

3.6 Ökobilanz von ausgesuchten Maßnahmen im urbanen Bereich

Daniel Mutz und Christian Remy (KWB)

Hintergrund und Ziel

Die Umsetzung von Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge verursacht neben den ökologischen Vorteilen im Gewässer (Vermeidung der Eutrophierung) auch negative Umweltwirkungen, die beim Bau und Betrieb der Anlagen entstehen. Dazu zählen u.a. der Verbrauch fossiler Energieträger und damit verbundene Treibhausgasemissionen, aber auch andere Emissionen die bei der Produktion von Baumaterialien oder Betriebsmitteln entstehen. Diese Umweltwirkungen entstehen im Lebenszyklus der Anlagen und umfassen auch die Entsorgung anfallender Abfälle. Da gerade im urbanen Bereich die Maßnahmen zur Nährstoffreduktion oft einen hohen Aufwand bei Bau und Betrieb erfordern, sind dort die Erfassung dieser Umweltwirkungen und ein Vergleich unterschiedlicher Maßnahmenstrategien sinnvoll. Damit können effiziente Maßnahmen mit einem guten Aufwand/Nutzen-Verhältnis identifiziert werden und ggf. unverhältnismäßig hohe Aufwendungen vermieden werden.

Eine geeignete Methode zur Erfassung aller direkten und indirekten Umweltwirkungen im Lebenszyklus ist die Ökobilanz (ISO 14040 2006, ISO 14044 2006). In NITROLIMIT I wurden bereits die Maßnahmen zur weitergehenden Stickstoffreduktion auf Großkläranlagen über eine Ökobilanz analysiert und bewertet (siehe Abschlussbericht NITROLIMIT I, Kap. 4.1.3). Neben den Kläranlagen entstehen im urbanen Bereich auch Nährstoffemissionen aus dem Kanalnetz in die Gewässer. Dabei unterscheidet man zwei unterschiedliche Kanalsysteme:

- Im **Trennsystem** wird häusliches Abwasser und Regenwasser in getrennten Kanälen erfasst und abgeleitet. Während Abwasser zur Kläranlage läuft, wird das Regenwasser direkt in die Gewässer eingeleitet. Es enthält Verunreinigungen und Nährstoffe, die von der Oberfläche abgeschwemmt werden (besonders von Verkehrsflächen). Diese Nährstoffeinträge über Regenwasser können z.B. durch Reinigungsmaßnahmen am Auslass gemindert werden.
- Im **Mischsystem** wird häusliches Abwasser und Regenwasser in einem Kanal erfasst und zur Kläranlage geleitet. Bei Starkregen wird diese Kanalisation teilweise hydraulisch überlastet, so dass es zum Überlauf von ungeklärtem Mischwasser (Abwasser gemischt mit Regenwasser) in die Gewässer kommt. Das Mischwasser enthält Verunreinigungen und Nährstoffe aus dem ungeklärten Abwasser und dem Regenwasser. Zur Vermeidung dieser Mischwasserüberläufe kann das Stauraumvolumen im Kanalnetz erweitert werden, damit mehr Mischwasser gespeichert werden kann und nach dem Regen nach und nach zur Kläranlage gelangt. Dabei kann entweder neues Stauraumvolumen geschaffen werden, oder vorhandene Infrastruktur wird so genutzt, dass Stauraum aktiviert wird (z.B. Einbau eines senkbaren Wehres in ein Kanalrohr, dass bei Starkregen den Kanal einstaut).

Für Misch- und Trennsystem stehen unterschiedliche Maßnahmen zur Verfügung, um negative Einflüsse auf die Gewässer zu vermindern. Zu beachten ist, dass Maßnahmen im Kanalnetz nicht nur zur Vermeidung von Nährstoffeinträgen dienen, sondern vor allem andere Verschmutzungen wie Fäkalkeime und organische Stoffe reduzieren und auch den hydraulischen Stress für die Gewässer begrenzen. In NITROLIMIT II steht jedoch die Nährstoffreduktion im Vordergrund, so dass die Maßnahmen hier nur hinsichtlich ihres Potenzials zur Reduktion von Stickstoff- und Phosphoreinträgen bewertet werden.

Ziel der Arbeiten in NITROLIMIT II ist die Erfassung der Umweltauswirkungen von verschiedenen Maßnahmen zur Reduktion der Einträge aus dem Kanalnetz in die Gewässer. Dabei werden sowohl Maßnahmen fürs Trennsystem als auch fürs Mischsystem betrachtet und in ihrer Effizienz (Aufwand zu Nutzen) verglichen. Die Eingangsdaten stammen dabei von Fallbeispielen aus Berlin und der Literatur. Abschließend werden verschiedene mögliche Maßnahmenpakete für Kanalnetz und Kläranlagen in Berlin definiert und in Umfang und Effizienz der Nährstoffreduktion verglichen.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Ökobilanz einzelner Fallbeispiele für Maßnahmen im Kanalnetz auf Basis von Daten der Berliner Wasserbetriebe (BWB), ergänzt mit Literaturangaben
- Vergleich der Maßnahmen im Kanalnetz und auf Kläranlagen (NITROLIMIT I) in ihrer Effizienz zur Nährstoffreduktion (Verhältnis Aufwand zu Nutzen)
- Definition und Vergleich unterschiedlicher Maßnahmenpakete für Berlin zur Reduktion der Nährstoffeinträge aus dem urbanen Raum in Aufwand und Nutzen

Material und Methoden

Auswahl der Maßnahmen und Datenerhebung

Zu Beginn wurde zusammen mit den BWB eine Liste von möglichen Maßnahmen im Trenn- und Mischsystem von Berlin zusammengestellt und entsprechende Fallbeispiele dazu in Berlin identifiziert. Daraus wurden drei Maßnahmentypen für das Trennsystem (Retentionsbodenfilter, Regenklärbecken, und Lamellenabscheider als Nachrüstung oder Neubau) und drei Maßnahmentypen für das Mischsystem (Regenüberlaufbecken, Stauraumkanal, und Stauraumaktivierung über Überlaufkanäle, Drosseln/Wehre sowie Anhebung von Überlaufschwellen) für die weitere Analyse ausgewählt (Abb. 3.22). Daten zu Bau und Betrieb der verschiedenen Beispielanlagen wurden von BWB aus vorhandenen Bauakten und Berichten zur Verfügung gestellt. Einige Maßnahmentypen wurden auch aus Basis von Literaturwerten (ATV A166, A128) und Herstellerangaben (z.B. Lamellenabscheider Neubau) dimensioniert und bilanziert. Alle Eingangsdaten der Ökobilanz sind im Rahmen einer gesonderten Arbeit erhoben worden und im Detail dokumentiert (Ehrenreich 2015).

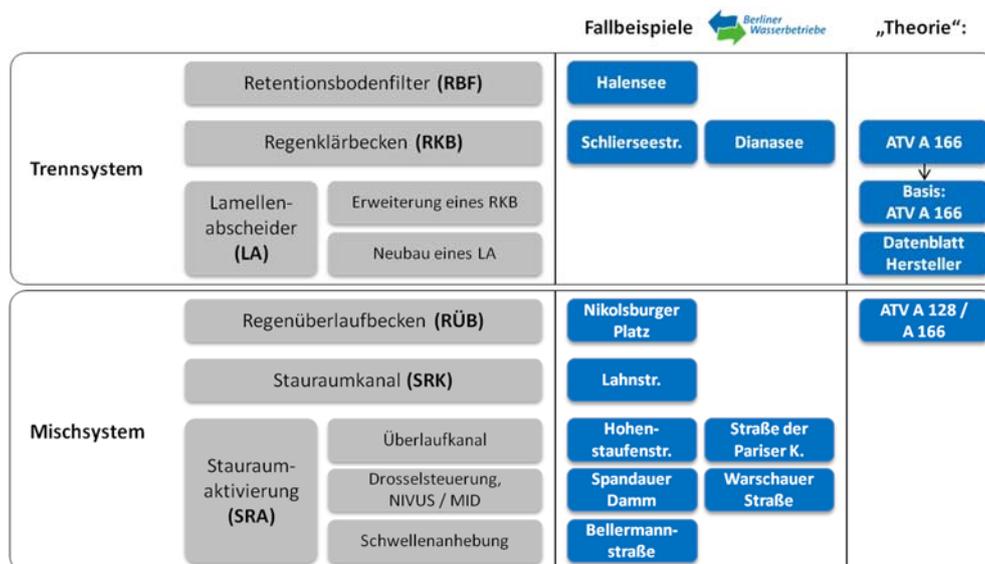


Abbildung 3.22. Übersicht der betrachteten Maßnahmentypen im Kanalnetz und den zugehörigen Datenquellen

Für die Berechnung der zurückgehaltenen Nährstofffrachten je Maßnahme wurde die durchschnittliche Menge und Qualität des Berliner Regenwassers und Mischwasserüberlaufs angenommen (Tab. 3.18). Daraus berechnet sich über die Reinigungseffizienz der Maßnahmen im Trennsystem bzw. über das geschaffene Stauraumvolumen im Mischsystem die zurückgehaltene Nährstofffracht pro Maßnahme.

Tabelle 3.18. Anfallende Wassermenge und -güte im Trenn- und Mischsystem

		<i>Regenwasser im Trennsystem</i>	<i>Mischwasserrückhalt im Mischsystem</i>
Volumen		4100 m ³ /(ha A _{red} *a)	18,6 m ³ /m ³ Stauraum*
Abfiltrierbare Stoffe	[mg/L]	160	97
Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg/L]	100	169
Gesamtstickstoff	[mg/L]	5	13,7
Gesamtphosphor	[mg/L]	0,6	1,74

Quelle: BWB

* durchschnittlich zurückgehaltenes Mischwasserüberlaufvolumen pro m³ zusätzlichem Stauraum, Modellberechnung im Projekt MIA-CSO (103.000 m³ zusätzlicher Stauraum im Zeitraum 2010-2020 führen zu 1,93 Mio m³/a Mischwasserrückhalt)

Definitionen in der Ökobilanz

Methodisch betrachtet diese Ökobilanz die einzelnen Maßnahmen sowie ihre relevanten vor- und nachgelagerten Prozesse. Die Systemgrenze der Betrachtung umfasst neben dem zu- und abfließenden Regen- oder Mischwasser für das Mischsystem auch die Auswirkungen auf Pumpwerk und Klärwerk: vermiedene Mischwasserüberläufe werden jetzt zum Klärwerk gepumpt und dort behandelt und eingeleitet (Abb. 3.23). Diese Prozesse werden über ein vereinfachtes Modell der Aufwendungen im Pumpwerk (Stromverbrauch) und auf dem Klärwerk (Stromverbrauch, direkte Emissionen ins Gewässer und die Atmosphäre) abgebildet (Ehrenreich 2015). Nicht in der Bilanz enthalten sind Änderungen in Bau und Betrieb des Kanalnetzes sowie auf der Kläranlage. Für Misch- und Trennsystem sind auch die Aufwendungen für die Entsorgung anfallender Schlämme vereinfacht abgebildet. Für alle Prozesse innerhalb der Systemgrenzen wird der Bedarf an Strom, Betriebsmitteln und Baumaterial für Infrastruktur abgebildet. Die Datensätze dafür stammen aus einer entsprechenden Ökobilanz-Datenbank (Ecoinvent 2010). Die Aufwendungen für Infrastruktur werden für alle Maßnahmen über eine Lebensdauer von 60 Jahren für Baumaterial und 10 Jahren für Anlagentechnik auf jährliche Wirkungen umgerechnet.

Als Bezugsgröße für den direkten Vergleich von Maßnahmen im Trenn- und Mischsystem wird die funktionelle Einheit „pro Hektar angeschlossene befestigte Fläche und Jahr“ oder [ha_{A,red}*a]⁻¹ gewählt. Dabei wird für die Maßnahmen im Trennsystem jeweils die befestigte Fläche berücksichtigt, die an diese Maßnahme im Berliner Kanalsystem angeschlossen ist. Bei der Bewertung von Maßnahmen im Mischsystem wurde für jeden Maßnahmentyp ein neuer „virtueller“ Flächenbezug berechnet, da die konkrete Dimensionierung der einzelnen Fallbeispiele stark vom Vorzustand des jeweiligen Abschnitts im Mischsystem abhängt (d.h. vom bereits vorhandenen Stauraumvolumen in einem Gebiet) und damit der bestehende Flächenbezug nicht direkt vergleichbar ist. Für einen einheitlichen Vergleich

werden sogenannte „virtuellen“ Flächenbezüge für Maßnahmen im Mischsystem berechnet, so dass sie alle auf den momentanen Zielzustand des Berliner Mischsystems von 48 m³ Stauraum pro ha A_{red} bezogen werden. Eine Maßnahme, die 600 m³ neuen Stauraum schafft, erhält so rechnerisch eine virtuelle Fläche von 12,5 ha A_{red} zugeordnet. Damit ist ein schlüssiger Vergleich von verschiedenen Maßnahmen im Mischsystem untereinander und mit den Maßnahmen des Trennsystems möglich.

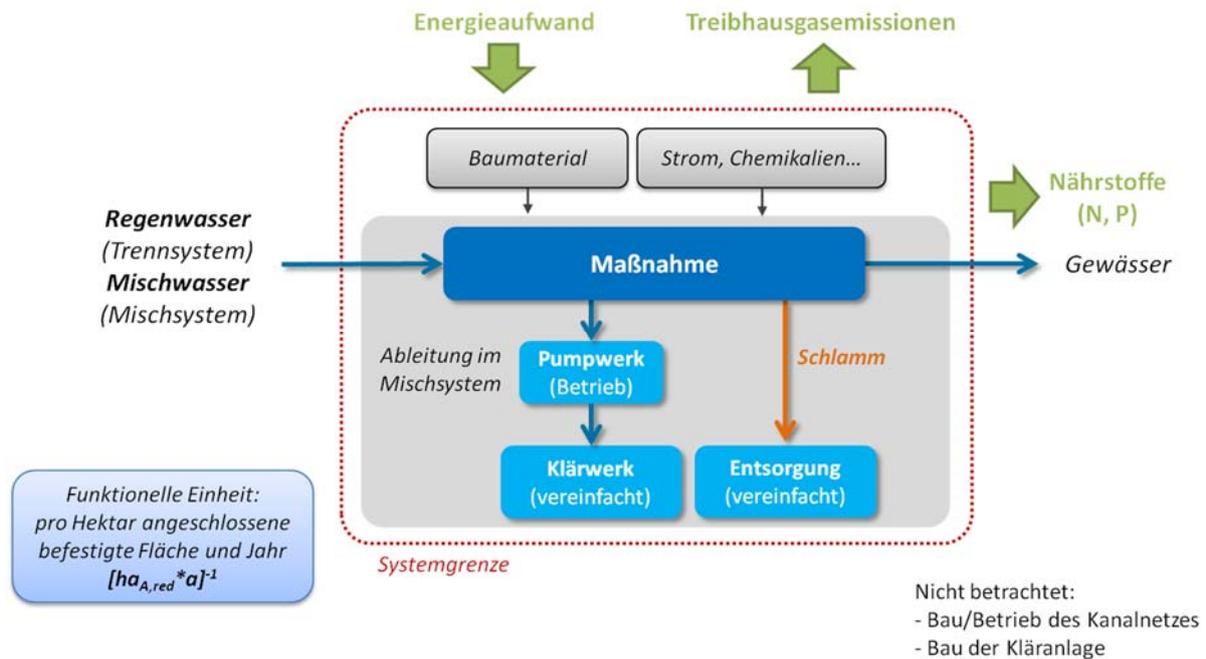


Abbildung 3.23. Systemgrenzen für die Ökobilanz von ausgewählten Maßnahmen im Kanalnetz

Die Bewertung der einzelnen Maßnahmen erfolgt über zwei ausgewählte Indikatoren für den Aufwand von Bau und Betrieb sowie über zwei Indikatoren für den Nutzen auf die Gewässerqualität. Als Maß für den Energieverbrauch wird der kumulierte Energieaufwand fossiler Ressourcen (KEA fossil) nach VDI 4600 berechnet (VDI 2012). Negative Umweltwirkungen von Energie- und Materialverbrauch und -transport werden zudem über den damit verbundenen Ausstoß von Treibhausgasen bewertet, in dem das Treibhauspotenzial über 100 Jahre (IPCC 2007) ermittelt wird. Der Nutzen für die Gewässer wird für jeden Maßnahmentyp direkt über die reduzierte Nährstofffracht (kg P oder N pro ha A_{red} und Jahr) abgebildet. Wenn Aufwand und Nutzen ins Verhältnis gesetzt werden, kann so direkt die Effizienz der Maßnahme berechnet werden (z.B. kg CO₂-eq pro kg N_{reduziert}). Dann lassen sich Maßnahmen im Kanalnetz auch mit bereits untersuchten Maßnahmen auf der Kläranlage (NITROLIMIT I) vergleichen, für die die gleichen Kennzahlen zur Effizienz berechnet wurden.

Definition und Berechnung der Maßnahmenpakete

Zur Extrapolation der einzelnen Maßnahmen auf den Planungsraum Berlin wurden verschiedene Maßnahmenpakete für Kanalnetz und Kläranlage vorgeschlagen, um beispielhaft mögliche Strategien zur Reduktion der Nährstoffeinträge aus urbanen Räumen zu vergleichen (Tab. 3.19). Dabei wurden sowohl bestehende Planungen in Berlin als auch mögliche Szenarien für bestimmte Teilräume definiert und miteinander verglichen. Es gilt zu beachten, dass die Bewertung der verschiedenen Maßnahmenpakete hier nur beispielhaft erfolgt und für eine umfassende Beurteilung der Strategien präzisere Informationen notwendig sind. Zudem führen Maßnahmen im Kanalnetz neben der Nährstoffreduktion noch zu vielen weiteren positiven Effekten im Gewässer, die nicht Gegenstand dieser Untersuchungen waren.

Tabelle 3.19. Mögliche Maßnahmenpakete für die Reduktion von Nährstoffemissionen in die Gewässer für Berlin

Maßnahmenpaket	Beschreibung	Annahmen	Datenquellen
Kläranlagen			
Flock-filter RUH/MÜN	Flockungsfilter in Klärwerken Ruhleben und Münchehofe	Senkung von Gesamt-P im Ablauf auf 0,06 mg/L*	Remy 2013
Biofilter WASS	Biofilter im Klärwerk Waßmannsdorf	Senkung von Gesamt-N im Ablauf auf 9,5 mg/L*	NITROLIMIT I (Mutz 2014)
Prozesswasser alle KW	Prozesswasserbehandlung auf allen Klärwerken mit Faulung	Senkung von Gesamt-N im Ablauf auf 9 mg/L* (7 mg/L für KW SCHÖ)	NITROLIMIT I (Mutz 2014)
Mischsystem			
CSO 2020	Geplantes Sanierungsprogramm der BWB 2010-2020	19550 m ³ über Überlaufkanal oder Drosseln, 36250 m ³ über Schwellen-anhebung, 33200 m ³ über Neubau	BWB
KURAS 50 %	Potenziale aus KURAS-Projekt (50 % angerechnet)	7 m ³ pro ha A _{red} zusätzlicher Stauraum aktivierbar über Drosseln	Matzinger 2016
KURAS 100 %	Potenziale aus KURAS-Projekt (100 % angerechnet)	14 m ³ pro ha A _{red} zusätzlicher Stauraum aktivierbar über Drosseln	Matzinger 2016
Trennsystem			
RBF 5 %	Anschluss von 5 % des Trennsystems an RBF	5 % des Trennsystems (462 ha A _{red}) werden an Bodenfilter angeschlossen	Schätzung KWB
RBF 10 %	Anschluss von 10 % des Trennsystems an RBF	10 % des Trennsystems (925 ha A _{red}) werden an Bodenfilter angeschlossen	Schätzung KWB

* im Jahresmittel, Berechnung der Jahresfracht aus Jahresmittel x Jahresvolumen

Die Berechnung von Aufwand und Nutzen der einzelnen Maßnahmenpakete wurde über eine einfache lineare Extrapolation realisiert. Dabei werden naturgemäß die jeweiligen Besonderheiten (z.B. örtliche Bedingungen beim Bau) und auch die zeitliche Dynamik des Abwassersystems und Kanalnetzbetriebs nicht näher berücksichtigt, so dass die berechneten Werte nur als erste Schätzung zu betrachten sind. Dennoch ergeben sich bestimmte Größenordnungen für Leistung und Effizienz einzelner Pakete, die Informationen für die weitere strategische Planung in Berlin liefern können.

Ergebnisse und Diskussion

Einzelbewertung der Maßnahmen

Energieaufwand und Treibhauspotenzial der Maßnahmen im Trennsystem sind in Abbildung 3.24 dargestellt. Die Aufwendungen für Infrastruktur verursachen den größten Beitrag zu beiden Effekten, nur der Neubau von Lamellenabscheidern hat mehr betrieblichen Aufwand durch die Behandlung des abgeschiedenen Schlamms in der Kläranlage. Insgesamt schneiden der Retentionsbodenfilter und der Lamellenabscheider am besten ab, Regenklärbecken sind deutlich aufwendiger.



Abbildung 3.24. Kumulierter Energieaufwand (links) und Treibhauspotenzial (rechts) für Maßnahmen im Trennsystem

Für das Mischsystem gibt es deutliche Unterschiede zwischen Speicherneubau und Speicheraktivierung (Abb. 3.25). Während der Speicherneubau (RÜB, SRK) flächenbezogen im Bereich der Maßnahmen im Trennsystem liegt, kann bei Nutzung der vorhandenen Infrastruktur eine Aktivierung von Stauraum (SRA) mit relativ geringem Aufwand realisiert werden. Dabei ist die Nutzung von vorhandenen Überlaufkanälen (ÜK) und Drosseln sehr günstig. Nur die Schwellenanhebung im Mischkanal ist in dieser Studie baulich ähnlich aufwendig wie der Neubau von Speichervolumen.



Abbildung 3.25. Kumulierter Energieaufwand (links) und Treibhauspotenzial (rechts) für Maßnahmen im Mischsystem

Der direkte Vergleich des Aufwands von Maßnahmen im Misch- und Trennsystem zeigt, dass im Mischsystem bei Aktivierung von vorhandenem Stauraum ein geringerer Aufwand pro angeschlossene Fläche anfällt als im Trennsystem. Wenn Stauraum im Mischsystem neu gebaut wird, liegt der Aufwand vergleichbar zum Trennsystem.

Effizienzvergleich über Aufwand pro entfernte Nährstofffracht

Für den Effizienzvergleich der verschiedenen Maßnahmentypen bezüglich der Reduktion von Nährstoffeinträgen wird der jeweilige Aufwand (hier beispielhaft über CO₂-Äquivalente dargestellt) auf die spezifische zurückgehaltene Nährstofffracht bezogen. Dieser Rückhalt wird fürs Trennsystem über Wirkungsgrade der Reinigung ermittelt, während beim Mischsystem die vermiedene Menge an Mischwasserüberlauf (18,6 m³ Mischwasser pro m³ Stauraum und Jahr, siehe Tab. 3.18) und die durchschnittliche Konzentration der Nährstoffe im Mischwasser zugrundegelegt wird. Für die Effizienz

der Maßnahmen auf Kläranlagen wird auf Ergebnisse vorangegangener Projekte zurückgegriffen (Flockungsfilter zur P-Reduktion (Remy 2013) bzw. Biofilter oder Umbau auf Kaskaden-Denitrifikation (Mutz 2013 aus NITROLIMIT I)).

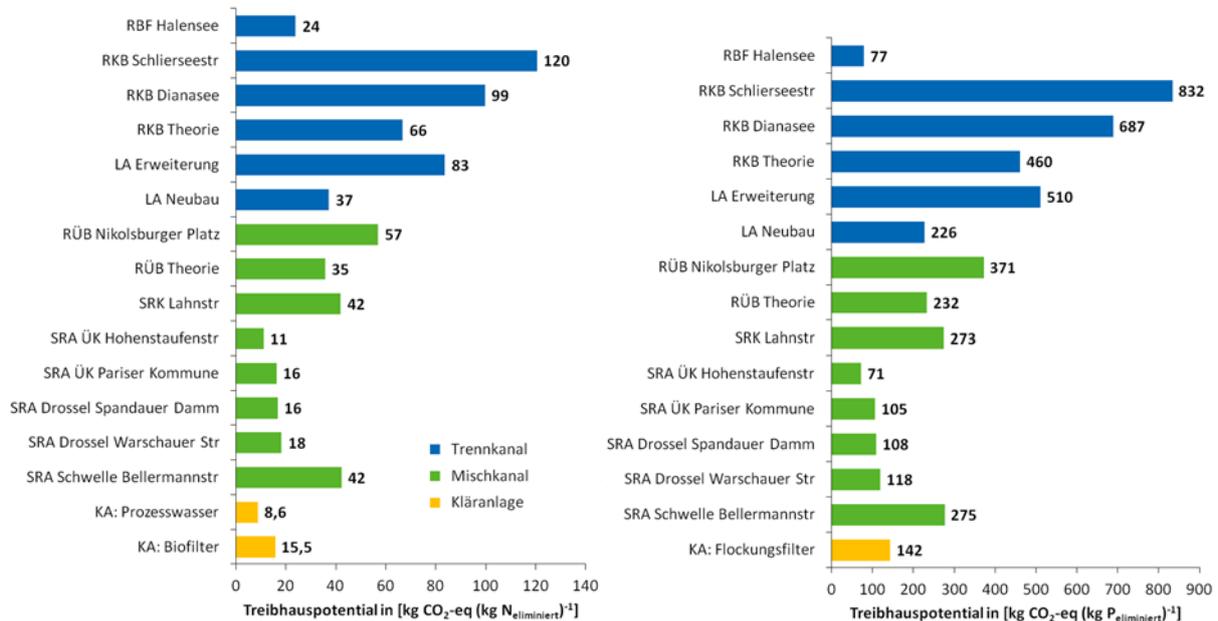


Abbildung 3.26. Vergleich der Maßnahmentypen über die Aufwendungen (hier: CO₂-eq) pro entfernter Nährstofffracht (links: pro kg N, rechts: pro kg P)

Der direkte Effizienzvergleich der Maßnahmen im Kanalnetz zeigt, dass besonders der Bau von Regenklärbecken im Trennsystem wenig effizient für die Nährstoffreduktion ist (Abb. 3.26). Der Bodenfilter ist hier viel effizienter, da er bei geringerem Aufwand eine höhere Reduktionsleistung bietet. Im Mischsystem ist die Nutzung vorhandener Potenziale durch Aktivierung von Stauraum relativ effizient und liegt für beide Nährstoffe im Bereich der Maßnahmen auf Kläranlagen sowie des Bodenfilters im Trennsystem. Der Neubau von Stauraum im Mischsystem ist dagegen weniger effizient, da bei gleicher Wirkung erheblich mehr Aufwand entsteht.

Wichtig beim direkten Vergleich der Maßnahmen auf Kläranlagen und im Kanalnetz ist der Hinweis, dass Maßnahmen im Kanalnetz neben der Nährstoffreduktion weitere Ziele verfolgen (u.a. Reduktion der hydraulischen Belastung, des Eintrags von Feststoffen oder Vermeidung akuter Wirkungen wie Sauerstoffmangel im Gewässer). Diese zusätzlichen Effekte sind bei Maßnahmen auf Kläranlagen nicht gegeben und werden in der gezeigten Effizienzbetrachtung nicht weiter berücksichtigt.

Vergleich von Maßnahmenpaketen für Berlin

Der Vergleich verschiedener möglicher Maßnahmenpakete für den Großraum Berlin macht deutlich, dass die Maßnahmen auf Kläranlagen bei der Reduktion der Gesamtfracht deutlich höher liegen als die Maßnahmen im Kanalnetz (Abb. 3.27). Während die Umrüstung von Kläranlagen die Einträge von über 30 Tonnen Phosphor pro Jahr bzw. 350-670 Tonnen Stickstoff pro Jahr vermeiden kann, liegen die Maßnahmen im Kanalnetz eher im Bereich von wenigen Tonnen Phosphor bzw. 4-23 Tonnen Stickstoff pro Jahr. Durch den großen Anteil der Kläranlagen an den Gesamteinträgen aus Berlin werden hier die größten Potenziale zur Nährstoffreduktion gesehen. Es liegt daran, dass die Maßnahmen im Kanalnetz nur bei Regen (Trennsystem) bzw. Starkregen (Überlauf im Mischsystem) wirksam sind, während die Kläranlagen dauerhaft Nährstoffe emittieren. Obwohl die Maßnahmen im Kanalnetz im direkten Effizienzvergleich der Pakete (Abb. 3.28) im Bereich der Kläranlagen liegen, ist eine deutliche

Reduktion der Nährstoffeinträge aus urbanen Gebieten vor allem über die Aufrüstung der Kläranlagen zu erreichen.

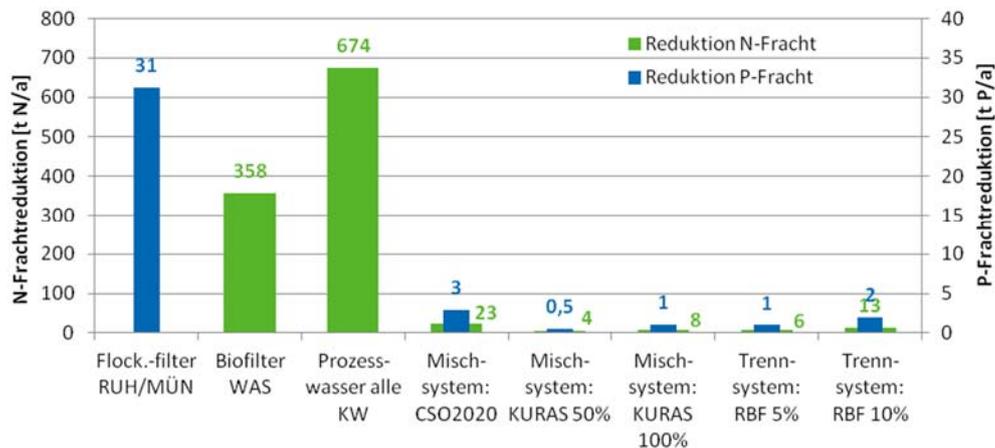


Abbildung 3.27. Potenzial zur Reduktion der Nährstoffeinträge in Berlin durch verschiedene Maßnahmenpakete (jährliche Frachtreduktion)

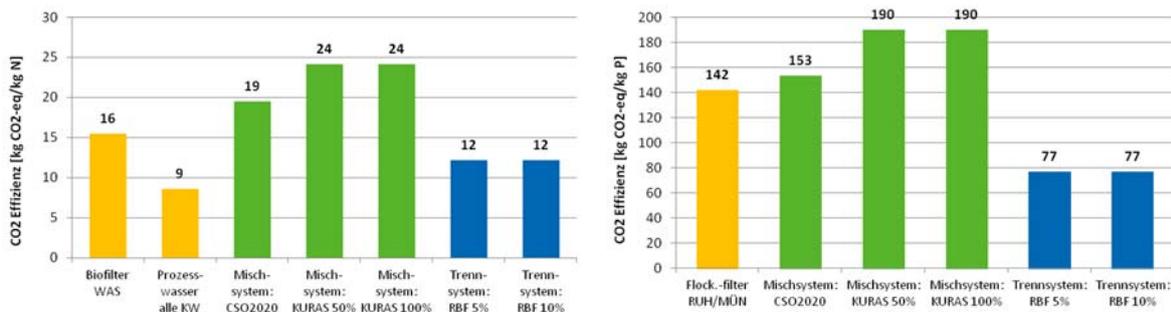


Abbildung 3.28. Effizienzvergleich verschiedener Maßnahmenpakete hinsichtlich Reduktion von Stickstoff (links) und Phosphor (rechts)

Zusammenfassung

Auf Basis von Berliner Fallbeispielen wurde Aufwand und Nutzen von verschiedenen Maßnahmentypen im Kanalnetz und auf Kläranlagen über eine Ökobilanz berechnet. Es zeigt sich, dass effektive Maßnahmen im Trennsystem (z.B. Bodenfilter) und Mischsystem (z.B. Stauraumaktivierung) eine Reduktion von Nährstoffeinträgen mit ähnlicher Effizienz erreichen können wie eine Aufrüstung der Kläranlagen. Betrachtet man das vorhandene Gesamtpotenzial von möglichen Maßnahmenpaketen zur Reduktion der Nährstofffrachten in die Gewässer Berlins, liegen die Kläranlagen deutlich vor den Maßnahmen im Kanalnetz. Dennoch ist der weitere Ausbau von Maßnahmen im Kanalnetz sinnvoll, da neben der Nährstoffreduktion weitere positive Effekte für die Gewässer wie Reduktion der hydraulischen Belastung und der akuten Wirkung von Verschmutzungen zu erzielen sind, die nicht Gegenstand dieser Untersuchung waren.

Literatur

Ecoinvent (2010): Ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-26, Swiss Center for Life Cycle Inventories, www.ecoinvent.org [online]. Dübendorf, Schweiz.
 Ehrenreich, D. (2015): Ökobilanz zu Maßnahmen der Nährstoffreduktion im Kanalnetz. NITROLIMIT II. Master-Thesis, Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft, TU Dresden.

- IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Genf, Schweiz.
- ISO 14040 (2006): Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework. Geneva, Switzerland: International Standardisation Organisation.
- ISO 14044 (2006): Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: International Standardisation Organisation.
- Matzinger, A. et al (2016): Abschlussbericht des BMBF-Projekts KURAS, www.kuras-projekt.de, noch unveröffentlicht.
- Mutz, D. (2013): Vergleichende Ökobilanz zu weitergehenden Stickstoffeliminierungsverfahren in Großkläranlagen. NITROLIMIT I. Master-Thesis, Institut für Technischen Umweltschutz, TU Berlin.
- Remy, C. (2013): Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of tertiary treatment schemes. Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH, Berlin. Online verfügbar auf: www.kompetenz-wasser.de/Abschlussberichte-des-Projektes-OXE.572.0.html (letzter Zugriff: 02/12/2015).
- VDI (2012): VDI-Richtlinie 4600: Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Berechnungsmethoden. Beuth-Verlag, Berlin.