NITROLIMIT

Stickstofflimitation in Binnengewässern

Ist Stickstoffreduktion ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar?

Diskussionspapier

Band 2, September 2013

Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge urbaner Bereiche

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

FONA Nachhaltiges Wassermanagement BMBF

Impressum

Herausgeber:
Projekt NITROLIMIT
c/o Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl Gewässerschutz
Forschungsstelle Bad Saarow
Seestraße 45
15526 Bad Saarow

Redaktion:
Claudia Wiedner, Jeanette Schlief

Autoren:
Daniel Mutz, Andreas Matzinger, Christian Remy

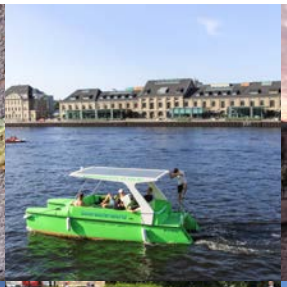
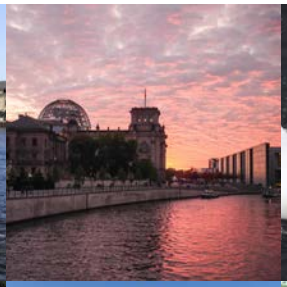
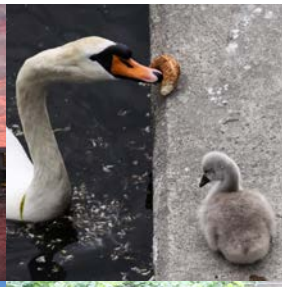
Unter Mitarbeit von:
Mathias Uldack, Pascale Rouault, Erika Pawlowsky-Reusing, Regina Gnirß, Katrin Lemm, Agnes Kummelt, Corinna Bartholomäus, Katharina Draht, Steffen Keller

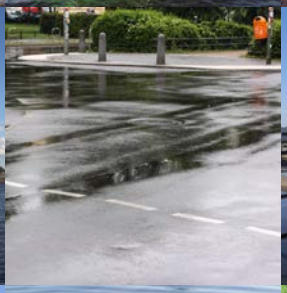
Illustration: Daniel Mutz

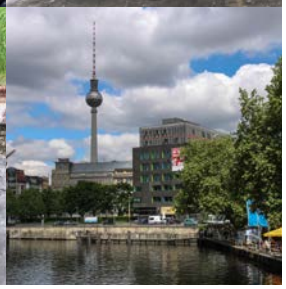
Fotos:
Claudia Wiedner, Andreas Matzinger, Daniel Mutz, Pascale Rouault

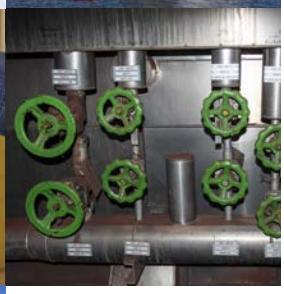
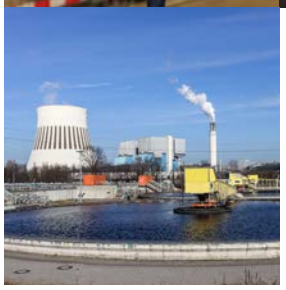
Kontakt: info@nitrolimit.de

Weitere Informationen unter:
www.nitrolimit.de





Nitrolimit

Stickstofflimitation in Binnengewässern – Ist Stickstoffreduktion ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar?

Projektförderung:

NITROLIMIT wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Forschungsprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklungen“ (FONA) im Schwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement“ (NaWaM) gefördert.

Förderkennzeichen:	033L041 A-G
Laufzeit Phase I:	01.09.2010 bis 31.12.2013
Projektbegleitung:	Projektträgerschaft Ressourcen und Nachhaltigkeit / Projektträger Jülich

Projektpartner:

Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH

Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei

Technische Universität Dresden

Technische Universität Berlin

NITROLIMIT wird von weiteren Partnern unterstützt:

- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (SenStadtUm) Berlin
- Berliner Wasserbetriebe (BWB)
- Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (LUGV)
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (MLUV)
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR)

NITROLIMIT wird beraten von einem wissenschaftlichen Beirat, der sich zu gleichen Teilen aus Wissenschaftlern und Interessenvertretern aus dem Bereich der Gewässerbewirtschaftung zusammensetzt.

Über NITROLIMIT

Der Großteil der deutschen Binnengewässer wird bis 2015 nicht den guten ökologischen Zustand erreichen, der von der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) gefordert wird. Bisher ging man davon aus, dass die Gewässergüte in erster Linie durch Phosphor bestimmt wird. In jüngster Zeit mehrten sich aber Hinweise, dass in vielen Gewässern auch Stickstoff eine entscheidende Steuergröße darstellt. Daher wird die Reduzierung von Stickstoffeinträgen gefordert. Die Kosten für Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffeinträge aus punktuellen (beispielsweise Kläranlagen) und diffusen Quellen (beispielsweise aus der Landwirtschaft) sind um ein Vielfaches höher als Maßnahmen zur Reduktion von Phosphoreinträgen. Ob diese Maßnahmen ökologisch wirksam werden, kann aufgrund unzureichender Kenntnisse zur Umsetzung und Wirkung von Stickstoff derzeit nicht eingeschätzt werden.

An diesem Punkt setzt NITROLIMIT an. Das interdisziplinäre Forschungsprojekt will dazu beitragen

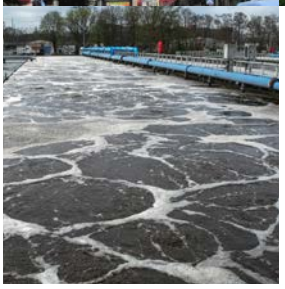
- die ökologische Bedeutung von Stickstoff für die Gewässergüte weiter aufzuklären,
- die Einträge von Stickstoff, seine gewässerinternen Umsetzungen und seine Austräge aus Gewässern ermitteln,
- die zukünftige Entwicklung der Gewässergüte bei verminderten Stickstoffkonzentrationen abzuschätzen und
- einen Katalog von Maßnahmen zur Verringerung der Stickstoffeinträge zu erstellen und die Kosten der individuellen Maßnahmen zu analysieren.

Dadurch soll in NITROLIMIT eine fundierte wissenschaftliche Grundlage geschaffen werden, auf der eine Kosten-Nutzen-Analyse zur Verringerung von Stickstoffeinträgen erfolgen kann.

NITROLIMIT Diskussionspapiere

Die Diskussionspapiere sollen aktuelle Forschungsergebnisse des NITROLIMIT Projekts zeitnah und kompakt interessierten Fachkollegen sowie Planungsbüros und Behörden zugänglich machen. Sie stellen Arbeitspapiere dar, die Impulse für den aktuellen Wissenschaftsdiskurs geben sollen. Als „work in progress“ spiegeln diese jedoch nicht notwendigerweise die Positionen aller Projektpartner wider. Aufgrund der Kürze erheben die Diskussionspapiere nicht den Anspruch alle Teilergebnisse, methodischen Details oder einen kompletten Literaturüberblick zu geben. Zu den in diesem Diskussionspapier dargestellten Ergebnissen zur Ökobilanz von Maßnahmen zur Stickstoffentfernung aus Großkläranlagen wird Ende des laufenden Jahres ein detaillierter Projektbericht veröffentlicht.

Über kritische Kommentare und Anregungen zu diesem Diskussionspapier freuen wir uns.



Inhalt

Einleitung und Ziele 5

Ansätze zur Bewertung von Maßnahmen 6

1. Maßnahmeneffekte 6

2. Maßnahmenkosten 8

3. Umweltauswirkungen in der Ökobilanz 10

4. Datenbasis 11

Maßnahmenkatalog 12

1. Regenwasserbewirtschaftung 12

2. Klärwerk 20

Ökobilanz zu Maßnahmen in Großkläranlagen 28

Zusammenfassende Bewertung der Maßnahmen 30

Ausblick 37

Danksagung 37

Literatur 38

Einleitung und Ziele

Eutrophierung von Oberflächengewässern durch anthropogene Einträge von Stickstoff und Phosphor ist ein globales Problem. Die Einträge stammen aus der Landwirtschaft (v. a. diffuse Einträge) und aus urbanen Gebieten (Punktquellen und diffuse Einträge). In Deutschland wurden in den letzten drei Jahrzehnten die Einträge von Stickstoff in Fließgewässer um ca. 45% und von Phosphor um ca. 71% vermindert [1], wozu insbesondere Modernisierungen in Kläranlagen beigetragen haben. Dennoch beträgt der derzeitige Anteil der urbanen Quellen 21% der Stickstoff- und 45% der Phosphoreinträge [1]. Daher besteht im urbanen Bereich noch immer Handlungsbedarf für weitere Maßnahmen zur Nährstoffreduktion, um den von der EU-WRRL geforderten „guten" ökologischen Zustand der Gewässer zu erreichen.

Konkret stammen in urbanen Bereichen die Einträge aus geklärten Abwässern aus Klärwerken, Regenwasserabflüssen und Überläufen aus Mischwasserkanalisation. In Mischwasserkanälen wird häusliches Abwasser und Regenwasser zusammen zum Klärwerk geleitet. Tritt ein Starkregenereignis auf, kann überschüssiges Mischwasser ungeklärt in ein Gewässer gelangen und dieses kurzfristig mit hohen Schmutz- und Nährstofffrachten belasten. Regenwasser, das im separaten Kanalnetz (Trennkanalisation) gesammelt wird, wird meist direkt einem Oberflächengewässer zugeführt. Es enthält Nährstoffe aus der Atmosphäre und insbesondere aus der Abwaschung von Dächern und Straßen (z.B. aus Blättern und Pollen). Bei der Trennkanalisation behandeln Klärwerke nur das im Schmutzwasserkanalnetz gesammelte Abwasser (in der Regel ohne Regenwasseranteil).

Ein Katalog zu Maßnahmen zur Reduktion von Nährstoffeinträgen aus urbanen Bereichen, deren Effizienz und Kosten sowie eine Bewertung der aus den Maßnahmen resultierenden Umweltauswirkungen existieren bislang nicht. Insbesondere im Fall von Großkläranlagen, welche bereits ca. 80% der Stickstoff- und ca. 97% der Phosphorfrachten aus dem Abwasser entfernen, gilt es zu berücksichtigen, dass Verfahren zu einer weitergehenden Reduktion teilweise erhebliche Aufwendungen an zusätzlicher Energie, Chemikalien und Infrastruktur benötigen.

Ziele

- Erstellung eines Katalogs zur Reduktion von urbanen Stickstoff- und Phosphoreinträgen (aus Klärwerk, Misch- und Regenwassereinleitungen) sowie Ermittlung deren spezifischer Reinigungsleistung und Kosten

- Durchführung einer Ökobilanz für Maßnahmen zur weitergehenden Stickstoffreduktion in Großkläranlagen

Ansätze zur Bewertung von Maßnahmen

1. Maßnahmeneffekte

Die Maßnahmen sollen hinsichtlich der möglichen Reduktion der Stickstoff- und Phosphorfrachten in Oberflächengewässer bewertet werden. Für die Phosphorfrachten bezieht sich die Reduktion auf die Gesamtphosphorkonzentration TP. Die Reduktion der Stickstofffracht wird (i) für Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung auf die Gesamtstickstoffkonzentration TN[1] und (ii) für die weitergehende Reinigung am Klärwerk aufgrund rechtlicher Rahmenbedingungen (Abwasserverordnung, AbwV) auf den anorganischen Stickstoff N_{an}[2] bezogen.

Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung

Erstens kann eine Maßnahme den Regenwasserabfluss (ins Gewässer) von versiegelten Flächen reduzieren, etwa durch erhöhte Versickerung oder Verdunstung. Dies kann durch den mittleren Abflussbeiwert ψ ausgedrückt werden, der den Anteil des Gesamtniederschlags ausweist, der direkt abflusswirksam wird:

$$\psi = h_{NA,\,eff} / h_{NA}$$

wobei h_{NA} [mm/a] = Gesamtniederschlag und $h_{NA,\,eff}$ [mm/a] = abflusswirksamer Niederschlag ist. Eine komplett versiegelte Fläche hat entsprechend $\psi = 1$, eine Fläche ohne direkten Abfluss hat $\psi = 0$. Je kleiner ψ durch eine Maßnahme wird, desto stärker reduziert sie den direkten Abfluss ins Gewässer.

Zweitens kann $h_{NA,\,eff}$ durch eine Maßnahme gereinigt werden. Diese Reinigungsleistung wird als Wirkungsgrad bezogen auf die Stickstoff- oder Phosphorkonzentration als η_{TN} und η_{TP} ausgewiesen. Bei vollständiger Entfernung hat η_i den Wert 1, bei einer Maßnahme ohne Reinigungsleistung hat η_i den Wert 0. Da Maßnahmen auch einen zusätzlichen Eintrag bewirken können (z.B. bei einer Düngung von eingesetzten Pflanzen), kann η_i auch negative Werte annehmen.

Die gesamte Frachtreduktion $\eta_{ges,\,i}$ durch eine Maßnahme wird über die Abflussreduktion und die Reinigungsleistung wie folgt bestimmt:

$$\eta_{ges,\,i} = 1 - \psi \cdot (1-\eta_i)$$

[1] $TN = N_{org} + N_{an}$ Der Gesamtstickstoff TN bildet sich aus der Summe von organischem Stickstoff (N_{org}) und anorganischem Stickstoff (N_{an})

[2] $N_{an} = NH_4\text{-}N + NO_3\text{-}N + NO_2\text{-}N$ Der anorganische Stickstoff N_{an} setzt sich aus der Summe der gelösten Stoffe Ammonium-N (NH_4-N), Nitrat-N (NO_3-N) und Nitrit-N (NO_2-N) zusammen.

Maßnahmen zur weitergehenden Reinigung im Klärwerk

Das Reduktionspotential in der Nährstoffkonzentration durch weitergehende Maßnahmen kann mit folgender Gleichung berechnet werden (exemplarisch am Beispiel N_{an} dargestellt):

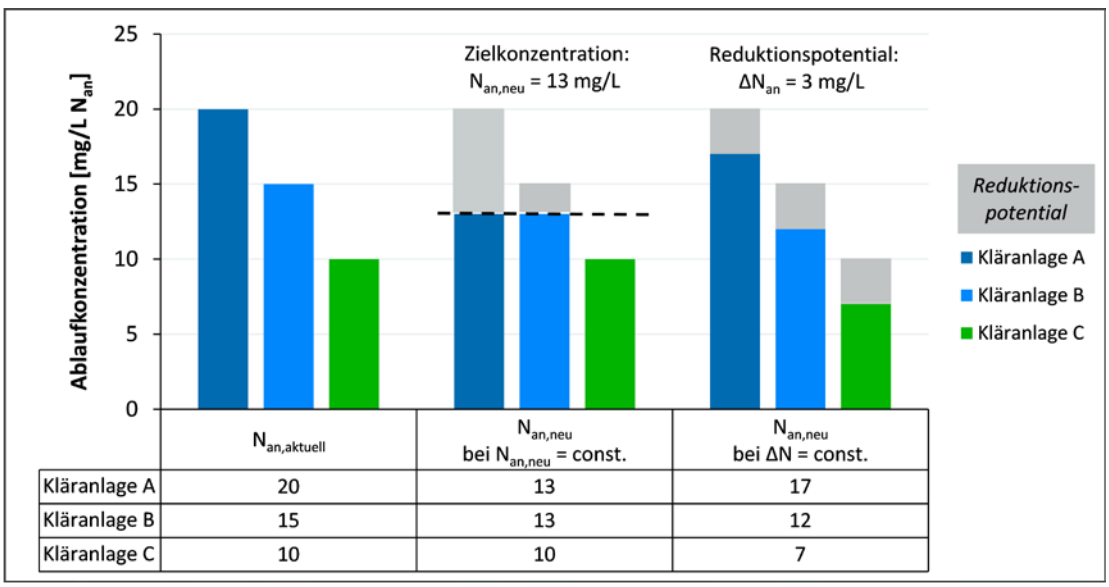
$$N_{an,\,aktuell} - N_{an,\,neu} = \Delta N_{an}$$

Das Reduktionspotential einer Maßnahme wird für Kläranlagen mithilfe von zwei Ansätzen angegeben:

i. Der erste Ansatz nimmt an, dass eine Maßnahme eine konstante Zielkonzentration ($N_{an,\,neu}$ = const.) im Ablauf erreichen kann, unabhängig vom aktuellen Ablauf- oder Zulaufwert. Das Reduktionspotential ΔN_{an} berechnet sich somit aus der Differenz zwischen aktueller und neuer Ablauflaufkonzentration. Eine Reduktion durch diese Maßnahmen ist nur möglich, wenn die aktuelle Nährstoffkonzentration größer ist als die Zielkonzentration nach Implementierung der Maßnahme. Ist die aktuelle Nährstoffkonzentration geringer, so besitzt die Maßnahme kein weiteres Reduktionspotential.

ii. Der zweite Ansatz nimmt an, dass mit einer spezifischen Maßnahme eine konstante Konzentrationsdifferenz (ΔN_{an} = const.) unabhängig von der aktuellen Nährstoffkonzentration der jeweiligen Kläranlage erreicht werden kann.

In Abbildung 1 sind die zwei unterschiedlichen Ansätze verdeutlicht. In diesem Maßnahmenkatalog werden je nach Maßnahme entweder die neue Zielkonzentration oder das Reduktionspotential angegeben.



	$N_{an,aktuell}$	$N_{an,neu}$ bei $N_{an,neu}$ = const.	$N_{an,neu}$ bei ΔN = const.
Kläranlage A	20	13	17
Kläranlage B	15	13	12
Kläranlage C	10	10	7

Abbildung 1. Beispiele zur Berechnung des entsprechenden Reduktionspotentials am Beispiel von drei Kläranlagen mit unterschiedlicher aktueller Stickstoff-Ablaufkonzentration

2. Maßnahmenkosten

Investitionskosten

Die ausgewiesenen Investitionskosten IK einer Maßnahme beinhalten neben den Herstellungskosten und Einbau auch Kosten für einen notwendigen Rückbau inklusive Entsorgung aber ohne Deponierung (z.B. im Falle einer Versickerungsfläche). Die Kosten für den Erwerb von Land wurden nicht berücksichtigt, da sie lokal sehr hohen Schwankungen unterliegen. Dies müsste im Kostenvergleich ggf. berücksichtigt werden. Für die Maßnahmen am Klärwerk ist das Bezugsjahr das Jahr 2012. Bei älteren Angaben wurde daher ein pauschaler Teuerungssatz von 2% pro Jahr verwendet. Die Investitionskosten werden in Anlehnung an die Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien) nach LAWA [3] über den Annuitätsansatz in jährliche Kapitalkosten umgerechnet. Der Ansatz geht davon aus, dass ein Kredit aufgenommen wird und über die Lebensdauer der Maßnahme mit gleichen jährlichen Raten zurückbezahlt bzw. abgeschrieben wird:

$$\text{jährliche Kapitalkosten} = IK \cdot Ann$$

$$\text{mit: } Ann = [i \cdot (1+i)^n]/[(1+i)^n - 1]$$

wobei IK [€] = Investitionskosten, Ann [-] = Annuität, i [-] = Aufzinsungsfaktor = 3% p.a. bzw. 0,03 [3], n [a] = Lebensdauer.

Die Lebensdauer der Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung basiert auf Annahmen der KVR-Leitlinien nach LAWA [3]. Zudem wurde für spezifische Maßnahmen auf Literaturangaben zurückgegriffen. Als maximale Lebensdauer wurden 100 a angenommen (z.B. für den Rückbau einer versiegelten Fläche) [3]. Die Lebensdauer der Bauwerke für die Maßnahmen am Klärwerk wird analog zu [3] mit 30 a, Maschinentechnik mit 12 a und Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR-Technik) mit 10 a angesetzt.

Betriebs- und Wartungskosten

Jährlich anfallende Kosten für den Betrieb und die Wartung der Maßnahmen bzw. Anlagen oder Flächen werden über die Lebensdauer als konstant angesehen. Wartungskosten im Bereich der Regenwasserbewirtschaftung wurden aus Literaturangaben generiert. Die Betriebskosten für die Maßnahmen in den Klärwerken beinhalten die Ausgaben für Strom und Chemikalien, Ersatzteile, Wartung, Personal und Entsorgung anfallender Abfälle (z.B. Schlämme).

Jahreskosten

Die jährlich anfallenden Kosten JK werden als Summe der jährlichen Kapitalkosten und der Betriebs- und Wartungskosten berechnet.

Für die Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung wird wegen starker Schwankungen und fehlender Informationen bezüglich der Kostenzusammensetzung mit Hilfe eines Unsicherheitsfaktors f_K der Mittelwert der Jahreskosten nach oben korrigiert [4]:

$$JK_{korr} = JK \cdot f_K$$

$$\text{mit: } f_K = \frac{JK_{max} - JK_{mittel}}{2} \cdot JK_{mittel} + 1$$

wobei JK_{korr} [€/a] = Korrigierte Jahreskosten, f_K [-] = Kostenunsicherheitsfaktor, JK_{max} [€/a] = Maximale Jahreskosten, JK_{mittel} [€/a] = Mittlere Jahreskosten.

Kostenbezug

Die Kosten der Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung werden auf die undurchlässige Fläche A_u bezogen, die von einer Maßnahme erfasst wird. Hiermit ist ein Vergleich der Maßnahmen untereinander möglich. Vereinfachend wird in der Folge davon ausgegangen, dass A_u der befestigten Fläche eines Einzugsgebietes entspricht.

Bei den Maßnahmen am Klärwerk werden die Kosten in Relation zum Reduktionspotential (ΔN_{an} bzw. ΔP) der entsprechenden Nährstofffracht angegeben, in [€/kg N_{elim}] bzw. [€/kg P_{elim}]. Sind in den Quellenangaben Kosten pro Einwohner und Jahr oder konstante Zielkonzentrationen angegeben, werden diese über die durchschnittlichen Werte aus dem Kläranlagenbestand im Einzugsgebiet Spree-Havel in Berlin und Brandenburg auf das Reduktionspotential umgerechnet (Tabelle 1).

Tabelle 1. Aktuelle Daten zum Kläranlagenbestand im Einzugsgebiet Spree-Havel in Berlin und Brandenburg (UBA-Kläranlageninventar, Stand 2008)

Parameter		GK 1 #,§	GK 2 #,§	GK 3 #	GK 4 #	GK 5 #	Summe
Anzahl der Anlagen	-	94	55	25	65	9	248
Summe Ausbau	EW *	38.314	124.409	164.532	1.984.600	5.219.400	7.531.255
Summe Volumen	Mio m^3/a	0,86	3,0	3,8	66,5	250,9	325,1
Volumen pro EW	m^3/(EW*a)	22,4	24,4	23,1	33,5	48,1	43,2
Ablauf-konzentration	mg/L N_{an}	36,1	21,9	8,3	5,6	11,3	
	mg/L TP	6,8	4,5	3,8	1,0	0,3	
Ablauffracht	t N_{an}/a	28	53	29	368	3.317	3.795
	t TP/a	5	12	14	57	86	174

* EW = Einwohnerwerte

\# GK 1 = 100-1.000 EW, GK 2 = 1.001-5.000 EW, GK 3 = 5.001-10.000 EW, GK 4 = 10.001-100.000 EW, GK 5 >100.000 EW

§ Daten: Stand 2003

3. Umweltauswirkungen in der Ökobilanz

Mit der Ökobilanz wird eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltauswirkungen verschiedener Verfahren „von der Wiege bis zur Bahre“ durchgeführt. Für die Ökobilanz von verschiedenen Maßnahmen zur Stickstoffentfernung in einer Großkläranlage (GK 5) werden neben den direkten Effekten im Gewässer durch die zusätzliche Reinigungsleistung der Verfahren auch die indirekten Effekte aus dem Bau der Verfahren (Infrastruktur), dem Chemikalieneinsatz und dem Stromverbrauch erfasst.

Basierend auf Datensätzen aus einer Ökobilanz-Datenbank werden die notwendigen Ressourcen sowie die Emissionen in Boden, Wasser und Luft über den gesamten Lebenszyklus bilanziert. Über wissenschaftliche Modelle werden daraus Auswirkungen auf verschiedene Umweltindikatoren wie „Kumulierter Energieaufwand“, „Klimawandel“ (= Treibhauseffekt), „Eutrophierung“ oder „Toxizität“ berechnet.

Die Basis für den Verfahrensvergleich bildet das Modell eines Großklärwerks im Raum Berlin mit 1,47 Mio. Einwohnerwerten. Die Systemgrenzen der ökobilanziellen Betrachtung

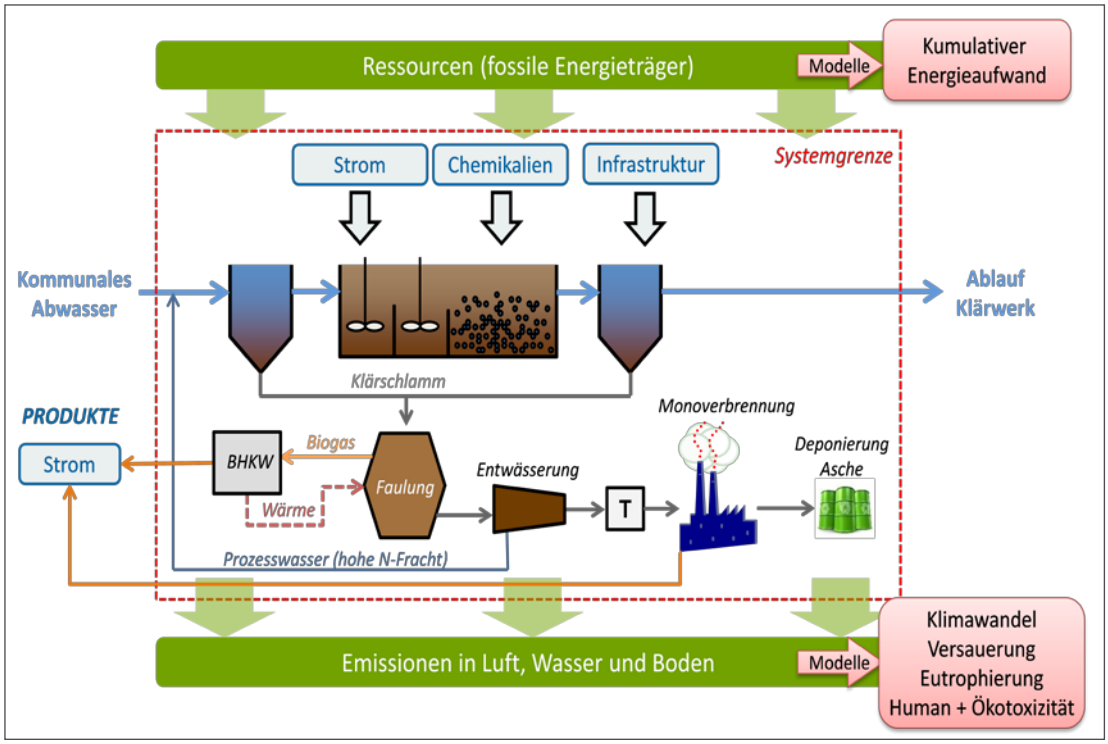
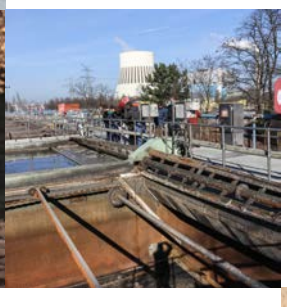
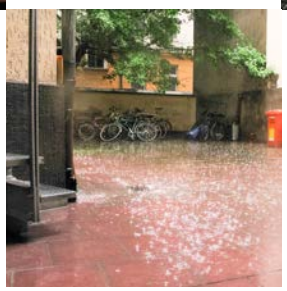


Abbildung 2. Systemgrenzen der Ökobilanz und betrachtete Umweltindikatoren

beinhalten sowohl die Abwasserreinigung (u.a. mit einer vorgeschalteten Denitrifikation) als auch die Schlammbehandlung mit Faulung, Biogasnutzung im Blockheizkraftwerk (BHKW) und einer thermischen Entsorgung des entwässerten Klärschlamms (Abbildung 2). Darauf aufbauend wurden alle möglichen Verfahrensvarianten zur Stickstoffentfernung in einem Stoffstrommodell abgebildet und über die verschiedenen Umweltindikatoren bewertet. Die mögliche Verringerung der Stickstofffracht im Ablauf durch die zusätzlichen Verfahren wurde über dynamische Frachtmodellierungen abgeschätzt [5].





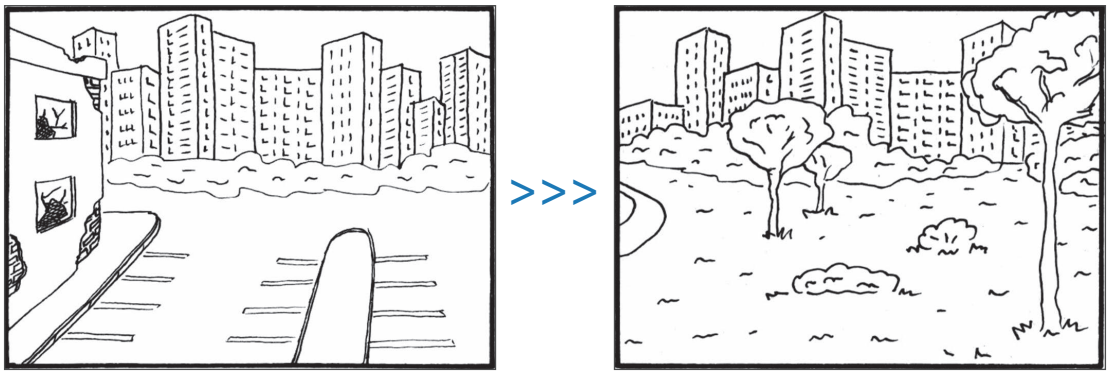
4. Datenbasis

Als Datenbasis der im Folgenden ausgewiesenen Werte dienten sowohl einzelne Fallstudien, die sich zum Großteil auf Anwendungen im Berliner Raum berufen, als auch Fachliteratur sowie existierende Regelwerke. Die Qualität der Daten im Maßnahmenvergleich kann daher variieren. Eine direkte Vergleichbarkeit der Maßnahmen wird auch dadurch begrenzt, dass sich deren Wirksamkeit an verschiedenen Stellen im Einzugsgebiet auf unterschiedliche Stofffrachten bezieht (z.B. typische Größenordnung für P-Konzentrationen ist 0,04 mg/L im Dachablauf, 0,6 mg/L an der Gewässereinleitung eines Regenwassereinzugsgebietes, 1,9 mg/L im Mischwasserüberlauf und 16 mg/L am Klärwerkszulauf).

Maßnahmenkatalog

1. Regenwasserbewirtschaftung

A Entsiegelung



Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Durch Entsiegelung von Flächen wird die Versickerung und Verdunstung von Regenwasser erhöht, so dass weniger Schmutzfrachten aus dem urbanen Raum in die Oberflächengewässer gelangt. Beim **Rückbau** werden versiegelte Flächen in Grünflächen (Parks o.ä.) umgewandelt. Bei der **Flächenumwandlung** werden undurchlässige Bodenbeläge durch versickerungsfähige Beläge ersetzt.

Wirksamkeit:

Maßnahme	Kenngrößen			Gesamte Frachtreduktion		Quellen
	Ψ [-]	η_{TN} [-]	η_{TP} [-]	$\eta_{ges,TN}$ [%]	$\eta_{ges,TP}$ [%]	
Rückbau	0,1 (0,0-0,3)	-	-	87	87	[6, 7]
Flächenumwandlung	0,2 (0,0-0,6)	-	-	76	76	[6-11]

Kosten:

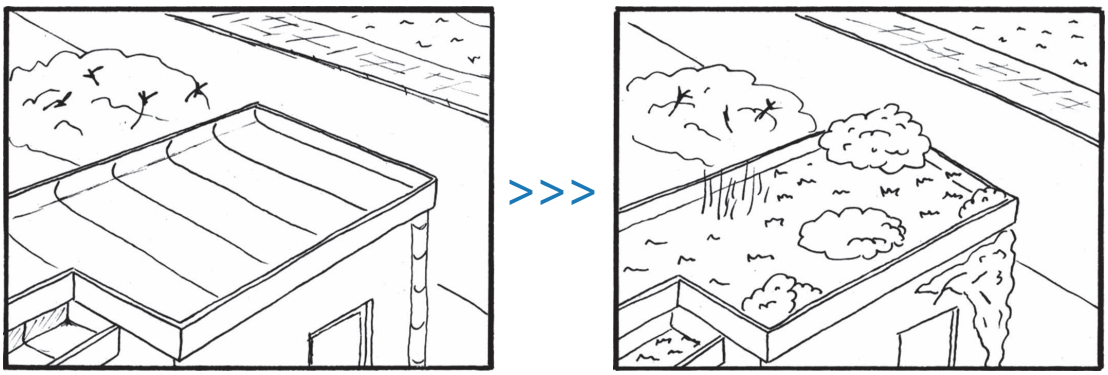
Maßnahme	Lebensdauer [a]	Investition [€/m² Au]	Wartung [€/m² Au/a]	JK_{korr} [€/m²Au/a]	Quellen
Rückbau	100	32,0 (1,3-176,8)	0,2 (0,0-0,3)	3,2	[12-15]
Flächenumwandlung	100/25*	62,0 (0,2-150,8)	0,1 (0,0-0,2)	6,8	[3, 6-24]

* 100 a für Rückbau, 25 a für versickerungsfähigen Belag

Zusatznutzen/Einschränkungen

Insbesondere im Falle eines Rückbaus ergibt sich ein Zusatznutzen für (lokale) Biodiversität und Stadtklima. In beiden Fällen werden die Staub- und Schadstoffbindung sowie die Grundwasseranreicherung gefördert. Einschränkungen können sich im Falle von Altlasten, Wasserschutzgebiet, besonderer Flächennutzung und Streusalzeinsatz ergeben. Nährstoffeinträge ins Grundwasser werden durch einen teilweisen Rückhalt bei der Bodenpassage reduziert ($\eta_{TP} \approx 0{,}4$ [25]; $\eta_{TN} \approx 0{,}3$ [4]). Durch den hohen Flächenbedarf ist in vielen Fällen von einer Flächenkonkurrenz zu anderen Maßnahmen auszugehen.

B Dachbegrünung



Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Die Begrünung von Dachflächen ist sowohl bei Neubauten als auch im Bestand bis zu Dachneigungen von 30 % möglich. Bei **extensiver Dachbegrünung** wird die Pflege durch angepasste Arten auf ein Minimum reduziert, Düngung/Bewässerung findet nur im Bedarfsfall statt, die Substratdicke liegt im Bereich von 10 cm. Die **intensive Dachbegrünung** ermöglicht vielseitige Dachgärten durch eine höhere Substratdicke von 50 bis 100 cm und Düngung/Bewässerung. [26]

Wirksamkeit:

Maßnahme	Kenngrößen			Gesamte Frachtreduktion		Quellen
	Ψ [-]	η_{TN} [-] *	η_{TP} [-] *	$\eta_{ges,TN}$ [%]	$\eta_{ges,TP}$ [%]	
Extensive Begrünung	0,6 (0,5-0,7)	0,3 (-5,4-0,8)	-6,4 (-41,4-0,8)	62	-309	[6, 7, 9, 27 - 32]
Intensive Begrünung	0,3 (0,2-0,3)			81	-101	[6, 7, 9,11, 16, 27-33]

* es lag nur eine Datenquelle für intensive Dachbegrünung vor, entsprechend wurden die beiden Typen zusammengefasst.

Kosten:

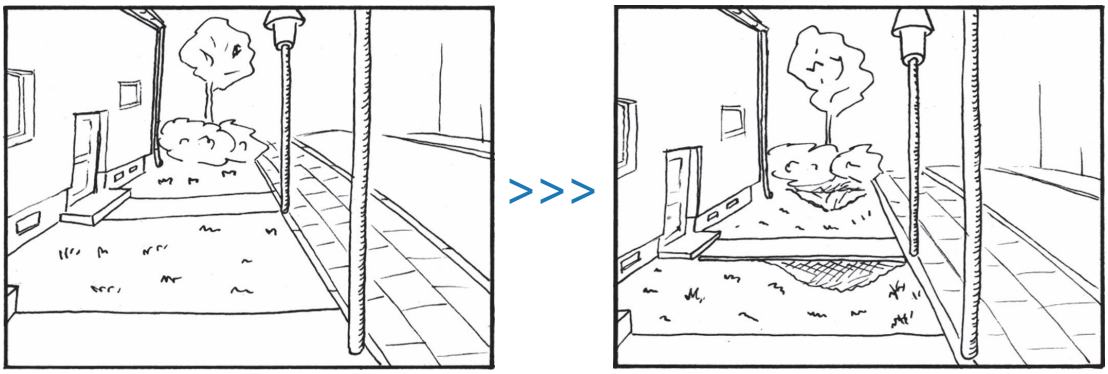
Maßnahme	Lebens-dauer [a]	Investition [€/m^2 Au]	Wartung [€/m^2 Au/a]	JK$_{korr}$ [€/m^{2}Au/a]	Quellen
Ext. Begrü-nung Neubau	40	32,4 (12,5-79,7)	1,0 (0,4-5,0)	5,29	[6, 7, 9, 11, 16, 18, 20, 22, 26, 31-41]
Ext. Begrü-nung Bestand	100/40*	62,0 (0,2-150,8)	0,1 (0,0-0,2)	7,44	[6, 7, 9, 11, 14, 16, 18, 20, 22, 26, 31-41]
Int. Begrü-nung Neubau	40	83,2 (30,0-179,0)	3,3 (1,1-6,0)	10,00	[6, 7, 9, 11, 16, 20, 22, 26, 31-33, 35, 36, 40, 41]
Int. Begrü-nung Bestand	100/40*	105,4 (30,6- 306,8)	3,3 (1,1-6,0)	12,14	[6, 7, 9, 11, 14, 16, 20, 22, 26, 31-33, 35, 36, 40, 41]

* 100 a für Rückbau, 40 a für Dachbegrünung

Zusatznutzen/Einschränkungen:

Es ergibt sich ein Zusatznutzen für die Bewohner (Stadtklima, Staub- und Schadstoffbindung, Freizeitflächen, Luftschall- und Wärmedämmung, Wertsteigerung) sowie für Naturschutz/Biodiversität. Einschränkungen können sich bei starker Dachneigung sowie aus der statischen Tragfähigkeit ergeben.

C Versickerungsmaßnahmen



Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Versickerungsmaßnahmen ermöglichen eine lokale Versickerung des Regenwasserabflusses von versiegelten Flächen. Der Flächenbedarf A_{si} der Maßnahmen ist generell

deutlich kleiner als die angeschlossene versiegelte Fläche A_u. Bei durchlässigen Böden reicht eine einfache **Muldenversickerung** (MV, $A_{si}/A_u \approx 0,15$) oder **Beckenversickerung** (BV, $A_{si}/A_u \approx 0,07$). Bei schlechter durchlässigen Böden kann der Flächenbedarf durch **Mulden-Rigolen-Versickerung** (MRV) mit Überlauf ($A_{si}/A_u \approx 0,05$) oder ohne Überlauf ($A_{si}/A_u \approx 0,1$) reduziert werden. Dabei wird durch eine gut durchlässige Schicht unter der Mulde zusätzlicher Speicherraum geschaffen. [42]

Wirksamkeit:

Maßnahme	Kenngrößen			Gesamte Frachtreduktion		Quellen
	Ψ [-]	η_{TN} [-]	η_{TP} [-]	$\eta_{ges,TN}$ [%]	$\eta_{ges,TP}$ [%]	
Versickerung* ohne Überlauf	0	-	-	100	100	[42, 43]
MRV mit Überlauf	0,03	0,3 (0,30-0,32)	0,4 (0,2-0,5)	98	98	[4, 18, 25, 42-45]

* Mulden-, Becken- oder Mulden-Rigolen-Versickerung

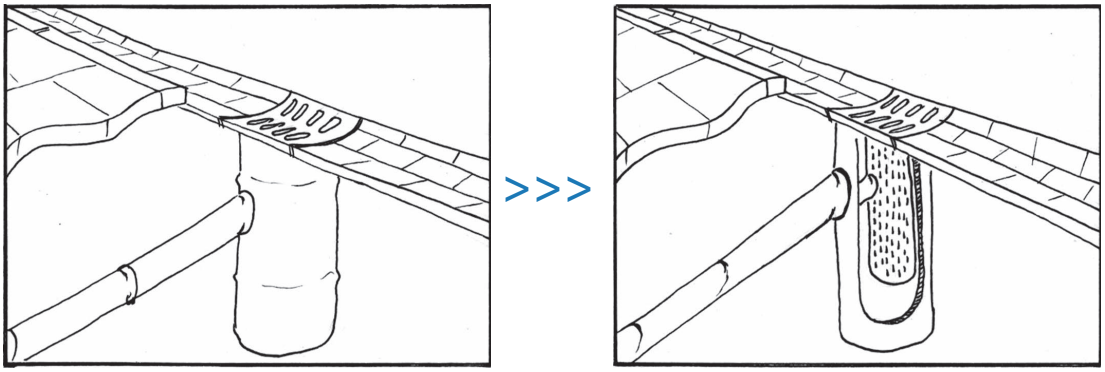
Kosten:

Maßnahme	Lebensdauer [a]	Investition [€/m² Au]	Wartung [€/m² Au/a]	JK_{korr} [€/m²Au/a]	Quellen
MV	25	11,5 (1,6-43,8)	0,4 (0,1-1,0)	2,2	[3, 8, 10, 11, 13, 16-18, 20-23, 36, 46-48]
BV	25	6,9 (4,9-15,5)	0	0,6	
MRV	25	24,7 (4,3-56,9)	0,3 (0,1-0,8)	2,8	

Zusatznutzen/Einschränkungen:

Die Maßnahmen fördern insbesondere die Grundwasseranreicherung; Nährstoffeinträge ins Grundwasser (die Frachtreduktion η_{ges} bezieht sich nur auf den Eintrag in Oberflächengewässer) werden durch einen teilweisen Rückhalt bei der Bodenpassage reduziert (siehe Stoffrückhalt bei der Mulden-Rigolen-Versickerung mit Überlauf). Weiter ergibt sich ein begrenzter Zusatznutzen für die Staub- und Schadstoffbindung sowie die Biodiversität. Einschränkungen können sich bei hohen Grundwasserständen, sowie aus stofflicher Sicht bei stark belastetem Regenwasser oder in Wasserschutzgebieten ergeben.

D Dezentrale Filtersysteme



Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Dezentrale Filtersysteme reduzieren die Partikelfracht im Straßenablauf. Dabei kommen verschiedene Filtermaterialien (Filtersubstrate, Textilfilter, Kunststofffilter, etc.) am Gully oder in Entwässerungsrinnen zum Einsatz, wobei viele Systeme unterschiedliche Stufen aufweisen (Grob- und Feinfilter). Die Anlagen kommen insbesondere als Vorbehandlung von Versickerungsmaßnahmen bei stark belasteten Abflüssen zum Einsatz, können aber auch als alleinstehende Maßnahmen eingesetzt werden. Da es sich um eine vergleichsweise neue Maßnahme handelt, liegen nur wenige Daten zur Leistungsfähigkeit im Betrieb vor. Einzelne Betriebserfahrungen zeigen, dass eine regelmäßige Reinigung 4 bis 6 Mal pro Jahr notwendig ist, im Gegensatz zu einer standardmäßigen Reinigung von Gullys (inkl. Schlammfang) alle ein bis zwei Jahre. Bei sehr hohem Feststoffanteil hat sich auch gezeigt, dass die Systeme unabhängig vom Reinigungsintervall verstopfen können. [43, 49]

Wirksamkeit:

Maßnahme	Kenngrößen			Gesamte Frachtreduktion		Quellen
	Ψ [-]	η_{TN} [-]	η_{TP} [-]	$\eta_{ges,TN}$ [%]	$\eta_{ges,TP}$ [%]	
Dezentrale Filter	1,0	0,3 (0,3-0,34)	0,5 (0,4-0,8)	32	50	[45, 48, 50]

Kosten:

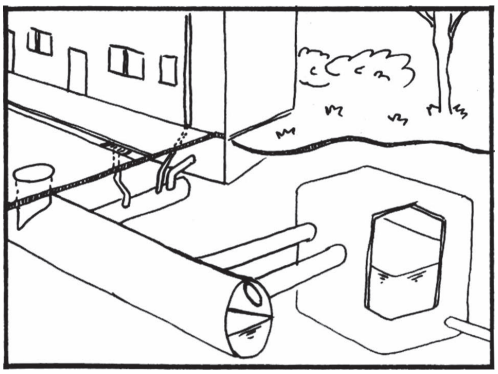
Maßnahme	Lebens-dauer [a]	Investition [€/m² Au]	Wartung [€/m² Au/a]	JK_{korr} [€/m²Au/a]	Quellen
Dezentrale Filter	15	12,8 (2,3-60,7)	1,3 (0,2-3,8)	5,5	[48, 50, 51]

Zusatznutzen/Einschränkungen:

Dezentrale Filtersysteme haben ein gutes Reinigungspotenzial; ein Einsatz könnte durch den vergleichsweise hohen Wartungsaufwand vor allem an Schwerpunkten hoher Gewäs-

serbelastung Sinn machen. Erfahrungen im Betrieb müssen aber noch zeigen, (i) ob das gute Reinigungspotenzial auch in der Praxis erreicht werden kann und (ii) wie hoch der Wartungsaufwand tatsächlich ist.

E Maßnahmen im Kanaleinzugsgebiet



Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Regenrückhaltebecken (RRB) werden vor allem in Trennsystemen für eine Drosselung der Regenabflussspitzen bei Extremereignissen verwendet (Beschickung < 1 a^{-1}). Stoffrückhalt findet wahrscheinlich statt, ist aber nicht Ziel der RRB. Durch Anpassungen in Bau (Schilf, Ablauf/Überlauf) und Betrieb (Speicherung für ca. 24 h) können RRB in sogenannte **Hochleistungssedimentationsanlagen (HLS)** umgewandelt werden, die auch Feinpartikel zurückhalten. Erste Anwendungen von HLS werden zurzeit in Berlin vorbereitet. Überläufe aus dem Mischsystem können durch **Stauraumkanäle** und **Regenüberlaufbecken (RÜB)** reduziert werden. Das gespeicherte Volumen wird bei diesen Maßnahmen nach Ende des Starkregens wieder dem Kanal und damit dem Klärwerk zugeführt. In RÜB findet zusätzlich zum Volumenrückhalt ein stofflicher Rückhalt zwischen Zulauf und Klärüberlauf statt. [43]

Wirksamkeit:

Maßnahme	Kenngrößen			Gesamte Frachtreduktion		Quellen
	Ψ [-]	η_{TN} [-]	η_{TP} [-]	$\eta_{ges,TN}$ [%]	$\eta_{ges,TP}$ [%]	
RRB	1,0	0 (?)	0 (?)	0	0	[43]
HLS	0,9 *	0	0,5	12	52	[52, 53]
RÜB	0,4 @	0,1	0,1	64	65	[18, 54, 55]
Stauraumkanal	0,4 @	0	0	60	60	[18, 54]

* Verdunstung analog zu Retentionsbodenfilter angenommen

@ Typische Anwendung der ATV A 128 [54], oft deutlich kleinere Werte (z.B. < 0,25 in Berlin)

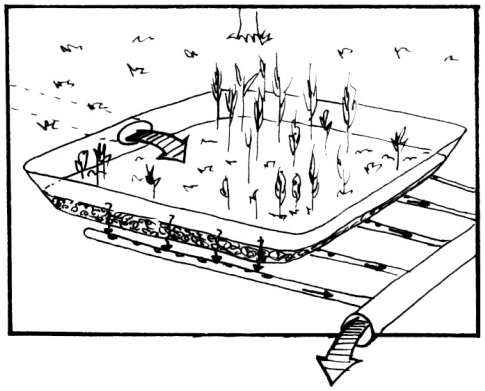
Kosten:

Maßnahme	Lebens-dauer [a]	Investition [€/m² Au]	Wartung [€/m² Au/a]	JK_{korr} [€/m²Au/a]	Quellen
RRB	60	17,2 (1,2-70,0)	0,02 (0,001-0,04)	1,5	[3, 17, 18, 20, 22, 56-60]
HLS (RRB-Umbau)	60	0,9	0,02 (0,001-0,04)	0,1	[61]
HLS (RRB-Neubau)	60	18,0 (2,0-70,8)	0,02 (0,001-0,04)	1,5	[17, 18, 20, 22, 56-61]
RÜB	60	6,1 (0,8-18,5)	0,03	0,4	[3, 20, 22, 62-66]
Stauraumkanal	60	3,2 (0,4-5,9)	?	0,2	[3, 56, 62, 64, 67, 68]

Zusatznutzen/Einschränkungen:

HLS können einen Zusatznutzen durch Staub- und Schadstoffbindung, sowie als ausgleichende Maßnahme für das Stadtklima aufweisen. Einschränkungen können sich bei RRB und HLS aus dem Flächenbedarf ergeben.

F End-of-pipe Maßnahmen



Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Direkt vor der Einleitung des Regenwassers ins Gewässer können **Regenklärbecken (RKB**) zum Einsatz kommen, die ein bestimmtes Volumen auffangen und einen Klärüberlauf zum Gewässer besitzen. Klassische RKB werden als reine Sedimentationsanlagen im Dauerstau betrieben. Durch die deutlich kürzeren Aufenthaltszeiten (Auslegung oft < 1h) als bei der HLS halten RKB hauptsächlich grobe Partikel zurück. Für eine weitergehende Reinigung werden **Retentionsbodenfilter (RBF)** eingesetzt, die aus einem Retentionsraum über einer mit Schilf bewachsenen, vertikal durchströmten Filterschicht bestehen. Zur Verhinderung einer Verstopfung ist ein RKB als Vorstufe zum Rückhalt von Grobpartikeln notwendig. RBF verbinden eine hohe Sedimentations- und Filterleistung mit biologischem Abbau und Sorption an geeignete Substrate. Zielgrößen von RBF sind insbesondere P und Schwermetalle. [43, 59, 68]

Wirksamkeit:

Maßnahme	Kenngrößen			Gesamte Frachtreduktion		Quellen
	Ψ [-]	η_{TN} [-]	η_{TP} [-]	$\eta_{ges,TN}$ [%]	$\eta_{ges,TP}$ [%]	
RKB	1,0	0,2 (0,03-0,3)	0,3 (0,1-0,5)	22	33	[18, 43, 45, 48, 60, 69]
RBF (+RKB)	0,9 *	0,3 (0,2-0,8)	0,7 (0,5-0,9)	42	74	[4, 48, 49, 53, 59, 68, 70, 71]

* reduzierter Abflussbeiwert durch Verdunstung

Kosten:

Maßnahme	Lebens-dauer [a]	Investition [€/m^2 Au]	Wartung [€/m^2 Au/a]	JK_{korr} [€/m^{2}Au/a]	Quellen
RKB	60	10,1 (1,3-19,7)	0,1 (0,01-0,1)	0,6	[3, 18, 48, 51, 57, 60, 72-74]
RBF (+RKB)	60	12,9 (2,9-44,4)	0,1 (0,02-0,2)	1,1	[3, 11, 18, 22, 57, 59, 60, 63, 65, 68, 72, 73, 75]

Zusatznutzen/Einschränkungen:

RKB können durch Unfälle in die Regenwasserkanalisation eingeleitete Flüssigkeiten (z.B. Öle) zurückhalten. RBF haben einen Zusatznutzen durch Staub- und Schadstoffbindung, für das Stadtklima und durch die Reduktion der hydraulischen Gewässerbelastung. RBF müssen regelmäßig beschickt werden (Schilf, Mikroorganismen) aber auch trocken fallen (Kolmationsverhinderung). Dies stellt hohe Anforderungen an die Planung von RBF. Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus dem hohen Flächenbedarf von RBF.

2. Klärwerk

Grundlagen zu biologischer Stickstoffentfernung und Maßnahmen in Kläranlagen

Die hier vorgestellten Verfahren zur Entfernung von Stickstoff basieren auf biologischen Umwandlungsprozessen anorganischen Stickstoffs. Bei der konventionellen Stickstoffentfernung laufen innerhalb der Belebungsstufe (Abbildung 3) Nitrifikation und Denitrifikation ab. Bei der Nitrifikation wird unter Sauerstoffzufuhr Ammonium (NH_4^+) zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert. Das produzierte NO_3^- wird in der Denitrifikation bei sauerstofffreien Bedingungen zu Stickstoffgas N_2 reduziert. So wird Stickstoff aus dem Abwasser in die Atmosphäre abgegeben. Die Mikroorganismen benötigen für die Denitrifikation leicht verfügbaren organischen Kohlenstoff. Eine andere Möglichkeit zur Entfernung von Stickstoff ist die Deammonifikation, bestehend aus den Teilschritten Nitritation ($NH_4^+ + O_2 \rightarrow NO_2^-$) und anaerobe Ammonium Oxidation, Anammox ($NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2$).

Innerhalb der Kläranlage kann an verschiedenen Punkten eine zusätzliche Stickstoff- und Phosphorentfernung eingesetzt werden. Mögliche Orte sind in Abbildung 3 dargestellt:

(A) Betriebsoptimierung: kein Umbau/Neubau notwendig

(B) Umbau innerhalb der Belebungsstufe

(C) Prozesswasserbehandlung (Zentrat aus der Schlammentwässerung)

(D)-(F) Nachgeschaltete Verfahren

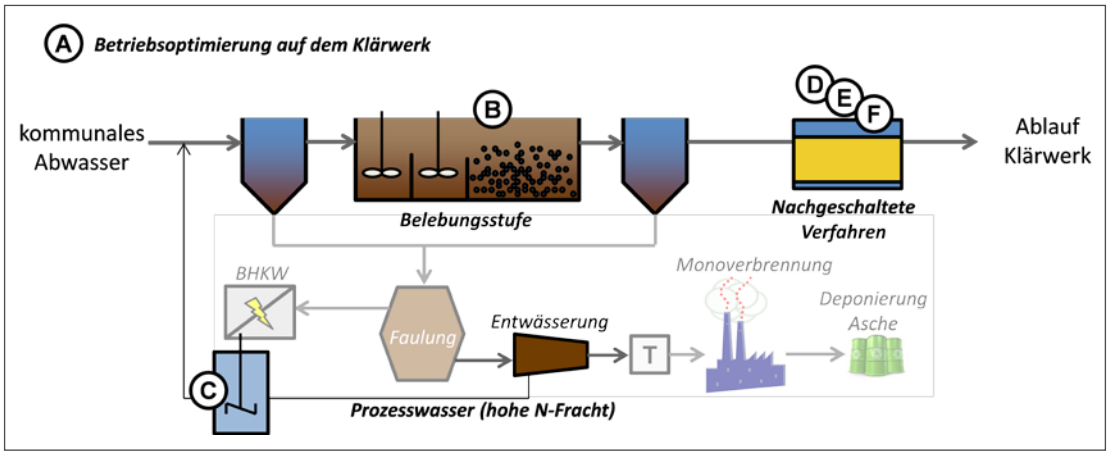


Abbildung 3. Mögliche Orte der Maßnahmen zur weitergehenden Nährstoffreduktion in einem Klärwerk am Beispiel eines Großklärwerks GK 5

A Betriebsoptimierung

	N	P		GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Betriebsoptimierung	X	X		X	X	X	X	

Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Es werden hierbei Optimierungsmaßnahmen an bestehenden Kläranlagen (GK 1 – GK 4) betrachtet. Dazu gehören Verbesserungen in der Dosierung, der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR) sowie Maschinentechnik. Großkläranlagen (GK 5) sind wegen der einzuhaltenden Grenzwerte in der AbwV [76] in der Regel bereits optimiert.

Wirksamkeit:

Für die Optimierungsmaßnahmen sind die zu erreichenden Zielkonzentrationen im Ablauf der Kläranlage in [77] angegeben. Diese beziehen sich auf eine Vielzahl von Fallstudien im Raum Brandenburg. In diesen Studien sind für GK 1 und GK 3 Kläranlagen keine Maßnahmen für N relevant [77].

Maßnahme	GK 1		GK 2		GK 3		GK 4		Quelle
	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	
Betriebs-optimierung		2	18	2		2	18	2	[77]

Kosten:

Die Kosten basieren auf einzelnen Fallstudien gemäß den Informationen aus [77].

Reduktion der Stickstofffracht					
Maßnahme	Größen-klasse	Investition [€/kg N_{elim}]	Betrieb [€/kg N_{elim}]	JK [€/kg N_{elim}]	Quellen
Betriebsoptimierung	GK 2	-	-	4	[77]
	GK 4	-	-	1,9	[77]
Reduktion der Phosphorfracht					
Maßnahme	Größen-klasse	Investition [€/kg P_{elim}]	Betrieb [€/kg P_{elim}]	JK [€/kg P_{elim}]	Quellen
Betriebsoptimierung	GK 1	-	-	100 (5-200)	[77]
	GK 2	-	-	35 (5-70)	[77]
	GK 3	-	-	20 (5-35)	[77]
	GK 4	-	-	20 (5-100)	[77]

Zusatznutzen/Einschränkungen:

-

B Umbau und Erweiterung der Belebungsstufe

	N	P		GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Erweiterung N/DN	X					X	X	X
Umbau zur bivalenten Belüftungszone	X							X
Erweiterung N/DN & Optimierung DN	X							X

Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Durch den **Bau von zusätzlichen Becken** in der Belebung von größeren Kläranlagen (>5.000 EW) wird die Verweilzeit des Abwassers in der biologisch aktiven Zone (Nitrifikation & Denitrifikation) verlängert und somit eine weitergehende N-Entfernung erzielt. GK 5 Kläranlagen mit geringem Anteil der Denitrifikationszone (DN-Zone) in der Belebung[3] können für eine weitere N-Reduktion optimiert werden [78]: Ein Umbau im bestehenden Becken mit **variabler (bivalenter) Belüftungszone** kann den Anteil der DN-Zone für Trockenwetterfälle erhöhen. Zusätzlich kann eine **Erweiterung des Gesamtvolumens mit einer Optimierung** (=Vergrößerung) der DN-Zone kombiniert werden.

Wirksamkeit:

Die Zielkonzentrationen für GK 3 und GK 4 Kläranlagen sind aus [79, 80] entnommen, für Maßnahmen an GK 5 Kläranlagen basieren diese auf einer Fallstudie zum KW Waßmannsdorf in Berlin (geringes V_D/V_{BB} = 0,39; ausreichende Nitrifikationskapazität) [5].

Maßnahme	GK 2		GK 3		GK 4		Quelle
	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	
Erweiterung N/DN	10		10		12		[5, 79, 80]
Umbau zur bivalenten Belüftungszone *					9-11		[5]
Erweiterung N/DN & Optimierung DN *					8-9		[5]

* nur bei GK 5 Kläranlagen mit geringem V_D/V_{BB}-Verhältnis anwendbar

[3] Als Maß wird das Verhältnis zwischen Volumen der DN-Zone V_D zum gesamten Volumen Belebungsbeckens VBB verwendet. Eine Optimierung wird nach DWA-A 131 bis zu $V_D/V_{BB} \leq 0,5$ als sinnvoll erachtet.

Kosten:

Für die Kosten bei GK 3 & GK 4 Kläranlagen [79, 80] ist eine Unsicherheit von ±30% abgeschätzt. Die Kosten für GK 5 Kläranlagen stammen aus der Fallstudie [5].

Maßnahme	Größenklasse	Investition [€/kg N_{elim}]	Betrieb [€/kg N_{elim}]	JK [€/kg N_{elim}]	Quellen
Erweiterung N/DN	GK 3	-	-	28,9 (26,9-30,9)	[79, 80]
	GK 4	-	-	24,3 (17,7-30,9)	[79, 80]
	GK 5	40,3 (32,2-48,3)	9,4 (7,5-11,2)	49,7 (39,7-59,5)	[5]
Umbau zur bivalenten Belüftungszone	GK 5 *	1,8 (1,4-2,1)	0,9 (0,7-1,0)	2,7 (2,1-3,1)	[5]
Erweiterung N/DN & Optimierung DN	GK 5 *	11,2 (10,3-12,1)	2,4 (2,2-2,5)	13,6 (12,5-14,6)	[5]

* nur bei nicht optimierten GK 5 Kläranlagen anwendbar

Zusatznutzen/Einschränkungen:

Die N-Entfernung in der Belebung hängt auch von der organischen Schmutzfracht (CSB = Kohlenstoffquelle für Denitrifikation) ab. Sinkt das Verhältnis CSB/N unter 8, so ist keine weitere Stickstoffentfernung ohne Zugabe von Kohlenstoff zu erwarten [81].

C Prozesswasserbehandlung

	N	P		GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
PWB – Deammonifikation	X						X	X
PWB – Nitrifikation/ Denitrifikation	X						X	X

Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Haben Kläranlagen eine Schlammfaulung (GK 4 und GK 5), so besitzt das abgetrennte Wasser (Zentrat) aus der Schlammentwässerung eine sehr hohe Stickstofffracht, die in den Kläranlagenzulauf rückgeführt wird. Sie beträgt in etwa 15-20% der Fracht aus dem ankommenden Abwasser. Wird Stickstoff aus dem hochkonzentrierten Prozesswasser entfernt, so gelangt weniger Stickstoff zurück in die Kläranlage und in der Belebung setzt ein verbesserter Abbau von Stickstoff ein. Zwei mögliche Maßnahmen für die **Prozesswasserbehandlung (PWB)** sind eine **konventionelle Nitrifikation** und **Denitrifikation** sowie eine **Deammonifikation**.

Wirksamkeit:

Das angegebene Reduktionspotential ΔN_{an} bezieht sich auf eine Fallstudie zum KW Waßmannsdorf in Berlin (GK 5) [5]. Innerhalb der PWB kann 80% der N-Fracht entfernt werden. Die Wirksamkeit bei GK 4 Kläranlagen wird als vergleichbar angenommen.

Maßnahme	GK 4		GK 5		Quelle
	ΔN_{an} [mg/L]	ΔTP [mg/L]	ΔN_{an} [mg/L]	ΔTP [mg/L]	
PWB Deammonifikation	5,0-6,0		5,0-6,0		[5]
PWB Nitrifikation/Denitrifikation	5,0-6,0		5,0-6,0		[5]

Kosten:

Die Kostendaten basieren auf der Fallstudie [5]. Die Investitionskosten sind für beide Verfahren vergleichbar. Die Betriebskosten für Nitrifikation/Denitrifikation sind höher wegen der notwendigen Kohlenstoffdosierung und des höheren Stromverbrauchs. Die Kosten für GK 4 Kläranlagen sind aus [5] abgeleitet (vergleichbare Betriebskosten, spezifische Investitionskosten +25%).

Maßnahme	Größenklasse	Investition [€/kg N_{elim}]	Betrieb [€/kg N_{elim}]	JK [€/kg N_{elim}]	Quellen
PWB Deammonifikation	GK 4	3,0 (2,9-3,0)	0,7 (0,6-0,7)	3,6 (3,5-3,7)	nach [5]
	GK 5	2,4 (2,3-2,4)	0,7 (0,6-0,7)	3,0 (2,9-3,1)	[5]
PWB Nitrifikation/ Denitrifikation	GK 4	3,0 (2,9-3,0)	2,3 (2,2-2,3)	5,2 (5,1-5,3)	nach [5]
	GK 5	2,4 (2,3-2,4)	2,3 (2,2-2,3)	4,6 (4,5-4,7)	[5]

Zusatznutzen/Einschränkungen:

Die Prozesswasserbehandlung kann nur bei großen Kläranlagen (ab GK 4) realisiert werden, die eine Schlammfaulung mit nachfolgender Schlammentwässerung besitzen. Je nach Randbedingungen einer Kläranlage kann das Reduktionspotential niedriger ausfallen (z.B. ΔN_{an} = 2mg/L; unveröffentlichte Simulationsstudie KW Münchehofe, Berlin).

D Nachgeschaltete naturnahe Verfahren

	N	P		GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Abwasserteiche	X	X		X	X	X		
Bodenfilter	X	X		X	X	X		

Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Nachgeschaltete naturnahe Verfahren können bei GK 1 bis GK 3 Kläranlagen sowohl Stickstoff als auch Phosphor im Abwasser reduzieren. Mögliche Maßnahmen wären ein unbelüfteter **Abwasserteich** oder ein bewachsener **Bodenfilter** (horizontal durchströmt) zur weiteren Nachreinigung des Abwassers aus der bestehenden Kläranlage.

Wirksamkeit:

Die neuen erreichbaren Zielkonzentrationen wurden über bisherige Ablaufkonzentrationen von Kläranlagen im Spree-Havel-Gebiet und der in der Literatur angegebenen relativen Reinigungsleistung für Abwasserteiche [82, 83] und Bodenfilter [84] abgeschätzt. Die Abwasserteiche können die Nährstoffe um N_{an} = -17% und TP = -10% [82] und Biofilter um N_{an} = -50% und TP = -20% [84] entfernen.

Maßnahme	GK 1		GK 2		GK 3		Quelle
	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	
Abwasserteiche	30,0	6,1	18,0	4,1	17,3	4,5	[82, 83]
Bodenfilter	18,1	5,4	10,8	3,6	10,4	4,0	[84]

Kosten:

Die Kosten für die Maßnahmen beziehen sich auf Hochrechnungen. Für Abwasserteiche wurde das ATV-Handbuch verwendet [85]. Für die Bodenfilter beziehen sich die Daten zu Investitions- und Betriebskostenkosten pro Fläche [86] mit einer angenommenen Fläche von 1 m^2/EW [84]. Angaben zu Investitions- und Betriebskosten sind nicht vorhanden.

Maßnahme	Größenklasse	JK (bezogen auf N) [€/kg N_{elim}]	JK (bezogen auf P) [€/kg P_{elim}]	Quellen
Abwasserteiche	GK 1	14 (12-17)	129 (108-151)	[85]
	GK 2	18 (14-22)	148 (119-178)	[85]
	GK 3	15 (13-17)	103 (88-118)	[85]
Bodenfilter	GK 1	32 (27-37)	426 (362-490)	[86]
	GK 2	49 (41-56)	585 (497-673)	[86]
	GK 3	56 (48-65)	580 (493-668)	[86]

Zusatznutzen/Einschränkungen:

Naturnahe Verfahren können parallel Stickstoff und Phosphor reduzieren. Zusätzlich kann aufgrund der langen hydraulischen Verweilzeit eine Pufferwirkung von Abwasserteichen entstehen, so dass Stoßbelastungen (insbesondere durch NH_4^+ bei Starkregenereignissen) im Teich zurückgehalten werden können.

E Nachgeschaltete Biofilter

	N	P		GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Bodenfilter	X						X	X

Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Nachgeschaltete biologisch aktive Filter können eine zusätzliche Entfernung der Stickstofffracht aus dem bereits gereinigten Abwasser erreichen. Da das gereinigte Abwasser aus der Kläranlage kaum Kohlenstoff enthält, muss für die Denitrifikation Kohlenstoff (z.B. Methanol) dosiert werden. Voraussetzung für den Biofilter ist eine vollständige Nitrifikation in der Belebungsstufe.

Wirksamkeit:

Das hier angegebene ΔN_{an} bezieht sich auf eine Fallstudie für das KW Waßmannsdorf (GK 5) [5]. In diesem Fall wird nur ein Teil des gesamten jährlichen Abwassers (ca. 74%) mit dem Biofilter behandelt (Dimensionierung auf Trockenwetterbehandlung). Die Wirksamkeit für GK 4 Kläranlagen ist bei gleicher Dimensionierung vergleichbar.um N_{an} = -50% und TP = -20% [84] entfernen.

Maßnahme	GK 4		GK 5		Quelle
	ΔN_{an} [mg/L]	ΔTP [mg/L]	ΔN_{an} [mg/L]	ΔTP [mg/L]	
Biofilter (Teilstrombehandlung)	5,0-6,0		5,0-6,0		[5]

Kosten:

Die Kostendaten basieren auf einer Fallstudie für das KW Waßmannsdorf (GK 5) in Berlin [5]. Die Kosten für GK 4 Kläranlagen werden aus den Angaben dieser Fallstudie abgeschätzt (Betriebskosten vergleichbar, spezifische Investitionskosten +25%).

Maßnahme	Größenklasse	Investition [€/kg N_{elim}]	Betrieb [€/kg N_{elim}]	JK [€/kg N_{elim}]	Quellen
Biofilter	GK 4	9,6 (8,6-10,6)	3,5 (3,1-3,8)	13,1 (11,7-14,4)	nach [5]
	GK 5	7,7 (6,9-8,5)	3,5 (3,1-3,8)	11,2 (10,0-12,3)	[5]

Zusatznutzen/Einschränkungen:

Das Reduktionspotential kann über die Filterfläche und die Kohlenstoffdosierung verändert werden. Durch den zusätzlichen Feststoffrückhalt im Biofilter können zusätzlich Phosphor und Schwermetalle aus dem Abwasser zurückgehalten werden. Inwieweit Phosphor dadurch zusätzlich entfernt wird, hängt vom partikulären Anteil der TP-Fracht ab. In der betrachteten Fallstudie [5] ist eine zusätzliche P-Entfernung von ΔTP = 0,16 mg/L (TP_{zu} = 0,47 mg/L, TP_{ab} = 0,31 mg/L) möglich.

F Nachgeschaltete Flockungsfiltration

	N	P		GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Flockung & Sandfilter		X					X	X
Flockung & Mikrosieb		X					X	X
Flockung & Membran		X					X	X

Kurzbeschreibung der Maßnahme:

Für GK 4 und GK 5 Kläranlagen kann eine nachgeschaltete Flockungsfiltration zur weiteren Reduktion von Phosphor genutzt werden. Durch Metallsalze kann aus dem Abwasser Phosphat gefällt und über eine Filtrationsstufe zurückgehalten werden. Die erste Maßnahme berücksichtigt einen **Zweischichtfilter (Sandfilter)**. In der zweiten Maßnahme wird zusätzlich Flockungshilfsmittel (FHM) zugegeben und die Feststoffe mit einem **Mikrosieb (Scheibenfilter)** zurückgehalten. Das dritte Verfahren verwendet ebenfalls FHM, als Filter wird eine **Ultrafiltrationsmembran** verwendet.

Wirksamkeit:

Mit den Maßnahmen kann eine neue Zielkonzentration für Phosphor erreicht werden. Sie basieren auf einer Fallstudie am KW Ruhleben (GK 5) in Berlin mit biologischer P-Entfernung (Bio-P) [87]. Für GK 4 wird die Wirksamkeit angelehnt an [88] angenommen.

Maßnahme	GK 4		GK 4		Quelle
	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	$N_{an,neu}$ [mg/L]	TP_{neu} [mg/L]	
Flockung & Sandfilter		0,3		0,1	[87,88]
Flockung & Mikrosieb		0,3		0,1	[87,88]
Flockung & Membran		0,05		0,05	[87,88]

Kosten:

Die Kosten basieren auf eine Fallstudie zum KW Ruhleben (GK 5) in Berlin [87]. Analog zu [87] sind die Kosten für GK 4 Kläranlage abgeschätzt (vergleichbare Betriebskosten pro m^3, +50% Investitionskosten für Sandfilter [88] und Membran, +30% für Mikrosieb).

Maßnahme	Größen-klasse	Investition [€/kg P_{elim}]	Betrieb [€/kg P_{elim}]	JK [€/kg P_{elim}]	Quellen
Flockung & Sandfilter	GK 4	55 (47-62)	27 (25-30)	82 (71-92)	[87]
	GK 5	104 (89-119)	78 (70-85)	181 (159-201)	[87, 88]
Flockung & Mikrosieb	GK 4	55 (47-62)	27 (25-30)	82 (71-92)	[87]
	GK 5	85 (59-111)	96 (85-107)	181 (144-219)	[87]
Flockung & Membran	GK 4	75 (63-87)	52 (47-57)	127 (111-143)	[87]
	GK 5	173 (147-200)	180 (163-197)	353 (310-397)	[87]

Zusatznutzen/Einschränkungen:

Die Wirksamkeit basiert auf Ergebnissen von Pilotversuchen mit Abwasser aus dem KW Ruhleben mit Bio-P [87]. Bei höheren Konzentrationen von gelöstem nicht-reaktivem P im Abwasser ist die Leistungsfähigkeit der Maßnahmen eingeschränkt. Ist keine Bio-P Stufe in der Belebung vorhanden, ändern sich Filterfläche und Fällmittelverbrauch.

Ökobilanz zu Maßnahmen in Großkläranlagen

Anhand eines Modells für ein Großklärwerk im Raum Berlin mit 1,47 Mio. EW (nicht optimiert) [5], wurden folgende fünf Maßnahmen zur weiteren Stickstoffentfernung miteinander verglichen:

(1) Optimierung der Denitrifikation durch eine bivalente Belüftungszone (optiDN),

(2) Kombination aus Erweiterung der Belebungsbecken und Optimierung der Denitrifikation (erwBB + optiDN),

(3) Nachgeschalteten Biofiltration im Teilstromverfahren (Biofilter, Teilstrom),

(4) Prozesswasserbehandlung über Deammonifikation (PWB Anammox),

(5) Prozesswasserbehandlung über Nitrifikation/ Denitrifikation (PWB Nitri/Deni)

Folgende Ergebnisse können aus dem Vergleich der Maßnahmen durch die Ökobilanz abgeleitet werden (Abbildungen 4-6): eine Optimierung der Denitrifikation (z.B. durch eine bivalente Belüftungszone) erzielt bereits eine relativ hohe N-Frachtreduktion (-32%) bei relativ geringem Energieaufwand und somit geringen Umweltauswirkungen. Die Prozesswasserbehandlung über Deammonifikation besitzt ebenfalls erhebliches Reduktionspotential (-32% N-Fracht) und einen geringen zusätzlichen Strombedarf, ist aber vermutlich durch höhere Emissionen des Treibhausgases N_2O nachteilig für den Treibhauseffekt (Abbildung 6). Der nachgeschaltete Biofilter hat den höchsten Primärenergiebedarf und, durch den hohen Strombedarf und die zusätzliche Dosierung einer Kohlenstoffquelle (Methanol), einen zusätzlichen Treibhauseffekt, bietet aber positive Nebeneffekte für die Ablaufqualität durch die Filtration von Feststoffen und darin enthaltenen Phosphor und Schwermetalle. Im Vergleich mit den anderen Verfahren schneiden die Kombination aus Erweiterung der Belebungsbecken und Optimierung der Denitrifikation sowie die

konventionelle Prozesswasserbehandlung über Nitrifikation/Denitrifikation schlechter ab. Die Ökobilanz hat beim Treibhauspotential durch die grobe Abschätzung der Emissionsfaktoren für N_2O eine hohe Unsicherheit, da dieses Treibhausgas durch seine hohe Wirkung andere Effekte überlagern kann.

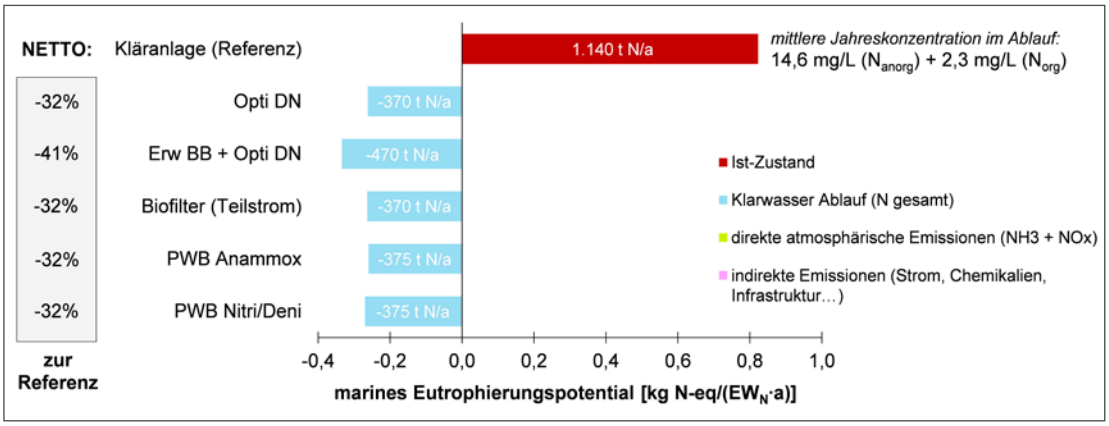


Abbildung 4. marines Eutrophierungspotential über Stickstoffemissionen

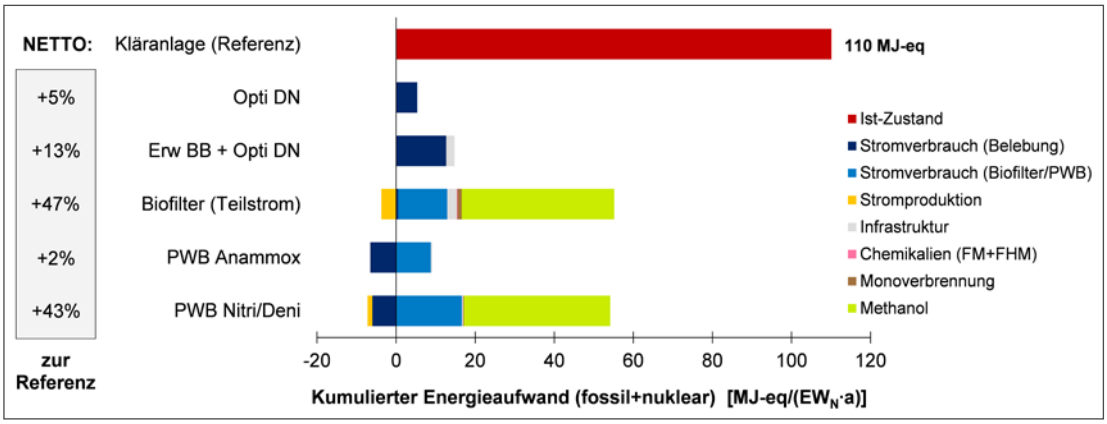


Abbildung 5. Kumulierter Energieaufwand fossiler und nuklearer Primärenergieträger

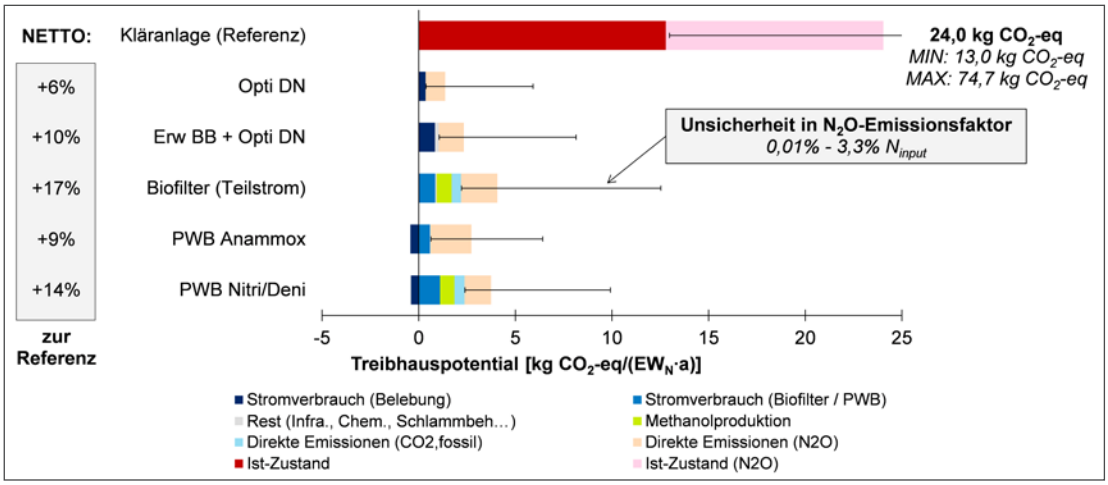


Abbildung 6. Treibhauspotential

Zusammenfassende Bewertung der Maßnahmen

A Zusammenfassende Bewertung der Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung

Maßnahme	Kanal-system *	WIRKSAMKEIT					
		Kenngrößen			Gesamte Frachtreduktion		
		Ψ [-]	η_{TN} [-]	η_{TP} [-]	$\eta_{ges,TN}$ [%]	$\eta_{ges,TP}$ [%]	
Entsiegelung							
Rückbau	M&T	0,1	-	-	88	88	
Flächenumwandlung	M&T	0,2	-	-	76	76	
Dachbegrünung							
Ext. Begrünung, Neubau	M&T	0,6	0,3	-6,4	61	-309	
Ext. Begrünung, Bestand	M&T	0,6	0,3	-6,4	61	-309	
Int. Begrünung, Neubau	M&T	0,3	0,3	-6,4	81	-102	
Int. Begrünung, Bestand	M&T	0,3	0,3	-6,4	81	-102	
Versickerung							
Muldenversickerung	M&T	0	-	-	100	100	
Beckenversickerung	M&T	0	-	-	100	100	
MRV ohne Überlauf	M&T	0	-	-	100	100	
MRV mit Überlauf	M&T	0,03	0,3	0,4	98	98	
Dezentrale Filtersysteme							
Dezentrale Filtersysteme	M&T	1,0	0,3	0,5	32	50	
Maßnahmen im Kanaleinzugsgebiet							
Regenrückhaltebecken (RRB)	(M) T	1,0	0	0	0	0	
HLS (Umbau von RRB)	(M) T	0,9	-	-	0	45	
HLS (Neubau)	(M) T	0,9	-	-	0	45	
Regenüberlaufbecken (RÜB)	M	0,4	0,1	0,1	64	65	
Stauraumkanal	M	0,4	0	0	60	60	
End-of-pipe Maßnahmen							
Regenklärbecken (RKB)	T	1,0	0,2	0,3	22	33	
Retentionsbodenfilter + RKB	(M) T	0,9	0,3	0,7	42	74	

* M = Mischkanalsystem, T = Trennkanalsystem (siehe Einleitung)

Hier sind die Ergebnisse aus den Maßnahmensteckbriefen nebeneinander gestellt. Hierbei sind große Unterschiede zwischen den betrachteten Maßnahmen in Wirksamkeit (neg. – 100 %) und Kosten (0,1 – 12,1 €/m^2 Au/a) zu erkennen.

	KOSTEN				
	Lebens-dauer	Investition	Wartung	JK_{korr}	
	[a]	[€/m^2 Au]	[€/m^2 Au/a]	[€/m^2 Au/a]	Maßnahme
					Entsiegelung
	100	32,0	0,2	3,2	Rückbau
	100/25	62,0	0,1	6,8	Flächenumwandlung
					Dachbegrünung
	40	32,4	1,0	5,3	Ext. Begrünung, Neubau
	100/40	54,7	1,0	7,4	Ext. Begrünung, Bestand
	40	83,2	3,3	10,0	Int. Begrünung, Neubau
	100/40	105,4	3,3	12,1	Int. Begrünung, Bestand
					Versickerung
	25	11,5	0,4	2,2	Muldenversickerung
	25	6,9	0,0	0,6	Beckenversickerung
	25	24,7	0,3	2,8	MRV ohne Überlauf
	25	24,7	0,3	2,8	MRV mit Überlauf
					Dezentrale Filtersysteme
	15	12,8	1,3	5,5	Dezentrale Filtersysteme
					Maßnahmen im Kanaleinzugsgebiet
	60	17,2	0,02	1,5	Regenrückhaltebecken (RRB)
	60	0,9	0,02	0,1	HLS (Umbau von RRB)
	60	18,0	0,02	1,5	HLS (Neubau)
	60	6,1	0,03	0,4	Regenüberlaufbecken (RÜB)
	65	3,2	?	0,2	Stauraumkanal
					End-of-pipe Maßnahmen
	60	10,1	0,1	0,6	Regenklärbecken (RKB)
	60	13,0	0,1	1,1	Retentionsbodenfilter + RKB

Tabelle 2. Wirksamkeit und Kosten der Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung

Kosten:

Ein direkter Vergleich der Maßnahmenkosten ist nicht möglich, da die Auslegung einer Maßnahme je nach Standort sehr unterschiedlich ausfallen kann. Dies wird durch die große Kostenspanne innerhalb der meisten Maßnahmen deutlich (Abbildung 7). Bei einem Vergleich muss auch beachtet werden, dass der Landerwerb in den angegebenen Kosten vernachlässigt wurde. Dieser kann bei allen Maßnahmen, mit Ausnahme der Dachbegrünung und unterirdischer Becken, zu erheblichen Mehrkosten führen. Trotz der eingeschränkten Vergleichbarkeit kann man feststellen, dass in der Investition kostenintensive Maßnahmen wie RBF oder RÜB, bezogen auf die angeschlossene Fläche ähnliche oder geringere Kosten verursachen als dezentrale Maßnahmen, wie beispielsweise die lokale Versickerung oder die Dachbegrünung (Abbildung 7).

Wirksamkeit:

Ein direkter Vergleich der Wirksamkeit der Maßnahmen wird dadurch eingeschränkt, dass die Maßnahmen an sehr unterschiedlichen Ebenen des Einzugsgebietes zum Einsatz kommen und daher unterschiedliche Abflüsse und Nährstoffkonzentrationen antreffen. Dennoch kann verallgemeinernd gesagt werden, dass für eine Reduktion des Abflusses Maßnahmen der Entsiegelung, der Versickerung, der Dachbegrünung und Stauraum im Kanal (bei Mischkanalsystemen) den größten Effekt haben. Bezüglich der Frachtreduktion sind vor allem Maßnahmen der Entsiegelung, der Versickerung sowie End-of-pipe-Maßnahmen vielversprechend.

Anwendungsbeispiel:

Als Hauptanwendung des Kataloges wird die Möglichkeit einer groben Einschätzung von Wirksamkeit und Kosten anhand konkreter Einzugsgebiete gesehen. Die folgende Tabelle 3 zeigt eine solche Anwendung der in den Steckbriefen ausgewiesenen Werte für ein fiktives Einzugsgebiet [4]. In dem spezifischen Fall ist von den drei Maßnahmen der Retentionsbodenfilter die kosteneffizienteste Lösung bezüglich N-Reduktion, die Mulden-Rigolen-Versickerung hingegen die beste Variante bezüglich hydraulischer Entlastung. Bei einer Änderung der Einzugsgebietscharakteristika, wie beispielsweise der Landkosten oder bei einer Berücksichtigung des Mehrwertes der Dachbegrünung für die Hausbesitzer kann der Vergleich komplett anders ausfallen.

Maßnahmen	Reduziertes Volumen	Reduzierte N-Fracht	JK_{korr}	ΔJK_{korr} aus Landewerb	Kosten pro Volumen	Kosten pro Fracht
	m3/a	kg-N/a	k€/a	k€/a	€/m^3	€/kg-N
Ext. Begrünung, Bestand 15 % der A_u	4.968	14	255	0	51	18.721
MRV: 15 % der A_u	12.420	75	97	38	11	1.806
RBF: 80 % der A_u	6.624	167	202	15	33	1.301

Tabelle 3. Anwendungsbeispiel dreier exemplarischer Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung für ein fiktives Einzugsgebiet

[4] Annahmen: Regenwassereinzugsgebiet im Trennsystem mit A_u = 23 ha, Dachflächen = 30 % von A_u, abfließende Regenmenge $h_{NA,eff}$ = 360 mm/a, N-Konzentration am Auslass = 6 mg-N/L, N-Konzentration des Dachabflusses = 1,8 mg-N/L, Landkosten = 200 €/a.

B Zusammenfassende Bewertung der Maßnahmen auf Kläranlagen

In Tabelle 4 und Abbildung 7 sind die möglichen Maßnahmen zu einer weitergehenden Nährstoffreduktion auf Kläranlagen dargestellt.

Berücksichtigt man die Gesamtnährstofffrachten aus dem Einzugsgebiet Spree-Havel in Berlin und Brandenburg (Tabelle 1), ist zu erkennen, dass an den wenigen großen Kläranlagen GK 4 und GK 5 für Phosphor und GK 5 für Stickstoff die höchsten Frachten auftreten. Richtet man also den Fokus auf eine großräumige Planung zur Nährstoffreduzierung im gesamten Einzugsgebiet, so erscheinen Maßnahmen an GK 4 und GK 5 Kläranlagen zielführend, z.B. die vergleichsweise kosteneffiziente Prozesswasserbehandlung für eine Stickstoffreduktion oder nachgeschaltete Maßnahmen für eine zusätzliche Phosphorentfernung. Im Einzelfall muss aber überprüft werden, ob die hier vorgestellten Maßnahmen anwendbar sind und die geforderten Zielkonzentrationen erreichen können. Dabei ist zu beachten, dass bei den GK 5 Kläranlagen das angegebene Reinigungspotential auf jeweils einer Fallstudie beruht.

Auch wenn in der großräumigen Planung am Beispiel des Spree-Havel-Einzugsgebietes der Fokus auf GK 4 und GK 5 Kläranlagen sinnvoll erscheint, wird von der EU-WRRL der „gute ökologische Zustand" bei allen Oberflächengewässern gefordert. Daher ist der Maßnahmenkatalog für die lokale Planungsebene für Kommunen mit GK 1 bis GK 3 Kläranlagen ebenso interessant. Bei den GK 1 bis GK 3 Kläranlagen wird deutlich, dass zunächst die Prüfung einer Betriebsoptimierung sinnvoll erscheint. Werden für GK 1-3 Kläranlagen deutlich geringere Zielwerte als in der AbwV für Stickstoff gefordert, kann aber ein kostenintensiveres nachgeschaltetes Verfahren notwendig sein.

Die Ökobilanz zu den weitergehenden N-Entfernungsmaßnahmen macht deutlich, dass die größten Umweltauswirkungen während des Betriebs der Kläranlage entstehen, die Infrastruktur hat nur einen geringen Anteil an den Auswirkungen. Die Ergebnisse der Ökobilanz spiegeln weitestgehend die Aufwendungen in den Betriebskosten wieder: hoher Strom- und Chemikalienverbrauch = hohe Umweltauswirkungen = hohe Betriebskosten. Insofern ergänzt die ökologische Betrachtungsweise die ökonomischen Aspekte in der Verfahrensauswahl auf Kläranlagen. Zusätzlich können über die zusätzliche jährliche Reduktion der N-Frachten (Abb. 4) mögliche Kostenvorteile bei der zu entrichtenden Abwasserabgabe nach AbwAG abgeschätzt werden.

Maßnahme	GK	Nährstoff:		Neuer Zielwert		Reduktions-potential	
		N	P	$N_{an,neu}$	TP_{neu}	ΔN_{an}	ΔTP
				[mg/L]			
A Betriebsoptimierung							
Betriebsoptimierung	GK 1		X	-	2	-	-
	GK 2	X	X	18	2	-	-
	GK 3		X	-	2	-	-
	GK 4	X	X	18	2	-	-
B Maßnahmen in der Belebung							
Erweiterung N/DN	GK 3	X		10	-	-	-
	GK 4	X		10	-	-	-
	GK 5	X		12	-	-	-
Bivalente Belüftungszone	GK 5*	X		9 – 11	-	-	-
Erweiterung N/DN + Opti.	GK 5*	X		8 – 9	-	-	-
C Prozesswasserbehandlung							
Deammonifikation	GK 4	X		-	-	5 – 6	-
	GK 5	X		-	-	5 – 6	-
Nitrifikation/Denitrifikation	GK 4	X		-	-	5 – 6	-
	GK 5	X		-	-	5 – 6	-
D Nachgeschaltete naturnahe Verfahren							
Abwasserteiche	GK 1	X	X	30	6,1	-	-
	GK 2	X	X	18	4,1	-	-
	GK 3	X	X	17,3	4,5	-	-
Bodenfilter	GK 1	X	X	18,1	5,4	-	-
	GK 2	X	X	10,8	3,6	-	-
	GK 3	X	X	10,4	4	-	-
E nachgeschalteter Biofilter							
Biofilter (Teilstrom)	GK 4	X		-	-	5 – 6	-
	GK 5	X		-	-	5 – 6	-
F nachgeschaltete Flockungsfiltration							
Flockung & Sandfilter	GK 4		X	-	0,3	-	-
	GK 5		X	-	0,1	-	-
Flockung & Mikrosieb	GK 4		X	-	0,3	-	-
	GK 5		X	-	0,1	-	-
Flockung & Membranfilter	GK 4		X	-	0,05	-	-
	GK 5		X	-	0,05	-	-

* GK 5 Kläranlage mit $V_D/V_{BB} < 0,4$; InvK = Investitionskosten; WK = Wartungskosten; JK = Jahreskosten

Kostenbezug: Stick-stoff			Kostenbezug: Phos-phor			Maßnahme
InvK	WK	JK	InvK	WK	JK	
[€/kg N_{elim}]			[€/kg P_{elim}]			
						Betriebsoptimierung A
-	-	-	-	-	100	Betriebsoptimierung
-	-	4	-	-	35	
-	-	-	-	-	20	
-	-	1,9	-	-	20	
						Maßnahmen in der Belebung B
-	-	28,9	-	-	-	Erweiterung N/DN
-	-	24,3	-	-	-	
40,3	9,4	49,7	-	-	-	
1,8	0,9	2,7	-	-	-	Bivalente Belüftungszone
11,2	2,4	13,6	-	-	-	Erweiterung N/DN + Opti.
						Prozesswasserbehandlung C
3	0,7	3,7	-	-	-	Deammonifikation
2,4	0,7	3,1	-	-	-	
3	2,3	5,3	-	-	-	Nitrifikation/Denitrifikation.
2,4	2,3	4,7	-	-	-	
						Nachgeschaltete naturnahe Verfahren D
-	-	14	-	-	129	Abwasserteiche
-	-	18	-	-	148	
-	-	15	-	-	103	
-	-	32	-	-	426	Bodenfilter
-	-	49	-	-	585	
-	-	56	-	-	580	
						nachgeschalteter Biofilter E
9,6	3,5	13,1	-	-	-	Biofilter (Teilstrom)
7,7	3,5	11,2	-	-	-	
						nachgeschaltete Flockungsfiltration F
-	-	-	55	27	82	Flockung & Sandfilter
-	-	-	104	78	181	
-	-	-	55	27	82	Flockung & Mikrosieb
-	-	-	85	96	181	
-	-	-	75	52	127	Flockung & Membranfilter
-	-	-	173	180	353	

Tabelle 4. Wirksamkeit und Kosten der Maßnahmen auf Kläranlagen

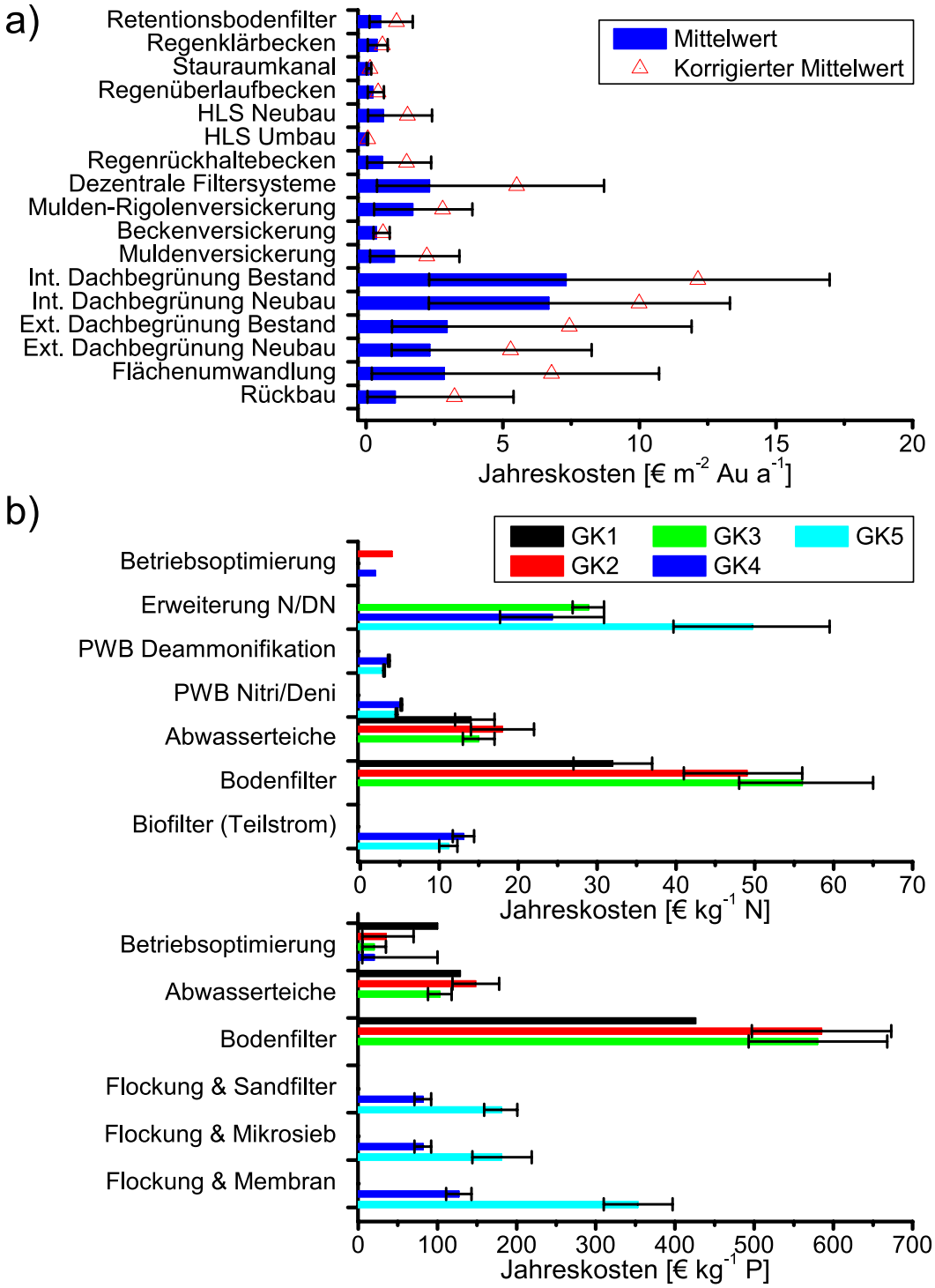


Abbildung 7: Kosten der Maßnahmen, (a) Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung, (b) weiterführende Reinigung am Klärwerk

Ausblick

Das vorliegende Diskussionspapier weist das Potenzial von urbanen Maßnahmen für die Reduktion von Nährstofffrachten in Oberflächengewässer aus. Als nächster logischer Schritt sollten an konkreten Beispielen die Auswirkungen durch bereits in der Vergangenheit umgesetzte Maßnahmen auf urbane Gewässer untersucht werden.

Die betrachteten Maßnahmen können neben der Reduktion von Nährstofffrachten auch weitere Entlastungen für die Gewässer mit sich bringen. Neben einer Erweiterung der stofflichen Betrachtung (z.B. auf organische Spurenstoffe oder Schwermetalle) für alle Maßnahmen ist für Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung zusätzlich die Reduktion von Abflussspitzen während Starkregenereignissen elementar für den Schutz von Oberflächengewässern.

Die Effekte der Maßnahmen gehen aber weit über das Gewässer hinaus, was durch die exemplarisch durchgeführte Ökobilanz für ein GK5 Klärwerk angedeutet wurde. Zum einen sollte die Ökobilanzierung auch für weitere Maßnahmen durchgeführt werden. Zum anderen ist insbesondere bei den Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung auch eine Abwägung der Umwelteffekte gegenüber Effekten auf die Bewohner und ökonomischen Veränderungen für eine strategische Planung notwendig.

Danksagung

Herzlichen Dank für die freundliche Kooperation mit den Berliner Wasserbetrieben. Die Arbeiten des KWB wurden neben der Finanzierung durch das BMBF durch die Berliner Wasserbetriebe finanziell unterstützt.

Literatur

1. Fuchs, S., et al., 2010. *Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS.*, Umweltbundesamt (UBA): Dessau-Roßlau.
2. Osterburg, B. und T. Runge, 2007. *Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer - eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie*, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL): Braunschweig.
3. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser LAWA, 2005. *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)*. Vol. 7. Auflage. Berlin: Kulturbuchverlag.
4. Karl, H., et al., 2006. *Identifizierung der kosteneffizienten Maßnahmen bezüglich der Gewässerbelastung mit Schadstoffen zur Erfüllung der EG-Wasserrahmenrichtlinie unter Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen - Beispiel Rur*, Ruhr Universität Bochum.
5. BWB-GI, 2013. *Kommunikation mit BWB-GI (Grundlagenplanung und Investition) zu weitergehenden Stickstoffeliminierungsverfahren gemäß vorliegender Simulationsmodellierungen zum Klärwerk Waßmannsdorf in Berlin, Bearbeitungsstand Juni 2013*.
6. DWA, 2006. *Bemessung von Regenrückhalteräumen*.
7. ATV, 2000. *Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser*.
8. Rheinisch Bergischer Kreis. *Regenwasser - Versickerung, Nutzung, Bodenentsiegelung*, Wasser und Abfallwirtschaft Umweltvorsorge.
9. Regierungspräsidium Karlsruhe, 2003. *Naturverträgliche Regenwasserbewirtschaftung*.
10. Herzer, P., 2004. *Einflüsse einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung auf den Städtebau - Räumliche, ökonomische und ökologische Aspekte*: Frauenhofer IRB Verlag.
11. Kipgen, R. *Leitfaden zum Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten Luxemburgs*.
12. Gaßner, H., 2001. *Anforderungen an die Wiederherstellung von Bodenfunktionen nach Entsiegelung - Rechtliche und bodenfachliche Rahmenbedingungen für eine Entsiegelungsverordnung*, Umweltbundesamt.
13. Schrader, R., et al., 2003. *Kostendateien für Ersatzmaßnahmen im Rahmen der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung*, Thüringer Ministerium für Landwirtschaft Naturschutz und Umwelt, Editor.
14. Bracke, R. und C. Klümpen, 2005. *Leistungsbuch Altlasten und Flächenentwicklung 2004 / 2004*, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen.
15. Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2008. *Entsiegeln und Versickern - Leitfaden für den Wohnbau*.
16. Senatsverwaltung Berlin, 2002. *Maßnahmenkatalog - Reduzierung der Wasserkosten im öffentlichen Bereich*, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung.
17. Böhm, E., H. Hiessl, und T. Hillenbrand, 2002. *Auswirkungen der Wassertechnologie-Entwicklungen auf Wasserbedarf und Gewässeremissionen im deutschen Teil des Elbegebietes*: Karlsruhe.
18. Sieker, H., 2001. *Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten* Darmstadt.
19. Stadt Siegen, 2006. *Versickern statt Versiegeln*, Abteilung Umwelt.
20. MLUR, 2001. *Leitfaden zur umweltverträglichen und kostengünstigen Regenwasserbewirtschaftung in Brandenburg*, Ministerium für Landwirtschaft Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg.
21. Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2005. *Regenwasserversickerung - Gestaltung von Wegen und Plätzen*.
22. Sieker, 2007. *ECO.RWB Software für die Regenwasserbewirtschaftung*.
23. Kampfmüller, M. und J. Hloch, 2008. *Wege zur Natur im Siedlungsraum - Grundlagenstudie*, Amt der Oö. Landesregierung.
24. Heitker GmbH Lingen. *Innovative Regenwasser-Entwässerungssysteme für die nachhaltige und zukunftsorientierte Wasserwirtschaft*. 2012.
25. Sieker, F., P. Schlottmann, und U. Zweynert, 2007. Ökologische und Ökonomische Vergleichsbetrachtung zwischen der konzeptionellen Regenwasserentsorgung und dem Konzept der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung, Umweltbundesamt.
26. Senatsverwaltung Berlin, 2010. *Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung - Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung - Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung*, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung.
27. Berndtsson, J.C., L. Bengtsson, und K. Jinno, 2009. *Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs.* Ecological Engineering. **35**(3): 369-380.

28. Chen, C.F., 2013. *Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review.* Ecological Engineering. **52**: 51-58.
29. Gregoire, B.G. und J.C. Clausen, 2011. *Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality.* Ecological Engineering. **37**(6): 963-969.
30. Zimmerman, M.J., et al., 2010. *Effects of low-impact-development (LID) practices on streamflow, runoff quantity, and runoff quality in the Ipswich River Basin, Massachusetts: A summary of field and modeling studies.* US Geological Survey Circular. (1361): 6-41.
31. Schmidt, M., 2000. *Dachbegrünung als Ausgleichs- und Ersatzmaßnahme zur Flächenversiegelung*. Infoforum Regenwassermanagement. Geoagentur Berlin Brandenburg.
32. Henze, M., 1999. *Regenwassermanagement - natürlich mit Dachbegrünung*.
33. Rüngeler, S., 1998. *Die Funktion von Dachbegrünungen in urbanen Wasserkreisläufen*, Technische Universität Berlin.
34. Emscher Genossenschaft. *Dachbegrünung*. 2012.
35. Fachvereinigung Bauwerksberünung e.V. *Grüne Innovation Dachbegrünung*.
36. Gantner, K., 2002. *Nachhaltigkeit urbaner Regenwasserbewirtschaftungsmethoden*, Technische Universität Berlin. p. 277.
37. Hämmerle, F. *Die Wirtschaftlichkeit von Gründächern aus Sicht des Bauherrn - Eine Kosten-Nutzen-Analyse*.
38. Senatsverwaltung Berlin, 2011. *Leitfaden für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen*, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung.
39. Stadt Plettenberg, 2009. *Umweltbericht zum Bebauungsplan Nr. 647 „Twersbrauck"*, Stadt- und Umweltplanung.
40. Umweltberatung Wien, 2009. *Leitfaden für die Dachbegrünung*.
41. Verband für Bauwerksbegrünung. *Grundlagen der Dachbegrünung*.
42. DWA, 2005. *Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser*.
43. Fuchs, S., 2010. *Studie zur Effizienz von Maßnahmen der Regenwasserbehandlung in Berlin*, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie: Berlin. p. 59.
44. Ney, A., 2003. *Naturnahe Aufbereitung von gereinigtem Abwasser zur Vitalisierung von Fließgewässern und Auen und zur Effizienzsteigerung der Abwasserbehandlung*, Universität Trier.
45. Sommer, H., 2007. *Behandlung von Straßenabflüssen, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie.* Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität Hannover.
46. Londong, D. und A. Nothnagel, 1999. *Bauen mit Regenwasser - Aus der Praxis von Projekten*: München.
47. Stadt Dresden. *Mit Regenwasser Wirtschaften - Ausschnitt aus dem Praxisratgeber des Umweltamtes*.
48. Pfeffermann, A.-L., 2011. *Management of Stormwater on Highways*, Hochschule RheinMain, Wiesbaden.
49. Sommer, H. und N. Nikisch, 2009. *Untersuchungen zur Funktion und Leistungsfähigkeit eines nachrüstbaren Straßenablauffilters.* KA Abfall. **56**(2): 158-163.
50. Funke Kunststoffe GmbH, 2012. *Regenwasserbewirtschaftung*.
51. Ellerhorst, S., 2011. *Praktiksche Anwendung des Trennerlasses am Beispiel einer Kommune in NRW*. BEW-Seminar „Beseitigung von Niederschlagswasser".
52. Berliner Wasser Betriebe (BWB), 2012. *Restenlastungsfaktoren*, persönliche Mitteilung.
53. Grotehusmann, D., 2010. *RBF Halensee, Inbetriebnahme und Messtechnische Begleitung - Schlussbericht*.
54. ATV, 1992. *Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen, ATV-A 128*. p. 105.
55. Heinzmann, B., 1993. *Studie Regenüberlaufbecken Urbanstraße*, unveröffentlichte Daten, Berliner Wasserbetriebe.
56. Brunner, P.G., 1997. *Wirtschaftliche Aspekte bei Gestaltung, Konstruktion und Ausrüstung von Regenbecken*, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
57. Dobner, I. und J.-U. Holthuis, 2011. *Praxiserprobung und technische Optimierung eines neuartigen Hochleistungs-Pflanzenfilterverfahrens zur Behandlung belasteter Niederschlagswässer*, Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien (UFT), Bremen.
58. DWA, 2004. *Abkopplungsmaßnahmen in der Stadtentwässerung Teil IV: Auswirkungen von Abkopplungsmaßnahmen auf die Gewässerbelastung aus Mischwasserkanalisationen*.

59. Grotehusmann, D. und U. Kasting, 2009. *Vergleich der Reinigungsleistung von Retentionsbodenfiltern und Versickerwungsanlagen an Bundesfernstraßen*, Hannover.
60. Kasting, U., 2002. *Reinigungsleistung von zentralen Anlagen zur Behandlung von Abflüssen stark befahrener Straßen*, Kaiserslautern.
61. Berliner Wasser Betriebe (BWB), 2012. *Kostenschätzung Hochleistungssedimentation*, persönliche Mitteilung.
62. Berliner Wasser Betriebe (BWB), 2012. *Kosten der Maßnahmen im Mischsystem*, persönliche Mitteilung.
63. Grossmann, M. *Analyse der Kosten- und Kostenwirksamkeit von Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge und -frachten in Flussgebieten mit dem MONERIS Modell*.
64. Joswig, K., 2010. *Entlastung des Mischwassersystems in Berlin - Vorstellung von Projekten zur Erschließung von Stauraum*.
65. Namutz, M., 2006. *Pilotprojekt „Retentionsbodenfilter Hartum"*.
66. Stotz, S. und B. Haller, 2002. *Nährstoffeinträge durch Mischwassereinleitungen in Gewässer.* GWF Wasser Abwasser. 143(1).
67. AQUAROC, 2010. *Retention zu niedrigen Kosten - Einführung und Ergebnis*.
68. Waldhoff, A., 2008. *Hygienisierung von Mischwasser in Retentionsbodenfiltern (RBF)*, Universität Kassel: Kassel.
69. Wassmann, H., 2007. *Regenwasserbewirtschaftung in Berlin*. 13. Berliner Wasserwerkstatt. Berlin.
70. Dittmer, U., 2006. *Prozesse des Rückhaltes und Umsatzes von Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen in Retentionsbodenfiltern zur Mischwasserbehandlung*, Technische Universität Kaiserslautern. p. 193.
71. Feil, M., 2011. *Maßnahmen zur Einhaltung der WRRL: Stickstoffentfernung*, Technische Universität Berlin.
72. Berliner Wasserbetriebe (BWB), 2012. *Regenwasserbehandlungsmaßnahmen ab 2000*, unveröffentlichte Daten.
73. Brunner, P.G., 2002. *Bodenfilter zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem*, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
74. Grüning, H. und H. Hoppe, 2001. *Vergleichende Untersuchungen zu Regenklärbecken und Filtersystemen*.
75. Mertsch, V., 2003. *Handbuch Retentionsbodenfilter*, Ministerium für Umwelt und Naturschutz Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen.
76. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2012. *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer*, Deutschland.
77. LUGV, 2011. *Optimierungspotentialen an Kommunalen Kläranlagen in Brandenburg, Studie im Auftrag des LGUV vom Büro Born-Ermel + Büro PWU Magdeburg*.
78. DWA, 2002. *Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*, GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., Hennef.
79. Siewert, S., 2010. *Die Ermittlung kosteneffektiver Maßnahmen zur Reduktion von Nährstoffemissionen aus Kläranlagen im Einzugsgebiet der Oder, Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)*, Berlin.
80. Bäumer, K.A., 1998. *Mehrkosten in der Abwasserentsorgung aufgrund von Forderungen zur weitergehenden Abwasserreinigung für kommunale Kläranlagen*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
81. Janke, H.D., 2002. *Umweltbiotechnik*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
82. Barjenbruch, M., 2007. *Abwasserreinigung im ländlichen Raum, Vorlesung an der TU Berlin*.
83. DWA, 2005. *Arbeitsblatt DWA-A 201, Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Abwasserteichanlagen,*: Hennef.
84. DWA, 2006. *Arbeitsblatt DWA-A 262: „Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit bepflanzten Bodenfiltern zur biologischen Reinigung kommunalen Abwassers"*, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Hennef.
85. ATV, 1985. *Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik. Band IV: Biologisch-chemische und weitergehende Abwasserreinigung* Berlin: Ernst-Verlag.
86. Sieker. *Abschätzung für Investitionskosten und Betriebskosten von Bodenfiltern*. 2001 24/06/2013]
87. KWB, 2013. *OXERAM 2 Projektbericht, Veröffentlichung im Laufe des Jahres 2013, Im Auftrag von BWB, Veolia und Berliner Senat (UEP2)*, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH.
88. Barjenbruch, M., 1997. *Leistungsfähigkeit und Kosten von Filtern in der kommunalen Abwasserreinigung*, Universität Hannover.

Gestaltung: www.quadraflex.de

Weitere Informationen finden Sie unter:

www.nitrolimit.de

www.fona.de