Reaktorsole, die zu einer vertikalen Pfropfenströmung führt, können die Befüll- und Entleerungsphasen im Nereda®-Zyklus gleichzeitig stattfinden. Daraus resultieren längere Reaktionsphasen und ermöglichen eine verbesserte Nährstoffelimination. Durch die granulare Struktur können verschiedene Stoffwechselprozesse simultan passieren (z.B. Nitrifikation im Außenbereich und Denitrifikation im Inneren der Granule), was die Nährstoffelimination zusätzlich verbessert. Bei der Granulabildung werden also sowohl die mikrobiologischen Randbedingungen mit der physikalischen Selektion des Schlammes kombiniert. Damit unterscheidet sich das Verfahren auch von anderen Wettbewerbern am Markt, die zur Etablierung der aeroben Granula nur auf eine physikalische Selektion (z.B. durch den Einsatz von Hydrozyklonen) setzen.

Die Beschickung der Reaktoren mit Rohabwasser ohne einen vorherigen Abzug von Primärschlamm führt wiederum zu einer deutlich höheren Zulaufbelastung der biologischen Stufe. Wie im Kapitel 3.2.2 dargestellt, führt dies am Standort Altena im Vergleich zu Bestandsanlage zu einem deutlich höheren Energiebedarf für die Belüftung.

Nachteilig auf der KA Altena ist auch, dass zur Gewährleistung der vertikalen Pfropfenströmung das Rohabwasser stets gepumpt werden muss und dabei durch die hohe Reaktortiefe ein hoher statischer Wasserdruck überwunden werden muss. Können die Reaktoren, wie in diesem Fall, nur oberirdisch errichtet werden, geht dies ebenso mit einem erhöhten Energieverbrauch einher.

Bei Vergleichen zu anderen Verfahren mithilfe der, in der Siedlungswasserwirtschaft gebräuchlichen, Einwohnergleichwerte<sup>7</sup> muss berücksichtigt werden, dass die tatsächliche Belastung der biologischen Stufe aufgrund der fehlenden CSB-Elimination in der Vorklärung um ca. 30 % höher ist als bei konventionellen Verfahren mit einer Vorklärung.

---

<sup>7</sup> Annahme für die Berechnung der Einwohnergleichwerte ist eine spezifische CSB-Belastung von 120 g CSB/(E\*d)

**Tabelle 23: Vergleich von konventionellen Verfahren mit dem Nereda®-Verfahren am Standort Altena [Ruhrverband]**

	<b>Belebtschlamm-Verfahren mit anaerober Schlammbehandlung</b>	<b>SBR-Anlage</b>	<b>Belebtschlamm-Verfahren mit aerober Schlammbehandlung</b>	<b>Nereda®-Verfahren KA Altena (AGS-SBR)</b>
<b>Vorklärung</b>	Ja, Primärschlamm in Faulbehälter behandelt/stabilisiert	Ja, Primärschlamm in Faulbehälter behandelt/stabilisiert	Nein, durch hohes Schlammalter (>25 Tage) wird der Schlamm aerob in der Belebungsstufe stabilisiert	Nein, zusätzliche organische Substanzen werden Substrataufnahme der PAO und GAO bzw. zur Granulabildung benötigt
<b>Betrieb hydraulisch</b>	Kontinuierlich durchflossen	Diskontinuierliche Beschickung; Ausgleichsbecken erforderlich	Kontinuierlich durchflossen	Diskontinuierliche Beschickung; Ausgleichsbecken erforderlich,
<b>Beschickung</b>	Im Freigefälle (nach Anheben durch Zulaufpumpwerk)	I.d.R. über Beschickungspumpwerk, Freigefälle möglich (nach Anheben durch Zulaufpumpwerk)	Im Freigefälle (ggf. nach Anheben durch Zulaufpumpwerk)	Zulaufpumpwerk; Beschickung über Reaktorsole
<b>Belüftung</b>	Kontinuierliche und intermittierende Belüftung möglich	intermittierend	Kontinuierliche und intermittierende Belüftung möglich	intermittierend
<b>Austauschrate</b>	-	0,1-0,5 [21]	-	0,4-0,7 [2]
<b>Abzugszeiten/ Dekantierzeit</b>	-	30-90 min [21]	-	0-10 min (zeitgleich während Beschickung u./o. ÜSS-Abzug)
<b>Hydraulische Verweilzeit/Gesamtzykluszeiten</b>	12-24 h [21]	12-24 h [21]	12-24 h [21]	3-6 h (allg. bis zu 10 h) vgl. [2]
<b>Belebtschlammkonzentration</b>	2-4 g/l	2-4 g/l	3-5 g/l	6-10 g/l
<b>Beckentiefe</b>	4-6,5 m	4-6,5 m	4-6,5 m	>7,5 m (allg. 5-11 m)
<b>Durchmischung</b>	Rührwerke und Impulsbelüftung möglich	Rührwerke und Impulsbelüftung möglich	Rührwerke und Impulsbelüftung möglich	Impulsbelüftung
<b>Nachklärung/ RLS-Pumpwerk</b>	Erforderlich	Nicht erforderlich	Erforderlich	Nicht erforderlich

## 4. Übertragbarkeit

### 4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

#### Schnelle Inbetriebnahme und stabile Granulierung

Um eine möglichst schnelle Inbetriebnahme zu gewährleisten, wurden 1.000 m<sup>3</sup> eingedickter Impfschlamm (3 % TR) von niederländischen Anlagen über 3 Wochen hinweg zur Kläranlage geliefert. Ein Animpfen mit konventionellem Belebtschlamm wäre auch möglich gewesen, indem der Selektionsdruck nach und nach erhöht wird. Diese Inbetriebnahme hätte so theoretisch bis zu 9 Monate gedauert. In diesem Zeitraum hätte teilweise ein hybrider Betrieb der alten und neuen Anlagen erfolgen müssen und eine vollständige Nährstoffelimination nicht garantiert werden können. Die Lagerung des Impfschlammes ohne Substratzugabe bei gelegentlicher Belüftung hat reibungsfrei funktioniert. Eine besondere Herausforderung in Altena war die beengte Zufahrtssituation, wodurch die Pumpwagen das Anlagengelände nicht passieren konnten (s. Abbildung 24). Ein Umfüllen des granularen Schlammes von den Pumpwagen in einen bereitgestellten Gütleanhänger war erforderlich. Hier kamen Vakuumpumpen zum Einsatz, die den Schlamm schonend umgepumpt haben. Nach wenigen Wochen im Betrieb hat sich der Schlamm an die Abwassermatrix in Altena adaptiert und die volle Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Absetz- und Abbauprozesse wurde erreicht.

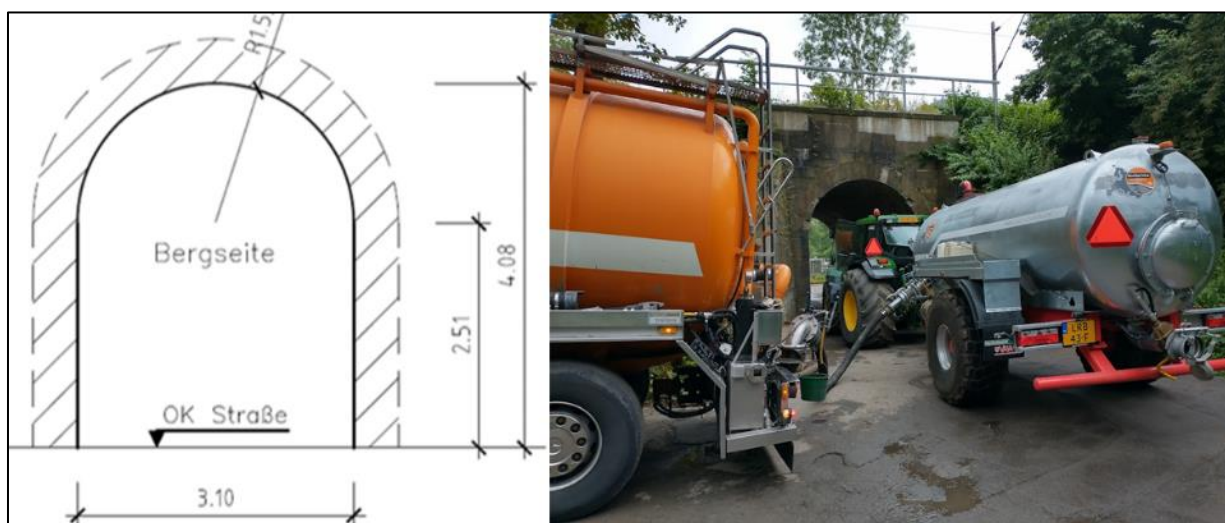


Abbildung 24: Zufahrt zur KA Altena während der Impfschlammtransporte [Ruhrverband]

Trotz der in Kapitel 3.2.5 dargestellten eher geringen CSB-Schlammbelastung und den nennenswerten Nitratfrachten im Zulauf, die potenziell einen negativen Einfluss auf die Granulabildung zur Folge haben könnten, wurden über die gesamte Betriebsdauer stabile Granulen beobachtet deren Zusammensetzung bzgl. der Granulengrößen nur geringe Veränderungen zeigten.

## **Gute Stickstoffelimination erlaubt vollständige Nutzung des Ausgleichsbeckens zur Zwischenspeicherung**

Aufgrund der erhöhten Nitratfrachten im Zulauf war planerisch eine hybride Nutzung des Ausgleichsbeckens vorgesehen (s. Abbildung 25). So kann eine Kammer genutzt werden, um dort bei Bedarf eine Vordenitrifikation durchzuführen. Eine weitere Variante sieht eine Vorversäuerung vor, um den Anteil der leicht abbaubaren organische Fraktion zu erhöhen. Die in Kapitel 3.2.1 beschriebene gute Gesamtstickstoffelimination erlaubt eine ausschließliche Nutzung des Ausgleichsbeckens zur Zwischenspeicherung des Rohabwassers.



**Abbildung 25: Hybrides Konzept zur Nutzung einer Kammer des Ausgleichsbeckens zur Vordenitrifikation oder zur Vorversäuerung [Ruhrverband]**

## **Guter Rückhalt der abfiltrierbaren Stoffe**

Über die gesamte Betriebsdauer hinweg wurde ein guter Rückhalt der abfiltrierbaren Stoffe beobachtet. Dies liegt vor allem an dem gut funktionierenden Prinzip für den Überschussschlammabzug aus den Reaktoren. Trotzdem hat sich gezeigt, dass dieser Prozess stets vom Betriebspersonal überwacht werden muss. Wenn es über längere Zeit zu einem unvollständigem Schlammabzug kommt, ist die Selektion beeinträchtigt und es kann sich schwer absetzbarer, flockiger Belebtschlamm im Reaktor akkumulieren. Nach einem TS-Anstieg in den Reaktoren im Sommer 2024 wurde auf eine alternative Methode zurückgegriffen, um eine möglichst große Schlammmenge in kurzer Zeit aus den Reaktoren zu entfernen, was mit der Standard-Methode nicht möglich ist. Die alternative Methode erlaubt einen Schlammabzug aus der belüfteten (voll durchmischten) Phase, wodurch auch ein nennenswerter Anteil an granuliertem Schlamm mit entfernt wird. Der alternative Schlammabzug kann eingesetzt werden, um den Gesamt-TS schneller abzusenken oder auch um die Größenverteilung der Granulen zu beeinflussen, kommt aber im Regelbetrieb nur selten zum Einsatz.

Begrenzend für die Schlammentnahme ist die Dimensionierung der Voreindicker. So kommt es immer wieder vor, dass betriebliche Sollvorgaben (z.B. Abzugszeiten, TS nach dem Abzug im Reaktor) bei dem regulären Schlammabzug nicht erfüllt werden können, weil die Voreindicker ihren maximalen Füllstand erreicht haben. Um also eine größere Flexibilität und Kontrolle über den TS-Gehalt in den Reaktoren zu bekommen, sollte eine größere Dimensionierung der Voreindicker während der Planung in Betracht gezogen werden.

## **Reibungsloser Bauablauf und ungestörter Betrieb der Altanlage während der Bauzeit**

Nach dem Baubeginn im Jahr 2019 konnte trotz Beeinträchtigung durch die Corona-Pandemie ein nahezu reibungsfreier Bauablauf erreicht werden. So konnte die Anlage planmäßig im Jahr 2022 in Betrieb genommen werden. Aufgrund der platzsparenden Bauweise konnten die neuen Reaktoren auf einem freien Bauplatz errichtet werden, ohne den Regelbetrieb der Altanlage zu beeinträchtigen. Somit verfügte die Kläranlage während der gesamten Bauphase über die vollständige Leistungsfähigkeit. Dies wäre bei einem Umbau der einstraßigen Bestandsanlage nicht möglich gewesen und hätte die Nutzung von provisorischen Lösungen erfordert.

## **Planung der Rechenstufe**

Beim Nereda®-Verfahren werden besonders hohe Anforderungen an den Rückhalt von Rechengut gestellt, um mögliche Verstopfungen zu vermeiden und Reinigungsaufwand in den Beschickungsleitungen zu reduzieren. Feststoffe mit einem Durchmesser von 6 mm oder mehr sollen daher zuverlässig durch den Rechen zurückgehalten werden. In Altena kommt hierfür ein Rechen mit 4-mm-Lochblech zum Einsatz.

In den ersten beiden Betriebsjahren traten jedoch wiederholt Fehlfunktionen des Feinsiebrechens auf, die zu einem erhöhten Eintrag von Rechengut führten. Dies verursachte vor allem Verstopfungen der Beschickungspumpen. Um den Betrieb der Reaktoren dennoch sicherzustellen, werden die Beschickungsleitungen vorsorglich regelmäßig mit einem Spülwagen gereinigt. Diese Spülungen lassen sich im laufenden Betrieb durchführen, ohne den Prozess zu unterbrechen.

Nach mehreren Revisionen und technischen Anpassungen am Rechen konnte mittlerweile ein dauerhaft zufriedenstellender Rückhalt des Rechenguts erreicht werden.

Bei künftigen Planungen sollte sichergestellt werden, dass durch einen zweistraßigen Rechenbetrieb eine Redundanz vorgehalten wird, da sich ein Ausfall oder eine Fehlfunktion direkt auf den gesamten Anlagenbetrieb auswirkt. Alternativ kann auch ein zwei-stufiges Rechenkonzept in die Planung miteinbezogen werden mit einem Grobrechen (z.B. 8 - 10 mm) im Zulauf der Anlage und einem Feinrechen (4 - 6 mm) im Ablauf des Sandfangs.

## **Planung und Bewirtschaftung des Ausgleichsbeckens**

Aufgrund des diskontinuierlichen SBR-Betriebs muss das ankommende Rohabwasser nach der Rechen- und Sandfangstufe in einem Ausgleichsbecken zwischengespeichert werden. In Altena wurde dafür die ehemalige Vorklärung auftriebssicher umgebaut. Durch diesen Umbau im Bestand ist das Speichervolumen begrenzt, sodass in etwa das Abwasser für 1,5 Zyklen zwischengespeichert werden kann. Gerade zu Beginn der Inbetriebnahme als der Prozess noch nicht optimal eingestellt war, hat dies häufig zu Überlaufereignissen geführt. Durch den hohen Fremdwasseranteil und die kurzen Fließzeiten im Kanal bei einsetzendem Regen kommt es im Zufluss der

Anlage zu einem sehr dynamischen Verhalten. Der Nereda®-Controller muss die Zyklusplanung schnell anpassen, da die Speicherkapazität im Ausgleichsbecken begrenzt ist. Mit Hilfe einer Zulaufprognose der Wassermengen versucht der Controller eine optimale Zyklusplanung zu realisieren. Aber gerade in der Hinsicht auf die Betriebssicherheit ist es von Vorteil die Ausgleichsbecken möglichst groß zu dimensionieren. Dadurch könnte auch bei Spitzenbelastungen ein Frachtmanagement eingeführt werden und die Nährstoffelimination verbessert werden. Hier sollten der Nutzen des größeren Speichervolumens und die Wirtschaftlichkeit aufgrund der höheren Baukosten abgewogen werden.

Nach den anfänglichen Problemen mit der Zulaufbewirtschaftung und der Wassermengenprognose konnte die Steuerung so optimiert und an die spezifische Zulaufsituation in Altena angepasst werden, dass das begrenzte Speichervolumen gut ausgenutzt wird, um möglichst lange Zyklen zu erlauben. Gleichzeitig werden Überlaufereignisse deutlich reduziert bzw. vermieden.

### **Pumpenergie**

Die oberirdische Bauweise und eine Wassertiefe von 7,5 m in den Reaktoren, wie in Kapitel 3.2.2 dargestellt, führen zu einem sehr hohen Energieverbrauch für die Beschickung. Dieser ist in etwa so hoch wie der Verbrauch für die Belüftung und zählt mit zu den größten Verbrauchern auf der Anlage. Bedingt durch den ohnehin hohen Fremdwassereintrag haben maßgeblich auch die hohen Niederschlagsmengen in dem Vergleichszeitraum und die damit verbundene hohe Abwassermenge zu dem erhöhten Energieverbrauch beigetragen. In Altena mussten besondere Anforderungen an den Hochwasserschutz erfüllt werden, da sich der Reaktorstandort in unmittelbarer Nähe zu Gewässer (Lenne) befindet. Die Grundwasserhaltung der Baugrube wäre sehr aufwändig geworden und die erforderlichen Maschinen konnten aufgrund der beengten Zufahrtsituation durch ein Bahnviadukt nicht bereitgestellt werden.

Dennoch sollte in künftigen Projekten die Möglichkeit geprüft werden, die Reaktoren tiefer zu bauen und eine wirtschaftliche Abwägung zwischen den erhöhten Baukosten und den Energiekosten stattfinden. Dadurch könnte ein Großteil der eingesetzten Pumpenergie eingespart werden. Auch bei der Pumpenauslegung sollte darauf geachtet werden, dass der im Betriebspunkt erforderliche Durchfluss durch eine einzelne Pumpe erreicht werden kann. Hierdurch kann ein höherer Wirkungsgrad erzielt werden und die Energieverluste reduziert werden.

### **Versorgungsleitungen (Luftverteilung, Fällmittel)**

Die SBR-Betriebsweise führt dazu, dass die Reaktoren nacheinander beschickt werden und die Zyklen zeitversetzt zueinander verlaufen. In einer häufig auftretenden Betriebssituation wird ein Reaktor beschickt, während ein zweiter in der Hauptbelüftung ist und ein dritter gelegentlich belüftet wird oder sich in einer Absetzphase befindet. Trotz dieses zeitversetzten Betriebs ist die Luftverteilung so konfiguriert, dass die Druckluftherzeuger (Gebläse) in eine Sammelleitung fördern und dort regelbare Abgänge zu den Reaktoren installiert wurden. Der unstetige Betrieb aus Dauerbelüftung mit stoßweiser Belüftung des Nachbarreaktors erschwert den Regelbetrieb. Es muss ständig auf die wechselnden Anforderungen reagiert werden, wodurch die Reaktoren zeitweise nicht bedarfsgerecht versorgt werden können. Des Weiteren müssen zusätzliche Absperrorgane in die Automatik integriert werden, die die Störanfälligkeit erhöhen. Auch bei den Druckluftherzeugern zeigten sich aufgrund dessen schon nach 3 Jahren Verschleißerscheinung, die eine Reparatur erforderten. Zu Gunsten einer einfachen Regalbarkeit, einer geringeren Störanfälligkeit und einem verschleißarmen Betrieb der Druckluftherzeuger ist es aus Betreibersicht sinnvoll, jeden Reaktor mit einer eigenen Luftleitung und Verdichterstation zu konfigurieren.

Ein ähnliches Problem resultiert aus der Konfiguration der Fällmittelleitung als Sammelleitung. Aus der Sammelleitung werden die drei Reaktoren und eine 4. Dosierstelle im Ablauf des Reaktors bedient. Es kommen Kugelhähne mit Magnetventilen zum Einsatz. Diese erlauben jedoch keine Mengenregelung. Dadurch kann immer nur eine der vier Dosierstellen bedient werden und es kann zu Konflikten bzw. zu einer gegenseitigen Blockade kommen. Dadurch kann die Fällung nicht immer bedarfsgerecht erfolgen. Dieses Problem kann vermieden werden, wenn jeder Reaktor über eine eigene Dosierleitung und Fällmittelpumpe verfügt. Alternativ kann bei Neuanlagen die Fällmittelzugabe im Ausgleichsbecken eingesetzt werden.

### **Kohlenstoffdosierung in die Reaktoren**

Trotz der sehr guten Betriebsergebnisse ist aufgrund der schwankenden Zulaufbedingungen die Möglichkeit wünschenswert, Kohlenstoffträger in die Reaktoren dosieren zu können. Bei Bedarf können dadurch die Prozesse der P-Rücklösungen und Vordenitrifikation oder die Nachdenitrifikation verbessert werden. In Altena war dies planerisch nicht vorgesehen. Daher wurde noch eine Kohlenstoffdosierung im Ausgleichsbecken (kurz vor den Beschickungspumpen) nachgerüstet, um die P-Rücklösungen und Vordenitrifikation während der Beschickungsphase zu verbessern.

Im bisherigen Betriebszeitraum wurde ein Kohlenstoffträger als Vorsichtsmaßnahme zugegeben, da aufgrund der geringen Schlammbelastung Bedenken bestanden, ob ausreichend Substrat für die Granulabildung bereitgestellt wird. Seit Juli 2024 wird probeweise auf die Kohlenstoffzugabe

verzichtet. Bisher wurden dabei keine Auswirkungen auf den Prozess beobachtet. Ob ganzjährig auf die Kohlenstoffzugabe verzichtet werden kann, wird der Langzeittest zeigen.

### **Elektro- und Programmierarbeiten**

Die komplexe Anlagensteuerung sowie die Schnittstelle zwischen dem externen Controller und der lokalen SPS haben die Inbetriebnahme trotz umfangreicher Vorabtests erheblich erschwert. Gründe hierfür lagen einerseits in den unterschiedlichen Sicherheitsphilosophien der beteiligten Dienstleister, andererseits in der noch geringen Praxiserfahrung mit dem neuen Verfahren.

### **Transparenter Controller und Betriebsbegleitung durch externen Dienstleister**

Insgesamt erweist sich der eingesetzte externe Controller nach Abschluss der Inbetriebnahmephase als sehr zuverlässig und bietet eine transparente Darstellung der Prozessabläufe. Der Wechsel von der bisherigen Steuerung auf das neue System erforderte vom Betriebsteam jedoch eine intensive Einarbeitung sowie das Verständnis teils komplexer Zusammenhänge. Aus diesem Grund wurde die Inbetriebnahme eng durch die Verfahrenstechniker des Patentinhabers begleitet, die das Betriebsteam gezielt mit den Funktionen des Controllers vertraut machten. Sollwerte können durch das Betriebspersonal eingestellt werden. Änderungsvorschläge in der Zyklusplanung bzw. des Programmablaufs sind jedoch immer durch den Dienstleister umzusetzen.

### **Ersatzteilhaltung**

Aufgrund des SBR-Betriebs gibt es eine erhöhte Abhängigkeit von der Mess-, Steuer-, und Regeltechnik. Da Störungen an zentralen Aggregaten wie Steuerluftkompressoren, Gebläsen oder Klappenantrieben rasch einen Teilausfall oder sogar die Abschaltung eines Reaktors nach sich ziehen können, werden die wichtigsten Ersatzteile direkt auf der Anlage bevorratet.

### **Diskussion Faulung vs. Abtransport**

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde festgestellt, dass der Weiterbetrieb der KA Altena als Satellitenanlage ohne Schlammbehandlung die wirtschaftlichste Lösung darstellt. Ein Betrieb als Satellitenanlage ist derzeit jedoch noch nicht absehbar. Da sich die Kosten für den Schlammtransport unter anderem durch die erschwerten Zufahrtsverhältnisse mehr als verdoppelt haben, wäre in zukünftigen Planungen zu überdenken eine vorhandene Faulung weiter zu nutzen, auch wenn beim Nereda®-Verfahren kein Primärschlamm anfällt und somit eine geringere Gasproduktion zu erwarten ist. Der Vorteil bestünde dann in der besseren Entwässerbarkeit des Schlammes und der deutlichen Volumenreduzierung des Faulschlammes vor dem Abtransport.

## **4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)**

### **4.2.1 Neuheitswert des Nereda®-Verfahrens/Fortschrittlichkeit gegenüber dem Stand der Technik**

Durch den Einsatz aerober granulierter Biomasse werden die Vorteile verschiedenster bekannter Abwasserbehandlungstechnologien kombiniert und weitergeführt. Der Verzicht auf Nachklärbecken wie in herkömmlichen SBR-Verfahren, die Prozessstabilität etablierter Biofilmverfahren sowie hohe volumenspezifische Umsatzraten aufgrund hoher Biomassenkonzentrationen im Reaktor, wie sie aus der Anaerobtechnik (UASB-Reaktoren, EGSB-Reaktoren) bekannt sind, werden erstmals in einem Verfahren kombiniert, welches das konventionelle Belebungsverfahren vollständig ersetzen kann. Das Nereda®-Verfahren weist gegenüber dem Stand der Technik folgende Vorteile auf:

- Grundfläche der Anlage bis zu vier Mal kleiner als konventionelle Belebungsanlagen durch kompakte Bauweise
- Fähigkeit, hohe Anforderungen an die Ablaufwerte einzuhalten, indem Stickstoff und Phosphor in einem einzigen Verfahrensschritt entfernt werden
- Stabile Schlammeigenschaften unabhängig von saisonalen Einflüssen

Damit entstehen weitere Vorteile, die aber je nach Standortbedingungen und der Abwasserzusammensetzung unterschiedlich stark zum Tragen kommen können:

- Reduzierter Chemikalienverbrauch<sup>8</sup> durch „feast/famine-Prinzip“ (Wechsel von hohem Substratangebot und Substratarmut u.a. zur Förderung der biologischen P-Elimination)
- Kosteneffizienz, sowohl in Bezug auf den Kapitalaufwand als auch Personalkosten<sup>9</sup>
- Hohe Robustheit gegenüber Lastschwankungen und Veränderungen der Zulaufbedingungen

Die zugehörige Nereda®-Controller-Software ermöglicht die Umsetzung eines weitgehend automatisierten Anlagenbetriebs inklusive der flexiblen Anpassung der Prozessabläufe an variierende Zulaufbedingungen (u. a. basierend auf Prognosen der Zulaufwassermengen). Das Nereda®-Verfahren ist für die Reinigung kommunalen und industriellen Abwassers geeignet. Es wurde im Ausland bereits für ein breites Spektrum von Ausbaugrößen umgesetzt, von wenigen 10.000 bis hin zu mehreren 1.000.000 Einwohnerwerten.

---

<sup>8</sup> Variiert in Abhängigkeit von saisonalen Einflüssen, der Abwasserbeschaffenheit und vom Substratangebot

<sup>9</sup> Aufgrund von personalintensivem Demonstrationsbetrieb in diesem Projekt noch nicht nachgewiesen

#### 4.2.2 Übertragbarkeit auf gleiche oder andere Branchen

Viele Kläranlagen wurden in Deutschland Ende der 1990er Jahre bis zum 31.12.2005 für eine weitergehende Nährstoffelimination ausgebaut, um den ab diesem Stichtag verbindlich geltenden gesetzlichen Mindestanforderungen zu genügen. Dementsprechend hat ein Großteil dieser Kläranlagen im Bereich der Maschinen- und Elektrotechnik heute die üblichen Nutzungsdauern dieser Anlagenteile erreicht bzw. überschritten. Gerade im ländlichen Bereich hat ein demografischer Wandel eingesetzt, der eine rückläufige Schmutzfrachtbelastung für die vorhandenen Kläranlagen bedeutet. Hinzu kommen niedrigere Belastungen aus der Industrie. Dies wird viele Kläranlagenbetreiber dazu bewegen, auch konzeptionelle Überlegungen für ihre Kläranlagenstandorte anzustellen und über verschiedene Umbau-, Neubau- und Sanierungsszenarien nachzudenken. Die Mess-, Regel- und Fernwirktechnik sowie die elektronischen Kommunikationsmöglichkeiten haben in den vergangenen Jahren beträchtliche Fortschritte gemacht. Diese neuen Technologien können auch im Betrieb von Kläranlagen deutliche Vorteile bringen. Voraussetzung ist eine robuste Anlagentechnik, die durch das Nereda®-Verfahren gegeben ist.

Darüber hinaus sind die für den Umbau von Kläranlagen erforderlichen Reserveflächen auf vielen Kläranlagen nur begrenzt vorhanden. Das Nereda®-Verfahren kommt mit einem verhältnismäßig geringen Platzbedarf aus, da die sonst üblichen Nachklärbecken entfallen. Benötigt wird lediglich ein Ausgleichsbecken mit geringem Flächenbedarf, ein Umbau vorhandener Becken für diese Nutzung ist grundsätzlich möglich. Damit ist eine hohe Flexibilität für ggf. erforderliche Erweiterungen gegeben (z. B. weitergehende Niederschlagswasserbehandlung; weitergehende Abwasserbehandlung mit Filtration, Hygienisierung, Vierte Reinigungsstufe o. ä.; weitergehende Klärschlammbehandlung im Hinblick auf umzusetzende Vorgaben zur Entsorgung und P-Rückgewinnung o. ä.; etc.).

Für den Ruhrverband ist der Bau weiterer Nereda®-Anlagen künftig in Sonderfällen interessant. Der Grund dafür ist zum einen, dass auf vielen kleinen und mittleren Ruhrverbandsanlagen ähnlich hohe Fremdwassermengen wie in Altena anfallen, die zusätzlich in die Reaktoren gepumpt werden müssten und je nach statischer Förderhöhe die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen. Auch die Aufgabe der anaeroben Behandlung oder der Weiterbetrieb zur anaeroben Stabilisierung des Überschussschlammes ist aus ökologischer und energiewirtschaftlicher Sicht nicht vertretbar. Die geringere Klärgasausbeute infolge der ausschließlichen Behandlung von Überschussschlamm hat die Entscheidung zur Aufgabe der anaeroben Behandlung an diesem Standort geprägt. Maßgebend war aber auch eine strategische Entscheidung des Ruhrverbands, die Betriebspunkte auf diesem Standort weitestgehend zu reduzieren, um die Anlage als sogenannte Satellitenanlage aus der Ferne betreiben zu können.

Es ist vorstellbar, dass das Nereda®-Verfahren insbesondere bei Kläranlagenerweiterungen zum Einsatz kommt, wenn z.B. das Abwasser stillgelegter Kleinanlagen ohne eigene Faulung auf einer zentralen Kläranlage behandelt werden soll. Nereda®-Reaktoren lassen sich platzsparend errichten, ohne den laufenden Betrieb zu beeinträchtigen. Ein Teilstrom kann dann mithilfe des Nereda®-Verfahrens behandelt werden. Vorteilhaft ist, dass kritische Elemente wie die sichere Bewirtschaftung des Zulaufspeichers oder Teilausfälle aufgrund Störungen der MSR-Technik durch den Parallelbetrieb abgefangen werden können. Die Flexibilität des Gesamtanlagenbetriebs wird dadurch erhöht.

Bei einem Umbau auf einen vollständigen Nereda®-Betrieb sind speziell die Energieverbräuche bzw. -kosten in die Wirtschaftlichkeitsanalyse zu betrachten und planerische Maßnahmen zu ergreifen, um insbesondere den Energiebedarf für das Beschickungspumpwerk zu minimieren. An Kläranlagenstandorten mit Trennkanalisationen oder geringem Fremdwasseranteil würde dies nicht so stark in Gewicht fallen. Bei der Umrüstung von aerob stabilisierenden Anlagen ist es wahrscheinlich, dass das Nereda®-Verfahren zu einer Senkung des Energieverbrauchs führt und aufgrund der verbesserten Nährstoffelimination und dem platzsparenden Bau weitere Vorteile entstehen.

Insofern erscheint das Nereda®-Verfahren im Ruhrverbandsgebiet eher im Sonderfall für die Kläranlagenertüchtigung interessant zu sein. Dennoch kann sie für viele Gebiete in Deutschland als eine gut geeignete Technologie betrachtet werden, um vorhandene Kläranlagen umzurüsten, zu erneuern oder deren Kapazitäten bei geringem Flächenverbrauch zu erweitern. Insbesondere an Standorten mit einer Trennkanalisation würde sich diese Technologie anbieten. Durch die erfolgreiche Pilotumsetzung des Nereda®-Verfahrens in Deutschland ist davon auszugehen, dass auch andere Kläranlagenbetreiber zu ähnlichen Projekten ermutigt werden.

Ein Hemmnis in der Fachöffentlichkeit bestand darin, dass international andere Regularien für die Einleitung bestehen. So werden in den meisten Ländern, in denen das Nereda®-Verfahren zum Einsatz kommt, Betriebsmittelwerte (Jahresmittelwerte auf Basis von 24h-Mischproben) für die Ablaufüberwachung angewendet. In diesem Pilotvorhaben konnte aber gezeigt werden, dass das Verfahren auch der deutschen Überwachungsmethode, bei der qualifizierte Stichproben aus dem Kläranlagenablauf analysiert werden, standhält (vgl. Kapitel 3.2.1 Abbildung 11).

### 4.3 Kommunikation der Projektergebnisse

Über das Projekt und die Projektergebnisse wurde umfassend publiziert und kommuniziert. Die Veröffentlichungen erfolgten über verschiedene Kanäle: auf den Unternehmensmedien wie der Ruhrverbands-Homepage, in den Geschäftsberichten sowie in der Mitgliederzeitschrift „Glasklar“.

Darüber hinaus wurden das Projekt und seine Ergebnisse gezielt einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht - sowohl durch Fachartikel in einschlägigen Zeitschriften als auch durch Beiträge auf nationalen und internationalen Fachveranstaltungen. Auch Tageszeitungen und TV-Beiträge trugen dazu bei, das Projekt einer breiten Öffentlichkeit sichtbar zu machen.

Einen Überblick geben die nachfolgenden Tabellen:

**Tabelle 24: Liste der Fachpublikationen [Ruhrverband]**

<b>Titel</b>	<b>Medium</b>	<b>Erscheinungsdatum</b>
Kläranlage in Altena: Ruhrverband setzt das Nereda®-Verfahren um	EU-Recycling 12/2019	12/2019
Nereda®-Verfahren: Ruhrverband nimmt Kläranlage Altena offiziell in Betrieb	EUWID Wasser und Abwasser	28.10.2022
Kläranlage Altena reinigt erfolgreich nach dem Nereda®-Verfahren	wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik	25.05.2023
Kläranlage Altena: Neuartiges Abwasser-Reinigungsverfahren besteht Leistungstest	zfk.de	30.08.2023
Das Nereda®-Verfahren auf der Kläranlage Altena ein vielversprechendes neuartiges Behandlungskonzept	Korrespondenz Abwasser und Abfall (KA)	04/2026
Umstellung der Kläranlage Altena auf das Nereda®-Verfahren	KA-Betriebs-Info	2026

**Tabelle 25: Liste der Fachvorträge [Ruhrverband]**

<b>Titel</b>	<b>Veranstaltung</b>	<b>Art des Beitrags</b>	<b>Jahr</b>
Herausforderungen und Erfahrungen in Planung, Bau und Inbetriebnahme der ersten großtechnischen Nereda®-Anlage in Deutschland	Essener Tagung	Vortrag und Beitrag im Tagungsband „Gewässerschutz – Wasser – Abwasser“	2022
Herausforderungen und Erfahrungen in Planung, Bau und Inbetriebnahme der ersten großtechnischen Nereda®-Anlage in Deutschland	Karlsruher Flokkungstage	Vortrag und Beitrag in Band 159 der SWW-Schriftenreihe (digital)	2022
Planung, Bau und Inbetriebnahme der ersten großtechnischen Nereda®-Anlage in Deutschland	DWA-Landesverbandstagung Baden-Württemberg	Vortrag	2023
#70- Abwassertalk Das Nereda® Verfahren	Abwassertalk	Podcast	2023
Nereda®-Verfahren auf der Kläranlage Altena – Erste Erfahrungen aus Inbetriebnahme und Übergang in den Regelbetrieb	Essener Tagung	Vortrag und Beitrag im Tagungsband „Gewässerschutz – Wasser – Abwasser“	2024
Das Nereda®-Verfahren beim Ruhrverband - Pionierleistung bei einem deutschen Wasserverband	Seminarveranstaltung am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig	Vortrag	2024
Zwei Jahre Betriebserfahrung mit Deutschlands erster Nereda®-Anlage	Essener Tagung	Vortrag und Beitrag im Tagungsband „Gewässerschutz – Wasser – Abwasser“	2025
Innovative biologische Abwasserbehandlung mit dem Nereda®-Verfahren	DEX – Webinar (Deutscher Expertenrat für Umwelttechnologie und Infrastruktur e.V.)	Webinar	2025
Nereda®-Verfahren in der Praxis – ein Erfahrungsbericht	DWA Landesverbandstagung Nordost	Vortrag	2025

Das neuartige Verfahren wurde durch Beiträge in der WDR-Lokalzeit (März 2022), im ARD-Mittagsmagazin (Juni 2024), durch einen Artikel in der Tagesschau („Sauberes Wasser dank kleiner Kügelchen“, Juni 2024) sowie durch zahlreiche Veröffentlichungen in lokalen und überregionalen Zeitungen einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt.

In der nachfolgenden Tabelle sind einige Zeitungsartikel gelistet.

**Tabelle 26: Liste der Zeitungen (analog und digital) [Ruhrverband]**

<b>Titel</b>	<b>Zeitung</b>	<b>Erscheinungsdatum</b>
Wie funktioniert das Nereda®-Verfahren?	Altenaer Kreisblatt	30.10.2021
Wie Kläranlagen kleiner und besser werden können	Süddeutsche Zeitung	19.03.2022
Innovatives Verfahren zur Abwasserreinigung auf der Kläranlage Altena des Ruhrverbands geht in Betrieb	Lokalstimme.de	28.10.2022
Kläranlage bundesweit einmalig	Altenaer Kreisblatt	28.10.2022
Innovative Klärtechnik	Westfalenspiegel	28.10.2022
14,5-Millionen-Euro-Neubau: Deutschlands innovativste Kläranlage steht im MK	Come-on.de	28.10.2022
Kläranlage Altena reinigt erfolgreich nach dem Nereda®-Verfahren	Südländer Tageblatt	31.10.2022

Das Projekt sowie das Verfahren wurden im Rahmen mehrerer Vor-Ort-Besichtigungen zahlreichen Besuchergruppen - darunter Vertreter verschiedenen Hochschulen und Betreiberorganisationen wie auch der DWA-Fachausschuss für aerobe biologische Abwasserbehandlungsverfahren - präsentiert. Im Rahmen der internationalen Konferenz für Wasser- und Abwassertechnologien „Leading Edge Conference on Water und Wastewater Technologies“ 2024 in Essen besuchten internationale Experten die Kläranlage Altena und informierten sich über das Nereda®-Verfahren.

## **5. Zusammenfassung**

### **Einleitung**

Der Ruhrverband ist ein öffentlich-rechtlicher Wasserverband, zuständig für Abwasserbehandlung und Wassermengenbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Ruhr. Er betreibt 66 Kläranlagen, zahlreiche technische Einrichtungen und acht Talsperren, finanziert sich über Mitgliederbeiträge und beschäftigt rund 1.000 Mitarbeitende.

Die Kläranlage Altena (Baujahr 1984, Ausbaugröße 35.000 EW) war zum Zeitpunkt der Antragstellung veraltet und erforderte eine umfassende Modernisierung insbesondere der Maschinen- und Elektrotechnik. Ein Anschluss an die KA Iserlohn-Letmathe erwies sich innerhalb der Vorplanung als unwirtschaftlich. Durch den demografischen Wandel wurde die Ausbaugröße auf 20.000 EW reduziert. Die alte Anlage arbeitete nach dem Belebtschlammverfahren mit anaerober Schlammstabilisierung und Energiegewinnung aus Faulgas, erreichte eine hohe CSB-Elimination, jedoch geringere Stickstoff- und Phosphorentfernungsraten.

Im Rahmen einer Variantenuntersuchung zur Ertüchtigung der Anlage zeigte sich, dass der Einsatz des innovativen Nereda®-Verfahrens als wirtschaftlichste Lösung hervortrat. Dabei sprachen

der geringere Flächenbedarf, die prognostizierte Reduktion im Energieverbrauch, die erwartete Verminderung bei der Nutzung von Fällmitteln durch eine verstärkte biologische Phosphorelimination, die Kosteneffizienz sowie ein reduzierter Wartungsaufwand für diese moderne Technologie. Aufgrund dieser Vorteile wurde das Nereda®-Verfahren zur Vorzugsvariante erklärt und in die Umsetzung gebracht.

### **Vorhabenumsetzung**

Ein Ziel des Projektes war es, die Kläranlage Altena zu ertüchtigen und auf das in Deutschland neuartige Nereda®-Verfahren umzurüsten, ohne dabei den laufenden Betrieb zu beeinträchtigen. Dabei sollte in der Praxis geprüft werden, ob der Standort von den Vorteilen des Verfahrens profitiert und welche standortspezifischen Randbedingungen für die Übertragbarkeit auf andere Standorte berücksichtigt werden müssen. Wesentlich war die Demonstration, dass die Ablaufqualität die hohen deutschen Überwachungsstandards erfüllt. Auch die Robustheit und die Eignung für den ferngesteuerten Satellitenbetrieb wurde dabei geprüft.

Das neuartige biologische Verfahren zur Abwasserbehandlung Nereda® ist erstmalig großtechnisch in Deutschland auf der KA Altena umgesetzt worden. Diese innovative Technologie basiert auf aerober granularer Biomasse im Sequencing-Batch-Reactor-Verfahren und ersetzt die herkömmlichen Belebtschlammflocken durch kompakte Granulen. Dadurch können biologische Prozesse wie Nitrifikation, Denitrifikation und biologische Phosphorelimination gleichzeitig in einem Reaktor stattfinden, weitgehend ohne chemische Fällmittel. Das Verfahren benötigt weniger Platz, senkt Investitionskosten und verspricht die Verringerung von Energiekosten und dem Verbrauch von Betriebsmitteln. Gleichzeitig werden die Absetzeigenschaften des Schlammes verbessert und der Bildung von Blähschlamm vorgebeugt. Durch die kompakte Bauweise konnte der Umbau ohne Beeinträchtigung des laufenden Anlagenbetriebs realisiert werden.

Für die Realisierung des Nereda®-Verfahrens waren HaskoningDHV, jetzt Haskoning (Patentinhaber) und die WABAG Wassertechnik AG (Schweiz) als Projektpartner eingebunden.

Die Umsetzung des Projekts zur Einführung des Nereda®-Verfahrens in Altena verlief insgesamt erfolgreich. Trotz komplexer Schnittstellen über mehrere Projektpartner bzw. Länder hinweg, patentrechtlicher Vorgaben und sprachlicher Barrieren konnten Planung, Bau und Inbetriebnahme erfolgreich abgeschlossen werden. Während der Bauphase, die trotz Corona-Pandemie weitgehend störungsfrei verlief, wurden die drei neuen Reaktoren errichtet, Ausrüstung installiert und bestehende Anlagenteile angepasst. Nach Abschluss der baulichen Maßnahmen begann im Sommer 2022 die Inbetriebnahme mit einer Impfschlammkampagne sowie einer Einfahrphase, in der die Reaktoren von Beginn an den gesamten Abwasserstrom übernahmen. Die förmliche Abnahme erfolgte nach einer 60-tägigen Leistungsfahrt im 2. Quartal 2023, wobei die Zielwerte mit Ausnahme des CSB-Betriebsmittelwertes durchweg erreicht oder übertroffen wurden.

## Ergebnisse

### Betriebsergebnisse

Die Auswertung der Ablaufkonzentrationen im zweijährigem Demonstrationszeitraum (06/2023 – 06/2025) zeigt deutliche Verbesserungen bei der Nährstoffelimination: Ammonium- und Stickstoffwerte konnten erheblich gesenkt werden, wodurch der Vorfluter deutlich entlastet wird. Die CSB-Zielkonzentrationen wurden ebenfalls erreicht. Auch beim Gesamtposphor ergaben sich durch Rückhaltewirkungen zusätzliche Verbesserungen. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Zielvorgaben erreicht wurden und die Anlage im Vergleich zur Altanlage eine deutliche Leistungssteigerung aufweist.

In energetischer Hinsicht ergibt sich auf der KA Altena hingegen ein anderes Bild: Der Gesamtstromverbrauch der Anlage ist nach dem Umbau deutlich gestiegen, insbesondere durch den hohen Energiebedarf für die Belüftung und das Beschickungspumpwerk. Ein ursprünglich erwartetes Einsparpotenzial konnte nicht bestätigt werden. Zwar arbeitet die biologische Stufe im Verhältnis zur eliminierten Fracht effizienter, durch die Mitbehandlung des Primärschlammes fällt der absolute Energieverbrauch jedoch höher aus. Auch die fehlende Energieerzeugung durch Wegfall der Schlammfäulung verstärkt diesen Effekt.

Die Phosphorelimination zeigt, dass die Ziele auch mit dem neuen Verfahren sicher erreicht werden, jedoch bisher keine signifikante Einsparung an Fällmitteln erzielt wurde. Optimierungspotenziale bestehen in der Anpassung der Dosierstellen. Im Vergleich zur Altanlage ist der Verbrauch von externem Kohlenstoff reduziert. Die Feststoffbilanz bestätigt eine hohe Rückhaltewirkung. Beim Rückhalt von Schwermetallen und Spurenstoffen zeigen sich keine Unterschiede zu Anlagen mit dem Belebtschlammverfahren.

Insgesamt belegen die Betriebsergebnisse, dass das Vorhaben erfolgreich umgesetzt und die angestrebten Ziele in Bezug auf Ablaufqualität und Nährstoffelimination erreicht oder übertroffen wurden. Einschränkungen bestehen vor allem im Bereich Energieeinsatz, während durch die positiven betrieblichen Erfahrungen und die erreichten Ablaufwerte die Umsetzung aus Betreibersicht dennoch als sehr zufriedenstellend bewertet wird.

### Umweltbilanz und Kostenvergleich

Bezogen auf die Emissionen ins Gewässer bestätigt sich die positive Entwicklung: Stickstoff- und Phosphorwerte liegen deutlich unter den Zielvorgaben, lediglich beim CSB kam es trotz Grenz- und Zielwertehaltung zu einer geringen Frachterhöhung. Im Energiebereich wurden die Ziele dagegen klar verfehlt: Der Verbrauch stieg um rund 233.000 kWh/a, der externe Bezug um 580.200 kWh/a, was zu insgesamt über 210 Tonnen zusätzlichem CO<sub>2</sub> pro Jahr führte. Wie be-

reits beschriebenen ist der höhere Energieverbrauch jedoch nicht ausschließlich eine Charakteristik des Nereda®-Verfahrens, sondern ist auch bedingt durch die Anlagenkonzeption und die hochwasserbedingte Höhenlage der Reaktoren.

Auch der Einsatz von Fällmitteln nahm zu, während der Kohlenstoffverbrauch weitgehend stabil blieb. Hier wird künftig infolge einer betrieblichen Optimierung eine Reduzierung des Verbrauchs erwartet. Der zusätzliche Schlammtransport belastet die Bilanz mit weiteren 35 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr. Diese Mehrbelastung wäre auch bei der Umsetzung der weiteren Planungsvarianten entstanden.

Der Betriebskostenvergleich zeigt aktuell höhere Aufwendungen als bei der Bestandsanlage, vor allem durch gestiegenen Energie- und Schlammentsorgungskosten sowie zusätzliche Reparaturen der z.T. störanfälligen Anlagenausstattung. Einsparungen sind bei der Abwasserabgabe zu erwarten, wodurch die Mehrkosten jedoch nur geringfügig abgedeckt werden.

### Betriebserfahrungen

Die Inbetriebnahme der Nereda®-Anlage in Altena erfolgte durch die Anlieferung von granularem Impfschlamm, wodurch bereits nach wenigen Wochen eine stabile Granulierung und volle Leistungsfähigkeit erreicht werden konnte – ein deutlicher Zeitvorteil gegenüber dem Anfahren mit Belebtschlamm. Trotz erhöhter Nitratfrachten im Zulauf blieb die Granulabildung über den gesamten Zeitraum stabil und die gute Stickstoffelimination machte eine Vorbehandlung obsolet und erlaubte die ausschließliche Nutzung des Ausgleichsbeckens zur Zwischenspeicherung. Der Rückhalt der abfiltrierbaren Stoffe funktionierte zuverlässig, erforderte jedoch eine kontinuierliche Überwachung des Schlammabzugs. Trotz sehr hohem Fremdwasseranteil und der niedrigen CSB-Zulaufkonzentration konnte eine stabile Granulabildung nachgewiesen werden. Während der Bauphase konnte dank kompakter Bauweise der Betrieb der Altanlage störungsfrei weitergeführt werden. Betriebliche Herausforderungen ergaben sich bei der Rechenstufe, wo es anfangs zu Fehlfunktionen kam, die später durch technische Anpassungen behoben wurden. Aufgrund der häufigen Wartungseinsätze und dem personalintensiven Messprogramm kann derzeit noch keine Aussage über die Eignung des Verfahrens für einen ferngesteuerten Satellitenbetrieb getroffen werden. Begrenzend auf die Flexibilität im Betrieb wirkten das Speichervolumen des Ausgleichsbeckens sowie die Dimensionierung der Voreindicker, was auf zukünftige Planungen von Nereda®-Anlagen übertragen werden sollte. Auch der hohe Energiebedarf für die Pumpen sowie die komplexe Luft- und Fällmittelverteilung stellen Optimierungsfelder dar. Insgesamt zeigte sich jedoch, dass das Verfahren trotz dieser Herausforderungen zuverlässig arbeitet und eine robuste Prozessstabilität und eine hohe Nährstoffelimination aufweist.

## **Ausblick**

In Deutschland haben viele Kläranlagen, die bis 2005 für eine weitergehende Nährstoffelimination ausgebaut wurden, heute ihre technische Lebensdauer erreicht, während demografischer Wandel und geringere Industriebelastungen zu sinkenden Abwassermengen führen. Das Nereda®-Verfahren bietet hierfür eine kompakte, flexible und robuste Lösung, die trotz begrenzter Flächen eine effiziente Modernisierung oder Erweiterung von Anlagen mit hoher Reinigungsleistung ermöglicht. Der erfolgreiche Demonstrationsbetrieb auf der Kläranlage Altena zeigt das Potenzial des Verfahrens für eine breite Anwendung in Deutschland und könnte weitere Betreiber zur Umsetzung ähnlicher Projekte motivieren. Die speziellen Gegebenheiten durch die z.T. sehr hohen Fremdwassermengen, die durch viele Kläranlagen des Ruhrverbands behandelt und zusätzlich gepumpt werden müssten, schränken die Anwendbarkeit im Verbandsgebiet aufgrund der nicht gegebenen Wirtschaftlichkeit in solchen Fällen ein. Insbesondere auf größeren Standorten ist die Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung eines möglichen Wegfalls oder einer deutlichen Reduktion der Faulgaserzeugung zu prüfen.

## 6. Summary

### Introduction

The Ruhrverband is a public-law water management association responsible for wastewater treatment and water quantity management in the Ruhr river basin. It operates 66 wastewater treatment plants, numerous technical facilities and eight reservoirs, is financed through member contributions, and employs around 1,000 staff.

The Altena wastewater treatment plant (constructed in 1984, design capacity 35,000 PE) was outdated at the time of application and required comprehensive modernization, particularly of mechanical and electrical equipment. A connection to the Iserlohn-Letmathe WWTP proved to be uneconomical during preliminary planning. Due to demographic change, the design capacity was reduced to 20,000 PE. The old plant operated using the activated sludge process with anaerobic sludge stabilization and energy recovery from digester gas, achieving high COD removal but lower nitrogen and phosphorus removal rates.

A variant analysis for upgrading the plant showed that the use of the innovative Nereda® process emerged as the most economical solution. This was due to the reduced space requirements, the predicted reduction in energy consumption, the expected reduction in the use of precipitating agents thanks to enhanced biological phosphorus removal, cost efficiency, and reduced maintenance requirements of this modern technology. Because of these advantages, the Nereda® process was selected as the preferred option and implemented.

### Project Implementation

One aim of the project was to upgrade the Altena WWTP and convert it to the Nereda® process without impairing ongoing operations. The intention was to verify in practice whether the site could benefit from the advantages of the process and to identify any site-specific constraints that would need to be taken into account for transferability to other sites. It was essential to demonstrate that the effluent quality meets the high German monitoring standards. The robustness and suitability for remote-controlled satellite operation was also evaluated.

The novel Nereda® biological wastewater treatment process was implemented on a full scale for the first time in Germany at the Altena plant. This innovative technology is based on aerobic granular biomass in a sequencing batch reactor and replaces conventional activated sludge flocs with compact granules. This enables biological processes such as nitrification, denitrification, and biological phosphorus removal to take place simultaneously in a single reactor, largely without chemical precipitants. The process requires less space, reduces investment costs, and promises lower energy and chemical consumption. At the same time settling properties of the sludge are improved and the formation of bulking sludge is prevented. Thanks to the compact design,

the conversion could be carried out without impacting ongoing plant operation.

For the introduction of the Nereda® process, Royal HaskoningDHV, now Haskoning (patent holder) and WABAG Wassertechnik AG (Switzerland) were involved as project partners.

Overall, the project to introduce the Nereda® process in Altena was successfully implemented. Despite complex interfaces across several countries, patent-related requirements, and language barriers, planning, construction, and commissioning were successfully completed. During the construction phase – which proceeded largely without disruption despite the COVID-19 pandemic – the three new reactors were built, equipment was installed, and existing plant components were adapted. After completion of the construction work, commissioning began in summer 2022 with an inoculation campaign using granular sludge and a start-up phase in which the reactors took over the full wastewater load from the outset. Formal acceptance took place after a 60-day performance test in the second quarter of 2023, with target values consistently achieved or exceeded, except for the COD operating resource value.

## **Project Results**

### Operational Results

The evaluation of effluent concentrations during the two-year demonstration period (06/2023–06/2025) shows significant improvements in nutrient removal: ammonium and nitrogen values were greatly reduced, substantially relieving the receiving water body. COD target concentrations were also achieved. Total phosphorus values improved further due to retention effects. The results confirm that the target specifications were met and that the plant shows a clear performance improvement compared to the old facility.

In terms of energy, however, the picture is less favorable: total electricity consumption increased significantly after the upgrade, particularly due to the high energy demand for aeration and feed pumping. The initially expected savings potential could not be confirmed. Although the biological stage is more efficient in relation to the removed load, the absolute energy consumption is higher due to the co-treatment of primary sludge. The lack of energy generation due to the elimination of sludge digestion amplifies this effect.

Phosphorus removal shows that the targets can also be reliably achieved with the new process, but significant savings in chemical precipitants have not yet been realized. Optimization potential exists in adjusting dosing locations. The solids balance confirms high retention. No differences in the retention of heavy metals and trace substances were observed compared to activated sludge plants.

Overall, the operational results demonstrate that the project was successfully implemented and

that the targeted objectives relating to effluent quality and nutrient removal were met or exceeded. Limitations primarily concern energy consumption, while positive operational experience and achieved effluent values are nevertheless assessed as very satisfactory from the operator's perspective.

### Environmental Balance and Cost Comparison

Concerning emissions into the receiving water body, the positive trend is confirmed: nitrogen and phosphorus values are well below target levels, while COD loads increased slightly despite compliance with limit and target values. In terms of energy, however, the targets were clearly missed: consumption increased by around 233,000 kWh/year, and external electricity procurement increased by 580,200 kWh/year, resulting in more than 210 tons of additional CO<sub>2</sub> annually. However, as already described, the higher energy consumption is not exclusively a characteristic of the Nereda® process, but is also due to the plant design and the high altitude of the reactors due to flood protection requirements.

The use of precipitants also increased, while carbon consumption remained largely stable. Future operational optimization is expected to reduce consumption. Additional sludge transport burdens the balance with a further 35 tons of CO<sub>2</sub> per year. This additional burden would also have arisen in the other planning variants.

The operating cost comparison currently shows higher expenses than the old plant, mainly due to increased energy and sludge disposal costs and additional repairs to partially failure-prone equipment. Savings are expected in wastewater discharge fees, but these will only marginally offset the additional costs.

### Operational Experience

Commissioning of the Nereda® plant in Altena was carried out using granular inoculation sludge, allowing stable granulation and full performance to be achieved within just a few weeks – a clear time advantage over start-up with activated sludge. Despite elevated nitrate loads in the influent, granule formation remained stable throughout, and efficient nitrogen removal made pretreatment unnecessary, allowing the equalization tank to be used solely for buffer storage. Suspended solids retention worked reliably but required continuous monitoring of sludge withdrawal. Despite a very high proportion of extraneous water and the low COD inflow concentration, stable granule formation was demonstrated.

During the construction phase, the compact design enabled uninterrupted operation of the existing plant. Operational challenges arose in the screening stage, where initial malfunctions occurred but were later resolved through technical adjustments. Due to frequent maintenance efforts and the labor-intensive monitoring program, no definitive statement can yet be made regarding the suitability of the process for remote-controlled satellite operation. Limiting factors

included the storage volume of the equalization tank and the dimensions of the gravity thickeners, which should be considered for future planning. High energy demand for pumping as well as the complex air and chemical dosing systems also present areas for optimization. Overall, however, the process proved to operate reliably despite these challenges, demonstrating robust process stability and high nutrient removal.

### **Prospects**

In Germany, many wastewater treatment plants that were upgraded for advanced nutrient removal by 2005 have now reached the end of their technical service life, while demographic change and lower industrial loads are leading to reduced wastewater volumes. The Nereda® process offers a compact, flexible, and robust solution that enables efficient modernization or expansion of plants with high treatment performance despite limited space. The successful demonstration operation at the Altena WWTP highlights the potential of the technology for broader application in Germany and may encourage other operators to pursue similar projects.

However, exceptionally high extraneous water volumes, which would also have to be pumped and treated in Ruhrverband facilities, limit applicability within the association's catchment area due to insufficient economic viability. Economic feasibility must also be evaluated at larger sites, particularly considering the potential elimination or significant reduction of biogas production.

## 7. Literatur

- [1] Wikipedia.org, Nereda-Verfahren, <https://de.wikipedia.org/wiki/Nereda-Verfahren>, 2025.
- [2] M. Pronk, M. de Kreuk, B. de Bruin, P. Kamminga, R. Kleerebezem und M. van Loosdrecht, „Full-scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment,“ *Water Research*, Bd. 84, pp. 207-217, 2015.
- [3] F. Benstöm et al., Aerober Granulierter Schlamm in Sequencing-Batch-Reaktoren (AGS-SBR) - Quo Vadis Deutschland?, Bd. (66) Nr. 3, Hennef: KA - Korrespondenz Abwasser, 2019, pp. 187-199.
- [4] Royal Haskoning DHV, „Nereda®, Abwasser auf natürliche Weise aufbereiten,“ Produktflyer, 2017.
- [5] J. J. Beun, M. C. M. v. Loosdrecht und J. J. Heijnen, „Aerobic granulation,“ *Water Science and Technology* 41 (4-5), pp. 41-48, 2000.
- [6] M. Pronk, J. P. Bassin, M. K. d. Kreuk, R. Kleerebezem und M. C. M. v. Loosdrecht, „Evaluating the main and side effects of high salinity on aerobic granular sludge,“ *Applied Microbiology and Biotechnology* 98 (3), pp. 1339-1348, 2014.
- [7] C. H. S. Lochmatter, „Optimization of operation conditions for the start up of aerobic granular sludge reactors biologically removing carbon, nitrogen, and phosphorous,“ *Water Research* 59, pp. 58-70, 2017.
- [8] M. K. Jungles, M. Figueroa, N. Morales, A. V. d. Rio, R. H. R. d. Costa, J. L. Campos, Mosquera-Corral und R. Mendez, „Start up of a pilot scale aerobic granular reactor for organic matter and nitrogen removal,“ *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 86 (5), pp. 763-768, 2011.
- [9] Y. Liu, Z. W. Wang, L. Qin, Y. Q. Liu und J. H. Tay, „Selection pressure-driven aerobic granulation in a sequencing batch reactor,“ *Applied Microbiology and Biotechnology* 67 (1), pp. 26-32, 2005.
- [10] M. K. d. Kreuk, M. Ponk und M. C. M. v. Loosdrecht, „Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures,“ *Water Research* 39 (18), pp. 4476-4484, 2005.
- [11] M. v. Loosdrecht, C. Picioreanu und J. C. and Heijnen, „A more unifying hypothesis for biofilm structures,“ *FEMS Microbiology Ecology* 21 (2), pp. 181-183, 1997.
- [12] Winkler, MK.H., Kleerebezem, R., de Bruin, L.M.M. et al., Microbial diversity differences within aerobic granular sludge and activated sludge flocs, Bd. 97, Singapur: Applied environmental biotechnology, 2013, p. 7447–7458.

- [13] M. Ponk, J. P. Bassin, M. K. d. Kreuk, R. Kleerebezem und M. C. M. v. Loosdrecht, „Evaluating the main and side effects of high salinity on aerobic granular sludge.“ *Applied Microbiology and Biotechnology* 98 (3), pp. 1339-1348, 2017.
- [14] G. Schirmer und G. Kolisch, „Bestandsaufnahme des energetischen,“ WiW - Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH, Wuppertal, 2021.
- [15] G. Schirmer und G. Kolisch, „Energieanalyse für die Kläranlage Altena nach Umstellung auf das NEREDA®-Verfahren,“ WiW - Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH, Wuppertal, 2025.
- [16] Ingenieurbüro Friedrich, „Aerob oder Anaerob stabilisieren Ab wann lohnt sich die Faulung,“ DWA Fachseminar Energie auf Kläranlagen, Potsdam, 2013.
- [17] KA-6.5, DWA-Arbeitsgruppe, „DWA-M 229-1 - Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen - Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung,“ DWA, Hennef, 2017.
- [18] Y. Schneider, M. Dierker und N. Jardin, „Zwei Jahre Betriebserfahrung mit Deutschlands erster Nereda®-Anlage,“ in *Tagungsband Essner Tagung, Gewässerschutz Wasser Abwasser*, Aachen, Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, 2025.
- [19] B. Heinzmann und G. Engel, „Stand der Phosphorrückgewinnung bei Kläranlagen mit biologischer Phosphorelimination der Berliner Wasserbetriebe,“ in *Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik.*, Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt., 2005.
- [20] DWA Fachausschuss KA-5 und KA-6, „Arbeitsblatt DWA-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen.“ DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2016.
- [21] DWA-Arbeitsgruppe KA-6.2, Merkblatt DWA-M 210 Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb (SBR), Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2009.
- [22] A. Giesen, M. v. Loosdrecht, M. Pronk, S. Robertson und A. Thompson, „Aerobic Granular Biomass Technology: recent performance data, lessons learnt and retrofitting conventional treatment infrastructure,“ in *WEFTEC Proceedings of the Environmental Federation*, New Orleans, 2016.