

# Bericht

Endversion, Datum: 23.04.2014

Cicerostr. 24  
D-10709 Berlin  
Germany  
Tel +49 (0)30 536 53 800  
Fax +49 (0)30 536 53 888  
www.kompetenz-wasser.de

## Stickstofflimitation in Binnengewässern

Teilprojekt: Sensitivitätsanalyse zur Modellierung des  
Stickstoffumsatzes in Fließgewässern und Life Cycle

Assessment von Reinigungsverfahren

Project acronym: NITROLIMIT

### Abschlussbericht KWB

von

Pascale Rouault, Andreas Matzinger, Daniel Mutz, Christian Remy, Mathias Riechel,  
Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH  
Cicerostraße 24, 10709 Berlin

für

Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Preparation of this report was financed in part through funds provided by BMBF and  
Berliner Wasserbetriebe

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



**FONA**

Nachhaltiges  
Wassermanagement  
BMBF



Berliner  
Wasserbetriebe

Berlin, Germany

2014

© Copyright 2014 by the Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH. All rights including translation into other languages, reserved under the Universal Copyright Convention, the Berne Convention or the Protection of Literacy and Artistic Works, and the International and Pan American Copyright Conventions.

Present report was developed in compliance with the requirements of the quality management system DIN EN ISO 9001:2008

### **Important Legal Notice**

**Disclaimer:** The information in this publication was considered technically sound by the consensus of persons engaged in the development and approval of the document at the time it was developed. KWB disclaims liability to the full extent for any personal injury, property, or other damages of any nature whatsoever, whether special, indirect, consequential, or compensatory, directly or indirectly resulting from the publication, use of application, or reliance on this document. KWB disclaims and makes no guaranty or warranty, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of any information published herein. It is expressly pointed out that the information and results given in this publication may be out of date due to subsequent modifications. In addition, KWB disclaims and makes no warranty that the information in this document will fulfill any of your particular purposes or needs. The disclaimer on hand neither seeks to restrict nor to exclude KWB's liability against all relevant national statutory provisions.

### **Wichtiger rechtlicher Hinweis**

**Haftungsausschluss:** Die in dieser Publikation bereitgestellte Information wurde zum Zeitpunkt der Erstellung im Konsens mit den bei Entwicklung und Anfertigung des Dokumentes beteiligten Personen als technisch einwandfrei befunden. KWB schließt vollumfänglich die Haftung für jegliche Personen-, Sach- oder sonstige Schäden aus, ungeachtet ob diese speziell, indirekt, nachfolgend oder kompensatorisch, mittelbar oder unmittelbar sind oder direkt oder indirekt von dieser Publikation, einer Anwendung oder dem Vertrauen in dieses Dokument herrühren. KWB übernimmt keine Garantie und macht keine Zusicherungen ausdrücklicher oder stillschweigender Art bezüglich der Richtigkeit oder Vollständigkeit jeglicher Information hierin. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die in der Publikation gegebenen Informationen und Ergebnisse aufgrund nachfolgender Änderungen nicht mehr aktuell sein können. Weiterhin lehnt KWB die Haftung ab und übernimmt keine Garantie, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen der Erfüllung Ihrer besonderen Zwecke oder Ansprüche dienlich sind. Mit der vorliegenden Haftungsausschlussklausel wird weder bezweckt, die Haftung der KWB entgegen den einschlägigen nationalen Rechtsvorschriften einzuschränken noch sie in Fällen auszuschließen, in denen ein Ausschluss nach diesen Rechtsvorschriften nicht möglich ist.

## Colofon

Diesen Bericht wurde in Übereinstimmung mit dem Qualitätsmanagementsystem nach DIN EN ISO 9001:2008 geschrieben.

Titel

NITROLIMIT: Stickstofflimitation in Binnengewässern, Abschlussbericht KWB

Autoren

Pascale Rouault, Andreas Matzinger, Daniel Mutz, Christian Remy, Mathias Riechel,  
KWB

Endversion

Datum: 23.04.2014

## Kurzfassung

Das Projekt Nitrolimit hatte das Ziel, sich mit der Stickstofflimitation in Binnengewässern zu beschäftigen. Die Frage „Ist Stickstoffreduktion ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar?“ war zu beantworten.

Das KWB arbeitete als einer der Projektpartner in Nitrolimit an der Modellierung der Gewässergüte von Flusssystemen am Beispiel der Berliner Stadtspreewälder Gewässer mittels QSim. Es wurde gezeigt, dass das Phytoplanktonwachstum dort derzeit nicht durch Nährstoffe, sondern vorwiegend durch Licht limitiert ist. Dennoch kann Phosphor bei einem entsprechend niedrigen Nährstoff- und Phytoplankton-Grundniveau zur steuernden Größe werden. Damit bestätigt das Modell die Hypothese, dass auch in urbanen, stark nährstoffbelasteten Gewässern eine Nährstofflimitation erreicht werden kann. Obwohl aus der Arbeit keine konkrete Grenzkonzentration abgeleitet werden kann, bedeutet das Ergebnis für die Praxis, dass bei entsprechenden Gewässern eine bedeutende Nährstoffreduktion notwendig ist, um einen positiven Effekt auf die Gewässergüte zu erreichen.

Bei der Suche nach einer geeigneten Strategie für die Verbesserung des ökologischen Zustandes eines Gewässers wurde in Nitrolimit am Beispiel der unteren Havel die Strategie verfolgt, sowohl ökologische wie auch sozioökonomische Aspekte zu berücksichtigen. Wichtige Grundlage dafür waren Informationen zu Kosten und Wirksamkeit von einzelnen Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffeinträge aus den Bereichen Landwirtschaft und urbane Systeme. Diese Informationen wurden in Form eines Maßnahmenkatalogs in einer Datenbank zusammengefasst. Das KWB war hier verantwortlich für die Maßnahmen aus dem urbanen Bereich und veröffentlichte diese Ergebnisse separat als Nitrolimit Diskussionspapier Band 2.

Über eine Ökobilanz wurden zudem nicht-monetäre ökologische Auswirkungen von weitergehenden Stickstoffeliminierungsverfahren für Großkläranlagen beschrieben. Dabei wurden alle direkten und indirekten ökologischen Auswirkungen von fünf Verfahren auf Großkläranlagen in einer ganzheitlichen Betrachtungsweise untersucht und verglichen. So konnten die direkten Effekte der verbesserten Ablaufqualität hinsichtlich der N-Fracht den zusätzlichen Aufwendungen durch die vorgelagerten Prozesse (resultierend aus dem veränderten Strom- und Chemikalienverbrauch und der benötigten Infrastruktur) gegenübergestellt werden. Es zeigte sich, dass die einzelnen Maßnahmen bei vergleichbaren Wirkungen auf die N-Fracht sehr unterschiedliche zusätzliche Aufwendungen in Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen erfordern.

Letztendlich war es möglich, Szenarien für die Verbesserung des Zustandes der Unteren Havel vorzuschlagen und zu analysieren. Es haben dafür mehrfach Gespräche mit den Stakeholder aus Berlin und Brandenburg (SenStadtUm, BWB, LUGV) stattgefunden, um die Entwicklung der Szenarien abzustimmen. Das KWB prüfte und validierte in enger Zusammenarbeit mit dem IGB und der TUB die Ergebnisse des Nährstoffmodells MONERIS für die verschiedenen Szenarien.

## Inhaltsverzeichnis

1. Kurze Darstellung .....	1
1.1 Aufgabenstellung .....	1
1.2 Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	1
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	2
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	2
1.5 Zusammenarbeit mit Dritten .....	3
2. Eingehende Darstellung.....	5
2.1 Erzielte Ergebnisse.....	5
2.1.1 Untersuchung der Nährstoffsensitivität des Phytoplanktons in einem eutrophen Stadtgewässer - Modul 3, Arbeitspaket 3.2.2 .....	5
2.1.2 Maßnahmenkatalog zu Maßnahmen aus dem urbanen Systemen im Bereich des Regenwassermanagements und der Kläranlagen– Modul 4, Arbeitspaket 4.1 ..	9
2.1.3 Arbeiten in der Ökobilanz (LCA) – Modul 4, Arbeitspaket 4.1 .....	9
2.1.4 Zusammenführung entscheidungsvorbereitender Informationen– Modul 4, Arbeitspaket 4.4 .....	19
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	19
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	20
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	20
2.5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	21
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	21
Literatur .....	22
3. Erfolgskontrollbericht .....	25
3.1 den Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, z.B. des Förderprogramms (ggf. unter Angabe des Schwerpunkts),- soweit dies möglich ist- .	25
3.2 das wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen .....	25
3.3 die Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des ZE brauchen nicht offenbart zu werden) .....	26
3.3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u. a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten.....	26

3.3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt) .....	26
3.3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen .....	27
3.3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse .....	28
3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.....	28
3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z. B. Anwenderkonferenzen (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt) .....	28
3.6 die Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung. ....	28

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Für den Istzustand 2010 gemessene und simulierte Gesamt-N-, Gesamt-P- und Chlorophyll-a-Konzentration in der Berliner Stadtspreewei km 8 des simulierten Flussabschnitts. Die gepunktete Linie zeigt die Simulationsergebnisse für einen hypothetisch oligotrophen Gewässerzustand (Szenario „Oligotroph“). .....	6
Abbildung 2: Sensitivität von Chlorophyll-a bezüglich der einflussreichsten Zustandsvariablen (a) und Modellparameter (b) für den simulierten Istzustand 2010 der Berliner Stadtspreewei .....	7
Abbildung 3: Sensitivität von Chlorophyll-a bezüglich der einflussreichsten Zustandsvariablen (a) und Modellparameter (b) für den hypothetisch oligotrophen Zustand der Berliner Stadtspreewei (Szenario „Oligotroph“). .....	8
Abbildung 4: Für einen hypothetisch oligotrophen Zustand der Berliner Stadtspreewei simulierte Chlorophyll-a-Konzentration und Bruttowachstumsrate der Algen bei unterschiedlichen P-Eingangskonzentrationen (Szenario „Oligotroph“). .....	8
Abbildung 5. Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen der Ökobilanz.....	11
Abbildung 6. Übersicht über die betrachteten Szenarien.....	12
Abbildung 7. Marines Eutrophierungspotential (N-Emissionen) der Szenarien verglichen zur Referenz.....	14
Abbildung 8. Kumulierter Energieaufwand der Szenarien verglichen zur Referenz .....	15
Abbildung 9. Treibhauspotential der Szenarien verglichen zum Referenzzustand inklusive Unsicherheiten in den direkten N <sub>2</sub> O-Emissionen aus der biologischen N-Reduktion .....	16
Abbildung 10. KEA und THP der Szenarien im Vergleich pro kg eliminiertem Stickstoff	18

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Jahresmittelwerte der Modellrandbedingungen für die Simulation des Istzustands 2010 und des hypothetisch oligotrophen Gewässerzustands (Szenario „Oligotroph“)	6
Tabelle 2. Kurzbeschreibung der Szenarien	12
Tabelle 3. Auflistung der betrachteten Wirkungsindikatoren	13

# 1. Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt Nitrolimit hatte das Ziel, sich mit der Stickstofflimitation in Binnengewässern zu beschäftigen. Die Frage „Ist Stickstoffreduktion ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar?“ war zu beantworten.

Das KWB arbeitete im Modul 3 „Modellierung“ und im Modul 4 „sozioökonomische Analysen“.

Ziel der Arbeiten vom KWB im Modul 3 war es, die Modellierung der Gewässergüte von Flusssystemen am Beispiel der Unteren Havel mittels QSim zu unterstützen. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) hatte die Aufgabe, QSim für die in Nitrolimit zu bearbeitende Fragestellung weiterzuentwickeln. Das KWB sollte die Modellentwicklung und Kalibrierung mit einer Sensitivitätsanalyse unterstützen. Mit einer Sensitivitätsanalyse können Modellparameter und Zustandsvariablen nach deren Einfluss auf die interessierenden Größen ausgewertet werden sowie Unsicherheiten durch Fehler in Eingabegrößen oder Prozessformulierungen abgeschätzt werden. Eine solche Abschätzung erlaubt sowohl ein besseres Prozessverständnis als auch eine kritische Diskussion von Modellergebnissen (z.B. Szenarienrechnungen).

Das Modul 4 zu den Sozioökonomischen Analysen hatte die Bewertung verschiedener Bewirtschaftungsszenarien zur Reduktion punktueller und diffuser Stickstoffeinträge im Flusseinzugsgebiet Spree-Havel zum Ziel. Als Grundlage dafür sollte ein Katalog entwickelt werden, der eine Übersicht der Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffeinträge sowohl aus diffusen als auch punktuellen Quellen liefert und eine umfassende Gegenüberstellung der Kosten, Wirksamkeit, Akzeptanz, Fördermöglichkeit und weiterer Aspekte zur Umsetzbarkeit beinhaltet. Das KWB war hier verantwortlich für die Maßnahmen aus dem urbanen Bereich.

Zusätzlich sollte in diesem Modul durch das KWB eine Ökobilanz (Life Cycle Assessment (LCA)) für die Lebenszyklusbewertung von ausgewählten Verfahren zur weitergehenden Stickstoffelimination in Großkläranlagen durchgeführt werden. Dabei werden technische Lösungen insbesondere hinsichtlich ihres Energie- und Ressourcenverbrauches und ihrer direkten und indirekten Treibhausgasemissionen miteinander verglichen.

Im Rahmen einer Szenarienanalyse war geplant, unterschiedliche Kombinationen von Maßnahmen zu vergleichen und zu bewerten. Die Ergebnisse sollten dann für die Weiterverwertung durch Entscheidungsträger aufbereitet werden. Aufgabe des KWB war es, die TUB und das IGB bei dieser Arbeit zu unterstützen.

## 1.2 Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Voraussetzung für die Durchführung der geplanten Sensitivitätsanalyse war der Aufbau des Modells der Unteren Havel sowie die Anpassung der Prozessgleichungen für den Sedimentbaustein durch die BfG. Da der Modellaufbau länger gedauert hat als erwartet, wurden die Arbeiten alternativ mit einem bereits bestehenden Modell der Berliner Stadtspre, einem wichtigen Zufluss der Unteren Havel, durchgeführt. Das Modell wurde in einem vergangenen Projekt aufgebaut, validiert und erfolgreich genutzt und bildet die wichtigsten Gewässerprozesse plausibel ab.

Voraussetzung für die Erstellung des Maßnahmenkataloges und für die Arbeiten an der Ökobilanz war der Zugang zu Daten der Berliner Wasserbetriebe sowie ein enger Austausch mit den Kollegen. Einige Angaben konnten zwar aus der Literatur gewonnen werden, sie reichten aber nicht aus, um belastbare Informationen bzw. Ergebnisse zu liefern.

Auch die Zusammenarbeit mit Entscheidungsträgern der Länder war von Bedeutung, um einerseits Szenarien zu entwickeln und andererseits die Ergebnisse zu diskutieren.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Planung der Untersuchungen gliederte sich entsprechend des Projektantrages. Das Projekt musste bis Ende Dezember 2013 verlängert werden, um eine Integration der Ergebnisse aus den verschiedenen Modulen in die „Kosten-Nutzen-Analyse“ in Zusammenarbeit mit den Partnern aus Modul 4 zu ermöglichen und die Erstellung des Endberichtes mit den weiteren Projektpartnern sicherzustellen.

Eine Änderung ergab sich im Modul 3: Aufgrund der Verzögerung beim Aufbau des Modells der Unteren Havel wurde die Sensitivitätsanalyse in Absprache mit der BfG und der Projektleitung alternativ mit einem bestehenden QSim-Modell der Berliner Stadtspreewald durchgeföhrt. Hierfür wurde der Effekt von Veränderungen in den Randbedingungen (z.B. Nährstoffkonzentrationen, Licht und Temperatur) und Modellparametern (Prozessraten, Konstanten, etc.) auf das Algenwachstum untersucht. Damit konnte das Verständnis der abgebildeten Prozesse vertieft und Lücken in der Prozessformulierung aufgezeigt werden.

### **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Erfahrung mit der Modellierung mit QSim war vor Anfang des Projektes Nitrolimit am KWB bereits vorhanden. Im Rahmen des Projektes MIA-CSO wurde der Einfluss von Mischwasserüberläufen auf die Gewässer am Beispiel der Stauhaltung Charlottenburg (Spree) untersucht. Die Zielgröße im Gewässer war dabei der Sauerstoffgehalt, da Mischwasserüberläufe das Ökosystem in der Regel durch einen Absinken des Sauerstoffgehaltes beeinträchtigen. In Nitrolimit war geplant, auf den bestehenden Erfahrungen bezüglich der Ökologie langsam fließender Tieflandflüsse und der Prozessabbildung in QSim aufzubauen, um die Rolle der Nährstoffe in der Unteren Havel zu untersuchen.

Bewirtschaftungsszenarien sollten in Nitrolimit auf Basis eines Maßnahmenkatalogs entwickelt werden. Daten zu Kosten und Wirksamkeit von Maßnahmen aus dem urbanen Bereich waren zu diesem Zeitpunkt aus der Literatur nicht ausreichend vorhanden. Allerdings hat das KWB langjährige Erfahrung mit verschiedensten Maßnahmen zur Verbesserung des Gewässerzustands. Dieses galt sowohl für weitergehende Maßnahmen zur Nährstoffentfernung auf Kläranlagen (Projekt OXERAM2, siehe KWB 2013) wie auch für Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung (ISM, MIA-CSO, siehe Riechel et al. (2012), Uldack et al. (2013)). Die Erkenntnisse, Daten, usw. aus den einzelnen Projekten konnten in Nitrolimit genutzt und durch Literaturangaben oder Daten der Berliner Wasserbetriebe oder weiterer Entscheidungsträger ergänzt werden.

Auch zur Ökobilanzierung lagen am KWB bereits Erfahrungen vor. Auf Basis der LCA-Software UMBERTO® 5.6 konnte das Stoffstrommodell eines Modell-Großklärwerks

(Größenklasse 5: > 100.000 Einwohnerwerte) aufgebaut und mit Betriebsdaten der Klärwerke der Berliner Wasserbetriebe validiert werden.

## 1.5 Zusammenarbeit mit Dritten

Die Zusammenarbeit erfolgte im Modul 3 insbesondere mit folgenden Partnern:

- Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz (BfG), Referat U2 (Ökologische Wirkungszusammenhänge)
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (SenStadtUm)
- Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (LUGV)

Im Modul 4 waren die Partner:

- Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, FG Landschaftsökonomie (TUB)
- Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei Berlin (IGB), Dr. Marisa Matranga, Dr. Markus Venohr
- Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät Umweltwissenschaften, Lehrstuhl Gewässerschutz, Bad Saarow (BTU-BS)
- Berliner Wasserbetriebe
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin
- Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (LUGV)

Die Sensitivitätsanalyse zum Stoffumsatz im Gewässer fand in enger Absprache mit den Kollegen der BfG, insbesondere Dr. Helmut Fischer und Dr. Claudia Lindim, statt. Sowohl das methodische Vorgehen als auch die erzielten Ergebnisse wurden regelmäßig miteinander diskutiert und mit den anderen Projektergebnissen abgeglichen.

Die Erstellung des Maßnahmenkatalogs erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den NITROLIMIT-Projektpartnern IGB (Dr. Markus Venohr, Dr. Marisa Matranga) und TUB (DR. Jürgen Meyerhof, Andreas Horbat). In vielen Arbeitstreffen wurden die erforderlichen Inhalte des Katalogs schrittweise konkretisiert, ausgetauscht und validiert und mit der Projektleitung (BTU-BS) diskutiert. Für die Abfrage der Wirkungen und Kosten der verschiedenen Maßnahmen gab es mehrere Arbeitstreffen und entsprechenden Datenaustausch zwischen KWB und BWB im Bereich der Kläranlagen und des Regenwassermanagements. Darüber hinaus wurden von KWB Daten zu Maßnahmen auf Kläranlagen in Brandenburg vom LUGV abgefragt.

Für die Berechnung der Wirkungen und Kosten der Maßnahmen mit dem Modell MONERIS durch IGB wurde von KWB eine Teilprüfung der vorhandenen Eingabedaten und Berechnungen (insbesondere Kläranlageninventare, Flächenversiegelung, Berechnung der Mischwasserüberläufe) vorgenommen und in mehreren Treffen mit den Erfahrungen und Daten der BWB abgeglichen. Die in MONERIS genutzten Ansätze für die Berechnung von Wirkungen und Kosten von einzelnen Maßnahmen auf Kläranlagen wurden in einem gemeinsamen Treffen von KWB, IGB, TUB, BWB und der Senatsverwaltung Berlin (SenStadtUm) validiert. Für die abschließende Berechnung von Kosten und Wirkungen von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenpaketen im

Einzugsgebiet der unteren Havel gab es mehrere Treffen zwischen KWB, IGB und TUB zur Validierung und Analyse der Ergebnisse.

Für die Ökobilanzierung wurden KWB grundlegende Prozessdaten zu Großklärwerken und möglichen Maßnahmen durch BWB zur Verfügung gestellt und in mehreren Treffen abgeglichen. Die Ergebnisse der Ökobilanz wurden von KWB in Zusammenarbeit mit BWB validiert und interpretiert.

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1 Erzielte Ergebnisse

#### 2.1.1 Untersuchung der Nährstoffsensitivität des Phytoplanktons in einem eutrophen Stadtgewässer - Modul 3, Arbeitspaket 3.2.2

##### Hintergrund und Ziel

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde mit Hilfe des Gewässergütemodells QSim der Effekt von Veränderungen in den Zustandsvariablen (z.B. Nährstoffkonzentrationen, Licht und Temperatur) und Modellparametern (Prozessraten, Konstanten, etc.) auf die Algenbiomasse untersucht. Hintergrund der Arbeiten bildet die Hypothese, dass stark eutrophe urbane Fließgewässer, in denen die Nährstoffkonzentration kaum Effekte auf das Algenwachstum hat, erst bei einer deutlichen Verbesserung der Wasserqualität nährstofflimitiert werden. Ziel ist es zum einen, die Wirkung von Einflussgrößen in Abhängigkeit von den trophischen Vorbedingungen im Gewässer mit QSim zu untersuchen. Zum anderen soll das Verständnis des Zusammenspiels der im Modell abgebildeten Prozesse vertieft werden und letztlich geprüft werden, ob das Modell unter verschiedenen trophischen Randbedingungen plausible Ergebnisse liefert. Die Arbeiten wurden beispielhaft für ein bereits validiertes QSim-Modell der Berliner Stadtspreewasserschiffahrt durchgeführt, da die Untere Havel, für die im Rahmen des Projektes ein neues Modell aufgebaut wurde, stark durch den Zufluss der Stadtspreewasserschiffahrt geprägt wird.

##### Methodik

Zunächst wurden die Modellergebnisse durch einen Vergleich mit Messdaten des Jahres 2010 für eine Vielzahl von Zustandsvariablen (z.B. Nährstoffe, Chlorophyll, BSB<sub>5</sub>, AFS) plausibilisiert. Im Anschluss wurde die lokale Modellsensitivität bezüglich Chlorophyll-a (als Leitgröße für die Algenbiomasse) untersucht. Hierfür wurde zunächst eine Referenzsimulation mit unveränderten Eingangsdaten durchgeführt. Anschließend wurden die Eingangsdaten - unterschieden in Zustandsvariablen und Modellparameter - nacheinander („one-at-a-time“) um +/- 10% variiert und der Effekt auf das Modellergebnis, d.h. die Chlorophyll-a-Konzentration am letzten Punkt des simulierten Fließabschnitts von 11,2 km Länge, beurteilt.

Zur Quantifizierung der Sensitivität wurde die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung zwischen Referenzsimulation (*ref*) und Simulation mit veränderten Eingangsdaten (*var*) berechnet und auf den Mittelwert der Referenzsimulation (*ref<sub>mean</sub>*) normiert (Formel 1). Je größer der so berechnete Sensitivitätsindex, desto entscheidender ist die jeweils variierte Eingangsgröße für die simulierte Chlorophyll-a-Konzentration.

$$\text{Sensitivitätsindex} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (var_i - ref_i)^2}{n}}}{ref_{mean}} \quad (1)$$

Die Sensitivitätsuntersuchungen wurden zunächst für den eutrophen Istzustand der Berliner Stadtspreewasserschiffahrt des Jahres 2010 durchgeführt. Anschließend wurde für einen hypothetisch oligotrophen Gewässerzustand die Modellreaktion auf veränderte

Randbedingungen untersucht (Szenario „Oligotroph“). Dafür wurden die für den Istzustand gemessenen Zustandsvariablen so vermindert, dass die Qualitätsanforderungen nach LAWA-Güteklasse 1 eingehalten werden. Darüber hinaus wurde die Nährstoffrücklösung aus dem Sediment vermindert und der Nährstoffspeicher des Phytoplanktons am Modelleingang als leer angenommen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Randbedingungen für die Sensitivitätsuntersuchungen.

Tabelle 1: Jahresmittelwerte der Modellrandbedingungen für die Simulation des Istzustands 2010 und des hypothetisch oligotrophen Gewässerzustands (Szenario „Oligotroph“). TN = Gesamtstickstoff, NH<sub>4</sub>-N = Ammoniumstickstoff, NO<sub>3</sub>-N = Nitratstickstoff, TP = Gesamtphosphor, PO<sub>4</sub>-P = ortho-Phosphat-Phosphor, Chla = Chlorophyll-a, Rotat. = Rotatorien, AFS = Abfiltrierbare Stoffe, BSB<sub>5</sub> = biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen.

Zustandsvariable	TN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	TP	PO <sub>4</sub> -P	Chla	Rotat.	AFS	BSB <sub>5</sub>
Einheit	mg L <sup>-1</sup>	µg L <sup>-1</sup>	Ind L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>				
Istzustand 2010	1,73	0,23	0,98	0,132	0,052	23,4	808	6,84	2,58
Szenario „Oligotroph“	0,52	0,01	0,39	0,020	0,005	5,8	404	3,42	1,29

## Ergebnisse

### Modellvalidierung

In einem Vergleich von Modellergebnissen und Messdaten für das Jahr 2010 konnte gezeigt werden, dass das verwendete Modell die biologisch-chemischen Prozesse in der Stadtspreewasser für den Istzustand gut abbildet (vgl. Abbildung 1). Insbesondere für die Zielgrößen Chlorophyll-a und die verschiedenen Stickstoffspezies (NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N und Gesamt-N) konnten sehr hohe Modelleffizienzen nach Nash und Sutcliffe (1970) zwischen 0.56 und 0.83 erzielt werden.

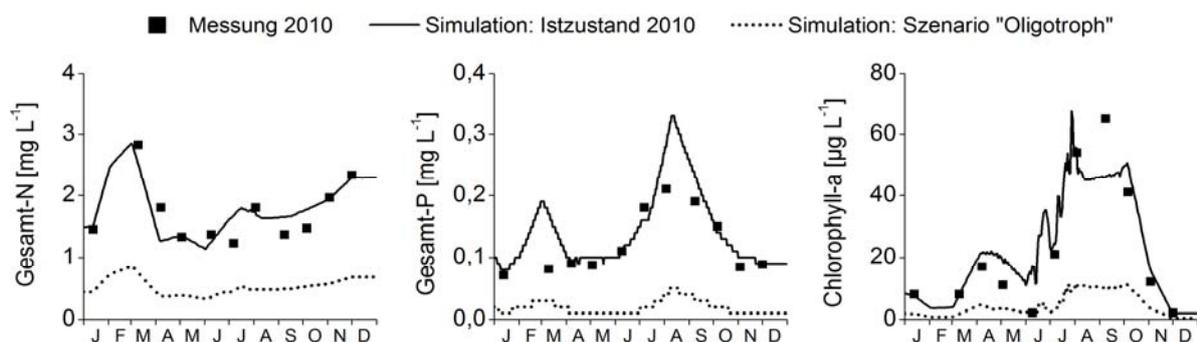


Abbildung 1: Für den Istzustand 2010 gemessene und simulierte Gesamt-N-, Gesamt-P- und Chlorophyll-a-Konzentration in der Berliner Stadtspreewasser bei km 8 des simulierten Flussabschnitts. Die gepunktete Linie zeigt die Simulationsergebnisse für einen hypothetisch oligotrophen Gewässerzustand (Szenario „Oligotroph“).

### Sensitivitätsuntersuchungen für den Gewässer-Istzustand

Die für den Istzustand des Jahres 2010 durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die in die Berechnung eingehende Chlorophyll-a-Konzentration einen erwartungsgemäß großen Einfluss auf die simulierte Chlorophyll-a-Konzentration hat (Abbildung 2a). Darüber hinaus reagiert Chlorophyll-a insbesondere auf die Wassertemperatur, die Rotatorien (Vertreter des Zooplanktons als Fressfeinde der Algen), die

Feststoffkonzentration und die Globalstrahlung sensitiv. Für Silizium lässt sich nur ein minimaler Effekt feststellen. Eine Veränderung der eingehenden Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen hat im Istzustand der Berliner Stadtsprees keinen Einfluss auf das Modellergebnis.

Die Ergebnisse bestätigen, dass die Algenbiomasse in der Stadtsprees in erster Linie durch Licht und Rotatorien und nicht durch Nährstoffe limitiert ist. Dies wird auch durch die Untersuchung der Modellsensitivität auf Änderungen der Modellparameter bestätigt. So haben Parameter, welche z.B. die Nährstoffaufnahme durch Phytoplankton beschreiben, keinen Einfluss auf die simulierte Chlorophyll-a-Konzentration (Abbildung 2b).

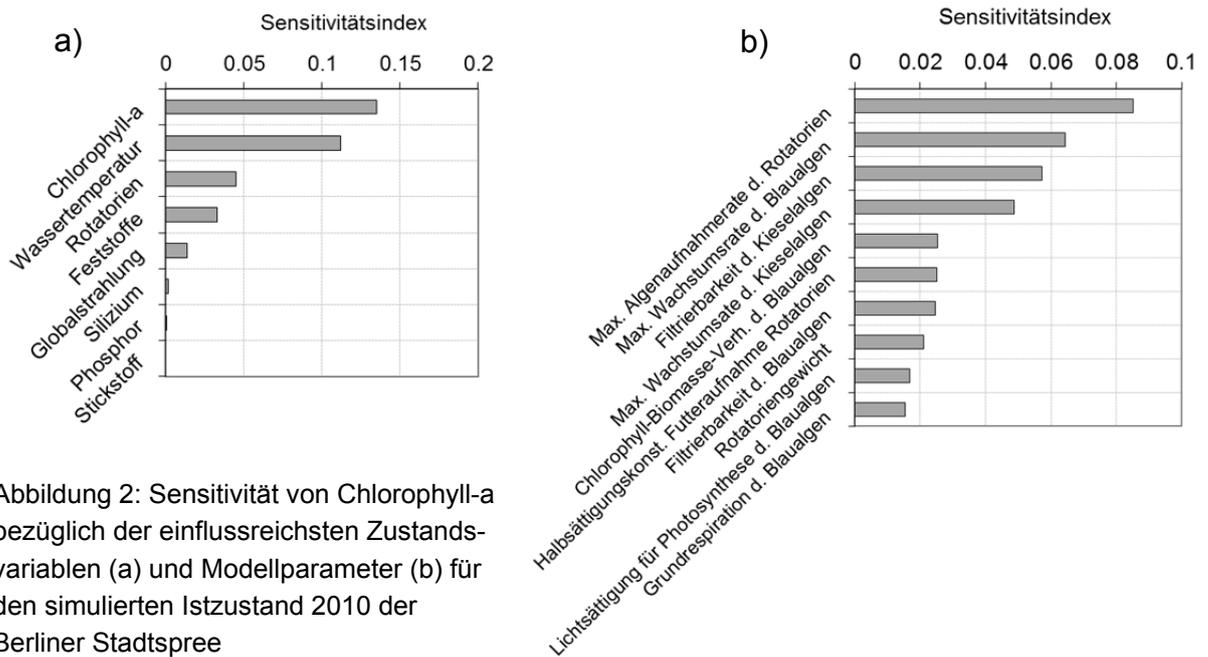


Abbildung 2: Sensitivität von Chlorophyll-a bezüglich der einflussreichsten Zustandsvariablen (a) und Modellparameter (b) für den simulierte Istzustand 2010 der Berliner Stadtsprees

### Sensitivitätsuntersuchungen für einen hypothetisch oligotrophen Gewässerzustand

Im Unterschied zum Istzustand der Berliner Stadtsprees hat für einen hypothetisch oligotrophen Gewässerzustand bereits eine leichte Änderung der Phosphor-Eingangskonzentration einen deutlichen Effekt auf die simulierte Chlorophyll-a-Konzentration. So ist Phosphor nach Chlorophyll-a und der Wassertemperatur die dritt wirksamste Zustandsvariable (Abbildung 3a). Die Nährstoffabhängigkeit der simulierten Chlorophyll-a-Konzentration spiegelt sich auch in der Untersuchung der Modellparameter wieder. Entsprechend gehört die P-Halbsättigungskonstante der Blaualgen und der Kieselalgen zu den zehn einflussreichsten Modellparametern (Abbildung 3b).

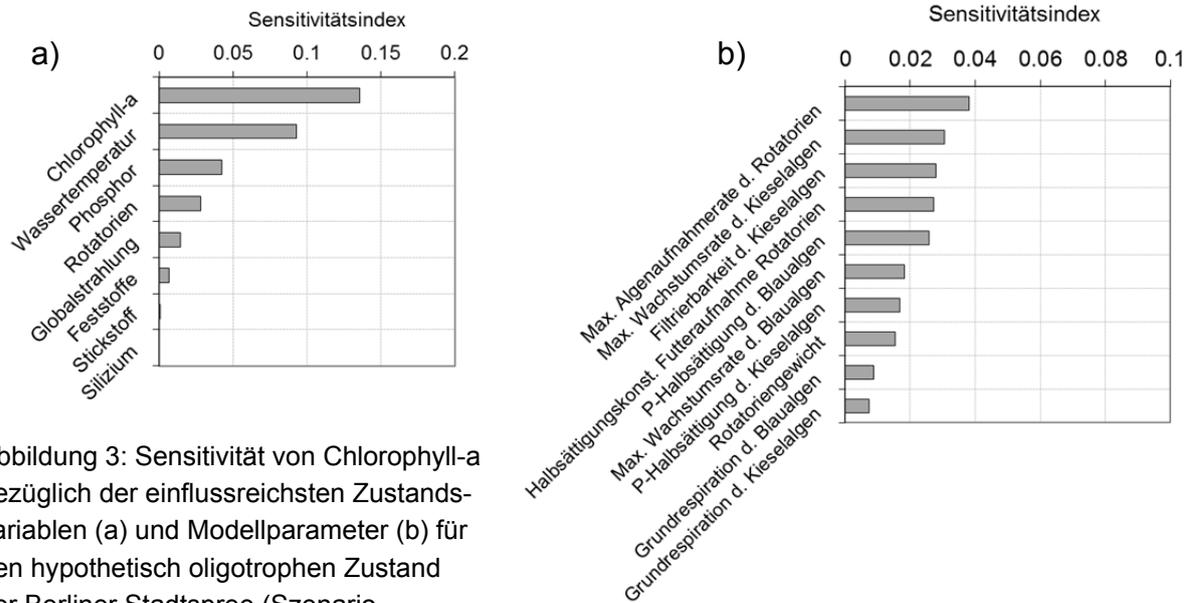


Abbildung 3: Sensitivität von Chlorophyll-a bezüglich der einflussreichsten Zustandsvariablen (a) und Modellparameter (b) für den hypothetisch oligotrophen Zustand der Berliner Stadtspreewasser (Szenario „Oligotroph“)

Für den oligotrophen Gewässerzustand hat Stickstoff im Gegensatz zu Phosphor selbst bei einer 90%igen Reduktion der Eingangskonzentrationen nur dann einen Effekt auf die simulierte Chlorophyll-a-Konzentration, wenn gleichzeitig die Phosphorkonzentration reduziert wird. Im Gegensatz dazu kann durch eine alleinige Reduktion der Phosphorkonzentration während der Wachstumsperiode von Mai bis September ein deutlicher Effekt auf die Chlorophyll-a-Konzentration und die Bruttowachstumsrate des Phytoplanktons erzielt werden (Abbildung 4).

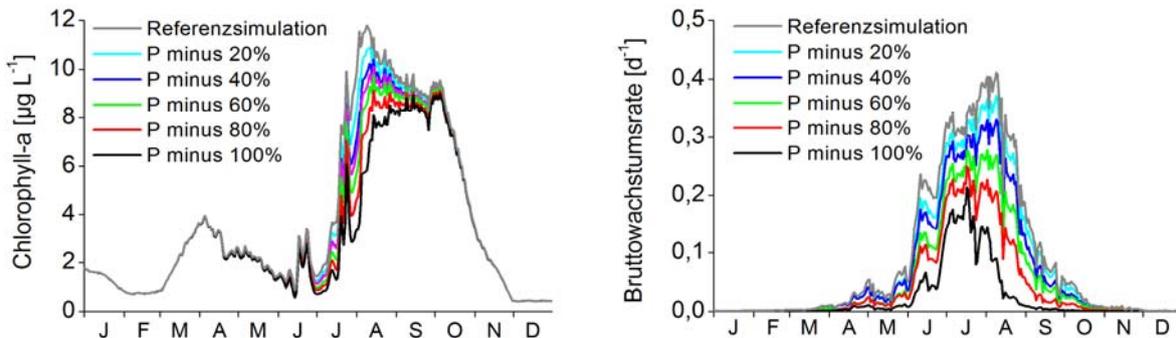


Abbildung 4: Für einen hypothetisch oligotrophen Zustand der Berliner Stadtspreewasser simulierte Chlorophyll-a-Konzentration und Bruttowachstumsrate der Algen bei unterschiedlichen P-Eingangskonzentrationen (Szenario „Oligotroph“).

Zwei Phänomene wurden im Rahmen der Sensitivitätsuntersuchungen für den oligotrophen Gewässerzustand beobachtet. Auch wenn das Phytoplanktonwachstum im Winterhalbjahr (Oktober bis April) im Modell durch Licht und Temperatur limitiert ist und Änderungen der Nährstoffkonzentration keine Wirkung auf die Chlorophyll-a-Konzentration haben, ist der Fraßdruck und die Sterberate nicht hoch genug, um die Chlorophyll-a-Konzentration auf dem modellierten Fließabschnitt vollständig absinken zu lassen. Zudem findet während der Wachstumsperiode von Mai bis September selbst bei einer TP-Konzentration von  $0 \text{ mg L}^{-1}$  am oberen Modellrand (P minus 100%) noch ein Bruttowachstum von bis zu  $0,2 \text{ d}^{-1}$  statt, da Nährstoffe durch Mineralisation von totem organischem Material wieder freigesetzt und durch das Phytoplankton aufgenommen werden.

## **Fazit**

Die Ergebnisse zeigen, dass die Algenbiomasse in der Berliner Stadtspreetiefe derzeit nicht durch Nährstoffe, sondern vorwiegend durch Licht limitiert ist. Dennoch kann Phosphor bei einem entsprechend niedrigen Nährstoff- und Phytoplankton-Grundniveau (entsprechend LAWA Güteklasse 1) zur steuernden Größe werden. Damit bestätigt das Modell die Hypothese, dass auch in urbanen, stark nährstoffbelasteten Gewässern eine Nährstofflimitation erreicht werden kann. Obwohl aus der Arbeit keine konkrete Grenzkonzentration abgeleitet werden kann, bedeutet das Ergebnis für die Praxis, dass bei entsprechenden Gewässern eine bedeutende Nährstoffreduktion notwendig ist, um einen positiven Effekt auf die Gewässergüte zu erreichen.

### **2.1.2 Maßnahmenkatalog zu Maßnahmen aus dem urbanen Systemen im Bereich des Regenwassermanagements und der Kläranlagen – Modul 4, Arbeitspaket 4.1**

Im Modul 4 wurde ein Maßnahmenkatalog in Form einer Datenbank (MS Access) erstellt, um eine Übersicht über relevante Informationen zu Wirkung und Kosten der verschiedenen Maßnahmen zu schaffen.

Nach der Vorstellung des Katalogs im Oktober 2012 im Rahmen einer Wasserwerkstatt wurden die Maßnahmen im urbanen Bereich (Kläranlagen und Regenwassermanagement) vom KWB in einem Diskussionspapier aufbereitet und so der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt (NITROLIMIT Diskussionspapier Band 2: Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge urbaner Bereiche (2013). D. Mutz, A. Matzinger, C. Remy, M. Uldack, P. Rouault, E. Pawlowsky-Reusing, R. Gnirß, K. Lemm, A. Kummelt, C. Bartholomäus, K. Draht, S. Keller). Diese Veröffentlichung soll Planungsbüros und Behörden helfen, für eine großräumige Planung auf Einzugsgebietsebene Wirksamkeit und Kosten verschiedener Maßnahmen abschätzen und vergleichen zu können. Neben Wirkungen und Kosten enthält das Papier auch eine Kurzdarstellung des Vergleichs von Maßnahmen auf Großkläranlagen in ihren stofflichen Aufwendungen über eine Ökobilanz. Das Diskussionspapier wurde auf der DGL-Jahrestagung 2013 in Potsdam präsentiert und auch in Vorträgen vorgestellt („Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge urbaner Standorte“ A. Matzinger; „Umweltfolgen der weitergehenden Stickstoffentfernung auf Großklärwerken – eine Ökobilanz“ D. Mutz).

### **2.1.3 Arbeiten in der Ökobilanz (LCA) – Modul 4, Arbeitspaket 4.1**

#### **Hintergrund und Ziel**

Die Einführung spezifischer Verfahrensstufen zur Elimination von Nährstoffen auf Kläranlagen hat in den letzten Jahrzehnten bereits zu einer erheblichen Verringerung der Nährstoffemissionen aus diesen Quellen in die Gewässer beigetragen. Dennoch tragen urbane Punktquellen (hauptsächlich Kläranlagen) noch 35 % zu den P- und 18 % zu den gesamten N-Emissionen in die Gewässer bei (UBA 2010). Von den N-Emissionen aus Kläranlagen emittieren im deutschlandweiten Vergleich die Großkläranlagen (GK 5<sup>1</sup>) die

---

<sup>1</sup> GK 5 = Größenklasse 5 gem. AbwV; entspricht der Behandlung von Abwasser von >100.000 Einwohnerwerten (EW). 1 EW = Abwasser einer Person aus einem Privathaushalt (120 g CSB d<sup>-1</sup>, 11 g N d<sup>-1</sup>) (ATV 2000).

höchsten Frachten mit knapp  $40.000 \text{ t N a}^{-1}$  und einem Anteil von 48 % der Gesamtemissionen aller Kläranlagen (DWA 2010), und das obwohl auf Großkläranlagen bereits ca. 80 % des Stickstoffs aus dem ankommenden Abwasser entfernt wird. Sollte eine weitergehende Reduktion der N-Einträge aus urbanen Punktquellen gefordert werden, bieten daher die Großkläranlagen einen Ansatzpunkt. In der vorliegenden Studie werden daher die Umweltwirkungen möglicher Maßnahmen zur weitergehenden Stickstoffentfernung auf Großkläranlagen genauer untersucht.

Eine zusätzliche N-Entfernung auf Großkläranlagen erfordert im Regelfall einen zusätzlichen Energie- und Ressourcenverbrauch für Strom, Baustoffe und Chemikalien. Daher stellt sich die Frage, inwieweit der ökologische Nutzen der N-Frachtreduktion zu negativen ökologischen Auswirkungen durch diesen erhöhten Energie- und Ressourcenverbrauch führt. Hierzu wurde mit Hilfe einer Ökobilanz eine ganzheitliche Betrachtung der potentiellen Umweltauswirkungen von ausgewählten Maßnahmen zur weitergehenden Stickstoffentfernung auf Großkläranlagen durchgeführt. Auf Basis dieser Ökobilanz können Entscheidungsträger in einer zukünftigen Maßnahmenplanung diese ganzheitlichen Umweltauswirkungen bei ihrer Entscheidung berücksichtigen.

Ziel der Studie ist es, ausgewählte Maßnahmen zur weitergehenden Stickstoffentfernung auf Großkläranlagen ( $> 100\,000 \text{ EW}$ ) mittels einer Ökobilanz hinsichtlich ihrer potentiellen Umweltauswirkungen in einer ganzheitlichen Betrachtung zu analysieren und zu vergleichen.

## **Methodik**

Mit der Methodik der Ökobilanz werden ausgewählte Verfahren zur weitergehenden N-Reduktion in einer holistischen Betrachtungsweise „von der Wiege bis zur Bahre“ miteinander verglichen. Die vorliegende Ökobilanz wird in Anlehnung an DIN EN ISO 14040/14044 (ISO 2006; ISO 2009) durchgeführt. Dabei werden neben den direkten Umwelteffekten aus dem Kläranlagenablauf (= Klarlauf) auch die indirekten Effekte resultierend aus Infrastruktur und Verbrauch an Energie und Chemikalien in der Abwasser- und Schlammbehandlung erfasst und bewertet.

### *Funktion und funktionelle Einheit*

Die Funktion der abgebildeten Großkläranlage ist die Reinigung des ankommenden kommunalen Abwassers bis zu einer ausreichenden Abwasserqualität nach bestehender Abwasserverordnung (AbwV 2012). Dabei werden die organische Schmutzfracht (gemessen als Chemischer Sauerstoffbedarf, CSB) sowie die Nährstoffe Phosphor (P) und Stickstoff (N) entfernt. Die Funktion der zu vergleichenden weitergehenden N-Eliminierungsverfahren ist eine weitere Reduktion der Stickstofffracht im Ablauf des Klärwerks durch Umbaumaßnahmen.

Der quantitative Bezug der Umweltauswirkungen für jedes Szenario wird über die funktionelle Einheit (fE) „Behandlung des Abwassers eines Einwohners pro Jahr, bezogen auf die Stickstofffracht im Zulauf  $[\text{EW}_N \cdot \text{a}]^{-1}$ “ als Berechnungsbasis hergestellt. Der  $\text{EW}_N$  ist definiert als tägliche N-Fracht einer Person mit  $11 \text{ g N (EW} \cdot \text{d)}^{-1}$  (ATV 2000). Die ankommende Stickstofffracht der hier abgebildeten Kläranlage entspricht etwa 1,41 Mio.  $\text{EW}_N$ . Ausgewählte Umweltindikatoren sind außerdem auf Basis der entfernten N-Fracht dargestellt, um einen direkten Leistungsvergleich der Verfahren pro kg zusätzlich

entferntem N zu ermöglichen. Hierbei wird die fE als „die zusätzlich eliminierte Stickstofffracht [kg N<sub>elim</sub>]<sup>-1</sup>“ definiert.

### Referenzzustand

Als Grundlage des Vergleichs (= Referenzzustand) dient das Modell einer generischen Großkläranlage mit 1,41 Mio. EW<sub>N</sub>. Die Abwasserreinigung besteht hier aus einer mechanischen Stufe (Rechen, Sandfang, Vorklärung) und einer biologischen Stufe mit biologischer P-Entfernung und vorgeschalteter Denitrifikation (Abbildung 5). Zur Unterstützung wird eine simultane Phosphorfällung in der Belebung durchgeführt.

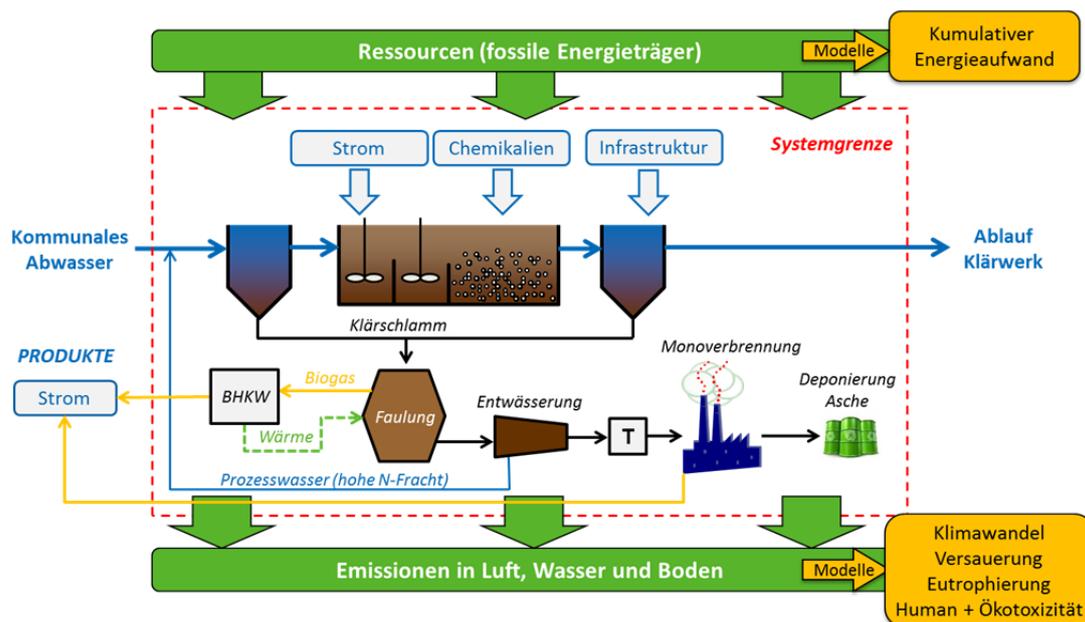


Abbildung 5: Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen der Ökobilanz

Die Schlammbehandlung besteht aus Schlammfäulung, Biogasaufbereitung und Biogasnutzung in einem Blockheizkraftwerk (BHKW). Der gefaulte Schlamm wird anschließend entwässert und thermisch in einer Monoverbrennung behandelt. Der produzierte Strom aus BHKW und Monoverbrennung kann als Produkt in das bestehende Stromnetz eingespeist werden und substituiert somit den durchschnittlichen Netzstrom. Die Datengrundlage für das generische Großklärwerk bildet eine bestehende Großkläranlage aus dem Raum Berlin-Brandenburg. Die biologische Stufe wurde hier für einen Überwachungswert für anorganischen Stickstoff von 18 mg L<sup>-1</sup> geplant und hat im Jahresmittel einen Ablaufwert von TN<sub>anorg</sub> = 14,6 mg L<sup>-1</sup>. Sie weist daher noch ein Optimierungspotential hinsichtlich der N-Entfernung aus. Das Verhältnis des Volumens der anoxischen und aeroben Becken in der Belebung liegt bei V<sub>D</sub>/V<sub>BB</sub> = 0,37<sup>2</sup>.

### Szenarien

<sup>2</sup> V<sub>D</sub> = Volumen des anoxischen Beckens, in der die Denitrifikation stattfindet, V<sub>BB</sub> = Volumen des anoxischen und aeroben Beckens, wo jeweils eine heterotrophe Kohlenstoffelimination stattfindet.

Auf Grundlage des Referenzzustands wurden fünf mögliche Verfahren einer weitergehenden Stickstoffentfernung (= Szenarien) in ihren ökologischen Auswirkungen verglichen. In Tabelle 2 und in Abbildung 6 sind die Verfahren und die wichtigsten Veränderungen bei ihrer Umsetzung auf der Kläranlage dargestellt.

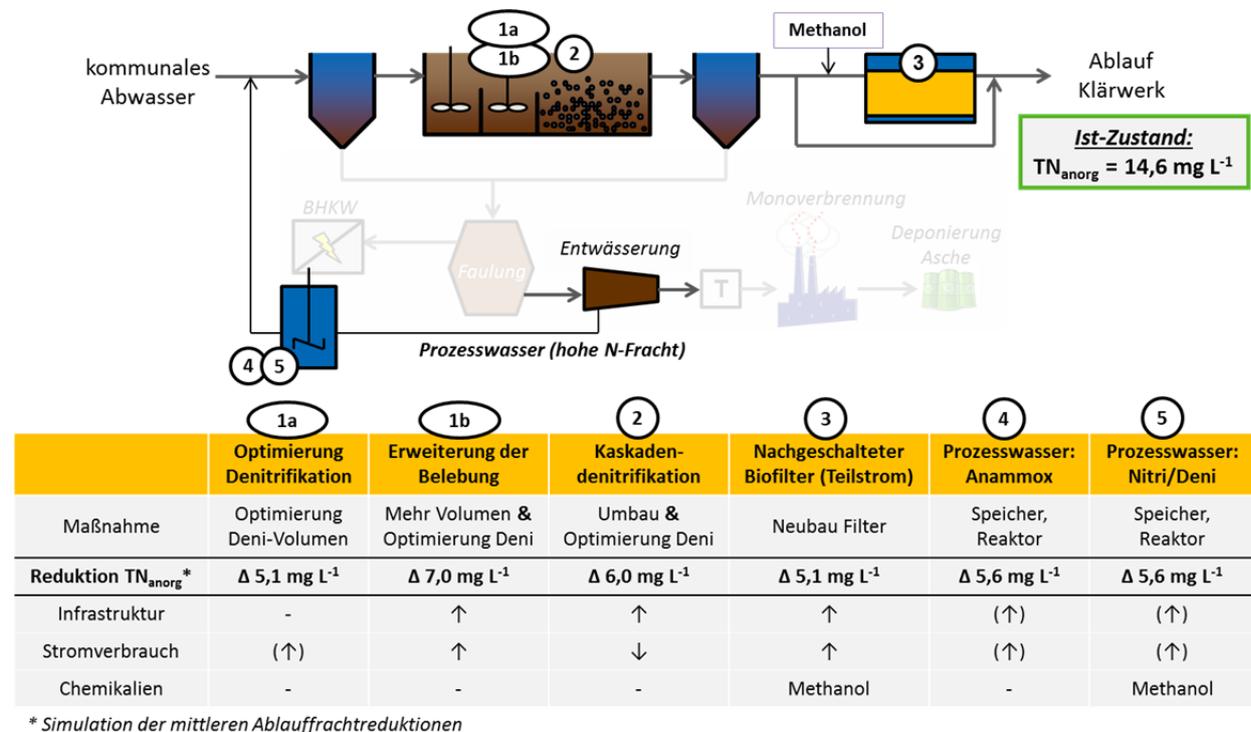


Abbildung 6: Übersicht über die betrachteten Szenarien

### Datenqualität

Für die durchgeführte Ökobilanz ist die Datenqualität hoch. Die Reinigungsleistungen der Verfahrensschritte auf der Kläranlage, die Energie- und Chemikalienverbräuche sowie die Infrastruktur für die generische Großkläranlage basieren auf Primärdaten einer Großkläranlage in Berlin und wurden von den Berliner Wasserbetrieben (BWB) zur Verfügung gestellt (Zech 2008; Schäfer 2009; Meinel 2011; KWB 2012). Die Daten zu den betrachteten Maßnahmen basieren auf Planungs- und Simulationsdaten für die modellierte Kläranlage (BWB-GI 2013).

Tabelle 2: Kurzbeschreibung der Szenarien

#### 1a Optimierung der Denitrifikationskapazität (optiDN)

Umbau der bestehenden Belebung mit einer bivalenten (variablen) Belüftungszone. Erhöhung des anoxischen Denitrifikationsvolumens bei Trockenwetter auf VD/VBB = 0,54. Belüftung der bivalenten Zone bei Regenwetter für eine ausreichende Nitrifikation.

#### 1b Erweiterung der Belebung und Optimierung der DN-Kapazität (erwBB + optiDN)

Bau von zusätzlichen Becken in der Belebung (+25%) und gleichzeitige Optimierung der Denitrifikationszone mit konstanten VD/VBB = 0,54. Das höhere Gesamtvolumen stellt eine ausreichende Nitrifikation bei Regenwetter sicher.

## 2 Umbau der Belegung zu einer Kaskadendenitrifikation (Kaskade)

Umbau der vorhandenen Belegungsbecken zu einer dreistufigen Kaskadendenitrifikation. Jede Stufe besteht aus einer vorgeschalteten Denitrifikation. Der Zulauf zur Belegung wird auf die in Reihe geschalteten Stufen anteilig verteilt mit 40%, 33% und 27% (Barjenbruch et al. 2008). Das VD/VBB-Verhältnis beträgt jeweils 0,54.

## 3 Bau eines nachgeschalteten Biofilters zur Teilstrombehandlung (Biofilter)

Neubau von nachgeschalteten, biologisch aktiven Filtern. Zur weitergehenden heterotrophen Denitrifikation ist eine externe Kohlenstoffquelle (hier: Methanol) notwendig. Behandlung von 74% des Klarlaufs (Jahresdurchschnitt) im Biofilter, der restliche Volumenstrom wird über einen Bypass in den Vorfluter geleitet.

## 4 Prozesswasserbehandlung durch Deammonifikation (PWB Anammox)

Die hohen N-Frachten aus dem Prozesswasser der Entwässerung (ca. 15-20% des Rohwasserzulaufs nach DWA (2004)) werden über eine Deammonifikation entfernt. Der Wirkungsgrad der N-Entfernung im Teilstrom wird mit  $\eta = 80\%$  angenommen. Durch die geringere Rückbelastung wird eine verbesserte Denitrifikation in der Belegung erzielt.

## 5 Prozesswasserbehandlung durch Nitrifikation und Denitrifikation (PWB Nitri/Deni)

Behandlung des Prozesswassers aus der Entwässerung über konventionelle Nitrifikation und Denitrifikation in einem Sequencing Batch Reactor (SBR). Dosierung von Kohlenstoff (hier: Methanol) ist notwendig. Annahme der N-Entfernung ebenfalls mit  $\eta = 80\%$ .

### Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung in der Ökobilanz wurden verschiedene Umweltindikatoren ausgewählt (ReCiPe nach Goedkopp et al. (2009), VDI-Richtlinie 4600 nach VDI (2012)). In Tabelle 3 sind die Wirkungsindikatoren und die Stoffe aus der Sachbilanz dargestellt, die einen Beitrag zum jeweiligen Indikator leisten.

Tabelle 3: Auflistung der betrachteten Wirkungsindikatoren

Umweltindikator	Stoffe aus der Sachbilanz	Einheit	Referenz
kumulierter Energieaufwand fossiler und nuklearer Energieträger (KEA)	Kohle, Rohöl, Erdgas, Uran	MJ-eq	VDI 4600
Treibhauspotential (THP)	CO <sub>2,fossil</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> etc.	kg CO <sub>2</sub> -eq	ReCiPe
Versauerungspotential (AP)	SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> etc.	kg SO <sub>2</sub> -eq	ReCiPe
marines Eutrophierungspotential (MEP)	N-Emissionen ins Gewässer	kg N-eq	ReCiPe
Süßwasser Eutrophierungspotential (FEP)	P-Emissionen ins Gewässer	kg P-eq	ReCiPe
Humantoxizitätspotential (HTP)	humantoxische Substanzen	kg 1,4-DCB-eq	ReCiPe
Süßwasser Ökotoxizitätspotential	toxische Substanzen für	kg 1,4-DCB-eq	ReCiPe

Umweltindikator	Stoffe aus der Sachbilanz	Einheit	Referenz
(FETP)	Süßwasserorganismen		

## Ergebnisse

### Weitergehende Stickstoffreduktion – Positive Umweltfolgen

Der positive ökologische Beitrag der Verfahren zur weitergehenden Stickstoffentfernung wird im Indikator des „marinen Eutrophierungspotentials“ (MEP) deutlich. Die direkten N-Einträge über den Klarlauf der Kläranlage dominieren das MEP trotz einer bereits vorhandenen 80%igen N-Entfernung in der bestehenden Kläranlage. Es werden im Jahresdurchschnitt  $1.140 \text{ t N a}^{-1}$  in die Gewässer im Referenzzustand emittiert (Abbildung 7). Die weitergehenden Reinigungsverfahren ermöglichen eine zusätzliche N-Reduktion von 32 – 41 %. Dabei erzielt das Szenario *erwBB+optiDN* mit  $470 \text{ t N a}^{-1}$  die höchste zusätzliche N-Reduktion.

Die zusätzliche N-Reduktion bezieht sich hier auf das generische Klärwerk, das im Jahresdurchschnitt einen Ablaufwert von  $\text{TN}_{\text{anorg}} = 14,6 \text{ mg L}^{-1}$  besitzt. Die Optimierungsszenarien *optiDN* und *erwBB+optiDN* sind daher fallspezifisch zu bewerten. Die Anwendbarkeit dieser Szenarien auf Kläranlagen, die bereits auf einen Überwachungswert von  $\text{TN}_{\text{anorg}} = 13 \text{ mg L}^{-1}$  optimiert sind, muss überprüft werden. Die Szenarien *Kaskade*, *Biofilter* sowie *PWB Anammox* bzw. *Nitri/Deni* sind in ihrer zusätzlichen N-Reduktion miteinander vergleichbar (32 – 35 %) und auf andere Großkläranlagen übertragbar.

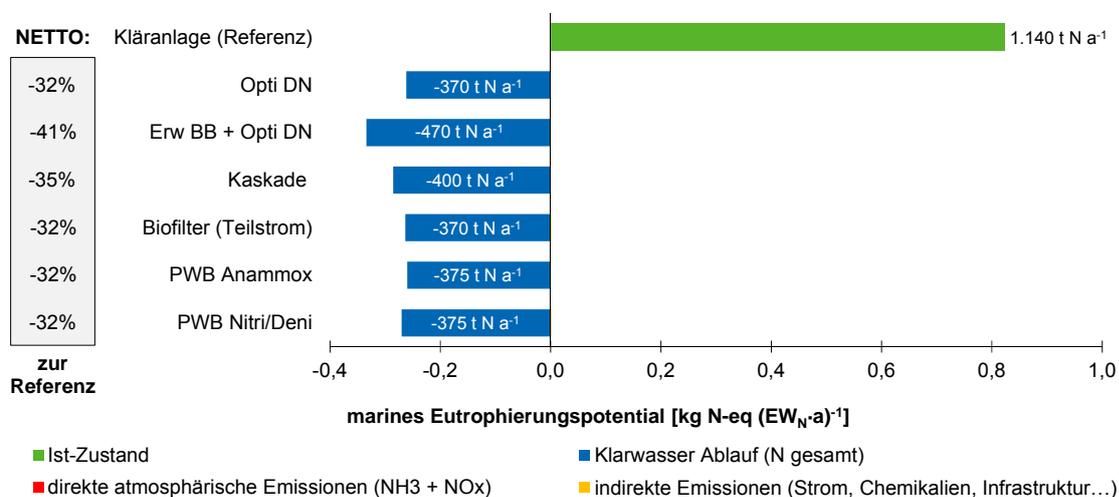


Abbildung 7: Marines Eutrophierungspotential (N-Emissionen) der Szenarien verglichen zur Referenz

### Aufwendungen zur Umsetzung der Maßnahmen

Die zusätzlichen ökologischen Aufwendungen der betrachteten Maßnahmen spiegeln sich hauptsächlich im veränderten Strom- und Chemikalienverbrauch wider und sind in den Umweltindikatoren kumulierter Energieaufwand (KEA) und Treibhauspotential (THP) sichtbar.

Der Netto-KEA der generischen Kläranlage liegt bei  $110 \text{ MJ-eq (EW}_{N,a})^{-1}$  inkl. Berücksichtigung des substituierten Stroms aus dem BHKW und der Monoverbrennung (Abbildung 8). Aufgrund des hohen Anteils an fossilen (62 %) und nuklearen (12 %) Energieträgern im modellierten Strommix 2010 dominiert der Einfluss des Stromverbrauchs beim KEA. Indirekte Effekte durch Infrastruktur, Chemikalien (Fäll- und Flockungshilfsmittel) und Monoverbrennung wirken sich in der Summe nur gering ( $< 15 \%$ ) auf den KEA aus. Da Methanol (MeOH) aus fossilem Erdgas hergestellt wird, ist der Effekt aus der MeOH-Dosierung auf den KEA sehr groß und überlagert in den Szenarien *Biofilter* und *PWB Nitri/Deni* die Effekte aus dem Stromverbrauch. Daher haben die beiden Szenarien den höchsten zusätzlichen KEA mit 47 % (*Biofilter*) bzw. 43 % (*PWB Nitri/Deni*). Eine alternative C-Quelle wie z.B. Ethanol aus Zuckerrüben könnte den KEA für die benötigte C-Quelle in diesen Szenarien um jeweils 74 % reduzieren (Mutz 2013).

Die *Kaskadendenitrifikation* verbraucht gegenüber dem Referenzzustand weniger Strom, so dass sich hier der KEA um 14 % verringert. Die Einsparungen im Strom sind größtenteils auf die in Summe geringere Rezirkulationsrate in den Belebungsbecken zurückzuführen. Die Optimierung der Denitrifikationskapazität (*optiDN*) erhöht den KEA um 5 % wegen des größeren Anteils des anoxischen Beckenvolumens und der dafür notwendigen zusätzlichen Rührerenergie. Beim Szenario *erwBB+optiDN* erhöht sich der KEA um 13% aufgrund der zusätzlichen Beckenvolumina (11% Strom für Rührer und Pumpen, 2% Infrastruktur). Die Szenarien *PWB Anammox* und *PWB Nitri/Deni* benötigen zwar zusätzlichen Strom für die N-Entfernung aus dem Prozesswasser, verringern aber durch die geringere N-Rückbelastung den Stromverbrauch in der Belebung (weniger Belüftung für Nitrifikation, höhere DN-Leistung). So entsteht insgesamt nur ein geringfügig höherer KEA von +2% für *PWB Anammox*.

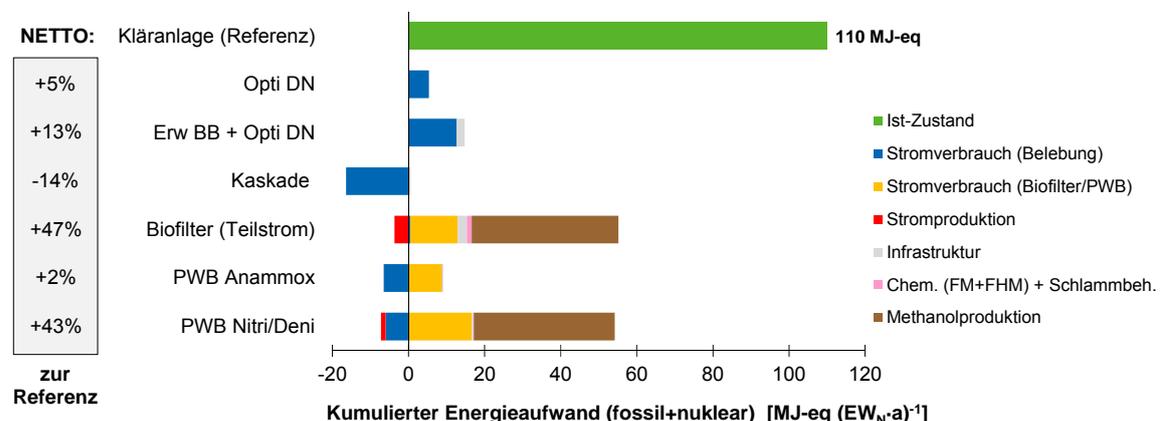


Abbildung 8: Kumulierter Energieaufwand der Szenarien verglichen zur Referenz

Das Treibhauspotential beschreibt die Treibhausgas-Emissionen, die direkt oder indirekt durch die weitergehenden N-Eliminierungsmaßnahmen entstehen (Abbildung 9). Durch den hohen Anteil an fossilen Energieträgern am Strommix korrelieren die Veränderungen der Szenarien in den indirekten Effekten (dominiert vom Stromverbrauch der Maßnahmen) im THP mit dem KEA. Der MeOH-Bedarf für den *Biofilter* und die *PWB Nitri/Deni* erzeugt sowohl indirekte Emissionen aus der MeOH-Herstellung als auch in

direkten Emissionen aus der Mineralisation des MeOH auf der Kläranlage in fossiles CO<sub>2</sub>.

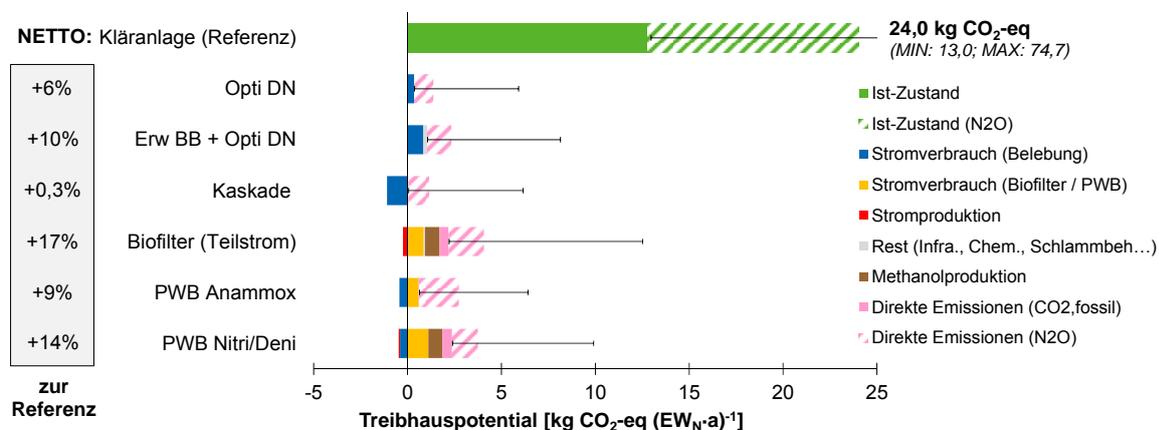


Abbildung 9: Treibhauspotential der Szenarien verglichen zum Referenzzustand inklusive Unsicherheiten in den direkten N<sub>2</sub>O-Emissionen aus der biologischen N-Reduktion

Neben den indirekten Emissionen, hauptsächlich aus dem Strom- und MeOH-Bedarf, haben die *direkten Lachgas-Emissionen* (N<sub>2</sub>O) auf der Kläranlage durch die biologische Stickstoffentfernung einen hohen Einfluss auf das THP. Der mit 0,83 % des denitrifizierten Stickstoffs gewählte N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktor (umgerechnet: 0,6 % N<sub>Zulauf</sub>) führt zu einer Überlagerung der indirekten Effekte im THP. Der gewählte Emissionsfaktor ist bisher noch nicht wissenschaftlich abgesichert, erscheint aber nach diversen Publikationen als realistisch (Wicht & Beier 1995; Kampschreur et al. 2009b). Zusätzlich wurde für die Deammonifikation ein höherer Faktor von 1,2 % des eliminierten Stickstoffs gewählt, da höhere Emissionen im Anammox-Verfahren vermutet werden (Kampschreur et al. 2009a; Schneider et al. 2013). Da die N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktoren auf Kläranlagen noch mit großen Unsicherheiten verbunden sind, wurde hier eine Unsicherheit des Emissionsfaktors zwischen 0,01 - 3,3 % (Ahn et al. (2010)) für alle Szenarien angenommen.

Ähnlich dem KEA liegt die *Kaskade* mit kaum zusätzlichem THP (+0,3 %) im Vergleich am besten. *OptiDN* (+6 %) und *PWB Anammox* (+9 %) haben das zweit- bzw. drittbeste Ergebnis im Vergleich der THP-Emissionen. Der *Biofilter* (+17 %) und *PWB Nitri/Deni* (+14 %) haben durch den hohen Stromverbrauch und der MeOH-Dosierung das höchste zusätzliche THP.

### Nebeneffekte

Das Süßwasser Eutrophierungspotential (FEP) erfasst die P-Emissionen in die Gewässer. Analog zum Stickstoff wird auf Großkläranlagen Phosphor bereits weitgehend entfernt (zu ca. 97 %). Dies entspricht einer jährlichen P-Fracht im Ablauf der Kläranlage von 32 t P a<sup>-1</sup>. Die betrachteten Szenarien haben bis auf den *Biofilter* keinen Einfluss auf die P-Entfernung. Durch den zusätzlichen Rückhalt an suspendierten Stoffen (SS) aus dem Klarlauf kann im *Biofilter* als positiver Nebeneffekt partikulärer Phosphor aus dem Klarlauf entfernt werden. Es wird eine zusätzliche Entfernung im *Biofilter* von 11 t P a<sup>-1</sup> abgeschätzt.

Hinsichtlich der Human- (HTP) und Süßwasserökotoxizität (FETP) wurden bei den direkten Emissionen der Kläranlage lediglich die Schwermetallemissionen im Klarlauf und im Klärschlamm bilanziert. Weitere Stoffe mit Auswirkungen auf das HTP und/oder FETP wie organische Verbindungen konnten in dieser Studie nicht erfasst werden. Neben den Schwermetallemissionen im Klarlauf (82 % des FETP und 9 % des HTP in der Referenz) liefern die Quecksilberemissionen aus der Monoverbrennung (64 % des HTP in der Referenz) einen wesentlichen Beitrag zu den Toxizitätspotentialen. Da sich die Metallfrachten mit Ausnahme des *Biofilters* in den Szenarien nicht ändern, beeinflussen die Szenarien FETP und HTP nicht. Durch die SS-Entfernung im Biofilter wird im Modell eine zusätzliche Entfernung von partikulär vorliegenden Schwermetallen abgebildet, die über den Klärschlamm in die Monoverbrennung gelangen. So führt der *Biofilter* durch die vermehrte Verlagerung der Metalle in den Klärschlamm zu einem positiven Effekt im FETP (-8 %) und einem erhöhten HTP durch Quecksilberemissionen in die Atmosphäre in der Monoverbrennung (+1,2 %). Für detaillierte Informationen zur Modellierung der Schwermetallfrachten wird auf Mutz (2013) verwiesen.

Das Versauerungspotential (AP) des Referenzzustands setzt sich zum größten Teil aus direkten Emissionen zusammen (48 % NH<sub>3</sub> aus der Nitrifikation und 12 % SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> aus der Schlammbehandlung). Da sich diese Emissionen in den Szenarien weitgehend nicht ändern, sind die Auswirkungen auf das AP durch die Szenarien vernachlässigbar (zwischen -3 % und +3 %).

### Fazit der Ökobilanz

Mit Hilfe der Methodik der Ökobilanz wurden die ökologischen Auswirkungen weitergehender Stickstoffeliminierungsverfahren auf Großkläranlagen in einer ganzheitlichen Betrachtungsweise untersucht und verglichen. Hierbei wurden sowohl die direkten Effekte der verbesserten Ablaufqualität hinsichtlich der N-Fracht als auch die zusätzlichen Aufwendungen durch die vorgelagerten Prozesse resultierend aus dem veränderten Strom- und Chemikalienverbrauch und der benötigten Infrastruktur dargestellt.

Die zusätzlichen Umweltauswirkungen der Szenarien im KEA und im THP wurden als Leistungsvergleich ebenfalls mit der fE [kg N<sub>elim</sub>]<sup>-1</sup> in Abbildung 10 dargestellt. Da sich die zusätzlich entfernte N-Fracht der Szenarien in einer ähnlichen Größenordnung (32 – 41 %) bewegt, verändern sich die Aussagen zum Vergleich der Szenarien nicht. Eine Ausnahme bildet das THP des Szenarios *erwBB+optiDN*, das durch die höhere N-Entfernung besser als *PWB Anammox* abschneidet. Es muss hierbei auf die Einschränkung der Übertragbarkeit der Szenarien *optiDN* und *erwBB+optiDN* und deren hohe Reinigungsleistung auf andere Kläranlagen hingewiesen werden. Sowohl bei *erwBB+optiDN* als auch bei *optiDN* können die dargestellten Auswirkungen pro kg N<sub>elim</sub> für bereits optimierte Kläranlagen deutlich höher ausfallen aufgrund der geringeren zusätzlichen N-Entfernung.

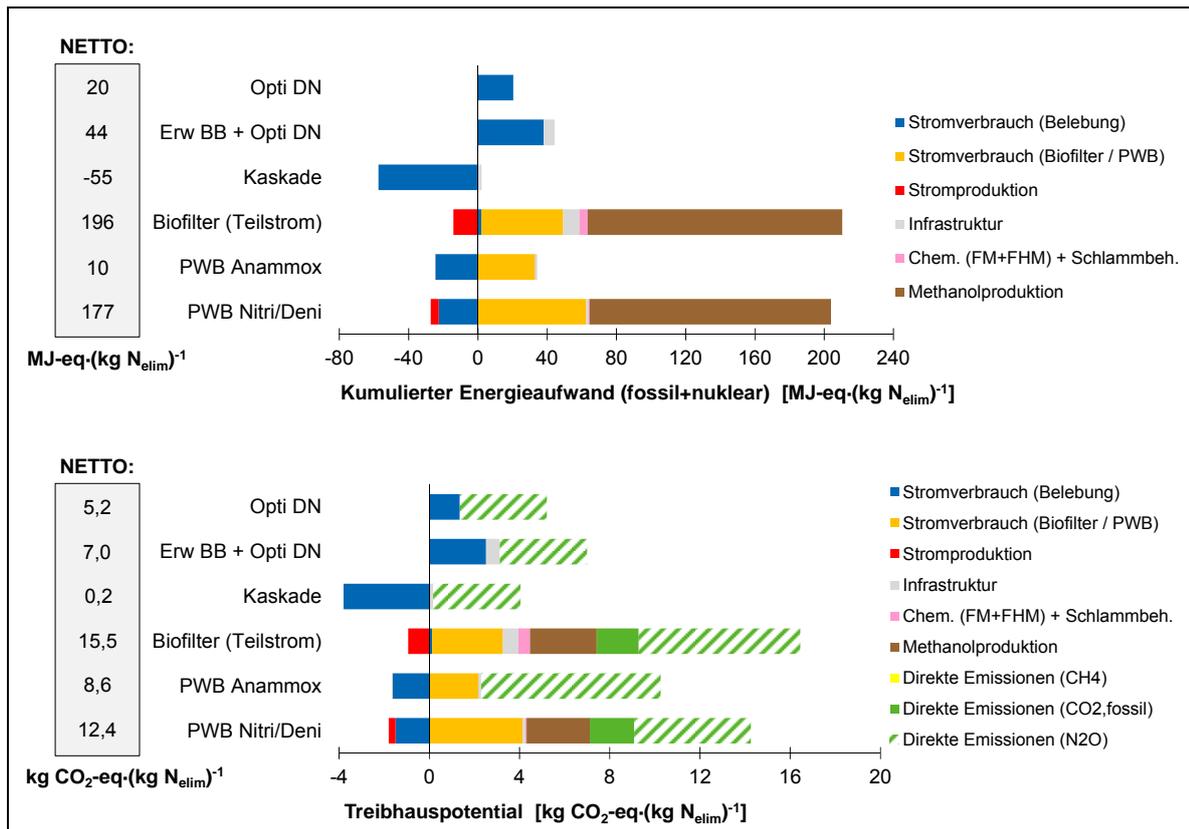


Abbildung 10: KEA und THP der Szenarien im Vergleich pro kg eliminiertem Stickstoff

Folgende Ergebnisse können aus der durchgeführten Ökobilanz zusammengefasst werden:

1. Die **Kaskade** hat einen geringeren Stromverbrauch bei weitergehender N-Reduktion und ist daher aus ökologischen Gesichtspunkten zu empfehlen. Die technische Umstellung im laufenden Betrieb ist jedoch tendenziell sehr aufwendig und muss vorher überprüft werden.
2. **OptiDN** als Umbaumaßnahme in der Belebung und **PWB Anammox** als Prozesswasserbehandlung haben einen geringen zusätzlichen Energieaufwand und vergleichbares N-Reduktionspotential. Die Anwendbarkeit von **optiDN** auf andere Kläranlagen ist jedoch nicht immer gegeben.
3. Der **Biofilter (Teilstrom)** hat den höchsten Energieverbrauch und assoziierte Treibhausgasemissionen durch hohen Stromverbrauch und die Dosierung einer externen Kohlenstoffquelle, besitzt aber positive Nebeneffekte auf die Ablaufqualität wie vermehrte Entfernung von P und Schwermetallen.
4. **ErwBB+optiDN** sowie **PWB Nitri/Deni** haben hohen Energieverbrauch/THG-Emissionen, aber keine signifikant höhere N-Reduktion gegenüber anderen Szenarien und können daher aus ökologischen Gesichtspunkten nicht empfohlen werden.

5. **N<sub>2</sub>O-Emissionen** in der biologischen N-Entfernung spielen eine signifikante Rolle für das THP einer Kläranlage, die Emissionsfaktoren für die biologische N-Entfernung (Nitrifikation/Denitrifikation und Deammonifikation) sind noch nicht gesichert.

Die Lachgas-Emissionen steuern bei allen Szenarien einen (möglicherweise) signifikanten Beitrag zum Treibhauspotential bei. Da zur Zeit der Studie noch keine gesicherten Emissionsfaktoren zur Lachgas-Emission auf Kläranlagen vorlagen, wurde mit 0,82% N<sub>DN</sub> ein für realistisch angenommener Emissionsfaktor gewählt. Mit diesem angenommenen Faktor überlagern die direkten N<sub>2</sub>O-Emissionen die indirekten Effekte der Kläranlage im THP.

Die durchgeführte Ökobilanz zeigt die ökologische Abwägung zwischen positiven Auswirkungen durch zusätzliche N-Reduktion im Klarlauf und negativen Auswirkungen durch höheren Strom- und Chemikalienbedarf. Nichtsdestotrotz ist die durchgeführte Ökobilanz mit ihrer ganzheitlichen Betrachtungsweise nur eines von vielen Aspekten, die im Entscheidungsprozess eine Rolle spielen. So muss bspw. auf Basis dieses ökologischen Vergleichs eine technische Umsetzung und die ökonomischen Rahmenbedingungen ebenfalls berücksichtigt werden.

#### **2.1.4 Zusammenführung entscheidungsvorbereitender Informationen– Modul 4, Arbeitspaket 4.4**

In diesem Arbeitspaket wurden die Ergebnisse aus der Bewertung der Szenarien zur Reduktion der Stickstoffeinträge zusammengeführt und für die Weiterverwertung durch Entscheidungsträger aufbereitet. Es haben mehrfach Gespräche mit den Stakeholder aus Berlin und Brandenburg (SenStadtUm, BWB, LUGV) stattgefunden, um die Entwicklung der Szenarien abzustimmen. Das KWB hat zudem in enger Zusammenarbeit mit dem IGB und der TUB die Ergebnisse des Nährstoffmodells MONERIS für die verschiedenen Szenarien geprüft und validiert (Eingabedaten). Auch die Übertragung der gesammelten Informationen zu Wirkungen und Kosten aus dem Maßnahmenkatalog auf die Modellregion „Einzugsgebiet untere Havel“ wurde vom KWB begleitet, vor allem im Hinblick auf die Maßnahmen im urbanen Raum und die korrekte Abbildung von deren Wirkungen und Kosten. Die Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse wurden bei der DGL-Jahrestagung 2013 in Potsdam vorgestellt und sind im gemeinsamen Abschlussbericht zusammengefasst.

#### **2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Personalkosten in Höhe von 191.350,24 € für die Arbeiten in den Modulen 3 und 4.

Reisekosten in Höhe von 1.983,76 €: Die Reisekosten wurden verwendet für die Teilnahme an Projekttreffen in Cottbus, Koblenz, Chorin, Ziethen und Bad-Saarow sowie für die Teilnahme an der DGL.

Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten:

- Rechner und Erweiterung der Server-Kapazität für die Sensitivitätsanalyse mit QSim (1087,73 €)

- Datenbank für Ökobilanz-Modell (3.837,73 €)

Die Förderung durch das BMBF betrug 80% der Ausgaben.

### **2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Arbeiten und die finanziellen Mittel wurden entsprechend den Modulen und an die im Verlauf des Projektes erhaltenen Ergebnisse ausgerichtet.

### **2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Die Arbeiten zur Sensitivitätsanalyse mit Hilfe des Gewässergütemodells QSim (Modul 3) können erfolgreich zur Schaffung von Know-how zur Kompetenzerhaltung und zur Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit beitragen. Das erarbeitete Wissen zu den Umsatzprozessen in staugeregelten Tieflandgewässern steht nun dem KWB, der BfG und weiteren Interessierten zur Verfügung und kann für die Weiterentwicklung von QSim bzw. für zukünftige Projekte / Fragestellungen genutzt werden.

Der Maßnahmenkatalog zu Wirkung und Kosten von Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffeinträge ist in Form einer Datenbank und des separaten Diskussionspapiers Band 2 (urbane Maßnahmen) veröffentlicht. Der Katalog vereinfacht den Zugang zu Informationen für die Bewirtschaftung der Gewässer und kann nach Projektende weiterhin von Entscheidungsträgern der öffentlichen Hand für die Maßnahmenplanung in weiteren Einzugsgebieten genutzt werden. Durch die Zusammenführung der vorhandenen Informationen zu urbanen Maßnahmen im Diskussionspapier wird die laufende Diskussion zwischen den Behörden in Berlin (SenStadtUm) und Brandenburg (LUGV) und den Berliner Wasserbetrieben (BWB) über die weitere Planung von Maßnahmen im Rahmen der EU-WRRL unterstützt. Allen interessierten Stakeholdern (SenStadtUm, LUGV, BWB) wurde im Anschluss an die öffentlichen Präsentationen (Wasserwerkstatt, Statusseminar) das Diskussionspapier zur Verfügung gestellt. Die beispielhafte Implementierung einzelner Maßnahmen und Maßnahmenpakete im Nährstoffmodell MONERIS ermöglicht zudem eine verbesserte Zusammenarbeit und Kommunikation bei der Maßnahmenplanung zwischen Forschern und den verschiedenen Anwendern in der Verwaltung auf Basis einer transparenten Einschätzung von Wirkungen und Kosten. Die weitere Pflege und Verbreitung der Datenbank liegt wie vorgesehen beim IGB.

Auch die Methode der Ökobilanz (LCA), die am KWB angewendet wird, beschreibt weitere nicht-monetäre Auswirkungen für die Bewertung von Maßnahmen. Diese ganzheitliche Betrachtungsweise liefert transparente und quantifizierbare Informationen über die zusätzlichen Umweltwirkungen weiterer Maßnahmen auf Großkläranlagen für die Planung von Maßnahmen durch den Berliner Senat (SenStadtUm) und BWB und trägt damit zu einer Versachlichung der laufenden Diskussion bei. Die genutzte Methodik zeigt beispielhaft für andere Stakeholder der Wasserwirtschaft die mögliche Erweiterung der Entscheidungsprozesse hin zu einer ganzheitlichen Beurteilung des Aufwands von Maßnahmen unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten. Durch die wissenschaftliche Verbreitung der Ökobilanz-Ergebnisse und Methodik werden zudem die Erfahrungen aus diesem Teilprojekt der breiteren Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht.

Durch die enge Vernetzung zwischen Forschern und assoziierten Partner (öffentliche Verwaltung, Betreiber von Kanalnetz und Kläranlagen) leistet das Projekt einen großen Beitrag zur verbesserten Zusammenarbeit mit Forschungsstellen und Transferstellen.

## **2.5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Laufzeit des Projektes wurden keine Fortschritte auf den vom KWB erarbeiteten Gebieten durch andere Stellen erzielt, die den bisher erzielten Ergebnissen widersprechen bzw. weitergehende Aussagen zulassen.

## **2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses**

### **Konferenzbeiträge / Vorträge**

NITROLIMIT Special Session der DGL Tagung 2013 in Potsdam:

- Umweltfolgen der weitergehenden Stickstoffentfernung auf Großklärwerken - eine Ökobilanz. Daniel Mutz, Christian Remy, Pascale Rouault, Corinna Bartholomäus, Katharina Draht, Regina Gnirß
- Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge urbaner Standorte. Andreas Matzinger, Daniel Mutz, Mathias Uldack, Christian Remy, Pascale Rouault, Erika Pawlowsky-Reusing, Regina Gnirß, Katrin Lemm, Corinna Bartholomäus, Katharina Draht, Steffen Keller

32. Berliner Wasserwerkstatt am 25.10.2012:

- Maßnahmen zur Reduktion von Stickstoffeinträgen in urbane Gewässer - Wirkungen und Kosten. Pascale Rouault (KWB), Kay Joswig (BWB, GI), Regina Gnirß (BWB, F&E), Dr. Markus Venohr (IGB)

World Water Congress & Exhibition (WWC) in Lissabon 21.-26. September 2014 (Abstract eingereicht):

- Environmental Impacts Of Advanced Nitrogen Removal At Large Wastewater Treatment Plants. Daniel Mutz, Christian Remy, Pascale Rouault, Corinna Bartholomäus, Katharina Draht, Regina Gnirß, Steffen Keller

### **Master Thesis**

Daniel Mutz (2013): Vergleichende Ökobilanz von weitergehenden Stickstoffeliminierungsverfahren in Großkläranlagen, Technische Universität Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz. Berlin

### **Nitrolimit Diskussionspapiere**

- Band 2, September 2013: Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge urbaner Bereiche. Daniel Mutz, Andreas Matzinger, Christian Remy, Mathias Uldack, Pascale Rouault, Erika Pawlowsky-Reusing, Regina Gnirß, Katrin Lemm, Agnes Kummelt, Corinna Bartholomäus, Katharina Draht, Steffen Keller

## Literatur

- Ahn, J.H., Kim, S., Park, H., Rahm, B., Pagilla, K., Chandran, K. 2010: N<sub>2</sub>O Emissions from Activated Sludge Processes, 2008-2009: Results of a National Monitoring Survey in the United States. Environ. Sci. Technol. 2010(44): 4505-4511.
- ATV 2000: Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef, GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V. ATV-DVWK-A 131.
- Barjenbruch, M., Bracklow, U., Rühmland, S., Kraume, M., Brand, C. 2008: Studie zu Varianten für weitere N-Senkung in Berliner Klärwerken. Berlin, Technische Universität Berlin.
- BWB-GI 2013: Kommunikation mit BWB-GI (Grundlagenplanung und Investition) zu weitergehenden Stickstoffeliminierungsverfahren gemäß vorliegender Simulationsmodellierungen, Bearbeitungsstand Juni 2013.
- DWA 2004: Rückbelastung aus der Schlammbehandlung - Verfahren zur Schlammwasserbehandlung. DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 "Rückbelastung aus der Schlammbehandlung". Arnold, E., Beier, M., Grömping, M., Jardin, N., Kolisch, G., Kühn, V., Meyer, S., Rolfs, T., Schmidt, F., Wett, B., Otte-Witte, R., DWA (Deutscher Vereinigung für Wasser, Abwasser und Abfall).
- DWA 2010: 23. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen 2010, Stickstoff im Mittelpunkt. Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- Goedkopp, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A.D., Struijs, J., van Zelm, R. 2009: ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and endpoint level; First Edition, Report I: Characterisation. <http://www.lcia-recipe.net>, Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Nederlande.
- ISO 2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderung und Anleitungen. Berlin, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN ISO 14044:2006-10.
- ISO 2009: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN ISO 14040:2009-11.
- Kampschreur, M.J., Poldermans, R., Kleerebezem, R., van der Star, W.R.L., Haarhuis, R., Abma, W., Jetten, M.S.M., van Loosdrecht, M.C.M. 2009a: Emission of nitrous

- oxide and nitric oxide from a full-scale single-stage nitrification-anammox reactor. *Water Science and Technology* 60.12(2009): 3211-3217.
- Kampschreur, M.J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M.S.M., van Loosdrecht, M.C.M. 2009b: Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research* 43(2009): 4093-4103.
- KWB 2012: LCA study of sludge treatment line in WWTP Berlin-Waßmannsdorf. Project CoDiGreen Workpackage 2. Remy, C. <http://www.kompetenzwasser.de/CoDiGreen.504.0.html>. Berlin, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.
- KWB (2013): Oxeram 2: Optimization of flocculation for tertiary filtration processes and evaluation of sustainability of tertiary wastewater treatment. Research project 2010-2013, reports available online at <http://www.kompetenzwasser.de/Final-Reports-of-OXERAM-Project.572.0.html>, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH, Berlin, Germany.
- Meinel, F. 2011: Ökobilanz und wirtschaftlicher Vergleich verschiedener Phosphoreliminationsverfahren in Kläranlagen. Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft. Dresden, Technische Universität Dresden. Diplomarbeit.
- Mutz, D. 2013: Vergleichende Ökobilanz zu weitergehenden Stickstoffeliminierungsmaßnahmen in Großkläranlagen. Institut für Technischen Umweltschutz. Berlin, TU Berlin. Master-Thesis.
- Nash, H.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10 (3): 282-290.
- Riechel, M., Matzinger, A., Sonneberg, H., Caradot, N., Meier, I., Heinzmann, B. and Rouault, P. (2012): Validation and sensitivity of a coupled model tool for CSO impact assessment in Berlin, Germany. 6th International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs). Leipzig, Germany, 1-5 July 2012.
- Riechel, M., Matzinger, A., Uldack, M., Caradot, N., Sonnenberg, H., Rouault, P., Pawlowsky-Reusing, E., v. Seggern, D. and Heinzmann, B. 2012: Immissionsorientierte Mischwasserbewirtschaftung. *wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, Modernisierungsreport 2012/2013*, 65-67.
- Schäfer, S. 2009: Verfahrensvergleich der Abwasserbehandlung - Bilanzierung und Vergleich von drei ausgewählten Berliner Klärwerken. *Ingenieurwissenschaften II - Umweltverfahrenstechnik*. Berlin, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. Diplomarbeit.

- Schneider, Y., Beier, M., Rosenwinkel, K.-H. 2013: Nitrous oxide formation during nitrification and nitrification of high-strength wastewater. *Water Science and Technology* 67.11(2013): 2494-2502.
- Schumacher, F., Gebauer, U., Pawlowsky-Reusing, E., Meier, I., Schroeder, K., Leszinski, M. and Heinzmann, B. 2007. Teilstudie: Gewässersimulation der Stauhaltung Charlottenburg (Spree und Kanäle) unter Berücksichtigung der Mischwasserentlastungen am Beispiel eines Starkregenereignisses im September 2005. Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.
- UBA 2010: Wasserwirtschaft in Deutschland, Teil 2 Gewässergüte. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt (UBA).
- Uldack, M., Riechel, M., Heinzmann, B., Pawlowsky-Reusing, E., Matzinger, A. 2013: Demonstration of a planning instrument for integrated and impact based CSO control under climate change conditions in Berlin. Report Fp7 project Prepared. PREPARED 2013.015
- VDI 2012: Kumulierter Energieaufwand (KEA) Begriffe, Berechnungsmethoden. Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) VDI 4600.
- Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) 2012. AbwV. Deutschland, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Wicht, H., Beier, M. 1995: N<sub>2</sub>O Emission aus nitrifizierenden und denitrifizierenden Kläranlagen. *KA Korrespondenz Abwasser* 42(3): 404-406.
- Zech, M. 2008: Bewertung der Berliner Großklärwerke im Hinblick auf Einsparungen durch die Umstellung von Simultanfällung zu vermehrter, biologischer Phosphatentfernung. *Ingenieurwissenschaften II - Umweltverfahrenstechnik*. Berlin, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. Diplomarbeit.

### 3. Erfolgskontrollbericht

#### 3.1 den Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, z.B. des Förderprogramms (ggf. unter Angabe des Schwerpunkts),- soweit dies möglich ist-

Das Forschungsvorhaben kann einen Beitrag zu dem BMBF-Forschungsprogramm „Forschung für nachhaltige Entwicklung (FONA)“ und dort im Schwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement“ (NaWaM) leisten.

#### 3.2 das wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Die Ergebnisse sind detailliert im Kapitel 2.1 detailliert vorgestellt. Im Folgenden sind nur die Hauptergebnisse zusammengefasst.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde mit Hilfe des Gewässergütemodells QSim der Effekt von Veränderungen in den Zustandsvariablen (z.B. Nährstoffkonzentrationen, Licht und Temperatur) und Modellparametern (Prozessraten, Konstanten, etc.) auf die Algenbiomasse untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Algenbiomasse in der Berliner Stadtspreewasserstraße derzeit nicht durch Nährstoffe, sondern vorwiegend durch Licht limitiert ist. Dennoch kann Phosphor bei einem entsprechend niedrigen Nährstoff- und Phytoplankton-Grundniveau (entsprechend LAWA Güteklasse 1) zur steuernden Größe werden. Damit bestätigt das Modell die Hypothese, dass auch in urbanen, stark nährstoffbelasteten Gewässern eine Nährstofflimitation erreicht werden kann. Obwohl aus der Arbeit keine konkrete Grenzkonzentration abgeleitet werden kann, bedeutet das Ergebnis für die Praxis, dass bei entsprechenden Gewässern eine bedeutende Nährstoffreduktion notwendig ist, um einen positiven Effekt auf die Gewässergüte zu erreichen.

Ein Maßnahmenkatalog wurde in Form einer Datenbank (MS Access) erstellt, um eine Übersicht über relevante Informationen zu Wirkung und Kosten der verschiedenen Maßnahmen zu schaffen.

Mit Hilfe der Methodik der Ökobilanz wurden die ökologischen Auswirkungen weitergehender Stickstoffeliminierungsverfahren auf Großkläranlagen in einer ganzheitlichen Betrachtungsweise untersucht und verglichen. Hierbei wurden sowohl die direkten Effekte der verbesserten Ablaufqualität hinsichtlich der N-Fracht als auch die zusätzlichen Aufwendungen durch die vorgelagerten Prozesse resultierend aus dem veränderten Strom- und Chemikalienverbrauch und der benötigten Infrastruktur dargestellt. Hauptergebnisse davon sind:

1. Die **Kaskade** hat einen geringeren Stromverbrauch bei weitergehender N-Reduktion und ist daher aus ökologischen Gesichtspunkten zu empfehlen. Die technische Umstellung im laufenden Betrieb ist jedoch tendenziell sehr aufwendig und muss vorher überprüft werden.

2. **OptiDN** als Umbaumaßnahme in der Belebung und **PWB Anammox** als Prozesswasserbehandlung haben einen geringen zusätzlichen Energieaufwand und vergleichbares N-Reduktionspotential. Die Anwendbarkeit von **optiDN** auf andere Kläranlagen ist jedoch nicht immer gegeben.
3. Der **Biofilter (Teilstrom)** hat den höchsten Energieverbrauch und assoziierte Treibhausgasemissionen durch hohen Stromverbrauch und die Dosierung einer externen Kohlenstoffquelle, besitzt aber positive Nebeneffekte auf die Ablaufqualität wie vermehrte Entfernung von P und Schwermetallen.
4. **ErwBB+optiDN** sowie **PWB Nitri/Deni** haben hohen Energieverbrauch/THG-Emissionen, aber keine signifikant höhere N-Reduktion gegenüber anderen Szenarien und können daher aus ökologischen Gesichtspunkten nicht empfohlen werden.
5. **N<sub>2</sub>O-Emissionen** in der biologischen N-Entfernung spielen eine signifikante Rolle für das THP einer Kläranlage, die Emissionsfaktoren für die biologische N-Entfernung (Nitrifikation/Denitrifikation und Deammonifikation) sind noch nicht gesichert.

### **3.3 die Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des ZE brauchen nicht offenbart zu werden)**

#### **3.3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u. a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten**

Es wurde keine Erfindung / kein Schutzrecht im Rahmen dieses Projektes angemeldet oder erteilt.

#### **3.3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt)**

Der wirtschaftliche Erfolg dieses Projektes besteht in der Erarbeitung ökonomisch vertretbarer und kosteneffizienter Maßnahmen für die Erreichung bestimmter Ziele bei der Bewirtschaftung der Gewässer. Damit profitiert die breite Öffentlichkeit von den Projektergebnissen, da öffentliche Gelder damit zielgerichteter eingesetzt werden können.

Der wirtschaftliche Erfolg für das KWB besteht in Schaffung von Know-how zur Kompetenzerhaltung- und –erweiterung, in der Sichtbarkeit als Forschungsinstitution, in der Vernetzung mit neuen Forschungsgruppen und der Initiierung neuer Forschungsvorhaben.

**3.3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen**

Die Arbeiten zur Sensitivitätsanalyse mit Hilfe des Gewässergütemodells QSim (Modul 3) können erfolgreich zur Schaffung von Know-how zur Kompetenzerhaltung und zur Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit beitragen. Das erarbeitete Wissen zur Sensitivität der Prozesse in den Gewässern steht nun dem KWB, BFG und weiteren Interessierten zur Verfügung und kann für zukünftige Projekte / Fragestellungen genutzt werden. *Zeithorizont 5 Jahre.*

Der Maßnahmenkatalog zu Wirkung und Kosten von Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffeinträge ist in Form einer Datenbank und / oder des separaten Diskussionspapiers 2 (urbane Maßnahmen) veröffentlicht. Der Katalog vereinfacht den Zugang zu Informationen für die Bewirtschaftung der Gewässer und kann nach Projektende weiterhin von Entscheidungsträgern der öffentlichen Hand für die Maßnahmenplanung in weiteren Einzugsgebieten genutzt werden. Seine beispielhafte Implementierung im Nährstoffmodell MONERIS ermöglicht eine verbesserte Zusammenarbeit und Kommunikation bei der Maßnahmenplanung zwischen Forschern und Anwendern, die sich mit Maßnahmen im landwirtschaftlichen oder urbanen Bereich beschäftigen, so. u.a. die öffentlichen Verwaltungen, aber auch die Betreiber von Kanalnetzen und Kläranlagen. *Zeithorizont 5 Jahre.*

Auch die Methode der Ökobilanz (LCA), die am KWB angewendet wird, bringt weitere nicht-monetäre Auswirkungen für die Bewertung von Maßnahmen in die Diskussion und kann in Zukunft von Entscheidungsträgern auf weitere Anwendungsgebiete übertragen werden. Damit sind auch hier die Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit, der vereinfachte Zugang zu Informationen und der Nutzer für öffentliche Aufgaben gewährleistet. *Zeithorizont 3 Jahre.*

Durch die enge Vernetzung zwischen Forschern und assoziierten Partner (öffentliche Verwaltung, Betreiber von Kanalnetz und Kläranlagen) leistet das Projekt einen großen Beitrag zur verbesserten Zusammenarbeit mit Forschungsstellen und Transferstellen. *Zeithorizont 3 Jahre.*

### **3.3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse**

Im Anschluss an diesem Projekt wurde einen Antrag beim BMBF für eine zweite Projektphase gestellt. Diese Phase ist noch notwendig, bevor eine Demonstration möglich ist. Eine Demonstration wurde im Rahmen der ReWaM Ausschreibung dem BMBF angeboten.

### **3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Die Arbeiten haben alle zu einer Lösung geführt.

Ein Ziel im Modul 3 musste in Absprache mit der BfG und der Projektleitung ein wenig geändert werden: Die geplante Sensitivitätsanalyse mit dem Gewässergütemodell QSim, um der Effekt von Veränderungen in den Randbedingungen (z.B. Nährstoffkonzentrationen, Licht und Temperatur) und Modellparametern (Prozessraten, Konstanten, etc.) auf das Algenwachstum zu untersuchen wurde beispielhaft für ein bereits bestehendes Modell der Berliner Stadtspreet durchgeföhrt. Geplant war es, die Sensitivitätsanalyse an einem Modell der unteren Havel durchzuführen. Da dieses Modell sich noch in der Entwicklung befindet, wäre die Sensitivitätsanalyse nicht mehr im Projektzeitraum möglich gewesen.

### **3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z. B.**

**Anwenderkonferenzen (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt)**

Die Ergebnisse wurden bereits auf Konferenzen vorgestellt, insbesondere auf der NITROLIMIT Special Session der DGL Tagung 2013 in Potsdam. Es ist jetzt geplant, im Rahmen des World Water Congress & Exhibition (WWC) in Lissabon, die Ergebnisse der LCA mit einem Poster zu präsentieren.

### **3.6 die Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung.**

Der Kostenplan wurde eingehalten, siehe Kapitel 2.2.

Der Zeitplan wurde um vier Monate verlängert, um den Austausch mit den weiteren Partner aufrechtzuhalten und die Integration der Ergebnisse zu ermöglichen.