



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Strassen ASTRA**  
**Bundesamt für Umwelt BAFU**

**DOKUMENTATION**

# **STRASSENABWASSER BEHANDLUNGSVERFAHREN**

*Stand der Technik*

---

*Ausgabe 2021 V2.00*  
*ASTRA 88002*

# Impressum

## **Autoren/Arbeitsgruppe**

Marguerite Trocmé	(ASTRA Abt. N. SSI, Vorsitz)
Paul Burch	(ASTRA Abt. I, F3)
Michele Steiner	(wst21, Zürich (Leitung, Bericht))
Patrice Goosse	(wst21, Zürich)
Walter Osterwalder	(ilu AG, Uster)
René Brodmann	(Holinger AG, Liestal)
Elmar Scheiwiller	(GE 1, Kanton Bern)
Patrick Fischer	(BAFU)

## **Begleitungsgruppe**

Reto Battaglia	(AWA Kt. Bern)
Vincent Gorgé	(ASTRA Abt I, F1)
Christian Krismer	(GE VII, Kt. Zürich)
Patrick Lochmatter	(ASTRA Abt. I, F2)
Simon Metzger	(ASTRA Abt. I, F4)
Françoise Okopnik	(ASTRA Abt I, FU)
Philipp Stauer	(AfU Kt. Solothurn)

## **Übersetzung**

(Originalversion in Deutsch)

## **Herausgeber**

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA  
Abteilung Strassennetze N  
Standards und Sicherheit der Infrastruktur SSI  
3003 Bern

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Umwelt BAFU  
3003 Bern

## **Bezugsquelle**

Das Dokument kann kostenlos von [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) oder [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) heruntergeladen werden.

© ASTRA 2021

Abdruck – ausser für kommerzielle Nutzung – unter Angabe der Quelle gestattet.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>5</b>
	<b>Résumé .....</b>	<b>8</b>
	<b>Sintesi.....</b>	<b>11</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>14</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Zweck des Dokuments .....</b>	<b>17</b>
1.2	Adressaten .....	17
1.3	Inkrafttreten .....	17
<b>2</b>	<b>Strassenabwasserbehandlung .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Ausgangslage, Ziele und Fragestellung .....</b>	<b>18</b>
2.2	Schadstoffe im Strassenabwasser.....	19
2.3	Prozesse der Schadstoffentfernung.....	20
2.4	Beschreibung der Behandlungsverfahren.....	20
2.5	Fremdwasser.....	23
2.6	Projektierung von SABA.....	23
<b>3</b>	<b>Methodik.....</b>	<b>25</b>
3.1	Systembeschreibung.....	25
3.2	Beurteilung der Schadstoffentfernung .....	26
3.3	Leistungsbeurteilung: Behandlungsverfahren, SABA .....	26
3.3.1	Kriterien zur Leistungsbeurteilung.....	26
3.3.2	Leistungsklassen.....	27
3.3.3	Vergleich Leistungsklassen mit gesetzlichen Vorgaben (Schadstoffe) .....	28
3.3.4	Datengrundlage.....	29
<b>4</b>	<b>Datenanalyse .....</b>	<b>30</b>
4.1	Schadstoffentfernung .....	30
4.1.1	Ergebnisse .....	30
4.1.2	Zusammenfassung und Anforderungsstufen .....	32
4.2	Hydraulische Leistung und Flächenbedarf.....	33
4.3	Investitionskosten, Unterhaltskosten, Unterhalt.....	35
<b>5</b>	<b>Vergleich der Verfahren.....</b>	<b>39</b>
5.1	Anforderung erhöht .....	39
5.1.1	Bewachsener Sandfilter mit Bodenfilter und Strassenschulter .....	39
5.1.2	Vergleich Sandfilter mit Eisenhydroxid RFB .....	40
5.1.3	Empfehlung Anforderung erhöht.....	40
5.2	Anforderung standard .....	41
5.3	Anforderung erleichtert.....	43
5.3.1	Absetzbecken im Dauerstau und bewirtschaftete Absetzbecken .....	43
5.3.2	Vergleich von Absetzbecken mit und ohne Lamellen .....	43
5.3.3	Vergleich Absetzbecken mit Polstofffilter und Schnellfilter .....	44
5.3.4	Vergleich Absetzbecken mit dezentralen, technischen Verfahren.....	45
5.3.5	Empfehlung Anforderung erleichtert .....	46
5.4	Erkenntnisse für SABA.....	46
<b>6</b>	<b>Stand der Technik 2021 .....</b>	<b>48</b>
6.1	Empfehlungen .....	48
6.1.1	Anforderung erhöht .....	48
6.1.2	Anforderung standard .....	49

6.1.3	Anforderung erleichtert.....	49
6.1.4	Optimierung und Abklärungen von Verfahren.....	49
6.2	Weitere Verfahren .....	50
6.3	Behandlungsverfahren und Gewässerbelastung .....	50
<b>7</b>	<b>Folgerungen.....</b>	<b>51</b>
	<b>Anhänge .....</b>	<b>52</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>99</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>100</b>
	<b>Änderungsverzeichnis.....</b>	<b>103</b>

## Zusammenfassung

Die Schadstoffentfernung aus Strassenabwasser soll möglichst wirksam, robust und einfach zu betreiben sein und einen geringen Flächenbedarf aufweisen. Ebenso sollen die Investitions- und Unterhaltskosten tief sein.

Um herauszufinden, welche Verfahren diese Ansprüche am besten erfüllen, wurden während der letzten 20 Jahre von ASTRA, Kantonen und Städten viele, auch neuartige, Behandlungsverfahren eingesetzt und geprüft. Dasselbe geschah im Ausland. Heute steht somit eine breite Datenbasis zur Beurteilung der Verfahren zur Verfügung.

Die Beurteilung der unterschiedlichen Ansprüche an Behandlungsverfahren erfolgt mit den Kriterien in folgender Liste. Diese sind jeweils anhand einer fünfstufigen Skala klassiert, mit fünf als beste und eins als schlechteste Wertung (Tab. 1.1).

Schadstoffentfernung	Frachtgemittelte Ablaufkonzentrationen von GUS, Kupfer und Zink.
Flächenbedarf	Pro Hektare Strassenfläche benötigte Fläche einer SABA inklusive Umschwung, Bauwerken und Böschungen.
Einfacher Unterhalt	Erfahrungen der Unterhaltsdienste zum Unterhalt von SABA (qualitativ).
Unterhaltskosten	Jährliche Kosten für den Unterhalt einer SABA pro Hektare angeschlossene Strassenfläche (CHF/ha/Jahr).
Investitionskosten	Gesamtkosten einer SABA pro angeschlossene Strassenfläche (CHF/ha).

Tab. 1.1 Zuordnung der numerischen Werte der Kriterien zu den Leistungsklassen.

Leistungs- klasse	Ablaufkonzentration			Flächenbedarf SABA	Einfacher Unterhalt	Kosten	
	GUS	Kupfer	Zink			Unterhalt	Investi- tion
	mg/l	ug/l	ug/l	m <sup>2</sup> /ha	-	CHF/ha/Jahr	CHF/ha
5	≤10	≤ 5	≤10	≤ 60	5	≤ 700	≤150'000
4	≤20	≤10	≤20	≤120	4	≤1'400	≤200'000
3	≤30	≤15	≤30	≤180	3	≤2'100	≤250'000
2	≤40	≤20	≤40	≤240	2	≤2'800	≤300'000
1	>40	>20	>40	>240	1	>2'800	>300'000

Die Ergebnisse sind für die Schlüsselkriterien in Tab. 1.2 zusammengestellt. Sie zeigen, dass es aus Sicht der Schadstoffentfernung drei Gruppen gibt, welche GUS, Kupfer und Zink unterschiedlich gut zurückhalten. Diese drei Gruppen sind in Tab. 1.2 den bereits bestehenden Anforderungsstufen zugeordnet [9]. Anhand der weiteren Kriterien ergeben sich die für jede Anforderungsstufe empfohlenen Verfahrenstypen.

### Anforderung **erhöht**

Die Anforderung **erhöht** umfasst Behandlungsverfahren, welche bei der Ablaufkonzentration von GUS die Klasse 5 und bei Kupfer und Zink die Klasse 4 und 5 erreichen. Empfohlen werden mit erster Priorität die Versickerung in die Strassenschulter sowie Mulden-Rigolen, falls die notwendige Fläche zur Verfügung steht. Sonst ist der bewachsene Sandfilter die erste Wahl. Dieser benötigt im Vergleich zu Bodenfiltern weniger Fläche und ist im Unterhalt kostengünstiger. Bodenfilter werden nur noch bedingt empfohlen, nämlich für Retentionsfilterbecken ohne Abdichtung. Solche Versickerungsbecken haben jedoch den Nachteil, dass die Kontrolle des behandelten Strassenabwassers schwierig ist. SABA mit Retentionsfilterbecken mit einer Eisenhydroxidschicht werden wegen höherer Unterhalts- und Investitionskosten sowie des grösseren Flächenbedarfs nicht mehr empfohlen.

Die Vorbehandlung des bewachsenen Sandfilters erfolgt im Vergleich zur heutigen Dimensionierung mit einem deutlich kleineren Absetzbecken, das wie bisher das vorgeschriebene

Störfallvolumen gewährleistet. Eine Optimierungsmöglichkeit des bewachsenen Sandfilters bezüglich des Flächenbedarfs besteht möglicherweise darin, die Flächenbelastung zu erhöhen. Ob sich dadurch die Unterhaltskosten erhöhen würden, müssten langfristige Untersuchungen an bestehenden SABA zeigen.

**Anforderung standard**

Die Anforderung **standard** beinhaltet den Splitt-Kiesfilter als einziges Verfahren. Dieser erzielt bei der GUS-Ablaufkonzentration die zweithöchste Leistungsklasse 4. Im Vergleich zur Anforderung **erhöht** sind die Leistungsklassen von Kupfer um zwei und diejenige von Zink um drei bis vier Klassen tiefer. Bei Zink wird die Leistungsklasse 2 knapp verfehlt.

Beim Splitt-Kiesfilter ist zu klären, ob der Flächenbedarf tatsächlich geringer ist als derjenige eines bewachsenen Sandfilters. Ist dies nicht der Fall, ist der bewachsene Sandfilter zu bevorzugen. Ebenso sind die Investitionskosten im Vergleich zum bewachsenen Sandfilter zu prüfen. Ist bei Projekten gemäss Anforderung **standard** genügend Fläche vorhanden, kann unabhängig von der Anforderung ein bewachsener Sandfilter projektiert werden.

Tab. 1.2 Beurteilung der Verfahren gemäss Anforderung. Die empfohlenen Verfahren sind dunkelblau, die bedingt empfohlenen Verfahren hellblau eingefärbt. strd=standard. (\*)Hohe Leistungsklasse infolge Nutzung vorgelagerter und bestehender Bauwerke.

Stufe	Verfahren	Konzentrationen			Flächenbedarf SABA	Unterhalt		Invest. Kosten
		GUS	Kupfer	Zink		Kosten	Einfach	
erhöht	Schulter, Mulden-Rigolen	5	4	4	5	5	5	5
	Bewachsene Sandfilter	5	4	5	2	4	5	4
	Bewachsener Bodenfilter	5	4	4	1	3	4	3
	RFB mit Eisenhydroxid	5	4	4	3	3	3	3
strd	Splitt-Kiesfilter	4	2	1	3	3	3	5
erleichtert	Absetzbecken Dauerstau	4	1	1	4	4	5	4
	Polstofffilter	4	1	1	3	1	2	1
	Schnellfilter	4	1	1	5(*)	2	1	3(*)
	Poröser Filter	1	1	1	5	1	1	1
	Dezentrale schachtbasierte Systeme	3-4	1	1	5	1	2-4	4
neu	Poröser Asphalt (unklar)	1-5	1-3	1-3	5	5	5	5

**Anforderung erleichtert**

Der Anforderung **erleichtert** sind Verfahren zugeordnet, welche bei GUS meistens Ablaufkonzentrationen der Klasse 4 erzielen, jedoch bei Kupfer und Zink nur Klasse 1 erreichen. Für die Anforderung **erleichtert** wird das Absetzbecken betrieben im Dauerstau empfohlen, da es im Vergleich zu den anderen Verfahren deutlich geringere Unterhalts- und Investitionskosten ermöglicht und da der Unterhalt einfacher ist. Lamellen in Absetzbecken werden nicht mehr empfohlen, da sie im Vergleich zur geringen Wirkung hohe Unterhaltskosten bewirken.

Bedingt empfohlen wird der Polstofffilter, beispielsweise bei schwieriger Topographie. Beim Polstofffilter kann durch den Einsatz eines feineren Gewebes und beim Schnellfilter mit einer veränderten Verfahrensführung eventuell eine Verbesserung der Schadstoffentfernung erzielt werden. Allerdings bleiben die hohen Unterhalts- und Investitionskosten sowie der anspruchsvolle Unterhalt bestehen. Dezentrale Schachtsysteme brauchen zwar am wenigsten Fläche, bewirken allerdings sehr hohe Unterhaltskosten. Sie sind deshalb nur dort einzusetzen, wo andere Lösungen nicht verhältnismässig sind.

### Schadstoffentfernung und Flächenbedarf

Die Ergebnisse zeigen, dass die Reinigungsleistung der empfohlenen Verfahren hauptsächlich vom Flächenbedarf und nicht von den Investitions- oder den Unterhaltskosten abhängig ist. Damit zeichnen sich insbesondere bei der Anforderung *erhöht* Nutzungskonflikte ab. Ist die Fläche vor Ort nicht vorhanden, muss Strassenabwasser gepumpt werden, was die Kosten erhöht. Technische SABA sind für diesen Nutzungskonflikt keine Lösung, da sie anderes als erwartet nur die Anforderungsstufe *erleichtert* erzielen und zudem einen relativ hohen Flächenbedarf aufweisen. Bei zu geringer oder nicht geeigneter Fläche kann die Anforderungsstufe *erhöht* nur erreicht werden, wenn Strassenabwasser an einen anderen Standort gepumpt wird, was Abklärungen zur Verhältnismässigkeit erforderlich macht.

### Fremdwasser

Fremdwasser ist mehr oder weniger stetig anfallendes, nicht verschmutztes Wasser, welches in die Kanalisation zu einer SABA eingeleitet wird. Die Ursachen von Fremdwasser sind Drainagen, Bäche, Überläufe aus Pumpenwerken zur Absenkung von Grundwasser, Brunnenabläufe und weitere.

Fremdwasser sollte unbedingt vor der SABA separat gefasst und abgeleitet werden, da es bei jedem SABA-Typ Probleme verursacht. Dazu sind bereits in der Projektierung die entsprechenden Abklärungen zu treffen, was auch eine Messung des pH-Werts umfassen kann. Ist eine Abtrennung nicht möglich, muss Fremdwasser spätestens im Einlaufbauwerk mit einer Fremdwasserweiche abgetrennt werden. Dabei ist zu gewährleisten, dass Leichtflüssigkeiten zurückgehalten werden (Havarie, Störfall).

### Behandlungsverfahren und Gewässerbelastung

Behandlungsverfahren der Anforderung *erhöht* können GUS, Schwermetalle und PAK wirkungsvoll aus dem Strassenabwasser entfernen. Die erzielbaren Ablaufkonzentrationen unterschreiten die Anforderungen an Fliessgewässer für Schwermetalle sowie die Einleitbedingung von GUS bezüglich kommunaler Abwasserbehandlung. Auch Reifenabrieb wird mit solchen Verfahren zu über 90 % zurückgehalten.

### Ausblick

Heute können für jede Anforderungsstufe eines oder zwei Behandlungsverfahren empfohlen werden, was den Vollzug des Gewässerschutzes vereinfacht. Bei einzelnen Verfahren gibt es eventuell Verbesserungsmöglichkeiten und wenige, noch nicht geprüfte, Verfahren gilt es zukünftig zu untersuchen. Dennoch kann gesagt werden, dass die Möglichkeiten und Grenzen der Strassenabwasserbehandlung heute grösstenteils bekannt sind.

Einer der wichtigsten Aspekte ist die benötigte Fläche, welche künftig schwieriger zu finden sein wird, beziehungsweise Nutzungskonflikte bewirken kann. Damit die empfohlenen Verfahren zweckmässig und kosteneffizient eingesetzt werden können, ist die Projektierung der Strassenentwässerung, inklusive der Unterhaltsaspekte, von zentraler Bedeutung.

## Résumé

Le traitement des eaux de chaussée polluées doit pouvoir être assurée de manière aussi efficace, robuste et simple que possible tout en occupant une surface limitée. De même, les frais d'investissement et d'entretien doivent restés équilibrés.

Afin de déterminer les procédures qui répondent le mieux à ces exigences, l'OFROU, les cantons et les villes ont mis en œuvre et examiné des nombreuses méthodes de traitement, et souvent innovantes, au cours de ces 20 dernières années. Beaucoup de travaux ont aussi eu lieu à l'étranger. On dispose donc aujourd'hui d'une vaste base de données permettant d'évaluer ces méthodes.

Les diverses exigences imposées aux méthodes de traitement sont évaluées à l'aide des critères de la liste ci-après. Ceux-ci sont classés selon une échelle à cinq niveaux, où cinq représente la meilleure note et un la moins bonne (tab. 1.1).

Élimination des polluants	Moyenne en fonction des volumes transportés de la concentration de sortie des MES, du cuivre et du zinc.
Surface requise	Superficie requise pour une SETEC par hectare de superficie de route, y compris alentours, ouvrages et talus.
Entretien simple	Expériences des services d'entretien concernant l'entretien du SETEC (critère qualitatif).
Coûts d'entretien	Coûts annuels d'entretien d'un SETEC par hectare de superficie de route raccordée (CHF/ha/an).
Coûts d'investissement	Coûts totaux d'un SETEC par superficie de route raccordée (CHF/ha).

Tab. 1.1 Attribution des valeurs numériques des critères aux classes de performances.

Classe de performances	Concentration de sortie			Surface requise SETEC	Entretien simple	Coûts	
	MES	Cuivre	Zinc			Entretien	Investissement
	mg/l	ug/l	ug/l	m <sup>2</sup> /ha	-	CHF/ha/an	CHF/ha
5	≤10	≤ 5	≤10	≤ 60	5	≤ 700	≤150'000
4	≤20	≤10	≤20	≤120	4	≤1'400	≤200'000
3	≤30	≤15	≤30	≤180	3	≤2'100	≤250'000
2	≤40	≤20	≤40	≤240	2	≤2'800	≤300'000
1	>40	>20	>40	>240	1	>2'800	>300'000

Les résultats sont regroupés au tableau 1.2 pour les critères clés. Ils montrent qu'il existe, du point de vue l'élimination des polluants, trois groupes qui parviennent à une rétention variable des MES, du cuivre et du zinc. Ces trois groupes sont affectés aux niveaux d'exigences existants au tableau 1.2 **tab.** [9]. Avec cette analyse complétée des autres critères, des procédures de traitement sont recommandées pour chaque niveau d'exigence.

### Exigence élevée

L'exigence élevée inclut des méthodes de traitement qui atteignent la classe 5 pour la concentration de sortie des MES et les classes 4 et 5 pour le cuivre et le zinc. L'infiltration dans les bas-côtés est recommandée en priorité, ainsi que les cuvettes-rigoles si la surface nécessaire est disponible. Sinon, le filtre à sable végétalisé constitue le premier choix. Ce filtre occupe moins de surface que les filtres en terre et son entretien est moins coûteux. Les filtres en terre ne sont plus recommandés qu'à certaines conditions, à savoir pour les bassins de rétention filtrant sans étanchéité. Cependant, ce genre de bassins présente l'inconvénient que le contrôle des eaux de chaussée traitées est difficile. Les SETEC à bassins de rétention filtrants avec une couche d'hydroxyde de fer ne sont plus recommandées en raison de leurs coûts d'entretien et d'investissement plus élevés ainsi que de leur besoin en surface plus important.

Par comparaison avec le dimensionnement actuel, le prétraitement du filtre à sable végétalisé se fait avec un bassin de décantation nettement plus petit, qui garantit toujours le volume prescrit en cas d'accident. La surface requise par le filtre à sable végétalisé peut éventuellement être optimisée en accroissant la charge superficielle. Des études à long terme sur les SETEC existants montreront si cela entraînerait une hausse des coûts d'entretien.

### Exigence standard

L'exigence standard comprend comme seule méthode le filtre avec splitt/gravier. Celui-ci atteint la deuxième classe de performance 4 pour la concentration de sortie des MES. Par comparaison avec l'exigence élevée, la classe de performance du cuivre est inférieure de deux classes et celle du zinc de trois à quatre classes. Pour le zinc, la classe de prestation 2 est manquée de peu.

Dans le cas du filtre avec splitt/gravier, il convient de tirer au clair si la surface nécessaire est effectivement inférieure à celle d'un filtre à sable végétalisé. Si tel n'est pas le cas, le filtre à sable végétalisé doit être préféré. De même, les coûts d'investissement doivent être examinés par comparaison avec le filtre à sable végétalisé. Si la surface disponible est suffisante pour les projets conformément à l'exigence standard, il est possible de prévoir un filtre à sable végétalisé indépendamment du niveau d'exigence.

Tab. 1.2 Évaluation des méthodes en fonction du niveau d'exigence. Les méthodes recommandées sont en bleu foncé, les méthodes recommandées à certaines conditions sont en bleu clair. strd=standard. (\*)Classe de performances élevée par suite de l'utilisation d'ouvrages en amont et existants.

Niveau	Méthode	Concentrations			Besoin de surface SETEC	Entretien		Coûts d'invest.
		MES	Cuivre	Zinc		Coûts	Simple	
élevé	bas-côtés, cuvette-rigole	5	4	4	5	5	5	5
	Filtre à sable végétalisé	5	4	5	2	4	5	4
	Filtre en terre végétalisé	5	4	4	1	3	4	3
	FRT avec hydroxyde de fer	5	4	4	3	3	3	3
strd	Filtre avec splitt/gravier	4	2	1	3	3	3	5
allégé	Bassin de décantation à retenue permanente	4	1	1	4	4	5	4
	Sac filtrant	4	1	1	3	1	2	1
	Filtre à débit rapide	4	1	1	5 <sup>(*)</sup>	2	1	3 <sup>(*)</sup>
	Filtre poreux	1	1	1	5	1	1	1
	Systèmes décentralisés à base de puits	3-4	1	1	5	1	2-4	4
nouveau	Asphalte drainant (incertain)	1-5	1-3	1-3	5	5	5	5

### Exigence allégée

Relèvent de l'exigence allégée les méthodes qui atteignent le plus souvent des concentrations de sortie de classe 4 pour les MES, mais seulement la classe 1 pour le cuivre et le zinc. Pour l'exigence allégée, le bassin de décantation recommandé est celui exploité avec retenue permanente, car il facilite des coûts d'entretien et d'investissement nettement moindres que les autres méthodes et son entretien est plus simple. Les lamelles dans les bassins de décantation ne sont plus recommandées car elles provoquent des coûts d'entretien élevés pour un effet faible.

Le sac filtrant est recommandé à certaines conditions, par exemple quand la topographie est difficile. Il est possible d'obtenir éventuellement une amélioration de l'extraction des polluants avec le sac filtrant si l'on utilise un tissu plus fin et avec le filtre à débit rapide si l'on modifie le mode opératoire. Toutefois, les coûts d'entretien et d'investissement demeurent élevés et l'entretien exigeant. Les systèmes à puits décentralisés sont ceux qui occupent le moins de surface, mais ils génèrent des coûts d'entretien très élevés. C'est pourquoi ils ne doivent être utilisés que lorsque d'autres solutions s'avèrent disproportionnées.

### **Traitement des polluants et surface requise**

Les résultats montrent que la dépollution permise par des méthodes recommandées agit principalement sur la surface requise et non sur des coûts d'investissement ou d'entretien. Il en découle donc des conflits d'utilisation de surface, en particulier pour l'exigence élevée. Si la surface n'est pas disponible sur place, les eaux de chaussée doivent être pompées, ce qui augmente les coûts. Les SETEC techniques ne conviennent pas pour résoudre ce conflit d'utilisation, car, contrairement à ce qui est attendu, elles atteignent uniquement le niveau d'exigence allégé et présentent de surcroît un besoin de surface relativement élevé. Si la surface est insuffisante ou inappropriée, le niveau d'exigence élevé ne peut être atteint que si les eaux de chaussée sont pompées à un autre endroit, ce qui nécessite des analyses de proportionnalité.

### **Eaux claires**

Les eaux claires sont des eaux non polluées qui se rencontrent plus ou moins constamment et qui sont déversées dans la canalisation vers une SETEC. Elles ont pour sources les drainages, les ruisseaux, les déversoirs venant de stations de pompage pour le rabattement d'eaux souterraines, les écoulements de fontaines et autres.

Les eaux claires devraient absolument être captées et déviées avant le SETEC car elles posent des problèmes pour tous les types de SETEC. À cet effet, les évaluations correspondantes doivent être effectuées dès le stade des études de projet, ce qui peut également inclure de mesurer le pH. Si une séparation n'est pas possible, les eaux claires doivent être séparées au plus tard dans l'ouvrage de prise d'eau par le biais d'un aiguillage des eaux claires. Il convient alors de veiller à ce que les liquides légers soient retenus (avarie, accident majeur).

### **Méthodes de traitement et pollution des eaux**

Les méthodes de traitement relevant de l'exigence élevée peuvent efficacement éliminer les MES, les métaux lourds et les HAP des eaux de chaussée. Les concentrations de sortie que l'on mesure sont en dessous des valeurs limites fixées dans les exigences relatives aux cours d'eau pour les métaux lourds ainsi que pour les MES concernant la condition de déversement des eaux usées communales. De même, ces méthodes permettent de retenir plus de 90 % de l'abrasion des pneus.

### **Perspectives**

Aujourd'hui, il est possible de recommander une ou deux méthodes de traitement pour chaque niveau d'exigence, ce qui simplifie l'exécution de la protection des eaux. Certaines méthodes peuvent éventuellement être encore améliorées et un petit nombre de méthodes non encore étudiées devraient l'être à l'avenir. Il est néanmoins possible de dire que la plupart des possibilités et des limites du traitement des eaux de chaussée sont aujourd'hui connues.

Un des aspects les plus importants est la surface requise pour le traitement, qui sera plus difficile à trouver à l'avenir ou pourra provoquer des conflits d'utilisation. Pour que les méthodes recommandées puissent être mises en œuvre de façon opportune et rentable, les études de projet pour l'évacuation des eaux de chaussée, y compris les aspects d'entretien, revêtent une importance capitale.

## Sintesi

L'eliminazione dei microinquinanti dalle acque reflue stradali deve effettuarsi nel modo più efficace, affidabile e semplice possibile, in una superficie circoscritta, con bassi costi di investimento e manutenzione.

Nel corso degli ultimi 20 anni USTRA, Cantoni e Città hanno testato svariati procedimenti tecnici, alcuni anche innovativi, per individuare quelli che meglio rispondono ai suddetti requisiti. Grazie anche alle sperimentazioni condotte all'estero, oggi si dispone dunque di un'ampia base di dati per la valutazione dei metodi di trattamento.

Detta valutazione avviene sulla scorta dei criteri sottoelencati, a ciascuno dei quali viene assegnato un punteggio tra 1 (minimo) e 5 (massimo) (tab. 1.1).

Eliminazione di microinquinanti	Concentrazione media di solidi sospesi (SS), rame e zinco (rispetto al carico inquinante)
Superficie richiesta	Superficie stradale (espressa in metri quadri per ettaro) necessaria per ciascun SABA, comprensiva di terreni adiacenti, strutture e scarpate
Semplicità di manutenzione	In base all'esperienza maturata dai servizi addetti alla manutenzione dei SABA (valore qualitativo)
Costi manutentivi	Spese annuali per la manutenzione di un SABA per ettaro di superficie stradale collegata (espresse in CHF/ha/anno).
Costi di investimento	Costo complessivo di un SABA per ettaro di superficie stradale collegata (CHF/ha).

Tab. 1.1 Classi di rendimento: valori numerici

Classe di rendimento Classe di rendimento	Concentrazione			Superficie richiesta SABA	Semplicità di manutenzione	Costi	
	SS	rame	zinco			manutentivi	di investimento
	mg/l	ug/l	ug/l	m <sup>2</sup> /ha	-	CHF/ha/anno	CHF/ha
5	≤ 10	≤ 5	≤ 10	≤ 60	5	≤ 700	≤ 150 000
4	≤ 20	≤ 10	≤ 20	≤ 120	4	≤ 1400	≤ 200 000
3	≤ 30	≤ 15	≤ 30	≤ 180	3	≤ 2100	≤ 250 000
2	≤ 40	≤ 20	≤ 40	≤ 240	2	≤ 2800	≤ 300 000
1	> 40	> 20	> 40	> 240	1	> 2800	> 300 000

I risultati sono presentati in base ai criteri chiave nella tabella 1.2: i metodi di trattamento si suddividono in tre categorie per grado di efficacia nel trattenere solidi sospesi, rame e zinco. Queste categorie sono associate ai livelli di requisiti esistenti; incrociandole con gli altri criteri, si determinano i metodi di trattamento raccomandati per ogni livello.

### Livello elevato

Questa categoria comprende i metodi di trattamento di classe 5 per la ritenzione di solidi sospesi e di classe 4 o 5 per rame e zinco. Si raccomandano in priorità sistemi di infiltrazione nella banchina o a canalette e cunette, se la superficie a disposizione lo consente. In caso contrario, la miglior alternativa è il filtro a sabbia vegetato, che richiede meno spazio e minori costi manutentivi rispetto ai suoli filtranti. Questi ultimi vengono ormai raccomandati solo limitatamente, ovvero per bacini di ritenzione con filtro senza impermeabilizzazione; il loro inconveniente, tuttavia, è la difficoltà di controllare le acque reflue stradali trattate. I SABA con bacini rivestiti di idrossido di ferro, invece, non vengono più raccomandati per gli elevati costi manutentivi e di investimento e l'estesa superficie necessaria.

Oggigiorno il filtro a sabbia vegetato può essere sottoposto a trattamento preliminare in un bacino di decantazione di dimensioni considerevolmente ridotte, pur sempre nel rispetto del volume di sicurezza prescritto. Il filtro può eventualmente essere ottimizzato in termini

di superficie richiesta incrementando la capacità di carico superficiale; andrà verificato sul lungo periodo sui SABA esistenti se ciò dovesse comportare un aumento dei costi manutentivi.

**Livello standard**

Il filtro a ghiaia è l'unico sistema per il livello standard, con una classe di rendimento 4 (la seconda migliore) per i solidi sospesi. Rispetto alla categoria «livello elevato», la valutazione è inferiore di due punti per il rame e di tre-quattro per lo zinco (mancata di poco la classe 2).

Quando il filtro a ghiaia non presenta vantaggi in termini di minore superficie necessaria è meglio scegliere un filtro a sabbia vegetato; stesso discorso per quanto riguarda i costi di manutenzione. Per i progetti di livello standard, se la superficie a disposizione è sufficiente si può progettare un filtro a sabbia vegetato indipendentemente dai requisiti.

Tab. 1.2 Valutazione dei metodi di trattamento in base ai requisiti; quelli raccomandati sono su sfondo blu: l'intensità del colore è indicazione del «grado di raccomandazione». (\*) Classe di rendimento elevata grazie all'uso di strutture collocate prima dell'impianto o preesistenti.

Livello requisiti	Metodo	Concentrazioni			Superficie necessaria SABA	Manutenzione		Costi di investimento
		SS	rame	zinco		costi	semplicità	
elevato	Banchina, sistema a canalette e cunette	5	4	4	5	5	5	5
	Filtro a sabbia vegetato	5	4	5	2	4	5	4
	Suolo filtrante vegetato	5	4	4	1	3	4	3
	Bacino di ritenzione con filtro, rivestito di idrossido di ferro	5	4	4	3	3	3	3
standard	Filtro a ghiaia	4	2	1	3	3	3	5
basso	Bacino di decantazione in modalità continua	4	1	1	4	4	5	4
	Filtro a tela («Polstoff»)	4	1	1	3	1	2	1
	Filtro veloce	4	1	1	5(*)	2	1	3(*)
	Filtro poroso	1	1	1	5	1	1	1
	Sistemi di pozzi (tombini) decentralizzati	3-4	1	1	5	1	2-4	4
nuovo	Asfalto poroso (efficacia non comprovata)	1-5	1-3	1-3	5	5	5	5

**Livello basso**

In questa categoria rientrano i metodi che hanno ottenuto il punteggio 4 per le sostanze indissolte, ma solo 1 per rame e zinco. Per questo livello di requisiti si raccomanda il bacino di decantazione in modalità continua, dati i costi di manutenzione e investimento nettamente inferiori e la maggiore semplicità manutentiva. Non vengono invece più raccomandate le lamelle in bacini di decantazione per il basso rapporto costi manutentivi/efficacia.

Il filtro a tela (in tessuto «Polstoff») è adatto solo in determinate circostanze, per esempio in caso di difficoltà legate alla topografia. Il rendimento può essere eventualmente migliorato utilizzando un tessuto a trama più sottile, mentre quello del filtro veloce mediante una variazione procedurale. Ma i costi rimangono elevati e la manutenzione complessa. I sistemi di tombini decentralizzati, pur essendo la soluzione che richiede meno superficie di tutte, hanno una manutenzione molto costosa, pertanto devono essere utilizzati solo in assenza di alternative migliori.

### **Eliminazione di microinquinanti e superficie richiesta**

Dalle indagini condotte emerge che l'efficacia dei metodi raccomandati dipende principalmente dalla superficie impiegata e non dalle spese di investimento e manutenzione. Si profilano pertanto conflittualità legate all'utilizzo, in particolare per i metodi con classe di rendimento elevata. Se non si dispone dello spazio necessario in loco, occorre pompare altrove le acque di deflusso stradale, con conseguente incremento dei costi. I SABA «tecnici» non risolvono queste conflittualità: contrariamente alle attese, ottengono un punteggio minimo e richiedono comunque una superficie relativamente estesa. Quando l'area a disposizione è insufficiente o inadeguata si può raggiungere un punteggio elevato solo convogliando altrove le acque di scarico, dopo averne appurato la fattibilità.

### **Acqua estranea**

Per acqua estranea si intendono acque scolanti pressoché continue non inquinate convogliate nella canalizzazione di accesso a un SABA. Provengono da drenaggi, ruscelli, traboccamento di impianti di pompaggio per abbassare il livello della falda acquifera, fontane ecc.

L'acqua estranea, dal momento che produce danni a tutte le categorie di impianto, deve necessariamente essere captata e canalizzata separatamente prima del SABA, studiando le modalità già in sede di progettazione (con eventuale misurazione del pH dell'acqua). Se ciò non fosse possibile, l'acqua estranea deve essere separata al più tardi nel dispositivo di immissione mediante un separatore per liquidi leggeri (prevenzione di avarie e incidenti rilevanti).

### **Trattamento delle acque e carico inquinante**

I metodi di trattamento del livello elevato sono efficaci nel depurare le acque da solidi sospesi, metalli pesanti e IPA: le concentrazioni residue di metalli pesanti sono inferiori ai limiti ammessi per i corsi d'acqua; quelle di solidi sospesi inferiori ai limiti per le acque comunali trattate; in più, tali procedimenti permettono di trattenere oltre il 90% delle sostanze derivanti dall'abrasione degli pneumatici.

### **Prospettive**

Attualmente per ciascun livello di requisiti si possono raccomandare uno o due metodi di trattamento, il che semplifica l'attuazione della protezione delle acque. Alcuni metodi sono ancora perfettibili e pochi altri necessitano di ulteriori analisi. Si può tuttavia affermare che le potenzialità e i limiti del trattamento delle acque reflue stradali oggi sono ampiamente noti.

Tra gli aspetti più rilevanti c'è il requisito dello spazio necessario, che sarà sempre più esiguo in futuro e potrà dare luogo a situazioni conflittuali. La progettazione del drenaggio stradale, manutenzione compresa, riveste quindi un'importanza centrale per poter applicare i metodi raccomandati in maniera adeguata ed economicamente efficiente.

## Summary

The process of removing pollutants from road runoff needs to be as effective, reliable and simple as possible, as well as take up as little space as possible. In addition, the associated investment and maintenance costs should be kept as low as possible.

In order to determine which process is the most suitable for meeting these requirements, FEDRO, the cantons and communes have been using – and testing – a number of treatment processes, including new ones. Other countries have also been trialling various processes. This means that a wide range of data is now available for evaluating the various options.

The assessment of the various requirements placed on treatment processes is based on the criteria listed below, which are classified according to a five-level scale, with five as the highest and one as the lowest level (cf. tab. 1.1).

Pollutant removal	Absolute effluent concentrations of total suspended solids (TSS), copper and zinc.
Space requirement	Space requirement of a road runoff treatment plant (RRTP) per hectare of road surface, including surroundings, structures and embankments.
Simple maintenance	Experiences of maintenance services concerning the maintenance of RRTPs (qualitative).
Maintenance costs	Annual costs for the maintenance of an RRTP per hectare of connected road surface (Swiss francs per hectare per annum).
Investment costs	Total costs of an RRTP per connected road surface (Swiss francs per hectare).

*Tab. 1.1 Allocation of numerical values of the criteria to the 5 performance categories.*

Category	Effluent concentration			Space requirement RRTP	Basic maintenance	Costs	
	TSS	Copper	Zinc			Maintenance	Investment
	mg/l	ug/l	ug/l	m <sup>2</sup> /ha	-	Swiss francs/ha/yr	Swiss francs/ha
5	≤10	≤ 5	≤10	≤ 60	5	≤ 700	≤150,000
4	≤20	≤10	≤20	≤120	4	≤ 1,400	≤ 200,000
3	≤30	≤15	≤30	≤180	3	≤ 2,100	≤ 250,000
2	≤40	≤20	≤40	≤240	2	≤2,800	≤300,000
1	>40	>20	>40	>240	1	>2,800	>300,000

The results are summarised in table 1.2 for the key criteria. They show that, in terms of pollutant removal, there are three groups that retain TSS, copper and zinc with different degrees of efficiency. These three groups are already allocated in table 1.2 to the existing requirement levels [9]. Based on the other criteria, the recommended process types apply for each requirement level.

### Higher requirement level

The higher requirement level encompasses treatment processes that attain category 5 for effluent concentrations of TSS, and reach categories 4 and 5 for copper and zinc. As first priority, infiltration into the road shoulder and trench system is recommended, if the necessary space is available. Otherwise, use of vegetated sand filters is recommended. The latter require less space than soil filters and are cheaper to maintain. Soil filters are only recommended under certain circumstances, specifically for retention filter basins without sealing. However, the disadvantage of infiltration basins of this type is that it is difficult to control the treated road runoff. RRTPs with retention filter basins with an iron hydroxide layer are no longer recommended in view of the associated higher maintenance and investment costs and their greater space requirement.

In comparison with present-day dimensioning, the pre-treatment of vegetated sand filters is carried out with a significantly smaller settlement basin, which as before ensures the prescribed treatment volume. A possible option for optimising the vegetated sand filter in terms of space requirement consists of increasing the surface load. However, the impact this would have on maintenance costs would have to be ascertained based on long-term studies of existing RRTPs.

**Standard requirement level**

The standard requirement level involves the use of crushed gravel filters as the sole method. With respect to TSS effluent concentrations, these attain the second-highest performance category (4). In comparison with the higher requirement level, the performance category for copper is two, and for zinc three-to-four, levels lower. Zinc narrowly misses performance category 2.

With regard to crushed gravel filters, it is necessary to clarify whether their surface requirement is in fact lower than that of vegetated sand filters. If this is not the case, preference should be given to the latter. In addition, the investment costs in comparison with those for vegetated sand filters also need to be examined. If, in accordance with the standard requirement level, sufficient space is available for a project, use of a vegetated sand filter can be planned regardless of the requirement.

*Tab. 1.2 Evaluation of processes according to requirement level. The recommended processes are shown in dark blue, and conditionally recommended processes in light blue. Std. = standard. (\*) = high performance category due to use of upstream and existing structures.*

Level	Process	Concentrations			RRTP space requirement	Maintenance		Investment costs
		TSS	Copper	Zinc		Costs	Basic	
Higher	Shoulder, trench system	5	4	4	5	5	5	5
	Vegetated sand filter	5	4	5	2	4	5	4
	Vegetated soil filter	5	4	4	1	3	4	3
	Retention filter basin with iron hydroxide	5	4	4	3	3	3	3
Std.	Crushed gravel filter	4	2	1	3	3	3	5
Simplified	Settlement basin	4	1	1	4	4	5	4
	Pile fabric filter	4	1	1	3	1	2	1
	Fast filter	4	1	1	5(*)	2	1	3(*)
	Porous filter	1	1	1	5	1	1	1
	Decentralised pit-based systems	3-4	1	1	5	1	2-4	4
New	Porous asphalt (unclear)	1-5	1-3	1-3	5	5	5	5

**Simplified requirement level**

Processes are allocated to the simplified requirement level that mostly attain category 4 for TSS effluent concentrations, but only reach category 1 for copper and zinc. Here, the use of a settlement basin is recommended, because in comparison with the other processes its maintenance and investment costs are significantly lower thanks to its simpler maintenance. The use of lamellae in settlement basins is no longer recommended as these generate higher maintenance costs compared with their lower effectiveness.

Pile fabric filters are recommended under certain circumstances, e.g. in difficult terrain. With these filters, it is conceivable that pollutant removal could be improved by using a finer tissue, and with a fast filter with the aid of modified process management. However, in both

cases the high maintenance and investment costs still apply, as does the more demanding maintenance requirement. While decentralised pit systems require the least space, they give rise to very high maintenance costs. They should therefore only be used in situations in which other solutions are not suitable.

### **Pollutant removal and space requirement**

The findings indicate that the pollutant removal performance of the recommended processes primarily depends on the space requirement, and not on the investment or maintenance costs. This indicates utilisation conflicts, especially with respect to the higher requirement level. If the necessary space is not available on site, road runoff has to be pumped, which increases the costs. Technical RRTPs are not a solution to these utilisation conflicts because, contrary to expectation, they only attain the simplified requirement level and also have a relatively high space requirement. If there is insufficient or unsuitable space, it is only possible to attain the higher requirement level if road runoff is pumped at another location, which needs to be clarified from the point of view of proportionality.

### **Extraneous water**

The term “extraneous water” refers to non-polluted water that more or less constantly flows into the drainage system of an RRTP. The sources of extraneous water include drains, streams, overflows from pump stations for reducing groundwater levels, fountain outlets, etc.

It is essential to capture and divert extraneous water before it reaches an RRTP, because it causes problems in all types of treatment process. The corresponding clarifications have to be made during the project planning stage – which may include measuring the pH level. If its separation is not possible, extraneous water must be diverted before it reaches the intake structure. Here, care must be taken to ensure that any light fluids are held back (to prevent damage or malfunctions).

### **Treatment processes and water contamination**

Treatment processes at the higher requirement level can effectively eliminate TSS concentrations, heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from road runoff. The attainable effluent concentrations fall below the requirements placed on bodies of water for heavy metals and the TSS discharge conditions with respect to communal waste water treatment. With these processes, 90 percent of tyre abrasion can also be retained.

### **Outlook**

One or two treatment processes can now be recommended for each requirement level, which makes it simpler to comply with the provisions of Swiss water protection legislation. In some cases there are potentials for improvement, while a handful of processes that have not yet been tested need to be examined more thoroughly in the future. However, it may be stated that most of the potentials and limits of road runoff treatment are now known.

One of the most important aspects concerns the space requirement, which will be increasingly difficult to meet in the future and can give rise to utilisation conflicts. In order to ensure that the recommended processes are applied purposefully and cost-effectively, project planning in the field of road runoff treatment (including maintenance aspects) is of central importance.

# 1 Einleitung

## 1.1 Zweck des Dokuments

Die Behandlung von Strassenabwasser ist eine Herausforderung, denn es gilt zahlreiche Anforderungen zu erfüllen. Dazu zählen eine hohe Reinigungsleistung, ein geringer Flächenbedarf sowie möglichst tiefe Bau-, Unterhalts- und Entsorgungskosten. Zur Erfüllung dieser Kriterien stehen heute zahlreiche Behandlungsverfahren für Strassenabwasser zur Verfügung.

Diese Dokumentation beschreibt und beurteilt die heute zur Verfügung stehenden Verfahren mit Fokus auf die Schweiz. Dazu werden die Erfahrungen der letzten rund 10 Jahre sowie die erste Version dieses Dokuments aus dem Jahr 2010 genutzt. Das Ziel ist es, einen Überblick über die Behandlungsverfahren zu vermitteln und deren Reinigungsleistung, Flächenbedarf, Unterhalts- und Investitionskosten zu bewerten und zu vergleichen. Dabei werden nur in der Praxis eingesetzte Verfahren betrachtet.

Zusätzlich zu den Behandlungsverfahren werden auch Themen wie Reifenabrieb, Fremdwasser und die dezentrale Behandlung von Strassenabwasser besprochen.

Dieses Dokument beschreibt, welche Schadstoffentfernung die Behandlungsverfahren erzielen und stellt diese in Bezug zu den Anforderungen an die Behandlung. Die Anforderungen selbst sind in der Richtlinie 18005 Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen zu finden [9].

Diese Dokumentation soll Planerinnen und Planern helfen, das für die jeweilige Situation zweckmässigste Verfahren auszuwählen. Für die Projektierung von SABA wird auf die VSS Normen verwiesen [19].

## 1.2 Adressaten

Mit dieser Dokumentation werden Fachspezialisten im Bereich der Strassenabwasserbehandlung und des Gewässerschutzes, Bauherren, Planer, Erhaltungsplaner sowie Verantwortliche für den betrieblichen Unterhalt angesprochen.

## 1.3 Inkrafttreten

Dieses Dokument tritt am 01.01.2010 in Kraft. Das Änderungsverzeichnis ist auf Seite 103 dokumentiert.

## 2 Strassenabwasserbehandlung

### 2.1 Ausgangslage, Ziele und Fragestellung

Der Zweck der Strassenabwasserbehandlung ist es, die für ober- und unterirdische Gewässer relevanten Schadstoffe gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201) [1] möglichst wirksam aus dem Strassenabwasser zu entfernen. Zusätzlich zur hohen Schadstoffentfernung sollen SABA folgende Bedingungen erfüllen:

- Geringer Flächenbedarf
- Einfach zu bauen
- Geringe Investitionskosten
- Einfach zu betreiben
- Geringe Unterhaltskosten

SABA sollten zudem möglichst robust sein. Robust heisst, dass bei der Projektierung, beim Bau und beim Betrieb Spielraum besteht, und begründete Abweichungen von Vorgaben immer noch zu funktionierenden SABA führen.

Die Entwicklung von SABA hat in der Schweiz vor etwa 30 Jahren begonnen. Die Ausgangslage war der bewachsene Oberbodenfilter. Dieser benötigt relativ viel Fläche, neigt zu präferenziellem Fluss mit Einbussen beim Schadstoffrückhalt, ist im Bau anspruchsvoll und in einigen Fällen kolmationsanfällig, also insgesamt wenig robust.

Zur gleichzeitigen Optimierung von Flächenbedarf, Reinigungsleistung und tiefen Kosten wurden zahlreiche neuartige Verfahren eingesetzt und geprüft. Heute liegen genügend Informationen aus Leistungs- und Funktionsprüfungen von SABA in der Schweiz und im Ausland sowie Betriebserfahrungen vor, damit folgende Fragen beantwortet werden können:

- Welche Behandlungsverfahren zeigen die beste Schadstoffentfernung?
- Welche Verfahren benötigen bei den unterschiedlichen Behandlungsanforderungen die geringste Fläche?
- Welche Verfahren sind am einfachsten zu unterhalten und sind zudem robust?
- Welche Verfahren haben das beste Kosten-Nutzen Verhältnis?
- Inwiefern ist es möglich, mit technischen Filtern SABA zu bauen, die wenig Fläche benötigen und Strassenabwasser trotzdem kostengünstig reinigen?
- Inwiefern sind dezentrale, technische Systeme mit zentralen SABA vergleichbar hinsichtlich Flächenbedarf, Reinigungsleistung und Kosten?

Die vorliegende Dokumentation beantwortet diese Fragen mit dem Ziel, den heutigen Stand der Technik bei der Behandlung von Strassenabwasser aufzuzeigen. Der Ausdruck „Stand der Technik“ bezeichnet den aktuellen Stand der Entwicklung von Verfahren zur Behandlung von Strassenabwasser, welche die praktische Eignung unter Beweis gestellt haben. Dabei sind technische Fortschritte berücksichtigt, welche auf der Umsetzung von wissenschaftlichen Kenntnissen beruhen. Zudem sind solche Verfahren wirtschaftlich und können im Verlauf der Erneuerung der Entwässerung bei neuen oder teilweise auch bei bestehenden SABA eingesetzt werden.

## 2.2 Schadstoffe im Strassenabwasser

Strassenabwasser enthält aus dem Normalbetrieb der Strassen zahlreiche Schadstoffe<sup>1</sup>, die folgenden Ursachen haben (Anhang I.2):

- Reifenabrieb: Partikel, Mikroplastik, Zink (Zn), Kupfer (Cu), polyzyklische organische Kohlenwasserstoffe (PAK), organische Stoffe und weitere Schwermetalle
- Fahrbahnabrieb: Partikel, PAK, Mikroplastik
- Bremsabrieb: Kupfer, Antimon und weitere
- Verzinkte Installationen aus Fahrzeugrückhaltesysteme: Zink
- Verbrennungsrückstände: Russ, PAK, Katalysatormetalle und weitere
- Tropfverluste: Kohlenwasserstoffe

Die relevanten Schadstoffe im Strassenabwasser sind ersichtlich, wenn die Schadstoffkonzentrationen im Strassenabwasser stark befahrener Strassen mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) von mehr als 15'000 Fahrzeugen pro Tag mit Vergleichswerten der GSchV [1] verglichen werden. Die Vergleichswerte sind die Einleitbedingung für kommunales Abwasser in Fließgewässer und die Anforderungen an die Wasserqualität.

Problematisch sind die gesamt ungelösten Stoffe (GUS). Die Einleitbedingung wird im Mittel um mehr als eine Größenordnung überschritten. Auch Zink und Kupfer sind problematisch: Deren Konzentrationen im Strassenabwasser überschreiten die Anforderungen der Wasserqualität gemäss GSchV ebenso um mehr als eine Größenordnung<sup>2</sup> (Tab. 2.1).

Tab. 2.1 *Verwendete Stoffe zur Leistungsbeurteilung von SABA.*

Schadstoffe	Konzentrationsbereich	Schwellenwerte
GUS	100 - <b>302</b> - 646 mg/l	15 oder 20 mg/l
Cu	31 - <b>98</b> - 203 ug/l	5 ug/l (totales Kupfer)
Zn	153 - <b>449</b> - 904 ug/l	20 ug/l (totales Zink)

Zur Schadstoffentfernung aus Strassenabwasser ist die Partikelgrößenverteilung, der Anteil der chemisch betrachtet gelösten Fraktion und die Adsorptionsfähigkeit an Oberflächen entscheidend. Bezüglich GUS, Kupfer und Zink sieht diese Charakterisierung wie folgt aus:

- GUS ist ein Mass für Partikel mit einem Durchmesser von mehr als 0.45 µm.
- Kupfer liegt in partikulärer, feinpartikulärer und gelöster Form vor.
- Zink liegt analog zu Kupfer in partikulärer, feinpartikulärer und gelöster Form vor, allerdings mit einem höheren gelösten Anteil als bei Kupfer.

Mikroplastik ist eine weitere Schadstoffart im Strassenabwasser und besteht hauptsächlich aus Reifenabrieb [3]. Reifenabrieb ist partikulär oder feinpartikulär und wird damit grösstenteils mit GUS erfasst.

Zusätzlich gelangt durch die atmosphärische Deposition Staub auf die Fahrbahn und damit ins Strassenabwasser. Aus der Umgebung ist je nach Standort mit Blättern und Grobstoffen zu rechnen. Ebenso kann in der Nähe von Baustellen oder auf Strecken mit hohem LKW-Anteil und Transport von Baumaterialien mit einem erhöhten Partikeleintrag gerechnet werden. Staub und Partikel aus Baustoffen sind in erster Linie für den Betrieb von Behandlungsanlagen problematisch, indem sie die Schlammengen erhöhen. Für die Entfernung der Schadstoffe sind sie wenig relevant. Der Rückhalt von Mineralölprodukten wie Diesel oder Benzin im Fall einer Havarie ist in erster Linie durch das dafür vorgesehene Rückhaltvolumen gewährleistet und nicht Teil des Normalbetriebs.

<sup>1</sup> Eine weitere Stoffgruppe sind Tenside, welche aus biologischem Abbau und von Scheibenwischmitteln stammen. Diese sind keine Schadstoffe, können aber zu Schaum führen.

<sup>2</sup> Die Anforderungen an die Wasserqualität gelten nach weitgehender Durchmischung im Gewässer.

## 2.3 Prozesse der Schadstoffentfernung

Zum Rückhalt der chemisch und physikalisch unterschiedlichen Schadstoffarten stehen verfahrenstechnisch folgende Prozesse zur Verfügung. Je nach SABA-Typ laufen mehrere solcher Prozess ab und erhöhen die Wirksamkeit der Schadstoffentfernung.

- **Sedimentation:** Partikel sinken aufgrund ihrer im Vergleich zu Wasser höheren Dichte im Wasser ab. Je kleiner und leichter die Partikel sind, desto langsamer bis unwirksam ist die Sedimentation. Folgende Abschätzung verdeutlicht die Zusammenhänge. Partikel mit einer Dichte von 1.1 kg/dm<sup>3</sup> brauchen für das Absetzen einer Wassersäule mit einer Höhe von 1 m bei einem Durchmesser von 100 µm (Mikrometer) eine halbe Stunde, bei einem Durchmesser von 10 µm 2 Tage und bei einem Durchmesser von 1 µm 210 Tage. Dies zeigt, dass Partikel mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern durch Sedimentation alleine nur noch zu einem Bruchteil entfernt werden können.
- **Filtration auf Oberflächen (Siebfiltration, technisch):** Partikel werden an der Oberfläche einer technischen, porösen Trägerschicht (Sieb, Polstoff) abgetrennt. Dadurch entsteht ein Filterkuchen, der selbst filterwirksam ist, aber mit zunehmender Belastung zur Kolkation führt.
- **Filtration im Filterkörper:** Partikel werden im Inneren der Filterschicht eines Retentionsfilters in den strömungsarmen Poren abgelagert. Dieser Prozess schreitet mit zunehmender Betriebsdauer voran. Wenn der Filter mit Partikeln gesättigt ist, führt dies zum Filterdurchbruch mit ansteigenden Ablaufkonzentrationen.
- **Sedimentfiltration:** Die Filtration findet in der Sedimentaufflage auf einer Filteroberfläche statt. Die Sedimentaufflage besteht aus den zurückgehaltenen Partikeln und ist ein wirksamer Filter und Adsorber. Schilfbewuchs beim Sandfilter, die Aufnahme in die Bodenmatrix in die Strassenschulter oder periodisches Abschälen beim Splitt-Kiesfilter halten die Sedimentaufflage durchlässig.
- **Adsorption und Ionenaustausch:** Mit diesen beiden Prozessen werden gelöste Schadstoffe aus dem Strassenabwasser an Feststoffe oder an Partikel gebunden und damit aus dem Wasser entfernt. Dieser Prozess läuft ab in Sedimentaufflagen, Filterschichten von Retentionsfilterbecken, in Oberböden oder in technischen Adsorbenschichten. Idealerweise ist die Bindung dauerhaft ohne Rücklösung durch Streusalze, die beim Winterdienst eingesetzt werden.
- **Biologischer Abbau:** Biologisch abbaubare Stoffe können je nach Verfahrenstyp teilweise abgebaut werden (DOC, Stickstoffkomponenten etc.). Solche Stoffe gehören allerdings nicht zu den relevanten Schadstoffen im Strassenabwasser.
- **Flotation:** Wasserunlösliche Stoffe mit geringerer Dichte als Wasser schwimmen auf einer Wasseroberfläche, was bei einer Havarie oder einem Störfall mit Kohlenwasserstoffen entscheidend ist. Anhand der Eigenschaften von GUS, Kupfer und Zink kann abgeschätzt werden, welches Verfahren wie gut für deren Entfernung geeignet ist (Tab. 2.2). Evident wird, dass zur Entfernung von GUS ein grösseres Spektrum von Prozessen in Frage kommt als für Kupfer und Zink. Die Zuordnung dieser Prozesse zu den unterschiedlichen Verfahren gibt bereits jetzt einen ersten Anhaltspunkt, wie wirksam die im nächsten Kapitel beschriebenen Verfahren sind (Tab. 2.3).

Tab. 2.2 Zuordnung von GUS, Kupfer und Zink zu Prozessen der Schadstoffentfernung.

	Sedimentation	Filtration auf Oberflächen	Filtration in der Filterschicht	Sedimentfiltration	Adsorption, Ionenaustausch
<b>GUS</b>	•	●	●	●	
<b>Cu, Zn</b>	○	○	●	●	•

## 2.4 Beschreibung der Behandlungsverfahren

### Behandlungsart

Die in Betracht gezogenen Behandlungsverfahren sind in Tab. 2.3 nach deren Behandlungsart beschrieben. Zuerst werden die Verfahren nach zentraler und dezentraler Anwen-

dung unterteilt. Die zentrale Behandlung unterscheidet weiter nach Verfahren mit Retentionsfilterbecken, Verfahren, die auf der Sedimentation beruhen, und technischen Filtern.

Retentionsfilterbecken sind unterteilt nach bewachsenen Typen und technischen, unbewachsenen Filtern. Zu den sedimentationsbasierten Verfahren zählen unterschiedliche Typen von Absetzbecken, Absetzteiche und Lamellenabscheider. Die technischen Filter werden nach der Art des Filtermediums, welches zur Partikelabtrennung verwendet wird, unterschieden.

Bei der dezentralen Behandlung erfolgt eine Unterscheidung zuerst nach flächigen und schachtbasierten Verfahren. Die Entwässerung über das Bankett in die Strassenschulter, schulter und Mulden-Rigolen sowie der poröse Asphalt zählen zu den flächigen Verfahren. Bei schachtbasierten Verfahren fliesst das Strassenabwasser beispielsweise zu einem Schlamm-sammler und wird dort behandelt oder es fliesst von mehreren Schlamm-samm-lern zu einem Behandlungsschacht.

Anschliessend sind die Behandlungsverfahren anhand des Behandlungstyps (Vor- oder Hauptbehandlung), den hydraulischen Eigenschaften, den Prozessen der Schadstoffentfernung und der Eignung zum Rückhalt von Havariegut charakterisiert. Eine detaillierte Beschreibung ist im Anhang II zu finden.

### **Vorbehandlung, Hauptbehandlung**

Sedimentationsbasierte Verfahren können entweder als Vor- oder Hauptbehandlung eingesetzt werden. Als Hauptbehandlung werden sie im Gegensatz zur Vorbehandlung grösser dimensioniert. Alle anderen Verfahren werden als Hauptbehandlung eingesetzt. Bei den dezentralen, schachtbasierten Systemen besteht eine Vorbehandlung, falls die Strassen via Schlamm-sammler entwässert werden. Bei einigen solchen Systeme ist ein vorbe-handlungsartiges Element integriert.

### **Hydraulik und Retention**

Bei allen filtrationsbasierten, zentralen Verfahren ist eine Retention notwendig, weil ein Filter als hydraulische Drosselung wirkt. Bei Retentionsfilterbecken ist die Retention über dem Filter verfahrensbedingt vorhanden. Bei technischen Filtern muss ein zusätzliches Retentionsvolumen als separates Bauwerk projektiert werden. Ein Pumpwerk vereint Drosselung und Retention. Ein vorgelagertes Pumpwerk mit Retention vermindert das benötigte Retentionsvolumen der SABA.

Im Dauerstau betriebene Absetzbecken, Absetzteiche und Lamellenabscheider haben keine massgebliche hydraulische Retention. Bewirtschaftete Absetzbecken hingegen werden nach einem Regenereignis und nach dem Ablauf einer Beruhigungszeit teilweise abgepumpt oder gedrosselt entleert, weshalb eine Retention vorhanden ist.

Bei dezentralen flächigen Systemen ist bei der Behandlung in der Mulde eine Retention vorhanden. Bei schachtbasierten technischen Systemen ist wegen der Kompaktheit der Systeme keine oder nur eine geringe Retention vorhanden. Deshalb sind die Filter solcher Einheiten hydraulisch stark belastet, was öfters zu Entlastungen führt.

### **Schadstoffentfernung**

Alle bewachsenen Filterschichten ermöglichen Sedimentfiltration, Filtration im Innern eines Filterkörpers sowie Adsorption und sind damit für einen hohen Schadstoffrückhalt prädestiniert. Auch die Filterschichten in technischen Retentionsfilterbecken ermöglichen diese Prozesse.

Bei sedimentationsbasierten Verfahren ist die Sedimentation der wichtigste Prozess der Schadstoffentfernung. Entsprechend ist die Schadstoffentfernung gegenüber Retentionsfilterbecken geringer, da feinste Partikel und gelöste Schadstoffe nicht oder nur teilweise entfernt werden. Die meisten technischen Filter basieren hauptsächlich auf der Filtration auf der Oberfläche eines porösen Trägermediums und entsprechend kürzeren Aufenthaltszeiten im Vergleich zu einem Filterkörper eines Retentionsfilterbeckens. Entsprechend ist der Schadstoffrückhalt von technischen Filtern geringer.

Tab. 2.3 Charakterisierung der Behandlungsverfahren. R: Der Havarierückhalt findet in der zusätzlichen Retention statt. S: Havarierückhalt findet in den Sickerschichten statt. V: Systemabhängig.

Behandlungsart und Verfahren			Typ		Hydraulik			Schadstoffentfernung						Havarierückhalt	
			Vorbehandlung	Hauptbehandlung	Vorbehandlung nötig	Abflussdrosslung	Retention nötig (zusätzl.)	Retention vorhanden	Sedimentation	Filtration auf Oberflächen	Filtration im Filter	Sedimentfiltration	Adsorption / Ionentausch		Biologischer Abbau
Zentrale Behandlung	Retentionsfilterbecken RFB	bewachsen	Sandfilter	X	X		X	X			X	X	X	X	X
			Bodenfilter	X	X		X	X			X	X	X	X	X
			Kiessandfilter	X	X		X	X			X	X	X	X	X
	technisch	Splitt/Kiesfilter	X	X		X	X			(X)	X	X	X	X	
		Splitt/Sand + Adsorber		X	X		X	X			X	X	X	X	
	Sedimentationsbasierte Verfahren		Absetzbecken	X	X					X					X
			Absetzbecken bewirtschaftet	X	X		X	X		X					X
			Absetzteiche	X	X					X					X
			Lamellenabscheider	X	X					X					X
	Technische Filter		Polstofffilter		X		X	X		X					R
Schnellfilter				X		X	X		X	(X)		(x)		R	
Poröser Filter				X		X	X		X	(X)		X		R	
Dezentrale Behandlung	flächig	bewachsen	Versickerung Strassenschulter		X						X	X	X	X	S
			Mulden - Rigole		X		X	X			X	X	X	X	X
	schachtbasiert	technisch	Poröser Asphalt	(X)	X		X				X				
			Diverse Systeme		X		(X)			V	V	(V)	(V)	V	V

Bei dezentralen schachtbasierten Systemen sind die Prozesse der Schadstoffentfernung systemabhängig. Es gibt sedimentationsbasierte Verfahren, Verfahren mit Filtervliesen oder solche mit Filter- und Adsorbenschichten. Die aufgrund der verschiedenen Prozesse erzielbare Schadstoffentfernung ist somit unterschiedlich. Allerdings spielt bei diesem Systemtyp die hohe hydraulische Belastung infolge der geringen Filterfläche und der fehlenden Retention eine entscheidende Rolle. Diese führt zu häufigeren Entlastungen, wenn die Kolation bei Filtern nicht regelmässig behoben wird, was sie unterhaltsintensiv macht.

### Havarierückhalt und Störfall

Bei der zentralen Behandlung kann der Rückhalt von Stoffen aus einer Havarie oder von einem Störfall gezielt integriert werden. Bei der flächigen dezentralen Behandlung erfolgt der Rückhalt in den Bodenschichten, welche nach einer Havarie entsorgt werden müssen.

## 2.5 Fremdwasser

Fremdwasser ist mehr oder weniger stetig anfallendes, nicht verschmutztes Wasser, welches in die Entwässerungsleitung zu einer SABA eingeleitet wird. Die Ursachen von Fremdwasser sind Drainagen, Bäche, Überläufe aus Pumpwerken zur Absenkung von Grundwasser, Brunnenabläufe und weitere.

Fremdwasser verursacht bei jedem SABA-Typ und jeder SABA Probleme. Bei Retentionsfilterbecken führt es zu hydraulischen Problemen, da diese infolge der konstanten Einleitung von Fremdwasser vernässen und dadurch kolmatieren können. Zwar sind bewachsene Sandfilter diesbezüglich toleranter als Bodenfilter, dennoch kann Fremdwasser zur vorzeitigen Kolmation führen. Im schlimmsten Fall ist Fremdwasser kalkhaltig oder mit Kalk übersättigt, was zu Ausfällungen in Leitungen oder Bauwerken führt. Leitungen können dadurch schneller verstopfen. Gelangen Kalkausfällungen auf Retentionsfilterbecken, führt dies über kurz oder lang zur Kolmation auf deren Oberfläche, welche ein aufwändiges und teures Abschälen der entsprechenden Schicht zur Folge hat. Stammt Fremdwasser von landwirtschaftlichen Nutzflächen, kann durch den Eintrag von Dünger Algenwachstum resultieren.

### 1. Priorität – Fremdwasser von SABA fernhalten

Fremdwasser sollte separat gefasst und vor der SABA separat abgeleitet werden. Abklärungen, ob mit Fremdwasser zu rechnen ist, sollten bereits in der Voruntersuchung des Entwässerungssystems erfolgen. Wird Fremdwasser vermutet oder festgestellt, geben Fremdwasseruntersuchungen Aufschluss über die Menge und das Auftreten (konstant, nur nach Regen und/oder saisonal). Die Art der Fremdwasseruntersuchung kann auf die vorliegende Situation angepasst werden und gegebenenfalls die Bestimmung des pH-Werts beinhalten. Anschliessend kann die Ursache des Fremdwasseranfalls gesucht und diese wenn möglich beseitigt werden.

### 2. Priorität - Fremdwasserweiche

Ist keine Abtrennung des Fremdwassers möglich, muss es mittels Fremdwasserweiche vor einer SABA oder spätestens im Einlaufbauwerk abgetrennt werden. Wird es erst nach Durchströmen eines Absetzbeckens entlastet, gelangt ein wesentlicher Teil der Schadstofffracht im Absetzbecken, die sich nach einem Regenereignis noch im Absetzbecken befinden, kontinuierlich ins Gewässer.

Fremdwasserweichen vor einer SABA oder im Einlaufbauwerk müssen gewährleisten, dass Leichtflüssigkeiten zurückgehalten werden. Dies ist durch eine entsprechende Anordnung, beispielsweise hinter einer Tauchwand, zu gewährleisten. Bei Fremdwasserweichen ist darauf zu achten, dass sie mit geringem Unterhaltsaufwand zuverlässig funktionieren.

Das getrennte Ableiten von Fremdwasser vor der SABA hat jedoch absolute Priorität, denn jede Fremdwasserweiche reduziert die Gesamtreinigungsleistung einer SABA, da die Unterscheidung zwischen Strassenabwasser und Fremdwasser mit keiner Fremdwasserweiche präzise möglich ist. Dadurch erfolgt immer eine, wenn auch im Optimalfall geringe, Gewässerbelastung.

## 2.6 Projektierung von SABA

Das Behandlungsverfahren ist zwar der wichtigste Teil einer SABA. Damit dieses und damit die SABA optimal funktionieren, sind bei der Projektierung folgende Aspekte wichtig, auf welche in diesem Dokument nur ansatzweise eingegangen wird:

- Das Entwässerungssystem leitet das Strassenabwasser eines oder mehrerer Einzugsgebiete zur SABA. Die Ableitung erfolgt im freien Gefälle oder mit einer Druckleitung, die von einem Becken mit Pumpwerk gespiesen wird. Oft werden beide Typen für unterschiedliche Teileinzugsgebiete verwendet.
- Die Werkzeuge zur hydraulischen Dimensionierung des Entwässerungssystems und der SABA richten sich nach der Grösse des Einzugsgebiets und dessen Vielartigkeit.

Eine SABA und das Entwässerungssystem mit einem Einzugsgebiet von wenigen Hektaren Fläche und Freispiegelableitung können mit IDF-Kurven [65] oder ähnlichen, einfach zu nutzenden Werkzeugen bemessen werden. Bei grösseren, mehrteiligen Einzugsgebieten mit Freispiegelkanälen und Pumpwerken sind die entsprechenden Simulationswerkzeuge für eine hydrodynamische Modellierung notwendig.

- Damit eine SABA unterhaltsarm und sicher betrieben werden kann, sind Unterhaltsaspekte bereits bei der Projektierung zu berücksichtigen. Es ist deshalb von Vorteil, wenn die Unterhaltsdienste dazu miteinbezogen werden.



## 3.2 Beurteilung der Schadstoffentfernung

Die Bestimmung der Schadstoffentfernung eines Verfahrens für jeden Schadstoff mittels Ablaufkonzentrationen oder Wirkungsgraden ist aufwändig und teuer. Deshalb werden zur Beurteilung der Schadstoffentfernung Indikatorstoffe verwendet. Diese erfüllen folgende Bedingungen:

- Ein Indikatorstoff ist für Gewässer problematisch und repräsentativ für andere problematische Stoffe oder Stoffgruppen. Zudem ist er quantitativ relevant.
- Von Indikatorstoffen gibt es genügend Daten von Leistungs- oder Funktionsprüfungen.
- Die Indikatorstoffe decken zusammen das gesamte Spektrum der notwendigen Prozesse der Schadstoffentfernung ab.

Die zur Leistungsbeurteilung verwendeten Indikatorstoffe sind GUS, Kupfer und Zink (Tab. 3.1). Spezielles Augenmerk wird dabei auf Zink gegeben, denn ein wesentlicher Teil der Zinkfracht im Strassenabwasser stammt von Reifenabrieb. Verzinkte Fahrzeurückhaltesysteme sind eine weitere Quelle.

Tab. 3.1 Stoffe zur Leistungsbeurteilung von SABA (Anhang I.2).

Schadstoff	... ist Indikator hauptsächlich für
GUS	Partikel, Reifenabrieb, PAK
Cu	Feinpartikel Schwermetalle
Zn	Feinpartikel, Schwermetalle, Reifenabrieb, Fahrzeurückhaltesysteme

## 3.3 Leistungsbeurteilung: Behandlungsverfahren, SABA

### 3.3.1 Kriterien zur Leistungsbeurteilung

Für den Leistungsvergleich von Behandlungsverfahren werden die in Tab. 3.2 beschriebenen Kriterien verwendet. Sie sind gemäss der in Abb. 3.1 beschriebenen beiden Systemgrenzen eingefärbt. Die hell gefärbten Kriterien beziehen sich auf die Systemgrenze des Behandlungsverfahrens und können direkt zwischen den Verfahren verglichen werden. Zu diesen Kriterien zählen Ablaufkonzentrationen, Wirkungsgrade, Flächenbedarf und Durchfluss des Verfahrens.

Beim Vergleich von Behandlungsverfahren werden Entlastungen nicht berücksichtigt, da diese die Folge der hydraulischen Dimensionierung eines Behandlungsverfahrens sind. Bei dezentralen Schachtsystemen ist eine Trennung von behandeltem und entlastetem Strassenabwasser oft nicht möglich, da die Entlastung oft nicht von der Behandlung trennbar ist. In diesem Fall wird die Gesamtwirkung des Systems bestimmt.

Die dunkel gefärbten Kriterien beziehen sich auf die gesamte SABA und beinhalten damit projektspezifische Aspekte, was den Vergleich von SABA unschärfer macht. SABA-spezifische Aspekte sind beispielsweise Pumpwerke, welche sich nicht am Standort der SABA befinden, bereits bestehende Staukanäle oder umgenutzte Ölabscheider, die nicht in den Kosten erscheinen. Diese Faktoren sind auch abhängig vom Einzugsgebiet. Ebenso erschweren unterschiedliche Dimensionierungsvorgaben bezüglich des hydraulischen Wirkungsgrads den Vergleich von SABA.

Bei den Investitionskosten werden solche Faktoren berücksichtigt, indem zusätzlich zu den im Detail untersuchten SABA die Investitionskosten aus dem MISTRA SABA Kataster ausgewertet werden. Eine vergleichbare Thematik betrifft die Unterhaltskosten. Dort sind nicht bei jeder SABA dieselben Kostenarten berücksichtigt. Um diese Unterschiede auszugleichen, wurden mindestens drei Anlagen desselben Typs verglichen.

Tab. 3.2 Kriterien zur Leistungsbeurteilung von Behandlungsverfahren (Anhang III).

	Kriterium	Einheit	Beschreibung
Schadstoffrückhalt	Ablaufkonzentration	ug/l mg/l	Die frachtgemittelten Ablaufkonzentrationen von GUS, Kupfer und Zink sind relevant für die Gewässerbelastung und können mit Angaben gemäss GSchV verglichen werden. Ablaufkonzentrationen zeigen die Wirksamkeit der Schadstoffentfernung direkt an, weshalb sie hauptsächlich zur Beurteilung der Schadstoffentfernung verwendet werden.
	Wirkungsgrad	%	Der Wirkungsgrad eines Verfahrens für GUS, Kupfer und Zink gilt ohne Entlastungen. Der Wirkungsgrad ist eine technische Grösse ohne Bezug zur Gewässerbelastung. Hohe Wirkungsgrade bedeuten nicht automatisch tiefe Ablaufkonzentrationen und umgekehrt.
Flächenbedarf	Durchfluss	l/min/m <sup>2</sup>	Volumen, das pro Minute und pro Quadratmeter Filterfläche von einem Verfahren behandelt wird.
	Flächenbedarf Behandlung	m <sup>2</sup> /ha	Benötigte Behandlungsfläche eines Verfahrens pro Hektare angeschlossene Strassenfläche.
	Flächenbedarf SABA	m <sup>2</sup> /ha	Benötigte Fläche einer SABA inklusive aller Elemente einer SABA pro Hektare angeschlossene Strassenfläche.
Unterhalt, Kosten	Anforderungen an den Unterhalt	-	Qualitative Einschätzung zur Einfachheit des Unterhalts von unterschiedlichen SABA-Typen.
	Unterhaltsaufwand	CHF/ha/Jahr	Kosten für den Unterhalt einer SABA pro Hektare angeschlossene Strassenfläche und pro Jahr.
	Investitionskosten	CHF/ha	Investitionskosten pro Hektare angeschlossene Strassenfläche.

### 3.3.2 Leistungsklassen

Zum Vergleich der von ihrer Art und Einheit her betrachtet unterschiedlichen Kriterien wird eine Fünferskala verwendet (Tab. 3.3). Klasse 5 entspricht der besten Leistung eines Kriteriums. Bei den Ablaufkonzentrationen beispielsweise entspricht dies denjenigen Werten, die heute mit SABA erzielbar sind. Bei GUS entspricht Klasse 5 der frachtgemittelten Ablaufkonzentrationen von 10 mg/l und weniger. Der Klasse 2 werden Ablaufkonzentrationen von mehr als 30 mg/l bis und mit 40 mg/l zugeordnet. Klasse 1 ist die schlechteste Klasse und beinhaltet Werte über 40 mg/l.

Tab. 3.3 Zuordnung der numerischen Werte zu den Leistungsklassen.

Leistungsklasse	Ablaufkonzentration frachtgemittelt			Wirkungsgrad	Durchfluss (spezifisch)	Flächenbedarf		Einfacher Unterhalt	Kosten	
	GUS	Kupfer	Zink			GUS, Kupfer, Zink	Verfahren		SABA	Unterhalt
	mg/l	ug/l	ug/l	%	l/min/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /ha	m <sup>2</sup> /ha	-	CHF/ha/Jahr	CHF/ha
5	≤10	≤5	≤10	≥90	≥6.0	≤50	≤60	5	≤700	≤150'000
4	≤20	≤10	≤20	≥80	≥4.5	≤75	≤120	4	≤1'400	≤200'000
3	≤30	≤15	≤30	≥70	≥3.0	≤100	≤180	3	≤2'100	≤250'000
2	≤40	≤20	≤40	≥60	≥1.5	≤125	≤240	2	≤2'800	≤300'000
1	>40	>20	>40	<60	<1.5	>125	>240	1	>2'800	>300'000

Die Abstufung der Leistungsklassen erfolgt so, dass die Leistungsunterschiede zwischen den Behandlungsverfahren am besten sichtbar sind. Die Schrittweiten zwischen zwei Klassen sind jeweils gleich gross. Die Klassen 5 und 1 bezeichnen Schwellenwerte, die unter oder überschritten werden. Bei den Ablaufkonzentrationen von GUS enthält Klasse 1 Werte über 40 ug/l, unabhängig davon ob 41 ug/l oder 100 ug/l. Dies zeigt, dass der Unterschied zwischen Klasse 2 und Klasse 1 beträchtlich sein kann. Eine ideale SABA erzielt bei allen Kriterien die Leistungsklasse 5 (Abb. 3.2).

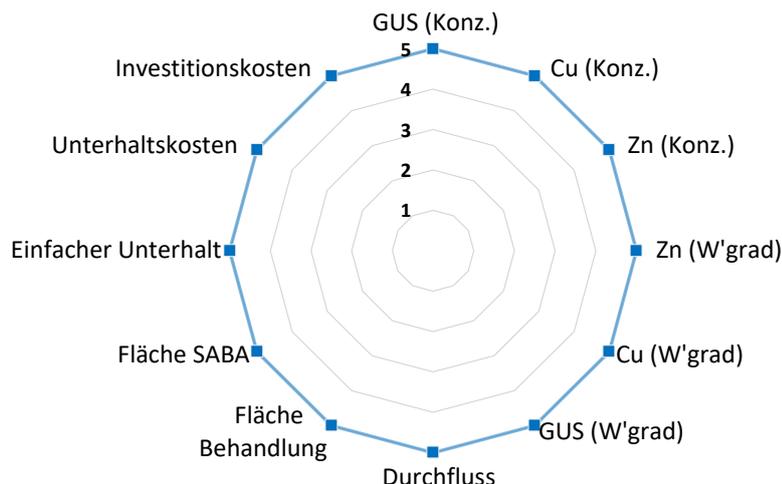


Abb. 3.2 Leistungscharakteristik einer idealen SABA: Klasse 5 bei allen Kriterien.

### 3.3.3 Vergleich Leistungsklassen mit gesetzlichen Vorgaben (Schadstoffe)

Die Leistungsklassen der GUS-, Kupfer- und Zink Ablaufkonzentrationen sind in Abb. 3.3 mit den bereits erwähnten Schwellenwerten aus der GschV [1] (Tab. 2.1) verglichen.

#### GUS

Als Vergleichswert für GUS wird die Einleitbedingung für geklärtes kommunales Abwasser gemäss Anhang 3.1 GSchV von 15 und 20 mg/l verwendet<sup>3</sup>. Die Leistungsklasse 5 unterschreitet mit einem Wert von weniger als 10 mg/l GUS beide Einleitbedingungen. Die Leistungsklasse 4 (10-20 mg/l) liegt im Bereich beider Einleitbedingungen.

#### Kupfer und Zink

Bei Kupfer und Zink werden zum Vergleich der Leistungsklassen die Anforderungen für Oberflächengewässer hinzugezogen (Gesamte Gehalte, Anhang 2, GSchV). Bei Kupfer entspricht die Anforderung von 5 ug/l oder weniger der Leistungsklasse 5 ( $\leq 5$  ug/l). Die Anforderung von 20 ug/l oder weniger bei Zink entspricht Leistungsklasse 4 ( $>10$  bis  $\leq 20$ ), die Leistungsklasse 5 ( $\leq 10$  ug/l) unterschreitet die Anforderung.

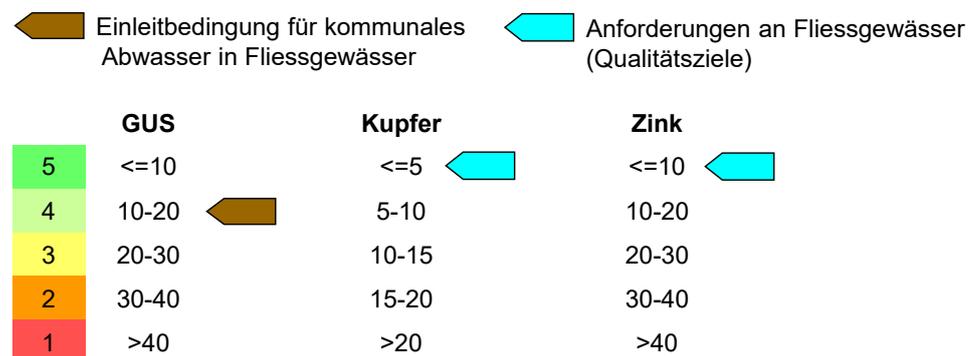


Abb. 3.3 Vergleich der Leistungsklassen mit der Einleitbedingung für gereinigtes kommunales Abwasser in Fließgewässer (GUS) und mit den Anforderungen an die Wasserqualität für Kupfer und Zink (totale Gehalte).

<sup>3</sup> 15 mg/l für mehr als 10'000 EW, 20 mg/l für weniger als 10'000 EW.

### Folgerungen für Strassenabwasser

Die Anforderungen an Fliessgewässer unterscheiden sich von Einleitbedingungen. Die Einleitbedingung für GUS bei kommunalem Abwasser gilt am Ort der Einleitung. Dabei wird an der Einleitstelle von einem Verdünnungsverhältnis von mindestens 1:10 ausgegangen. Die GUS-Zusammensetzung bezüglich Schwermetalle und PAK im Strassenabwasser unterscheidet sich von derjenigen im geklärten, kommunalen Abwasser insofern, dass die Konzentrationen der Schwermetallgehalte und auch diejenigen von PAK höher sind. Deshalb sind die Einleitbedingungen von GUS von 20 und 15 mg/l nicht auf Strassenabwasser übertragbar und es ist sinnvoll, Konzentrationen von weniger als 10 mg/l zu erzielen (Klasse 5).

Im Gegensatz zur Einleitbedingung von GUS gilt die Anforderungen an die Wasserqualität in Fliessgewässern bei Kupfer und Zink nach weitgehender Durchmischung in einem Fliessgewässer sowie bei jedem Wasserstand. Im Vergleich zur Einleitung von gereinigtem kommunalem Abwasser weist Strassenabwasser eine deutlich höhere Abfluss- und Schadstoffdynamik auf (Anhang I.1). Gerade bei schwachen Gewässern kann dadurch das „mittlere“ Einleitverhältnis von 1:10 bei intensiveren Niederschlägen<sup>4</sup> häufig unterschritten werden, was eine geringe Verdünnung zur Folge hat.

Dies bedeutet, dass auch nach weitgehender Durchmischung im Gewässer die Konzentrationen von beispielsweise Schwermetallen deutlich über den Anforderungen der GSchV liegen können. Verschärfend wirkt die Einleitung von mehreren Entwässerungsabschnitten einer Autobahn oder von zusätzlichen Einleitungen aus der Siedlungsentwässerung in dasselbe Fliessgewässer.

### 3.3.4 Datengrundlage

Für den Leistungsvergleich wurden folgende Daten genutzt.

- Leistungsprüfungen gemäss den Vorgaben des ASTRA [11] oder möglichst vergleichbar mit diesen. Dies gilt auch für Daten aus internationalen Quellen. Ergänzend werden Angaben aus Funktionsprüfungen [13] oder vergleichbaren Untersuchungen genutzt.
- Angaben aus der Projektierung der SABA bezüglich des Einzugsgebiets, der Entwässerungsart, der Flächen und der Dimensionierungen, Pläne zur Wasserführung durch die SABA sowie zu Kosten und Entlastungen.
- Daten der Gebietseinheiten und Unterhaltsdienste zum Unterhaltsaufwand gemäss MISTRA-SABA.
- Hauptsächlich werden Daten von realisierten SABA ausgewertet. Daten von Laboranlagen oder Testanlagen werden ergänzend genutzt.

Die für die Beurteilung der Behandlungsverfahren verwendeten Dokumente und Anlagen sind in Tab. V.1 zusammengestellt.

---

<sup>4</sup> Sofern keine entsprechende Retention erfolgt.

# 4 Datenanalyse

## 4.1 Schadstoffentfernung

### 4.1.1 Ergebnisse

#### Retentionsfilterbecken

Die Leistungsklassen der Ablaufkonzentrationen und Wirkungsgrade von GUS, Kupfer und Zink sind in Abb. 4.1 dargestellt. Bewachsene Retentionsfilterbecken zeigen für Ablaufkonzentrationen von GUS, Kupfer und Zink vergleichbare Leistungsklassen, nämlich Klasse 5 für GUS, und die Klassen 4 oder 5 für Kupfer und Zink. Der Unterschied zwischen bewachsenen Bodenfiltern und bewachsenen Sandfiltern bei Zink beruht auf präferenziellem Fluss bei einigen der untersuchten Retentionsbodenfiltern. Die Leistungsklassen der Ablaufkonzentrationen widerspiegeln sich in den Wirkungsgraden mit jeweils Klasse 5.

Technische RFB mit einer Eisenhydroxidschicht erzielen bei den Ablaufkonzentrationen bei zwei von drei SABA mit bewachsenen RFB vergleichbare Klassen. Bei der SABA Eisenhydroxid (2) sind die Ablaufkonzentrationen für Kupfer und Zink je eine Klasse geringer, was auf hohe Zulaufkonzentrationen mit entsprechend hohen Wirkungsgraden zurückzuführen ist. Der um eine und zwei Klassen tiefere Wirkungsgrad für GUS und Kupfer der SABA Eisenhydroxid (1) sind die Folge relativ geringer Zulaufkonzentrationen.

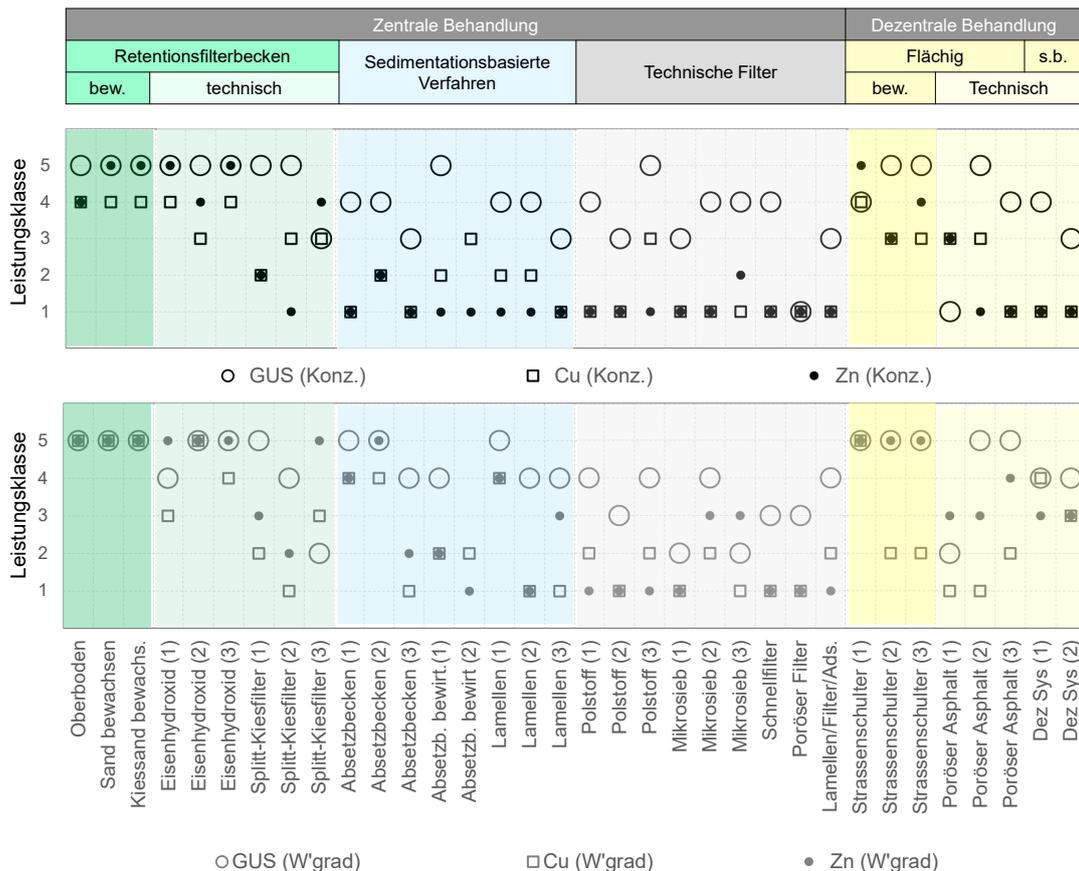


Abb. 4.1 Leistungsklassen Ablaufkonzentrationen (oben) und Wirkungsgrade (unten). Bei SABA mit Oberboden und bewachsenen Sandfiltern sind die Ergebnisse mehrerer SABA zusammengefasst. bew=bewachsen, technisch=nicht bewachsen, s.b.=schachtbasiert. Zuordnung der SABA in Tab. V.1.

Splitt-Kiesfilter zeigen im Vergleich zu bewachsenen Sandfiltern bei den Ablaufkonzentrationen und bei den Wirkungsgraden tiefere Leistungsklassen, vor allem bei Kupfer und

Zink. Bei Kupfer beträgt der Unterschied durchschnittlich eine und bei Zink drei Klassen.

Die eine Ursache für den geringeren Rückhalt von Kupfer und Zink ist die im Vergleich zu bewachsenen Sandfiltern gröbere Körnung der Filterschichten beim Splitt-Kiesfilter und damit eine geringere Filtration. Die andere Ursache ist in der Deckschicht zu finden. Zwar bildet sich auch über dem Splitt-Kiesfilter eine Deckschicht, die als Filter und Adsorber wirkt. Diese bildet sich jedoch, abhängig von der Belastung, erst nach über einem halben Jahr. Zudem trocknet sie bei längeren Trockenphasen aus, was wegen der Risse zwar die hydraulische Durchlässigkeit gewährleistet, jedoch zu präferenziellem Fluss führt.

### **Sedimentationsbasierte Verfahren**

Die sedimentationsbasierten Verfahren zeigen bei der Schadstoffentfernung im Vergleich zu Retentionsfilterbecken ein anderes Bild. Bei den Ablaufkonzentrationen von Kupfer und Zink zeigen sedimentationsbasierte Verfahren die Klassen 1 oder 2. Die Ausnahme des bewirtschafteten Absetzbeckens (1) ist auf wenige Stichproben zurückzuführen. Somit betragen die Ablaufkonzentrationen von Kupfer meistens über 15 µg/l und diejenigen von Zink über 30 µg/l.

Zwischen Absetzbecken mit und ohne Lamellen ist kein Unterschied erkennbar. Die beim bewirtschafteten Absetzbecken erzielte Klasse 3 bei Kupfer wird mit der hohen Zinkkonzentration von 68 µg/l (Klasse 1) relativiert. Ablaufkonzentrationen der Klasse 1 können die Klassengrenze um das Mehrfache überschreiten, und daher deutlich schlechter sein als Klasse 2, was bei einigen der beschriebenen SABA der Fall ist. Bei GUS ist die Leistungseinbusse im Vergleich zu Retentionsfilterbecken mit Klasse 3 bis 4 geringer.

### **Technische Filter**

Technische Filter sind bei den Ablaufkonzentrationen mit sedimentationsbasierten Verfahren vergleichbar. Für GUS werden mehrheitlich die Leistungsklassen 3 bis 4 und einmal die Leistungsklasse 5 erzielt. Bei Zink wird durchgehend die Klasse 1 und bei Kupfer, mit einer Ausnahme, Polstoff (3) mit Klasse 3, ebenso die Klasse 1 erzielt. Die im Vergleich zu den Ablaufkonzentrationen schlechtere Klassierung der Wirkungsgrade ist einerseits auf die hohen Ablaufkonzentrationen zurückzuführen, welche den Grenzwert für Klasse 1 teilweise um das Mehrfache überschreiten. Andererseits sind die Zulaufkonzentrationen infolge vorgelagerter Pumpwerke oder einer Vorbehandlung tiefer.

Es gibt zweierlei Ursachen für die mit Sedimentationsverfahren vergleichbare Schadstoffentfernung technischer Filter. Erstens ist es die Partikelgrößenverteilung der Schadstoffe und zweitens der hohe spezifische Durchfluss, welcher eine hohe Filterbelastung mit kurzer Aufenthaltszeit bewirkt. Gleichzeitig können dadurch technische Filter kleiner gebaut werden, was die Kosten begrenzt. Die hohen Durchflüsse bedingen jedoch Porendurchmesser im Bereich von 10 bis 20 Mikrometern. Dies vermindert den Rückhalt der feinpartikulären Anteile von Kupfer und Zink, welche über die Hälfte der Gesamtkonzentration betragen können.

Im Vergleich zu Kupfer und Zink ist der Rückhalt von GUS besser, da bei GUS Partikel mit mehr als 0.45 Mikrometer Durchmesser massgebend sind. Ob Polstofffilter mit einem feinporigeren Aufbau eine massgebliche Verbesserung mit sich bringen, ohne die Kosten zu erhöhen, müssen Leistungsprüfungen zeigen.

Dieselben Zusammenhänge gelten auch für das Mikrosieb, wobei zu erwähnen ist, dass mit den bisher eingesetzten Typen kein stabiler Betrieb möglich ist. Der Schnellfilter zeigt im Vergleich zum Polstofffilter vergleichbare Ablaufkonzentrationen und Wirkungsgrade, ebenso eine SABA mit porösem Filter und eine SABA mit einer Kombination aus Lamellenabscheider und Filter/Adsorber.

### **Dezentrale Behandlung**

Die Leistungsklassen der flächigen, dezentralen Behandlung mit der Versickerung in der Strassenschulter entsprechen denjenigen bewachsener Bodenfilter. Die Ablaufkonzentra-

tionen von GUS und Zink sind vergleichbar, diejenige von Kupfer ist bei den beiden Banketten (2) und (3) um eine Klasse geringer, was sich auch in Wirkungsgraden zeigt. Eine Erklärung dafür sind die tiefen Zulaufkonzentrationen. Die Zinkkonzentrationen im Ablauf mit durchschnittlich Klasse 4 und die Wirkungsgrade für Zink mit Klasse 5 relativieren bei diesen beiden Banketten die etwas geringeren Wirkungsgrade für Kupfer.

Poröser Asphalt zeigt kein einheitliches Bild. Ablaufkonzentrationen von GUS, Kupfer und Zink im Bereich von Absetzbecken sind möglich. Die beiden schachtbasierten dezentralen Systeme DezSys (1) und DezSys (2) haben eine mit sedimentationsbasierten Verfahren und technischen Filtern vergleichbare Charakteristik, indem sie für GUS Ablaufkonzentrationen zwischen Klasse 3 und Klasse 4 erzielen. Die Werte für Kupfer und für Zink entsprechen Klasse 1.

#### 4.1.2 Zusammenfassung und Anforderungsstufen

Die Leistungsklassen der erzielten Ablaufkonzentrationen und Wirkungsgrade der Verfahren sind in Tab. 4.1 als Durchschnittswerte der Ablaufkonzentrationen sowie der Wirkungsgrade zusammengefasst. Sie zeigen vor allem bei den Ablaufkonzentrationen von GUS, Kupfer und Zink ein differenziertes Bild. Dieses ermöglicht sinngemäss die Zuordnung der Verfahren zu den Anforderungsstufen gemäss der Richtlinie Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen [9] und zwar in erweiterter Form unter Berücksichtigung von Kupfer und Zink.

Tab. 4.1 Zusammenfassung der Leistungsklassen, der Ablaufkonzentrationen und der Wirkungsgrade und Zuordnung zu den Anforderungsstufen. Fe-Oxid=Eisenhydroxid.

Anforderung	Verfahren	Ablaufkonzentrationen			Wirkungsgrade		
		GUS	Kupfer	Zink	GUS	Kupfer	Zink
Erhöht	Bankette, Mulden-Rigolen	5	4	4	5	3	5
	Bewachsene Sandfilter	5	4	5	5	5	5
	Bewachsene Bodenfilter	5	4	4	5	5	5
	RFB mit Fe-Oxid Schicht	5	4	4	5	4	5
Standard	Splitt-Kiesfilter	4	2	1	4	3	4
Erleichtert	Absetzbecken Dauerstau	4	1	1	4	3	4
	Polstofffilter	4	1	1	4	1	1
	Schnellfilter	4	1	1	4	1	1
	Poröser Filter	1	1	1	1	1	4
	Dezentrale Schachtsysteme	3	1	1	4	3	3
	Poröser Asphalt (noch unklar)	1-5	1-3	1-3	2-5	1-3	1-3

Bezüglich der Ablaufkonzentrationen können die Anforderungsstufen wie folgt unterschieden werden:

- Die Anforderung **erhöht** zeichnet sich aus durch tiefe Ablaufkonzentrationen von GUS, Kupfer und Zink. Bei GUS wird die Klasse 5 und bei Kupfer und Zink werden die Klassen 4 bis 5 erzielt. Die Wirkungsgrade dieser Verfahren liegen unabhängig von den Zulaufkonzentrationen bei allen drei Stoffen bei Klasse 5. Dazu gehören die Versickerung über die Strassenschulter, Mulden-Rigolen, bewachsene Sand- und Bodenfilter sowie unbewachsene Retentionsfilterbecken mit einer Eisenhydroxid-Schicht.
- Mit der Anforderung **standard** werden zwar relativ geringe Ablaufkonzentrationen von GUS-, aber erhöhte Kupfer- und Zinkkonzentrationen erzielt. Die GUS Konzentrationen entsprechen Klasse 4, diejenigen von Kupfer der Klasse 2 und diejenigen von Zink bei Klasse 1, wobei Klasse 2 knapp verfehlt wird. Der Splitt-Kiesfilter ist der einzige Vertreter dieser Anforderungsstufe.
- Mit der Anforderung **erleichtert** werden relativ geringe GUS-Ablaufkonzentrationen, aber hohe Ablaufkonzentrationen von Kupfer und Zink erreicht. Bei GUS entspricht dies der Klasse 3 bis 4 und bei Kupfer und Zink der Klasse 1. Zu diesen Verfahren zählen

Absetzbecken im Dauerstau, Polstofffilter, Mikrosieb, Schnellfilter, Poröser Filter und dezentrale Schachtsysteme.

Entsprechend können die Anforderungsstufen für die Behandlung festgelegt werden (Tab. 4.2). Für die Anforderungsstufe **erhöht** gelten bei GUS Ablaufkonzentrationen der Klasse 5 und bei Kupfer und Zink mindestens der Klasse 4. Die Wirkungsgrade erreichen Klasse 5 (> 90%).

Für die Anforderungsstufe **standard** gilt bei GUS die Ablaufkonzentrationen der Klasse 4 und bei Kupfer und Zink je die Klasse 2. Bei Zink wird davon ausgegangen, dass der Splitt-Kiesfilter als Hauptbehandlung Klasse 2 erzielt. Bei einer SABA mit Anforderung **standard** kann für die Behandlung von Wirkungsgraden bei GUS, Kupfer und Zink von mindestens der Klasse 4 ausgegangen werden.

Für die Anforderungsstufe **erleichtert** gilt eine GUS-Ablaufkonzentration der Klasse 4 ( $\leq 20$  mg/l) und der Klasse 1 bei Kupfer ( $\geq 20$  ug/l) und Zink ( $\geq 40$  ug/l). Bei GUS gilt ein Wirkungsgrad der Klasse 4 ( $\geq 80$  %), und bei Kupfer und Zink ein Wirkungsgrad der Klasse 3 ( $\geq 70$  %). Die Wirkungsgrade beziehen sich auf eine SABA mit dem jeweiligen Verfahren ohne massgebliche Vorbehandlung.

Tab. 4.2 Anforderungen an die Leistungsklassen der Ablaufkonzentrationen und Wirkungsgrade der Behandlung eingeteilt nach Anforderungsstufen.

Anforderung	Ablaufkonzentrationen			Wirkungsgrade		
	GUS	Kupfer	Zink	GUS	Kupfer	Zink
erhöht	5	4	4	5	5	5
standard	4	2	2	4	4	4
erleichtert	4	1	1	4	3	3

## 4.2 Hydraulische Leistung und Flächenbedarf

Zusammengefasst werden die Ergebnisse wie folgt beschrieben.

- SABA mit Bodenfiltern benötigen am meisten Fläche, gefolgt von SABA mit bewachsenen Sandfiltern. Splitt-Kiesfilter benötigen weniger bis gleichviel Fläche wie bewachsene Sandfilter, was zu prüfen ist.
- Der Flächenbedarf von SABA mit technischen Filtern ist, trotz der Kompaktheit der Verfahren, infolge benötigter Zufahrten, Wendeplätzen und weiteren Elementen nicht wesentlich geringer als derjenige von bepflanzten Sandfiltern.
- Sedimentationsbasierte Verfahren zeigen im Vergleich zu technischen SABA und bewachsenen Sandfiltern einen geringeren Flächenbedarf.
- Dezentrale schachtbasierte Systeme haben den geringsten Flächenverbrauch.

### Retentionsfilterbecken

Bewachsene Retentionsfilterbecken weisen spezifische Durchflüsse der Klasse 2 und 3 auf (Abb. 4.2). Bepflanzte Bodenfilter erzielen in der Regel Werte im Bereich Klasse 1 oder Klasse 2, während bewachsene Sandfilter<sup>5</sup> Werte zwischen Klasse 2 und 3 erreichen. Bei den untersuchten bewachsenen Kiesfiltern wird Klasse 2 erzielt. Die spezifischen Durchflüsse von Eisenhydroxid-RFB entsprechen den Klassen 1 und 2 und sind damit geringer als diejenigen von bewachsenen Bodenfiltern.

Die Durchflüsse von Splitt-Kiesfiltern liegen mit den Klassen 3 und 4 im Bereich von bewachsenen Sandfiltern und höher. Bei Splitt-Kiesfiltern variieren die Durchflüsse jedoch

<sup>5</sup> Bei bewachsenen Sandfiltern ist zudem die Flächenbelastung zu beachten (Anhang IV.1.1).

jahreszeitlich und nehmen mit zunehmender Standzeit ab. Ob solche hohen Werte während eines gesamten Betriebszyklus erzielt werden, ist zu überprüfen.

Somit kann gesagt werden, dass Retentionsfilterbecken mit einem Splitt-Kiesfilter kleiner bis gleich gross werden wie solche mit einem bewachsenen Sandfilter. Bewachsene Bodenfilter brauchen mehr Fläche als bewachsene Sandfilter, RFB mit einer Eisenhydroxidschicht brauchen gleichviel oder mehr Fläche als bewachsene Bodenfilter.

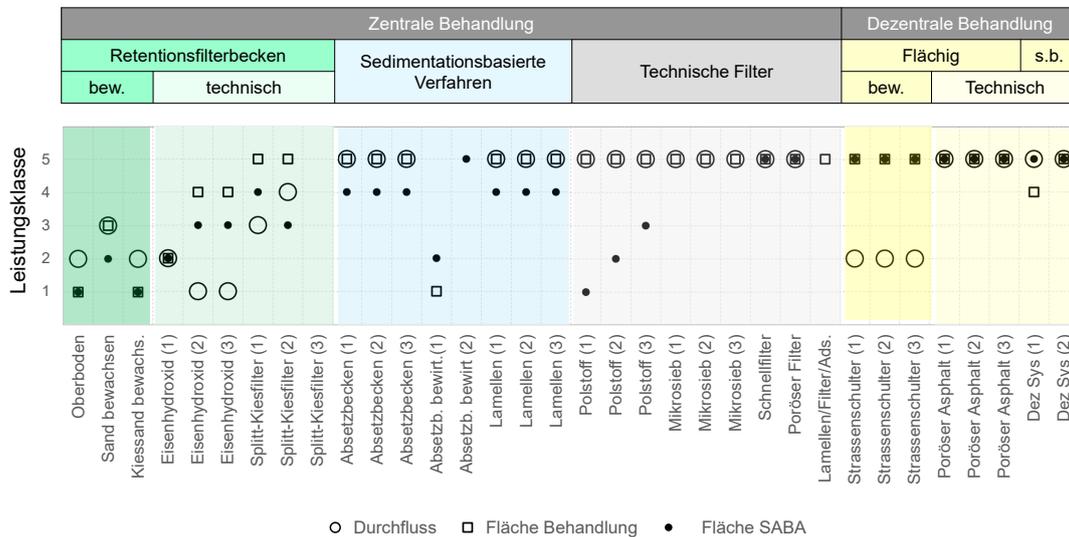


Abb. 4.2 Vergleich der Durchflüsse und des Flächenbedarfs der Behandlung sowie der SABA. Bei SABA mit Oberboden und bewachsenen Sandfiltern sind die Ergebnisse mehrerer SABA zusammengefasst. Zuordnung der Anlagen in Tab. V.1.

Diese Reihenfolge zeigt sich auch etwas weniger deutlich beim Flächenbedarf der SABA. Der Flächenbedarf von SABA mit Bodenfiltern (Klasse 1) ist grösser als derjenige eines bewachsenen Sandfilters (Klasse 2). Die Ergebnisse beider Splitt-Kiesfilter (1) und (2) sind eine oder zwei Klassen besser als beim bewachsenen Sandfilter. Allerdings sind beide Splitt-Kiesfilter als Vorbehandlungen dimensioniert. Eine SABA mit einem Splitt-Kiesfilter als Hauptbehandlung dürfte im Vergleich zum bewachsenen Sandfilter eine kleinere bis gleich grosse Fläche benötigen.

Der Flächenbedarf von SABA mit einem Retentionsfilterbecken mit einer Eisenhydroxidschicht liegt zwischen den Klassen 2 und 4 und damit im Bereich von SABA mit Retentionsfilterbecken. Die gute Klassierung beider SABA Eisenhydroxid (2) und (3) beruht auf einer optimalen Flächenausnutzung.

### Sedimentationsbasierte Verfahren

Sedimentationsbasierte Verfahren zeigen beim spezifischen Durchfluss sowie beim Flächenbedarf für die Behandlung die höchste Leistungsklasse 5. Das bewirtschaftete Absetzbecken (1) wurde sehr gross dimensioniert. Die absolut erzielten Werte liegen für den Durchfluss mehrfach über der höchsten Leistungsklasse. Trotzdem erzielen die sedimentationsbasierten SABA in der Kategorie "Flächenbedarf SABA" meistens nur die Klasse 4.

Eine Ursache für diesen Sachverhalt ist verfahrenstechnisch bedingt, denn damit sich Partikel absetzen können, ist eine ausreichende Oberfläche nötig. Ebenfalls eine Rolle spielen Flächen für die Zufahrt zu den Becken sowie weitere Installationen. Insgesamt zeigen die Daten, dass SABA mit einem sedimentationsbasierten Verfahren weniger Fläche benötigen als ein bewachsener Sandfilter. Der Unterschied liegt bei 1 oder 2 Leistungsklassen.

### Technische Filter

Technische Filter weisen, vergleichbar mit den sedimentationsbasierten Verfahren, für den Durchfluss und den Flächenbedarf für die Behandlung die höchste Leistungsklasse 5 (über 8 l/min/m<sup>2</sup>, unter 50 m<sup>2</sup>/ha) auf. Die absoluten Zahlen mit Werten von über 40 l/min/m<sup>2</sup>

und einem Flächenbedarf von weniger als 6 m<sup>2</sup>/ha zeigen, wie hoch solche Filter hydraulisch belastet sind und den Schadstoffrückhalt entsprechend begrenzen.

Diese hohen Durchflüsse schlagen sich jedoch nicht unbedingt in einem geringen Flächenbedarf der SABA nieder, da zusätzliche Komponenten benötigt werden. Der technische Filter begrenzt den Durchfluss, weshalb ein Retentionsvolumen notwendig ist, das üblicherweise als Betonbecken realisiert wird. Zusätzlich zur Retention ist oft ein Becken zur Schlammbehandlung des Rückspülwassers nötig. Diese Komponenten müssen unterhalten werden, was entsprechende Zufahrten erfordert. Ebenso sind Flächen für Leitungen, Schächte und teilweise Pumpinstallationen nötig. Alle diese Faktoren erhöhen den Flächenbedarf.

Beim Flächenbedarf einer SABA erzielen die drei Polstofffilter deshalb die Klassen 1, 2 und 3, wobei die Polstoff (2) mit Klasse 1 infolge des kleinsten der drei Einzugsgebiete (4 ha) nicht repräsentativ ist. Die beiden anderen Polstofffilter-SABA sind mit Klasse 2 und 3 vergleichbar mit einem bewachsenen Sandfilter (Klasse 2) oder einem Splitt-Kiesfilter (Klasse 2 und 3). Im Vergleich zu einem Absetzbecken sind diese beiden Polstofffilter-SABA um eine oder zwei Klassen tiefer.

Bei der Abschätzung des Flächenbedarfs ist entscheidend, welche Komponenten berücksichtigt werden, was anhand der Schnellfilter-SABA beispielhaft sichtbar wird (Anhang IV.3.3). Die Klasse 5 wird nur erreicht, weil zwei Pumpwerke sowie ein Stapelkanal vorgelegt und somit nicht auf dem Gelände der SABA sind. Beim Flächenvergleich ist somit entscheidend, wie allenfalls vorgelagerte Retentionsvolumina und Pumpwerke berücksichtigt sind.

Bei unterirdischen Anlagen im innerstädtischen Bereich kann argumentiert werden, dass die Fläche über einem Absetzbecken beispielsweise durch Parkplätze genutzt werden kann. Dies bedingt jedoch tiefe Becken mit speziellen Zugängen, die aufwändig zu reinigen sind, sowie entsprechende elektrotechnische Schutzvorkehrungen. Alle diese Faktoren erhöhen die Investitions- und Unterhaltskosten.

### **Dezentrale Verfahren**

Bei der Versickerung in der Strassenschulter oder bei Mulden-Rigolen ist der spezifische Durchfluss vergleichbar mit einem Retentionsfilterbecken mit bepflanztem Oberboden. Der Flächenbedarf dieser beiden Verfahren ist etwas anders zu interpretieren als bei den bisherigen Verfahren. Die Leistungsklassen 5 für den Flächenbedarf des gesamten Verfahrens gelten nur, wenn eine bereits vorhandene Böschung mit der entsprechenden Fläche genutzt werden kann. Muss hingegen zusätzliche Fläche für die Strassenschulter erworben werden, rutschen beide Kriterien in eine tiefere Leistungsklasse.

Bezüglich Flächenbedarf vorteilhaft ist die Behandlung im porösen Fahrbahnbelag. Da die Fahrbahn per se vorhanden ist, wird keine zusätzliche Fläche benötigt, weshalb für beide Kriterien die höchste Leistungsklasse 5 gilt.

Bei den schachtbasierten technischen Verfahren erzielen die Durchflüsse die höchste Leistungsklasse. Dasselbe gilt für den Flächenbedarf des gesamten Systems. Dabei zeigt sich der Effekt einer fehlenden oder nur geringen Retention, was kompakte Systeme ermöglicht. Allerdings geht der geringe Flächenbedarf bei einigen Systemen auf Kosten der Einbautiefe und des Unterhalts, was im nächsten Kapitel betrachtet wird.

## **4.3 Investitionskosten, Unterhaltskosten, Unterhalt**

Die Leistungsklassen von Investitions- und Unterhaltskosten sowie der Einfachheit des Unterhalts sind in Abb. 4.3 dargestellt. Die Investitionskosten gleicher Verfahrenstypen sind von zahlreichen SABA- und ortsspezifischen Faktoren abhängig. Dazu zählen unter anderem die hydraulische Dimensionierung, die Situation vor Ort, die Tiefe der Zuleitung, die Notwendigkeit von Pumpwerken sowie der Landerwerb. Ergänzend wurden Angaben aus dem MISTRA SABA Kataster genutzt (Abb. 4.4). Folgende Erkenntnisse ergeben sich daraus:

- Die Investitionskosten von SABA mit bewachsenem Sandfilter, SABA mit Absetzbecken im Dauerstau (Hauptbehandlung) und SABA mit Splitt-Kiesfilter sind in etwa vergleichbar.
- Die Unterhaltskosten von SABA mit bewachsenem Sandfilter und SABA mit Absetzbecken im Dauerstau (Hauptbehandlung) sind vergleichbar. Diejenigen von SABA mit Splitt-Kiesfilter sind höher.
- Die Investitionskosten von sedimentationsbasierten und auch anderen SABA sind in hohem Mass abhängig von standortspezifischen Faktoren. Unterirdische Absetzbecken im innerstädtischen Bereich sind mehrfach teurer als offene Absetzbecken im Gelände.
- SABA mit technischen Filtern sind die kostenintensivsten SABA, sowohl bei den Investitions- als auch bei den Unterhaltskosten. Dezentrale, schachtbasierte Systeme haben, wiederum abhängig von der Situation vor Ort, geringe Investitionskosten, dafür sehr hohe Unterhaltskosten.

### Retentionsfilterbecken

Bei den Investitionskosten bewachsener Retentionsfilterbecken sind diejenigen der Bodenfilter höher als diejenigen der bewachsenen Sandfilter, nämlich Klasse 3 statt 4. Dies wird auch in Abb. 4.4 bestätigt. Die Investitionskosten von SABA mit bewachsenem Sandfilter sind wenig abhängig von der Grösse des Einzugsgebiets. Auch bei den Unterhaltskosten ist der Sandfilter gegenüber dem Bodenfilter um eine Klasse im Vorteil. Die Anforderungen für den Unterhalt von Sandfilter-SABA sind mit Klasse 5 am geringsten, diejenigen des Bodenfilters mit Klasse 4 sind ebenfalls gering. Bei den SABA mit bewachsenem Kiessand-RFB sind die Investitions- und Unterhaltskosten hoch, weil sie mit einer Jährlichkeit von 10 Jahren und damit entsprechend gross dimensioniert wurden.

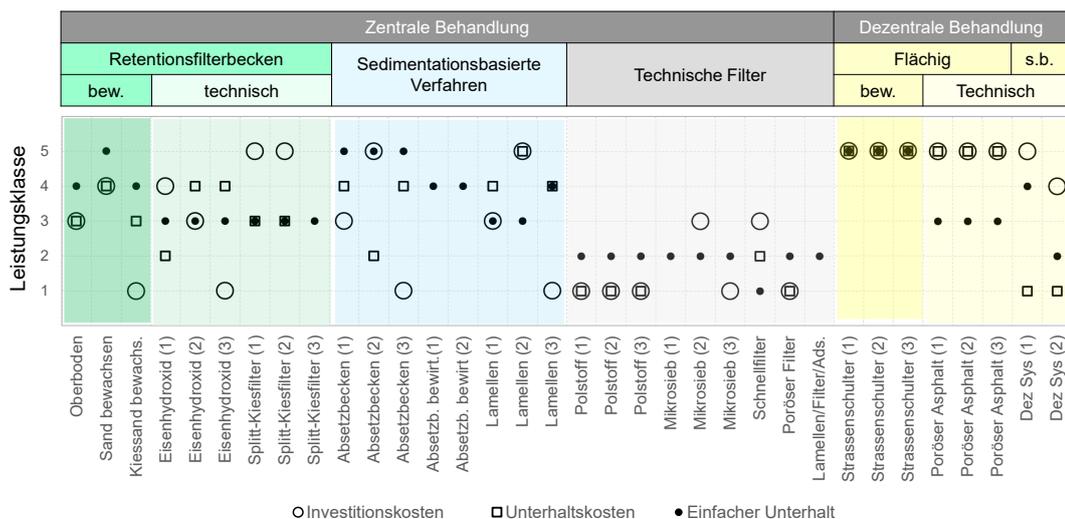


Abb. 4.3 Leitungsklassen der Investitions- und Unterhaltskosten sowie die Beurteilung des Unterhalts. Bei SABA mit Oberboden und bewachsenen Sandfiltern sind die Ergebnisse mehrerer SABA zusammengefasst. Zuordnung der Anlagen in Tab. V.1.

Die Investitionskosten von SABA mit Eisenhydroxid-RFB sind im Vergleich zu SABA mit bewachsenem Sandfilter durchschnittlich höher, und zwar mit Klasse 3 statt Klasse 4. Dies ist auch auf die teure Eisenhydroxid-Adsorbenschicht zurückzuführen. Die höheren Investitionskosten von SABA mit Eisenhydroxid-RFB, auch gegenüber Bodenfilter-SABA, bestätigen sich in Abb. 4.4. Die Unterhaltskosten von SABA mit Eisenhydroxid-RFB sind im Durchschnitt höher als diejenigen von SABA mit bewachsenem Sandfilter, was sich im schwierigeren Unterhalt widerspiegelt.

Splitt-Kiesfilter haben wie bewachsene Sandfilter auch tiefe Investitionskosten (Klasse 5). Splitt-Kiesfilter (1) und (2) sind jedoch als Vorbehandlungen dimensioniert, was im Vergleich zur Dimensionierung als Hauptbehandlung zu tieferen Kosten führt. Dafür ist die Vorbehandlung stärker belastet. Die Unterhaltskosten von Splitt-Kiesfiltern sind mit Klasse 3 gegenüber Klasse 4 bei bewachsenen Schilffiltern höher. Dies ist auf das periodische

Abschälen oder Aufkratzen der Schlammschicht sowie auf das teilweise Auswechseln der obersten Filterschicht zurückzuführen. Entsprechend ist der Unterhalt schwieriger.

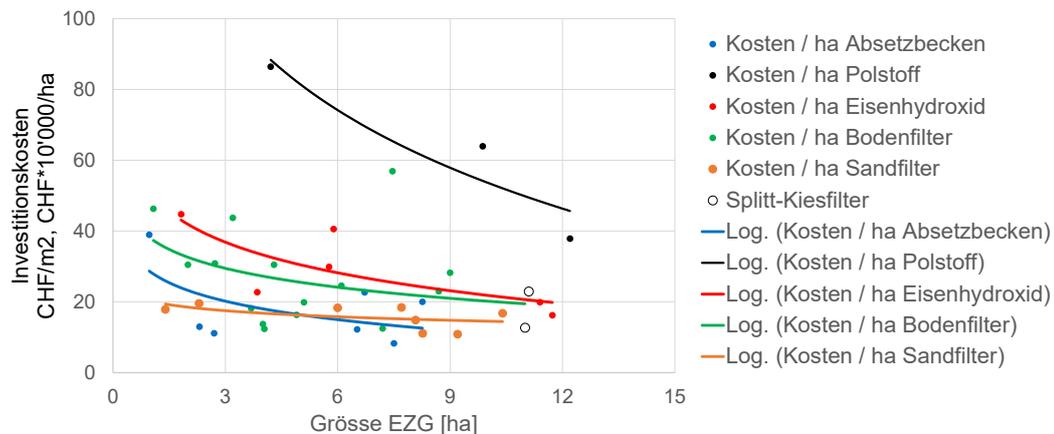


Abb. 4.4 Spezifische Investitionskosten nach Behandlungsverfahren und als Funktion der Einzugsgebietsgrösse (EZG).

### Sedimentationsbasierte Verfahren

Die Investitionskosten von sedimentationsbasierten Verfahren sind mit Klasse 3 bis 5 im Durchschnitt vergleichbar mit bewachsenen Sandfiltern. Dies bestätigt auch Abb. 4.4. Klasse 1 bei Absetzbecken (3) und bei Lamellen (3) ist auf ein kleines Einzugsgebiet von weniger als 0.5 ha im innerstädtischen Bereich mit einer Einbautiefe von 8 Metern zurückzuführen. Lamellen erhöhen die Kosten von Absetzbecken je nach Grösse zwischen 30'000 CHF und 100'000 CHF.

Der Unterhaltsaufwand entspricht bei den sedimentationsbasierten Verfahren der Klasse 4 und 5 und ist vergleichbar oder etwas geringer als bei Retentionsfilterbecken. Im Detail betrachtet ergeben sich für das Absetzbecken (1), welches dem Absetzbecken mit Lamellen (3) entspricht, eine um 1 Klasse geringere Unterhaltskosten. Dies deckt sich mit Angaben der Unterhaltsdienste, welche massgeblichen Mehraufwand beim Unterhalt der Lamellen bestätigen. Der Unterhalt von Absetzbecken wird von den Unterhaltsdiensten als einfach eingestuft, was die Klasse 4 und 5 ergibt.

### Technische Filter

Die Investitionskosten von SABA mit Polstoff-Filtern sind höher als diejenigen von Absetzbecken oder von SABA mit bewachsenen Sandfiltern: Hier resultiert eine um zwei bis vier Klassen tiefere Klassierung. Die Kosten nehmen zwar mit zunehmender Grösse des Einzugsgebiets ab, sind aber auch bei Einzugsgebieten im Bereich von 12 ha mehr als doppelt so hoch (Abb. 4.4). Dass SABA mit Polstoff-Filtern höhere Investitionskosten aufweisen, ist infolge der Mechanisierung, der zusätzlichen Becken sowie der Steuerungseinrichtungen plausibel.

Dasselbe gilt für die Unterhaltskosten von SABA mit Polstoff-Filtern, die unabhängig von der Grösse des Einzugsgebiets Klasse 1 erzielen. Auch hier ist dies wegen der hohen Mechanisierung und der zahlreichen Komponenten plausibel. Entsprechend sind auch die Anforderungen an den Unterhalt hoch (Klasse 2).

Die Investitionskosten des Schnellfilters liegen bei Klasse 3. Würde, wie bereits beschrieben, der Staukanal neu gebaut werden müssen, lägen die Investitionskosten eine Klasse tiefer. Der Unterhaltsaufwand und die Anforderungen an den Unterhalt mit je Klasse 1 sind infolge der zahlreichen Bauwerke und der hohen Mechanisierung plausibel. Der Unterhalt eines Stapelkanals ist aufwändiger als bei einem normalen Kanal. Auch die SABA mit porösem Filter erzielt bei den Kosten jeweils Klasse 1, aufgrund des schwierigen Unterhalts.

### **Dezentrale Verfahren**

Bei den dezentralen flächigen Verfahren sind die Investitionskosten bei der Versickerung über das Bankett in die Strassenschulter gering, falls eine bestehende Strassenschulter genutzt werden kann oder die Strassenschulter im Projektperimeter liegt und deshalb nicht erworben werden muss. Die Unterhaltskosten sind gering (Klasse 5), und der Unterhalt ist einfach zu bewerkstelligen: Die Böschungen müssen sowieso gemäht werden, unabhängig davon, ob über das Bankett in die Schulter versickert wird oder nicht.

Bei den Investitions- und Unterhaltskosten von porösen Strassenbelägen, die innerorts zur Lärminderung eingesetzt werden, gelten ähnliche Überlegungen wie bei der Versickerung in der Strassenschulter. Wird ein solcher Belag innerorts zur Lärminderung eingesetzt, resultieren weder zusätzliche Investitions- noch Unterhaltskosten. Die absoluten Kosten für den Unterhalt eines solchen Belags sind jedoch hoch und belaufen sich auf 4'000 CHF/ha/Jahr.

Bei den dezentralen schachtbasierten Verfahren sind die Investitionskosten je nach System gering bis mittel (Klasse 4 bis 5). Diese Klassen sind jedoch mit Vorsicht zu betrachten, denn einige Systeme benötigen zusätzliche Leitungen, nämlich von jedem Schlammseparator bis zur Behandlungseinheit und anschliessend zur Sammelleitung, was die Kosten entscheidend erhöht.

Der entscheidende Nachteil der beiden dezentralen, schachtbasierten Systeme liegt bei den hohen Unterhaltskosten mit Klasse 1. Absolut betragen diese zwischen 7'000 und 20'000 CHF/ha/Jahr, was den Schwellenwert von Klasse 1 um das Drei- bis Siebenfache überschreitet. Derartige Kosten sind typisch für diesen Verfahrenstyp und auch plausibel, denn die sehr hohe Filterbelastung führt zu schneller Kolmation.

## 5 Vergleich der Verfahren

### 5.1 Anforderung erhöht

#### 5.1.1 Bewachsener Sandfilter mit Bodenfilter und Strassenschulter

Der Vergleich von SABA mit bewachsenem Sandfilter mit SABA mit Oberboden sowie der Versickerung in der Strassenschulter wird im SABA-Spider in Abb. 5.1 anhand der Mittelwerte der untersuchten SABA gemacht. Da alle drei Typen die Anforderungsstufe *erhöht* erfüllen, sind für die Beurteilung die anderen Kriterien massgebend.

Der spezifische Flächenbedarf von bewachsenen Sandfiltern ist im Vergleich zu Bodenfiltern geringer, was sich in einer höheren Leistungsklasse äussert und kleinere SABA ermöglicht. Ursachen dafür sind die höhere spezifische Flächenbelastung der Sandfilter-RFB und der höhere spezifische Durchfluss. Die Versickerung in der Strassenschulter erfordert, falls die Fläche im Strassenperimeter vorhanden ist, keine zusätzliche Fläche.

Auch beim einfachen Unterhalt, den Unterhalts- und den Investitionskosten, erzielen SABA mit bewachsenem Sandfilter höhere Leistungsklassen als SABA mit einem Bodenfilter. Beim einfacheren Unterhalt ist dies darauf zurückzuführen, dass Sandfilter nicht gemäht werden müssen, was sich in geringeren Unterhaltskosten manifestiert. Bei Bodenfiltern wirkt kostensteigernd, dass sie eine grössere zu unterhaltende Fläche aufweisen. Der höhere Flächenbedarf ist auch ein Grund, weshalb SABA mit Bodenfiltern höhere Investitionskosten aufweisen als SABA mit bewachsenem Sandfilter. Der Flächenbedarf der Strassenschulter und die Investitionskosten sind geringer als beim Sandfilter, vorausgesetzt, die Strassenschulter ist im Eigentum des Strasseninhabers. Ebenso sind die Unterhaltskosten geringer.

Somit kann festgehalten werden, dass für die Anforderung *erhöht* bewachsene Sandfilter und die Strassenschulter gegenüber dem Bodenfilter besser geeignet sind.

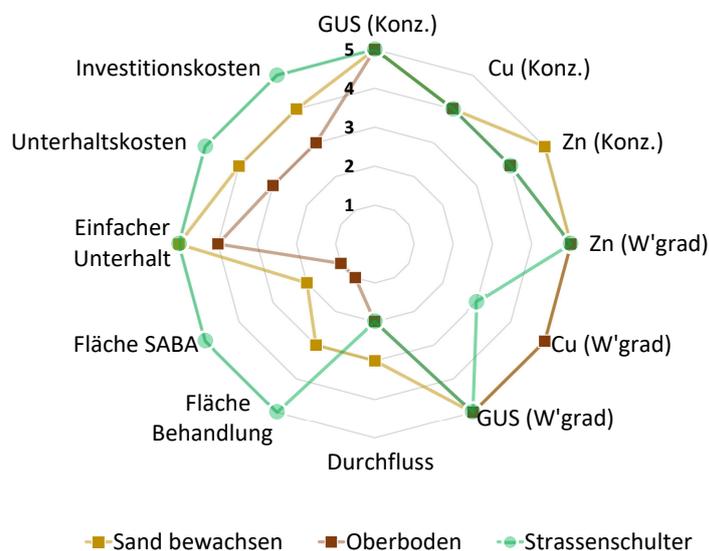


Abb. 5.1 Vergleich von SABA mit bewachsenen Sandfiltern mit Oberboden–SABA und der Versickerung in der Strassenschulter. Beschreibung in den Anhängen IV.1.1, IV.1.2 und IV.4.1.

### 5.1.2 Vergleich Sandfilter mit Eisenhydroxid RFB

Der Vergleich die Leistungskennzahlen des SABA-Typs mit bewachsenem Sandfilter mit dem SABA Typ Retentionsfilterbecken mit einer Eisenhydroxidschicht ist in Abb. 5.2 als Mittelwerte der untersuchten SABA dargestellt. Beide SABA-Typen sind der Anforderungsstufe *erhöht* zugeteilt, weshalb zur Gesamtbeurteilung die anderen Leistungskennzahlen massgebend sind.

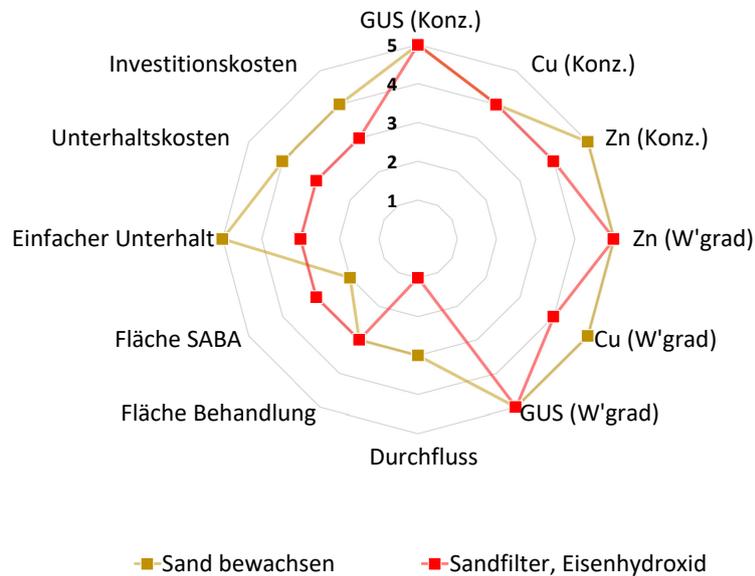


Abb. 5.2 Vergleich von SABA mit bewachsenen Sandfiltern mit SABA mit RFB mit einer Eisenhydroxidschicht. Beschreibung der Verfahren in den Anhängen IV.1.1 und IV.1.3.

Retentionsfilterbecken mit bewachsenen Sandfiltern und solche mit einer Eisenhydroxidschicht sind vergleichbar ausgestaltet. Ebenso weisen die betrachteten SABA eine Vorbehandlung auf. Deshalb wird für den Vergleich des Flächenbedarfs der spezifische Durchfluss verwendet. Dieser ist bei RFB mit bewachsenem Sandfilter um 2 Klasse höher als bei RFB mit einer Eisenhydroxidschicht, weshalb RFB mit bewachsenem Sandfilter kleiner dimensioniert werden können<sup>6</sup>. Dass sich dies beim Flächenbedarf der SABA nicht deutlicher auswirkt, ist auf andere Einflüsse wie unterschiedliche Dimensionierung und Gestaltung zurückzuführen.

Der Unterhalt von RFB mit einer Eisenhydroxidschicht wird als schwieriger eingestuft, da der Bewuchs und allenfalls die kolmatisierte oberste Schicht periodisch entfernt werden müssen. Entsprechend sind die Unterhaltskosten von RFB mit einer Eisenhydroxidschicht höher. Auch die Investitionskosten von RFB mit Eisenhydroxidschicht sind höher als solche mit bewachsenem Sandfilter, was auf das teure Adsorbermaterial zurückzuführen ist.

Bei RFB mit einer Eisenhydroxidschicht ist zudem mit höheren Entsorgungskosten zu rechnen, da die Filterschichten im RFB voneinander getrennt entfernt und entsorgt werden müssen. Zudem ist die Produktion von Eisenhydroxid mit dem Einsatz von Energie und Rohstoffen verbunden, was den Ressourcenverbrauch insgesamt erhöht. Da Eisenhydroxid-RFB keine Vorteile bringen, werden sie nicht mehr empfohlen.

### 5.1.3 Empfehlung Anforderung erhöht

Erste Priorität für die Anforderungsstufe *erhöht* ist die Versickerung über das Bankett in die Strassenschulter. Bei zentralen SABA ist der bewachsene Sandfilter im Vergleich zu SABA mit Bodenfiltern oder SABA mit einer Eisenhydroxidschicht im RFB im Vorteil und wird

<sup>6</sup> Neben der hydraulischen Leistung ist die Flächenbelastung massgebend.

deshalb für erhöhte Anforderungen empfohlen. Für bewachsene Sandfilter gibt es zudem folgende Optimierungsmöglichkeiten:

- Verkleinerung der Vorbehandlung: Die Grösse der Absetzbecken kann deutlich reduziert werden mit dem Ziel, die Sandfraktion und grössere Partikel zurückzuhalten. Dies würde die Investitions- und wahrscheinlich auch die Unterhaltskosten sowie den Flächenbedarf reduzieren. Der Rückhalt von Havariegut und das Störfallvolumen sind nach wie vor gewährleistet.
- Der Flächenbedarf kann verringert werden, indem statt Böschungen senkrechte Betonwände gebaut werden. Dies erhöht allerdings die Investitionskosten.
- Optimierungspotenzial besteht bezüglich der Erhöhung der Flächenbelastung. Entscheidend ist, ob und wie stark eine höhere Flächenbelastung zu höheren Unterhaltskosten führt.

## 5.2 Anforderung standard

Der Schadstoffrückhalt des Splitt-Kiesfilters ist bei GUS, Kupfer und Zink geringer als beim bewachsenen Sandfilter (Abb. 5.3, dargestellt sind Mittelwerte). Dies ist auf die Einfahrzeit der Deckschicht sowie die gröbere Körnung der Filterschicht zurückzuführen. Die Frage bleibt, ob dieser Nachteil mit anderen Vorteilen wie einem geringeren Flächenbedarf oder tieferen Unterhalts- oder Investitionskosten wettgemacht wird.

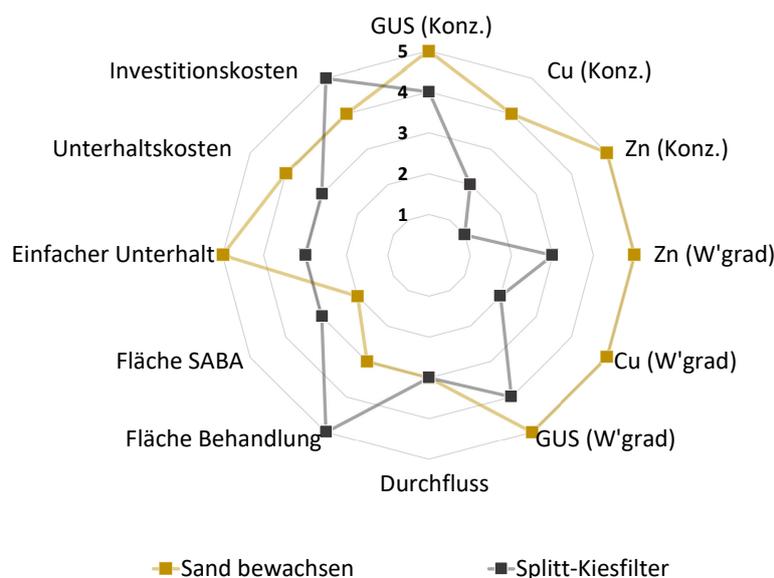


Abb. 5.3 Vergleich von SABA mit bewachsenen Sandfiltern mit Splitt-Kiesfiltern. Detaillierte Beschreibung in Kapitel IV.1.1 und IV.1.4.

Zur Abschätzung des Flächenbedarfs wird der spezifische Durchfluss verwendet. Dieser ist zwar zu Beginn der Laufzeit bei einem Splitt-Kiesfilter höher, nimmt aber infolge der reversiblen Kolmation der Deckschicht sowie der langsameren, irreversiblen inneren Kolmation ab. Ob der spezifische Durchfluss deshalb während eines Betriebszyklus des Splitt-Kiesfilters durchschnittlich höher ist als beim bewachsenen Sandfilter, ist heute noch fraglich.

Faktoren, welche die Durchlässigkeit beider Verfahren beeinflussen können, sind die Art und Grösse des Einzugsgebiets: Je länger das Einzugsgebiet, allenfalls noch mit diversen Pumpwerken, desto länger ist die Beschickungsdauer und desto kürzer sind die Abtrocknungsphasen. Diese sind besonders für den Splitt-Kiesfilter wichtig, da kein Bewuchs zur Erhaltung der Durchlässigkeit der Deckschicht vorhanden ist.

Der Flächenbedarf ist die zweite Vergleichsmöglichkeit. Bei bewachsenen Sandfiltern geht man heute von rund 100 m<sup>2</sup> pro ha Strassenfläche aus, während die beiden beschriebenen Splitt-Kiesfilter einen Flächenbedarf von durchschnittlich 37 m<sup>2</sup>/ha aufweisen. Allerdings liegt diesem Flächenbedarf die Dimensionierung als Vorbehandlung und nicht als Hauptbehandlung zugrunde. Als Hauptbehandlung würde infolge der Dimensionierung eine grössere Fläche benötigt werden. Der geringere Flächenbedarf der Behandlung widerspiegelt sich auch im Flächenbedarf der SABA, wo Splitt-Kiesfilter eine Leistungsklasse besser sind, allerdings unter der Prämisse, eine Vorbehandlung zu sein.

Die Unterhaltskosten des Splitt-Kiesfilters sind durch das periodische Abschälen oder Aufkratzen der Deckschicht gegenüber dem bewachsenen Sandfilter durchschnittlich eine Klassen schlechter. Die Investitionskosten sind tiefer, allerdings wiederum infolge der Bemessung als Vorbehandlung.

### **Splitt-Kiesfilter als Hauptbehandlung**

Der Splitt-Kiesfilter hat einen geringeren Schadstoffrückhalt als der bewachsene Sandfilter. Aufgrund der spärlichen Datenlage ist zudem unklar, ob der Splitt-Kiesfilter als Hauptbehandlung einen geringeren Flächenbedarf aufweist als ein bewachsener Sandfilter und damit die Nachteile des geringeren Schadstoffrückhalts und der höheren Unterhaltskosten kompensieren kann. Ist der Flächenbedarf des Splitt-Kiesfilters als Hauptbehandlung geringer als bei einem bewachsenen Sandfilter, kann er trotz höherer Unterhaltskosten empfohlen werden, sonst nicht.

### **Splitt-Kiesfilter als Vorbehandlung**

Als Vorbehandlung wurde der Splitt-Kiesfilter bisher bei bewachsenen Sand- oder Bodenfiltern eingesetzt. Heute wird für die Anforderungsstufe *erhöht* bei zentralen SABA der bewachsene Sandfilter empfohlen. Für dessen Vorbehandlung genügt ein relativ kleines Absetzbecken, welches die Sandfraktion und grössere Partikel zurückhält und zudem für den Rückhalt von Havariestoffen und die Störfallbewältigung sorgt. Im Vergleich zu bisherigen Absetzbecken ist ein empfohlenes Absetzbecken als Vorbehandlung vier- bis fünffach kleiner. Ob ein Splitt-Kiesfilter trotz der vorhandenen Retention gegenüber einer solchen Vorbehandlung Vorteile hat, müssen Projektierungen zeigen.

### **Offene Fragen**

Somit stellen sich zum Vergleich Splitt-Kiesfilter und bewachsener Sandfilter folgende Fragen, die mit künftigen Funktionsprüfungen geklärt werden können.

- Ist der volumengemittelte spezifische Durchfluss eines Splitt-Kiesfilters während eines gesamten Betriebszyklus (7-10 Jahre) höher als derjenige eines bewachsenen Sandfilters?
- Bewirkt ein bewachsener Sandfilter, der hydraulisch höher belastet ist als heute vorgesehen, einen höheren Unterhaltsaufwand? Erhöhen sich dessen Unterhaltskosten bei höherer Belastung nicht wesentlich, ist dem bewachsenen Sandfilter auch für die Anforderung *standard* der Vorzug zu geben.

Der Einsatz von bewachsenen Sandfiltern ist auch bei der Anforderung *standard* möglich, indem der hydraulische Wirkungsgrad reduziert wird. Damit sinkt auch der Flächenbedarf. Eine solche Dimensionierung bedingt eine hydraulische Modellierung mit Regendaten.

Bezüglich des Unterhalts- und des Entsorgungsaufwands ist auch der gesamte Lebenszyklus massgebend. Beim bewachsenen Sandfilter muss frühestens nach 30 Jahren die gesamte Filterschicht ausgetauscht, aufbereitet und Teile davon entsorgt werden. Beim Splitt-Kiesfilter erfolgt der Austausch der Splittschicht bereits nach einem Betriebszyklus von 7 bis 10 Jahren. Wann die gesamte Filterpackung ersetzt werden muss, werden künftige Betriebserfahrungen zeigen.

Die Sachlage bezüglich der Lebenszykluskosten von bewachsenen Sandfiltern und Splitt-Kiesfiltern ist somit heute noch unklar. Ein Projekt des ASTRA behandelt dieses.

## 5.3 Anforderung erleichtert

### 5.3.1 Absetzbecken im Dauerstau und bewirtschaftete Absetzbecken

Ein Vergleich zwischen Absetzbecken im Dauerstau und bewirtschafteten Absetzbecken ist nicht möglich, da zu wenig Daten für bewirtschaftete Absetzbecken als Haupt- oder Vorbehandlung vorliegen. Die vorliegenden Daten zweier SABA in Abb. 4.1 zeigen, dass die Schadstoffentfernung ähnlich sein kann. Verfahrenstechnisch betrachtet ist die Schadstoffentfernung bei vergleichbarer Dimensionierung jedoch geringer. Erstens ist die mittlere Absetzzeit kürzer und zweitens ist die hydraulische Gestaltung im Zulaufbereich schwieriger, was das Aufwirbeln von bereits abgesetzten Partikeln erhöht.

Einen Vorteil haben bewirtschaftete Absetzbecken dann, wenn die Einleitung in ein Gewässer hydraulisch gedrosselt erfolgen muss. Um die Retention und einen optimalen Schadstoffrückhalt zu kombinieren, kann dem Absetzbecken im Dauerstau für diesen Fall eine Retention vorgeschaltet werden. Damit können beide Bauwerke für ihren jeweiligen Zweck optimiert werden.

### 5.3.2 Vergleich von Absetzbecken mit und ohne Lamellen

Absetzbecken mit und ohne Lamellen werden in einem ersten Schritt anhand der Mittelwerte der Leistungskennzahlen in Abb. 5.4 verglichen. Die Leistungsklassen der Ablaufkonzentrationen beider Typen sind vergleichbar, bei den Wirkungsgraden für GUS, Kupfer und Zink sind die Absetzbecken je eine Klasse besser. Die Wirkungsgrade sind jedoch nicht direkt vergleichbar, weshalb die Ablaufkonzentrationen berücksichtigt werden.

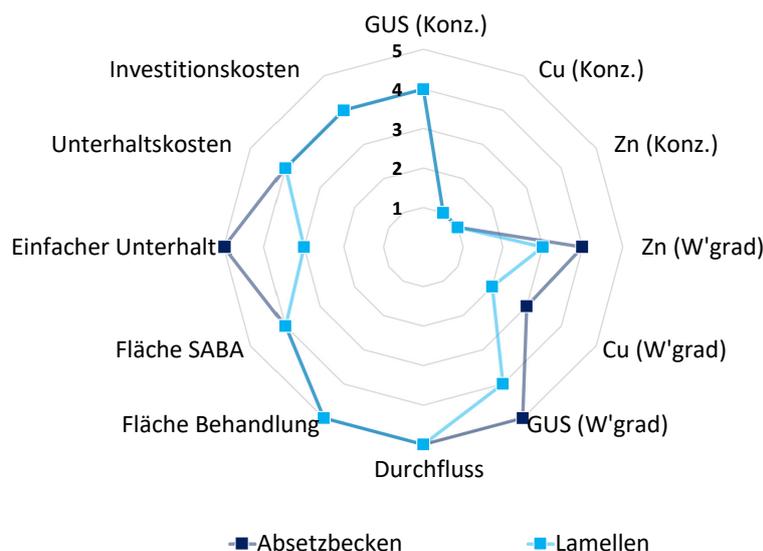


Abb. 5.4 Vergleich von Absetzbecken mit und ohne Lamellen. Detaillierte Beschreibung der Verfahren im Anhang IV.2.1 und IV.2.3.

Für den Vergleich werden die absolut erzielten Ablaufkonzentrationen genutzt, da die Unterscheidung bei Leistungsklasse 1 nicht möglich ist (Abb. 5.5). Der Fokus liegt auf denjenigen beiden Anlagen, welche je ein Jahr mit und ein Jahr ohne Lamellen geprüft wurden. Diese sind bezüglich Oberflächenbelastung und spezifischem Volumen unterschiedlich dimensioniert und beschreiben den Wirkungsbereich der Lamellen ausreichend (Tab. IV.1). Ergänzend sind die Angaben von je einer SABA mit und einer anderen ohne Lamellen aufgeführt.

Der Unterschied der frachtgemittelten Ablaufkonzentrationen zwischen dem Betrieb mit und ohne Lamellen ist bei GUS gering (1-2 mg/l). Anders ist die Situation bei Kupfer und Zink: Bei Kupfer sind die Ablaufkonzentrationen der Absetzbecken im Betrieb mit Lamellen geringer und zwar um 35 % bei Absetzbecken (1) und um 18 % bei Absetzbecken (2). Bei

Absetzbecken (1) ist die Kupfer-Zulaufkonzentration im Betrieb mit Lamellen jedoch um 25 % geringer, was letztlich eine Differenz von 10 % ergibt.

Bei Zink sind die Ablaufkonzentrationen bei Absetzbecken (1) im Betrieb mit Lamellen 19 % geringer also ohne, allerdings hier bei einer 5 % tieferen Zulaufkonzentration. Bei Absetzbecken (2) beträgt der Unterschied der Ablaufkonzentrationen 7 % bei vergleichbaren Zulaufkonzentrationen.

Zusammengefasst erhöhen Lamellen in Absetzbecken den Rückhalt von Kupfer und Zink um 7–15 %. Bei GUS ist kein wesentlicher Unterschied zu sehen. Dieser gerade bei Zink nicht unbedingt relevanten Erhöhung der Schadstoffentfernung stehen Mehrkosten beim Unterhalt von 30 % und höhere Investitionskosten von 5-10 % der Lamellen gegenüber. Zusammen mit deutlich schwierigeren Unterhaltsarbeiten bei Absetzbecken mit Lamellen wird die geringe Erhöhung der Schadstoffentfernung als nicht verhältnismässig beurteilt, weshalb Lamellen nicht mehr empfohlen werden.

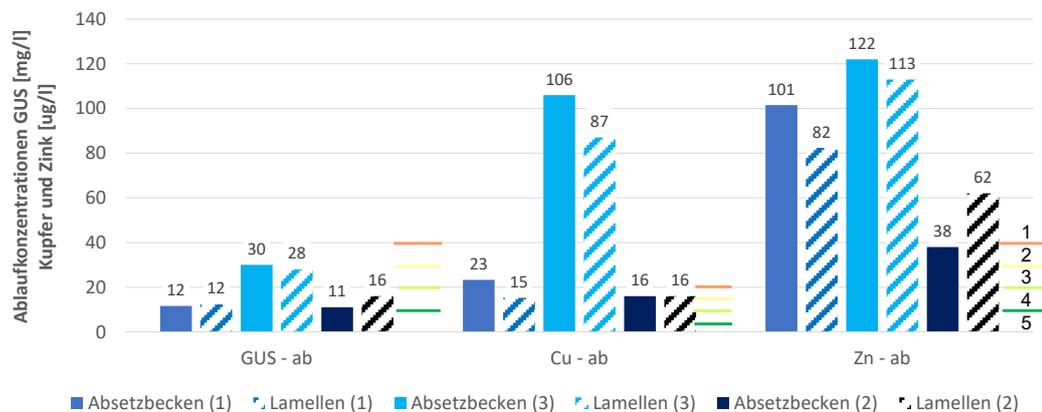


Abb. 5.5 Vergleich der Ablaufkonzentrationen von Absetzbecken mit und ohne Lamellen.

### 5.3.3 Vergleich Absetzbecken mit Polstofffilter und Schnellfilter

Die Leistungsklassen von Absetzbecken im Dauerstau sind im Vergleich mit Polstofffilter-SABA und einer SABA mit Schnellfilter in Abb. 5.6 dargestellt. Alle drei Behandlungsverfahren sind aufgrund ihrer Schadstoffentfernung der Anforderungsstufe *erleichtert* zugeteilt. Zum Vergleich werden die weiteren Kriterien hinzugezogen.

Absetzbecken im Dauerstau sind bei der Einfachheit des Unterhalts und bei den Unterhalts- und Investitionskosten um eine bis vier Leistungsklassen besser als Polstoff- oder Schnellfilter-SABA. Beim Flächenbedarf der SABA ist eine Schnellfilter-SABA eine Klasse besser. Dies ist auf die ausgelagerten Retentionsbauwerke zurückzuführen. Polstofffilter-SABA sind bezüglich des Flächenbedarfs der SABA eine Klasse schlechter als Absetzbecken. Der Schnellfilter ist bezüglich ausgelagerter Bauwerke besser als der Polstofffilter.

Ein Unterschied zwischen Absetzbecken im Dauerstau und SABA mit Polstoff- und Schnellfiltern besteht darin, dass letztere eine durch den Filter bedingte Abflussdrosselung aufweisen. Bei den betrachteten Absetzbecken im Dauerstau ist dies nur bei einer SABA der Fall. Ist ein begrenzter Abfluss bei einem Absetzbecken im Dauerstau nötig, kann dies mit dem Bau eines Retentionsbeckens umgesetzt werden. Dann würden sich die Investitionskosten um eine oder zwei Klassen verschlechtern, was aber immer noch besser als beim Polstofffilter wäre. Die Vorteile der tieferen Betriebskosten und der Anforderungen an den Unterhalt bei Absetzbecken blieben bestehen.

SABA mit Polstofffilter oder Schnellfilter weisen im Vergleich zu Absetzbecken im Dauerstau gemäss den Leistungskriterien keine Vorteile auf. Aus diesem Grund werden Schnellfilter nicht mehr empfohlen. SABA mit Polstofffiltern werden bedingt empfohlen, da sie bezüglich der Gestaltung eine im Vergleich zu Absetzbecken im Dauerstau höhere Flexibilität aufweisen: Retentionsbecken müssen nicht hinsichtlich hydraulischer Kriterien projiziert werden. Dies dürfte aber nur in wenigen Fällen zum Tragen kommen.

Ob der Einsatz eines Polstoffs mit geringerem Porendurchmesser wesentliche Vorteile bringt, müssten Leistungsprüfungen zeigen. Allerdings würde sich dadurch die notwendige Filterfläche erhöhen, was eine solche SABA noch teurer machen würde. Ob beim Schnellfilter eine verbesserte Rückspülung mit Klarwasser den Schadstoffrückhalt erhöht, ist fraglich. Auch dies müsste an einer SABA geprüft werden.

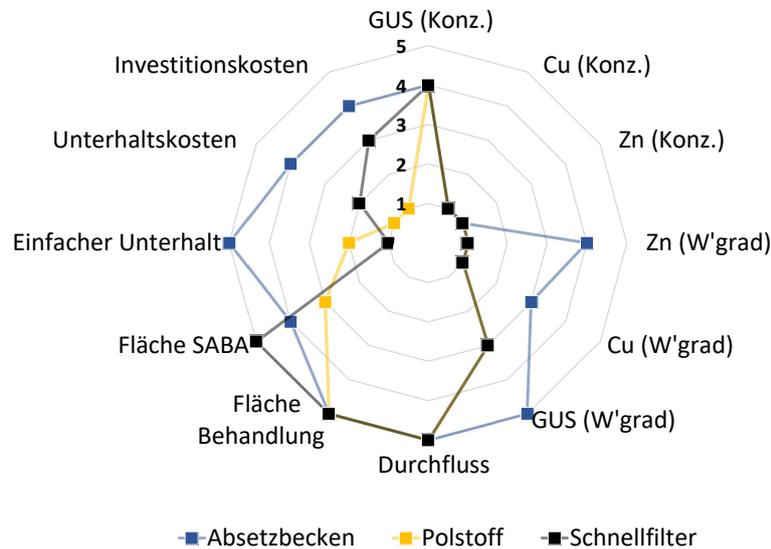


Abb. 5.6 Vergleich von Absetzbecken im Dauerstau mit Polstofffilter und einem Schnellfilter. Beschreibung im Anhang IV.2.1 und IV.3.3.

### 5.3.4 Vergleich Absetzbecken mit dezentralen, technischen Verfahren

Die beiden dezentralen schachtbasierten Systeme sind in Abb. 5.7 dem Absetzbecken im Dauerstau gegenübergestellt. Beide dezentralen Systeme zeigen eine mit Absetzbecken vergleichbare Schadstoffentfernung, obwohl sie unterschiedliche Funktionsprinzipien aufweisen. DezSys (2) erzielt bei GUS eine tiefere Bewertung bei der Ablaufkonzentration. Bei den Wirkungsgraden von GUS und Zink sind Absetzbecken durchschnittlich 1 Klasse besser, bei Kupfer gleich gut oder 1 Klasse tiefer.

Die beiden Systeme zeigen gegenüber Absetzbecken einzig einen Vorteil beim Flächenbedarf, indem dieser etwa viermal geringer ist als bei Absetzbecken. Der Schwellenwert für Klasse 5 wird von beiden Systemen um das Dreifache unterschritten. Hier manifestiert sich die Eigenschaft der dezentralen Systeme, indem sie durch den Einbau in Schlamm-sammlern oder in Schächten weniger Fläche benötigen. Bei überfahrbarer Gestaltung benötigen sie theoretisch betrachtet keine zusätzliche Oberfläche.

Dieser geringe Flächenbedarf geht zu Lasten der Unterhaltskosten: Diese übersteigen den Schwellenwert der Klasse 1 bei DezSys (1) um das Drei- bis Vierfache und bei DezSys (2) um das Vier- bis Siebenfache. Entsprechend sind die Anforderungen an den Unterhalt bei DezSys (2) höher als bei DezSys (1). Entscheidend ist zudem, dass dezentrale Systeme innerhalb von Monaten auf fehlenden Unterhalt mit deutlich reduzierter Schadstoffentfernung reagieren.

Die Investitionskosten von DezSys (1) beinhalten keine Kosten für Zu- oder Ableitungen, da das System direkt in Schlamm-sammler eingesetzt wird. Bei DezSys (2) erhöhen sich die Investitionskosten gegebenenfalls durch zusätzliche Leitungen zum zentralen Behandlungsschacht (Trennsystem) und von dort zu einer Sammelleitung.

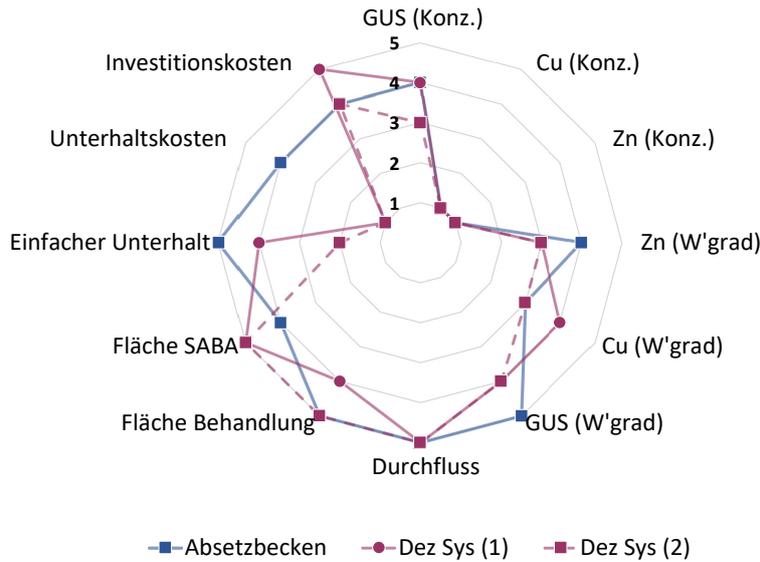


Abb. 5.7 Vergleich von Absetzbecken betrieben im Dauerstau mit zwei dezentralen, schachtbasierten Systemen. Bei den Absetzbecken sind die Mittelwerte von SABA dargestellt. Die Verfahren sind im Anhang IV.2.1 und IV.4.3 beschrieben.

### 5.3.5 Empfehlung Anforderung erleichtert

Keines der untersuchten Verfahren für die Anforderungsstufe *erleichtert* zeigt gleichwertige oder bessere Eigenschaften als das Absetzbecken betrieben im Dauerstau. Deshalb wird dieses für die Anforderung *erleichtert* empfohlen. Ist ein gedrosselter Abfluss wichtig, kann einem solchen Becken ein Retentionsvolumen vorgeschaltet werden, welches das Absetzbecken beispielsweise mit Pumpen beschickt. Dies entspricht einer Kombination eines bewirtschafteten Beckens mit einem Absetzbecken im Dauerstau. Erst zweite Priorität haben einzeln betriebene bewirtschaftete Absetzbecken deshalb, weil deren Schadstoffrückhalt bei vergleichbarer Dimensionierung geringer und die Gestaltung der Hydraulik anspruchsvoller sind. Bei beiden Varianten werden keine Lamellen eingesetzt, weil diese die Investitions- und Unterhaltskosten erhöhen, ohne eine wesentliche Erhöhung des Schadstoffrückhalts zu bewirken.

Bedingt empfohlen wird der Polstofffilter, dessen Komponenten bei anspruchsvoller Topografie einfacher angeordnet werden können. Dies dürfte nur in seltenen Fällen zum Tragen kommen.

Die Anforderung *erleichtert* kann auch mit entsprechenden dezentralen schachtbasierten Verfahren erzielt werden. Deren entscheidender Nachteil, im Vergleich zu Absetzbecken, sind die sehr hohen Unterhaltskosten. Dezentrale schachtbasierte Verfahren sind deshalb nur dort einzusetzen, wo andere Lösungen nicht verhältnismässig sind.

## 5.4 Erkenntnisse für SABA

### Eine hohe Schadstoffentfernung braucht Fläche

Eine hohe Schadstoffentfernung braucht eine entsprechend grosse Fläche. Bewachsene Sandfilter zeigen zwar einen deutlich besseren Schadstoffrückhalt als Absetzbecken im Dauerstau, brauchen dafür aber wesentlich mehr Fläche (Abb. 5.8). Dies ist auch der Fall, wenn die Vorbehandlung durch ein deutlich kleineres Absetzbecken erfolgt oder wenn Betonwände statt Böschungen projektiert sind. Auch der Splitt-Kiesfilter bietet keine Lösung, denn der allenfalls geringere Flächenbedarf geht zu Lasten der Schadstoffentfernung. Kann eine bereits vorhandene Strassenschulter genutzt werden, gelingt die Vereinbarkeit von hoher Schadstoffentfernung mit geringem Flächenbedarf am besten. Sonst ist mit Nutzungskonflikten zu rechnen.

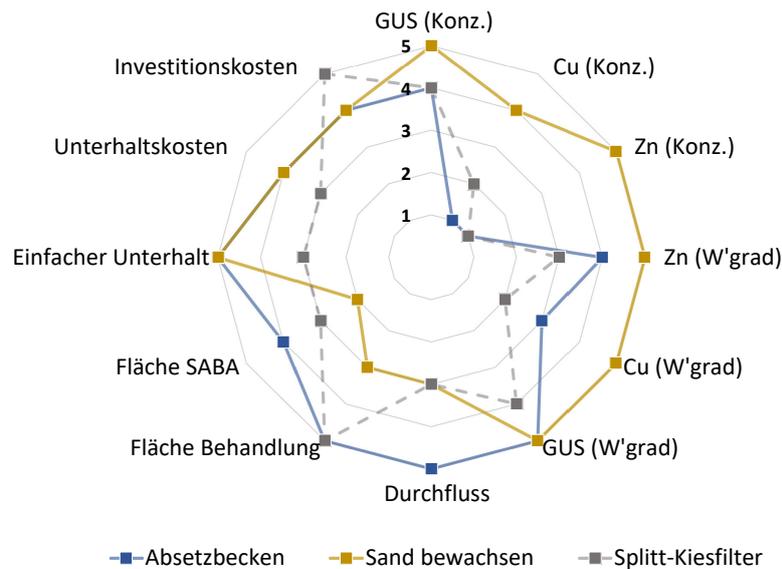


Abb. 5.8 Vergleich von SABA mit bewachsenen Sandfiltern mit Absetzbecken in Dauerstau und dem Splitt-Kiesfilter anhand der Mittelwerte.

### Die Investitionskosten sind unabhängig von der Schadstoffentfernung

Die Investitionskosten für ein Absetzbecken im Dauerstau unterscheiden sich nicht wesentlich von einem bewachsenen Sandfilter. Damit sind die Investitionskosten dieser beiden empfohlenen Verfahren wenig abhängig von der Schadstoffentfernung (Abb. 4.4, Abb. 5.8). Vorbehalten bleiben spezielle Konfigurationen mit beispielsweise zahlreichen Pumpwerken, langen Leitungen und weiterem. Dasselbe gilt vermutlich auch für den Splitt-Kiesfilter, wobei hierfür die Datenlage noch nicht genügt.

### Die Unterhaltskosten sind unabhängig von der Schadstoffentfernung

Es gibt keinen wesentlichen Unterschied bei den Unterhaltskosten zwischen dem bewachsenen Sandfilter und dem Absetzbecken. Dasselbe gilt für die Anforderungen an den Unterhalt. Eine Ausnahme ist der Splitt-Kiesfilter, der höhere Unterhaltskosten verursacht.

### Technische SABA: Keine Verringerung beim Flächenbedarf

Technische SABA erzielen wie Absetzbecken im Dauerstau beim Schadstoffrückhalt die Anforderungsstufe *erleichtert*, brauchen aber vergleichsweise mehr Fläche. Der Grund ist verfahrenstechnischer Natur: Für den Rückhalt kleiner Partikel sind die Poren technischer Filter zu gross und die Aufenthaltszeit des Strassenabwassers zu kurz. Zudem benötigen technische Filter infolge der hohen Flächenbelastung eine Rückspülung mit der Aufarbeitung des Rückspülwassers, was den Flächenbedarf erhöht.

Somit ist es nicht möglich, mit dem Einsatz von technischen SABA den Schadstoffrückhalt und den Flächenbedarf gleichzeitig zu optimieren. Insofern sind unterirdische, technische SABA keine Option für künftige SABA, da Absetzbecken vorzuziehen sind.

### Sind dezentrale, technische Systeme eine Lösung?

Dezentrale technische Systeme haben gegenüber zentralen SABA den Vorteil, dass sie weniger Fläche beanspruchen. Dieser Vorteil geht jedoch zu Lasten von sehr hohen Unterhaltskosten und dies bei einer im Vergleich zu Absetzbecken vergleichbaren oder sogar geringeren Schadstoffentfernung. Somit sind dezentrale technische Systeme nur dort einzusetzen, wo andere Lösungen nicht verhältnismässig sind.

## 6 Stand der Technik 2021

Der Stand der Technik für die Behandlung von Strassenabwasser ist in Tab. 6.1 zusammengefasst. Die Behandlungsverfahren werden anhand der Anforderungsstufen mit den Leistungsklassen der Kriterien klassifiziert. Die für jede Anforderungsstufe empfohlenen Verfahren sind blau und die bedingt empfohlenen Verfahren sind hellblau gefärbt. Empfohlene Verfahren zeichnen sich zudem durch Robustheit im Bau und Betrieb aus.

Tab. 6.1 Beurteilung der Verfahren gemäss Anforderungsstufe. Die empfohlenen Verfahren sind dunkel, die bedingt empfohlenen Verfahren hell eingefärbt. strd=standard. (\*)Hohe Leistungsklasse infolge Nutzung vorgelagerter und bestehender Bauwerke.

Stufe	Verfahren	Konzentrationen			Flächenbedarf SABA	Unterhalt		Invest. kosten
		GUS	Kupfer	Zink		Kosten	Einfach	
erhöht	Schulter, Mulden-Rigolen	5	4	4	5	5	5	5
	Bewachsene Sandfilter	5	4	5	2	4	5	4
	Bewachsener Bodenfilter	5	4	4	1	3	4	3
	RFB mit Eisenhydroxid	5	4	4	3	3	3	3
strd	Splitt-Kiesfilter	4	2	1	3	3	3	5
erleichtert	Absetzbecken Dauerstau	4	1	1	4	4	5	4
	Polstofffilter	4	1	1	3	1	2	1
	Schnellfilter	4	1	1	5 <sup>(*)</sup>	2	1	3 <sup>(*)</sup>
	Poröser Filter	1	1	1	5	1	1	1
	Dezentrale schachtbasierte Systeme	3-4	1	1	5	1	2-4	4
neu	Poröser Asphalt (unklar)	1-5	1-3	1-3	5	5	5	5

### 6.1 Empfehlungen

#### 6.1.1 Anforderung erhöht

Für die Anforderungsstufe *erhöht* sind die dezentrale Versickerung über das Bankett in die Strassenschulter oder Mulden-Rigolen erste Priorität. Ist diese Entwässerungsart nicht oder nur teilweise möglich, werden bewachsene Sandfilter empfohlen.

##### Versickerung in der Strassenschulter

- Aufbau der Strassenschulter: Der Aufbau der Strassenschulter kann wie bis anhin mit Oberboden und/oder Unterboden erfolgen. Dabei sind sandige Oberboden auch mit tiefem Tongehalt vorteilhaft, da die Schadstoffentfernung wie beim bewachsenen Sandfilter auf der Sedimentfiltration beruht. Die mechanische Stabilität der Strassenschultern ist in jedem Fall zu gewährleisten.

##### Bewachsene Sandfilter

- Die Vorbehandlung mit einem kleinen Absetzbecken, betrieben im Dauerstau, ist so auszulegen, dass nur noch Grobstoffe und grössere Partikel zurückgehalten werden. Dadurch wird der Flächenbedarf im Vergleich zu bisherigen Vorgaben etwa fünfmal kleiner. Das Rückhaltevolumen für Havarie und Störfall ist wie bisher zu gewährleisten. Ob Splitt-Kiesfilter wegen der vorhandenen Retention trotz der höheren Unterhaltskosten als Vorbehandlung noch geeignet sind, müssen Projektierungen zeigen.

- Durch den Bau von senkrechten Betonwänden anstelle von Böschungen kann der Flächenbedarf einer SABA mit bewachsenem Sandfilter reduziert werden. Allerdings erhöhen sich dadurch die Investitionskosten.
- Auf eine Zweiteilung des Retentionsfilterbeckens kann bei knappen Flächenverhältnissen verzichtet werden. Sonst bringt sie Vorteile beim Betrieb und im Havariefall, allerdings zu Lasten höherer Kosten und höherem Flächenverbrauch.

### Optimierungsmöglichkeiten

Eine Optimierungsmöglichkeit beim bewachsenen Sandfilter besteht darin, die Flächenbelastung (ha EZG/m<sup>2</sup> RFB) zu erhöhen, was die SABA verkleinern würde. Allerdings könnte dadurch der Unterhaltsaufwand zunehmen, wenn die Deckschicht früher entfernt werden müsste.

### Bedingt empfohlen

Bodenfilter sind bedingt empfohlen, falls Retentionsfilterbecken als Versickerungsbecken, also ohne Abdichtung, projektiert werden. Bewachsene Sandfilter sind dafür weniger geeignet, da das Schilfwachstum infolge des fehlenden Einstaus problematisch ist. Versickerungsbecken sind nur in Ausnahmefällen empfohlen, da deren Wirkung nur bedingt untersucht werden kann.

## 6.1.2 Anforderung standard

Für die Anforderung *standard* wird der Splitt-Kiesfilter empfohlen. Leistungs- oder Funktionsprüfungen müssen zeigen, ob dieser als Hauptbehandlung im Vergleich zum bewachsenen Sandfilter einen höheren spezifischen Durchfluss aufweist, und zwar während eines Betriebszyklus. Damit wäre der Flächenbedarf geringer. Ist dies nicht der Fall, wird auch für die Anforderung *standard* der bewachsene Sandfilter empfohlen. Dies gilt auch, wenn genügend Fläche für einen bewachsenen Sandfilter vorhanden ist.

### Alternative

Die Anforderung *standard* ist prinzipiell auch mit einem bewachsenen Sandfilter möglich, indem der Anteil des zu behandelnden Strassenabwassers reduziert wird, was den Gesamtwirkungsgrad verringert. Dadurch wird das RFB kleiner, dafür höher belastet. Ob dies die Unterhaltskosten erhöht, müsste an SABA geprüft werden.

## 6.1.3 Anforderung erleichtert

Für die Anforderung *erleichtert* wird das Absetzbecken im Dauerstau empfohlen. Muss der Ablauf gedrosselt werden, kann dem Absetzbecken im Dauerstau eine Retention vorgeschaltet werden, welche das Absetzbecken mit Pumpen beschickt. Damit Absetzbecken im Dauerstau eine optimale Schadstoffentfernung erzielen, ist eine sorgfältige Gestaltung und eine zweckmässige Dimensionierung wichtig (Anhang IV.2.1).

### Bedingt empfohlen

Ein Polstofffilter kann eingesetzt werden, wenn der Bau eines Absetzbeckens aufgrund des Baugrunds oder des Geländes schwierig umsetzbar ist. Dies dürfte nur in Einzelfällen zutreffen.

## 6.1.4 Optimierung und Abklärungen von Verfahren

Grundsätzlich sind heute die Möglichkeiten und Grenzen der Behandlungsverfahren bekannt. Die Klärung folgender Fragen zeigt allenfalls Wege zur Optimierung einzelner Verfahren auf.

### Polstofffilter

Bei Polstofffiltern gibt es feinporigere Gewebe, welche kleinere Partikel zurückhalten und damit den Schadstoffrückhalt möglicherweise verbessern können. Ob damit eine bessere Klassierung möglich wird, ist infolge der Partikelgrößenverteilung fraglich und müsste mit einer Leistungsprüfung belegt werden. Feinporigere Gewebe reduzieren allerdings den Durchfluss und verteuern somit das Verfahren.

### Schnellfilter

Beim Schnellfilter stellt sich die Frage, ob eine verbesserte Verfahrensführung eine massgeblich Erhöhung des Schadstoffrückhalts bewirkt. Leistungsprüfungen müssen zeigen, ob dies möglich ist. Aufgrund der Partikelgrössenverteilung dürfte dies jedoch schwierig zu erreichen sein.

## 6.2 Weitere Verfahren

Semidichter Asphalt (SDA) könnte innerorts eine Lösung sein, vorausgesetzt der Schadstoffrückhalt entspricht der Anforderungsstufe erleichtert und die Wirkung der Reinigung des Asphalts ist geklärt. Eine weitere Möglichkeit sind sogenannte poröse Filtrationsmauern welche in ein Becken eingesetzt werden und als technischer Filter funktionieren. Sie ermöglichen vielleicht eine flächensparende Lösung für die Anforderung erleichtert. Allerdings sind auch in diesem Fall die verfahrenstechnischen Limiten (Kolmation, Unterhaltskosten) zu berücksichtigen. Technische Filter können immer nur eine begrenzte Menge an Schadstoffstoffen zurückhalten, ohne zu kolmatieren und einen entsprechend hohen Unterhalt zu verursachen.

## 6.3 Behandlungsverfahren und Gewässerbelastung

Behandlungsverfahren der Anforderung *erhöht* entfernen GUS, Schwermetalle und PAK wirkungsvoll aus dem Strassenabwasser. Die erzielbaren Ablaufkonzentrationen der Schwermetalle unterschreiten die Anforderungen an Fließgewässer sowie die Einleitbedingung von GUS bezüglich der kommunalen Abwasserbehandlung.

Bei einem von SABA in der Regel geforderten hydraulischen Wirkungsgrad von 90 % werden die genannten Schadstoffe, wiederum von Verfahren gemäss Anforderung *erhöht*, zu 85 % bis 95 % zurückgehalten.

Auch Reifenabrieb wird mit Verfahren gemäss Anforderung *erhöht* mit einem Wirkungsgrad von über 90 % zurückgehalten. Heutige Untersuchungen zeigen zudem, dass Mikroverunreinigungen von Behandlungsverfahren der Anforderung *erhöht* ausreichend zurückgehalten werden können [26]. Ob dies für möglicherweise weitere, noch nicht identifizierte Mikroverunreinigungen auch gilt, bleibt zu untersuchen.

## 7 Folgerungen

Das Entwickeln und Prüfen neuer Verfahren zur Behandlung von Strassenabwasser während der vergangenen 20 Jahre hat sich gelohnt. Dank dieser Erkenntnisse ist es heute möglich, die Behandlungsverfahren umfassend zu vergleichen. Aus der Vielzahl der Verfahrenstypen haben sich die am besten geeigneten herauskristallisiert. Für die Behandlung von Strassenabwasser können somit für jede Anforderungsstufe Behandlungsverfahren empfohlen werden.

Für die Anforderung *erhöht* mit sehr hohem GUS-, Kupfer- und Zinkrückhalt, hat sich die dezentrale Versickerung in der Strassenschulter als geeignetstes Verfahren herausgestellt. Dieses sollte in erster Priorität realisiert werden, ansonsten die Behandlung mit dem bewachsenen Sandfilter oder eine Kombination von beiden. Beim bewachsenen Sandfilter genügt ein kleines Absetzbecken als Vorbehandlung zum Rückhalt der Sandfraktion und der grösseren Partikel. Der Rückhalt von Stoffen aus Havarie und Störfall bleibt gewährleistet.

Für die Anforderung *standard*, mit hohem GUS- und mittlerem Kupfer- und Zinkrückhalt, wird derzeit noch der Splitt-Kiesfilter empfohlen. Dessen Flächenbedarf als Hauptbehandlung muss noch bestimmt und mit dem bewachsenen Sandfilter verglichen werden.

Für die Anforderungsstufe *erleichtert*, mit mittlerem bis hohem GUS- und geringem Kupfer- und Zinkrückhalt, wird das Absetzbecken betrieben im Dauerstau empfohlen. Dieses muss nach heutigen Erkenntnissen dimensioniert und gestaltet werden. Bei schwieriger Topografie kann in Einzelfällen der Polstofffilter eingesetzt werden.

Entscheidend für die Umsetzung der Anforderungsstufen ist der Flächenbedarf, nicht die Investitionskosten. Eine SABA mit bewachsenem Sandfilter kostet im Durchschnitt pro Hektare entwässerte Strassenfläche gleich viel wie ein Absetzbecken betrieben im Dauerstau oder eine SABA mit Splitt-Kiesfilter. Gewässerschutz ist also eine Frage der nutzbaren Fläche, oder der Kosten, wenn Strassenabwasser in Becken zwischengespeichert und über längere Distanzen gepumpt werden muss. Bei den empfohlenen Verfahren der Anforderung *erhöht* und *erleichtert* sind die Unterhaltskosten vergleichbar tief. Beim Splitt-Kiesfilter mit der Anforderung *standard* sind die Unterhaltskosten höher.

Technische SABA erreichen die Anforderung *erleichtert*. Dennoch benötigen diese im Vergleich zum Absetzbecken einen höheren Flächenbedarf. Zwar kann die Schadstoffentfernung beim Polstoff- und Schnellfilter vielleicht noch verbessert werden, die Investitions- und Unterhaltskosten sowie der Flächenbedarf bleiben allerdings auch dann noch im Vergleich zum Absetzbecken hoch. Dezentrale, schachtbasierte Systeme erfüllen ebenfalls die Anforderung *erleichtert*. Vorteilhaft ist deren geringer Flächenbedarf. Dieser geht jedoch zu Lasten sehr hoher Unterhaltskosten im Vergleich zum Absetzbecken.

Grundsätzliche Verbesserungen beim Flächenbedarf dürften nicht ohne Nachteile bei den Unterhaltskosten realisierbar sein, da verfahrenstechnische Grenzen erreicht worden sind. Dennoch sind bei einzelnen Verfahren Verbesserungen möglich und Verfahren mit unbekannter Leistungsfähigkeit sind zu prüfen.

Auf die Projektierung einzelner Verfahren oder von SABA wird in dieser Dokumentation nur am Rand eingegangen. Details dazu finden sich in der Richtlinie Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen, im Fachhandbuch T/U sowie in der VSS-Norm 40 361 Strassenentwässerung - Behandlungsanlagen (in Revision).

Die Behandlung von Strassenabwasser wird auch künftig eine Aufgabe bleiben, welche Kenntnisse und die Zusammenarbeit zahlreicher Fachbereiche erfordert. Damit wird eine robuste, wirkungsvolle und wirtschaftliche Behandlung von Strassenabwasser erreicht.

# Anhänge

<b>I</b>	<b>Strassenabwasser</b> .....	<b>54</b>
I.1	Eigenschaften von Strassenabwasser .....	54
I.2	Schadstoffe im Strassenabwasser.....	54
I.2.1	GUS, Schwermetalle und PAK.....	54
I.2.2	Mikroplastik, Reifenabrieb.....	55
I.2.3	Organische Mikroverunreinigungen .....	55
I.3	Beurteilung der Schadstoffe.....	55
I.3.1	Gewässerrelevante Stoffe im Strassenabwasser .....	55
I.3.2	Indikatorstoffe.....	57
I.3.3	GUS-, Kupfer- und Zinkkonzentrationen im Strassenabwasser .....	57
<b>II</b>	<b>Charakterisierung der Verfahren</b> .....	<b>59</b>
II.1	Behandlungstyp: Vor- und Hauptbehandlung .....	59
II.2	Hydraulische Kriterien .....	59
II.2.1	Drosselung des Abflusses.....	59
II.2.2	Retentionsvolumina.....	59
II.3	Schadstoffentfernung .....	59
II.3.1	Art der Schadstoffentfernung .....	59
II.3.2	Stabilität der Schadstoffentfernung.....	60
II.3.3	Havarierückhalt .....	60
II.4	Betrieb, Unterhalt und Entsorgung.....	60
II.5	Diverse .....	60
II.5.1	Klimaempfindlichkeit .....	60
II.5.2	Materialbeschaffung .....	60
II.5.3	Inbetriebnahme .....	61
II.5.4	Flexibilität bei der Realisierung .....	61
<b>III</b>	<b>Leistungsbeurteilung: Kriterien und Klassen</b> .....	<b>62</b>
III.1	Beurteilung der Schadstoffentfernung .....	62
III.1.1	Ablaufkonzentrationen .....	62
III.1.2	Wirkungsgrade .....	62
III.2	Hydraulische Leistung und Flächenbedarf.....	63
III.2.1	Spezifischer hydraulischer Durchfluss .....	63
III.2.2	Spezifischer Flächenbedarf eines Behandlungsverfahrens.....	63
III.2.3	Spezifischer Flächenbedarf einer SABA.....	63
III.3	Einfacher Unterhalt .....	64
III.4	Unterhaltsaufwand .....	64
III.5	Investitionskosten.....	65
III.6	Bauwerkshöhe.....	65
<b>IV</b>	<b>Charakterisierung und Leistungsbeurteilung der Verfahren</b> .....	<b>66</b>
IV.1	Retentionsfilterbecken - zentrale Behandlung .....	66
IV.1.1	Sandfilter bewachsen mit Schilf .....	66
IV.1.2	Retentionsfilterbecken mit Oberbodenschicht .....	69
IV.1.3	Sandfilter mit Adsorbierschichten .....	71
IV.1.4	Splitt-Kiesfilter .....	73
IV.2	Sedimentationsbasierte Verfahren – zentrale Behandlung .....	76
IV.2.1	Absetzbecken - Betrieb im Dauerstau .....	76
IV.2.2	Absetzbecken, bewirtschaftet .....	80
IV.2.3	Lamellenabscheider .....	80
IV.3	Technische Filter – zentrale Behandlung.....	82
IV.3.1	Polstofffilter.....	82
IV.3.2	Mikrosieb .....	85
IV.3.3	Schnellfilter, rückgespült .....	87
IV.3.4	Weitere SABA-Typen mit technischen Filtern.....	89

IV.4	Dezentrale Verfahren .....	89
IV.4.1	Versickerung über das Bankett, Mulden-Rigolen.....	89
IV.4.2	Poröser Asphalt.....	91
IV.4.3	Dezentrale schachtbasierte Verfahren.....	93
IV.5	Bei projektierten SABA nicht eingesetzte Verfahren.....	96
IV.5.1	Adsorber als Nachbehandlung.....	96
IV.5.2	Membrananlagen .....	96
IV.5.3	Flockung und Fällung.....	96
<b>V</b>	<b>Zusammenfassung der Daten und Anlagen.....</b>	<b>98</b>

# I Strassenabwasser

## I.1 Eigenschaften von Strassenabwasser

Der Durchfluss im Zulauf einer SABA weist eine hohe Dynamik auf, die hauptsächlich vom Verlauf und der Höhe der Regenintensität, der Regendauer und der Grösse des Einzugsgebiets abhängt. Für Behandlungsverfahren bedeutet dies zweierlei. Entweder sie können hohe Durchflussschwankungen bewältigen, wie beispielsweise Absetzbecken oder sie benötigen ein Retentionsvolumen, wie beispielsweise eine SABA mit bewachsenem Sandfilter. Retentionsvolumina können auch nötig sein, wenn der Durchfluss vor der Einleitung in ein kleines Oberflächengewässer gedrosselt werden muss.

Zusätzlich zur Dynamik des Durchflusses zeigt der Zulauf einer SABA eine hohe Dynamik bezüglich der Schadstoffkonzentrationen im Strassenabwasser und damit deren Zulaufmengen. Die Zulaufkonzentrationen sind von zahlreichen Parametern abhängig. Wieder spielen die Regendauer, der Verlauf und die Höhe der Regenintensität eine Rolle. Zusätzlich sind Faktoren wie Länge und Grösse des Einzugsgebiets, Quer- und Längsgefälle der Fahrbahn, Anzahl der Fahrstreifen und weitere massgebend.

Aufgrund dieser Faktoren existiert kein ausgeprägter First-Flush der Schadstoffmengen im Zulauf einer SABA. Somit ist es mit einer First-Flush Abtrennung nicht genügend genau möglich, stark verschmutztes Strassenabwasser von weniger stark verschmutztem zu trennen. Dies verunmöglicht es, Behandlungsverfahren mit einer First-Flush Abtrennung kleiner zu dimensionieren.

## I.2 Schadstoffe im Strassenabwasser

### I.2.1 GUS, Schwermetalle und PAK

Die Konzentrationen von GUS, Schwermetallen und von PAK sind in Abb. I.1 dargestellt. Die Daten stammen von Zulaufmessungen zu SABA, die weder Pumpwerke, Stapelbecken- oder Stapelkanäle haben, welche zu einem Teilrückhalt von Schadstoffen führen [6], [8], [10], [12], [17], [21]. Der DTV liegt bei allen Messungen über 15'000 Fahrzeugen pro Tag und entspricht damit der Belastungsklasse „hoch“ [2].

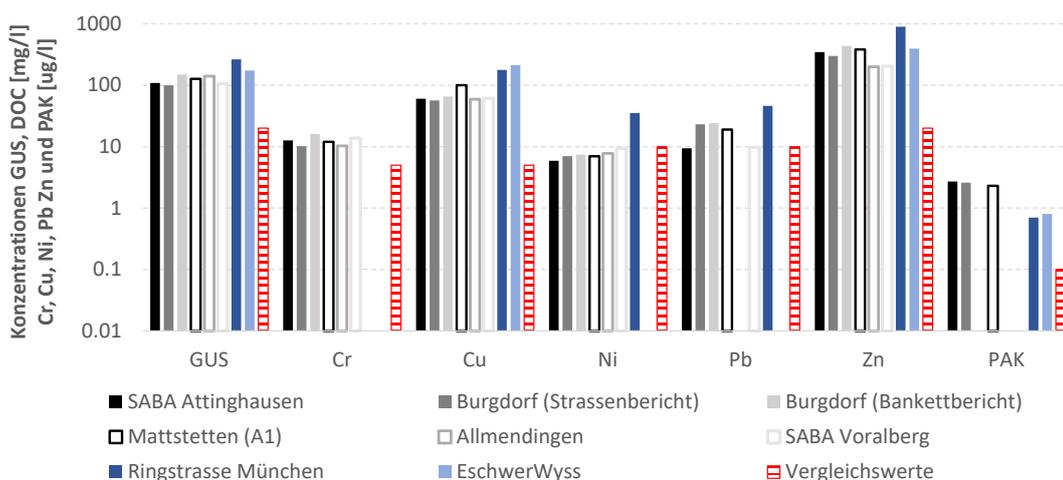


Abb. I.1 Schadstoffkonzentrationen im Strassenabwasser von Strassen mit einem DTV > 15'000. Totale Gehalte bei Schwermetallen. Vergleichswerte aus [1].

Die Daten zeigen die unterschiedlichen Konzentrationen sowie deren Bandbreite, welche auf die im vorigen Kapitel erwähnten Faktoren zurückzuführen sind. Diese Faktoren überlagern den Einfluss des DTV entscheidend, sodass dieser nicht als Mass für die Konzentrationen und Frachten von Schadstoffen im Strassenabwasser gilt. Diese Aussage gilt ab einem DTV von etwa 15'000 Fahrzeugen pro Tag. Die Daten sind wie folgt zusammengefasst.

- GUS 100–263 mg/l
- Kupfer 56–212 ug/l, Zink 199-896 ug/l
- Chrom 10–16 ug/l, Nickel 6–35 ug/l, Blei 9–46 ug/l
- PAK 0.7-2.7 ug/l

## I.2.2 Mikroplastik, Reifenabrieb

Mikroplastik im Strassenabwasser stammt hauptsächlich vom Reifenabrieb. Weitere Quellen sind Fahrbahnabrieb und Markierungen, welche aber eine untergeordnete Rolle spielen. Die Ursache für Reifenabrieb ist die Energieübertragung vom Fahrzeug via Reifen auf die Fahrbahn [3].

Reifenabrieb besteht im Wesentlichen aus drei Stoffgruppen: Natürliche und synthetische Polymere (Mikroplastik), Russ und anorganische Stoffe. Der Anteil der Polymere beträgt 60 % und derjenige von Russ 30 %. Der Rest von 10 % sind anorganische Stoffe. Davon hat Zink mit 1 % den höchsten Anteil und ist somit ein Indikator für Reifenabrieb. GUS ist ein weniger sensitiver Indikator für Reifenabrieb. Im Strassenabwasser sind Konzentrationen von 50-120 mg/l Reifenabrieb zu erwarten [3].

Behandlungsverfahren gemäss Anforderung *erhöht* erreichen sehr tiefe Ablaufkonzentrationen von Zink und einen Rückhalt des Reifenabriebs von über 90 %. Diese Zahl ist konservativ, da im Strassenabwasser auch Zink von Fahrzeugrückhaltesystemen vorhanden ist.

## I.2.3 Organische Mikroverunreinigungen

Strassenabwasser enthält zahlreiche Mikroverunreinigungen unterschiedlicher Herkunft. Eine Übersicht ist in [26] dargestellt. Für die Risikoabschätzung eines Stoffes ist erstens massgebend, ob er für aquatische Lebewesen ökotoxikologisch relevant ist, zweitens, wie gut ein Stoff in der Strassenabwasserbehandlung zurückgehalten wird (Verteilung Festphase/Flüssigphase) und drittens ob, wie schnell und unter welchen Bedingungen ein biologischer Abbau stattfindet. Ob humantoxikologische Aspekte durch die Nutzung von Oberflächengewässern oder Grundwasser zur Trinkwassergewinnung massgebend werden, ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreichend erforscht.

Aus der Zusammenfassung folgt, dass zum heutigen Zeitpunkt zwar ökotoxikologisch betrachtet problematische Mikroverunreinigungen im Strassenabwasser enthalten sind, diese aber grösstenteils durch eine Behandlung mit bewachsenen Retentionsfilterbecken zurückgehalten werden können. Es kann jedoch erwartet werden, dass künftig weitere Stoffe, beispielsweise aus Auswaschungen von Inhaltsstoffen von Reifenabrieb, identifiziert werden, welche analog zu [26] beurteilt werden können.

## I.3 Beurteilung der Schadstoffe

### I.3.1 Gewässerrelevante Stoffe im Strassenabwasser

Zur Bestimmung der gewässerrelevanten Schadstoffe im Strassenabwasser wird die Gewässerschutzverordnung (GSchV) genutzt [1]<sup>7</sup>, und zwar die Anforderungen an Fließgewässer sowie die Einleitbedingungen für kommunales Abwasser. Diese Werte werden mit den entsprechenden Konzentrationen im Strassenabwasser verglichen.

<sup>7</sup> Anhang 2 und Anhang 3.1 GSchV.

Die Anforderungen an Fliessgewässer und die Einleitbedingungen haben eine unterschiedliche Bedeutung. Die Anforderungen für Fliessgewässer gelten nach vollständiger Durchmischung im Fliessgewässer nach der Einleitung, die Einleitbedingung gilt für das eingeleitete Strassenabwasser.

Bei der Einleitung in ein Fliessgewässer spielt zudem die hydraulisch betrachtet langsamere Ansprechzeit des Fliessgewässers im Vergleich zu Strassenentwässerung eine verschärfende Rolle. Dies führt dazu, dass die Verdünnung der Schadstofffrachten im Fliessgewässer nach Beginn eines Regenereignisses gering ist, was insbesondere auf kleinere Fliessgewässer zutrifft.

*Tab. I.1 Vergleichswerte nach GSchV [1]. Bei den Schwermetallen betreffen die Werte die totalen Gehalte.*

	Zusätzliche Anforderungen an Fliessgewässer	Einleitbedingung für kommunales Abwasser	Bemerkungen
GUS		20 / 15 mg/l	ARA < 10'000 EW: 20mg/l ARA > 10'000 EW: 15 mg/l
Blei (gesamt)	10 ug/l Pb		
Cadmium (gesamt)	0.2 ug/l Cd		
Chrom (gesamt)	5 ug/l Cr		
Kupfer (gesamt)	5 ug/l Cu		
Nickel (gesamt)	10 ug/l Ni		
Zink (gesamt)	20 ug/l Zn		
PAK	0.1 ug/l je Einzelstoff, für Grundwasser, das als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist.		

Diese Vergleichswerte sind in Abb. I.1 als roter Balken dargestellt. Sichtbar ist, dass die Einleitbedingung von 20 mg/l GUS rund 10 bis 30-fach überschritten wird. Bei den Anforderungen an Fliessgewässer sind die Überschreitungen bei Kupfer und Zink am höchsten, und zwar um das 10- bis 40-fache.

Die Konzentrationen von Blei, Chrom und Nickel überschreiten die Anforderungen weniger stark, womit deren ökotoxikologische Relevanz geringer ist als bei Kupfer und Zink. Die Cadmium-Konzentrationen im Strassenabwasser liegen in der Regel unterhalb von 1 ug/l und sind bezüglich ökotoxikologischer Relevanz vergleichbar mit Blei und Chrom [10],[17].

## PAK

Für Grundwasser, welches als Trinkwasser genutzt wird oder dafür vorgesehen ist, gilt die Anforderung von 0.1 ug/l pro Einzelstoff. Zwar sind in Abb. I.1 die PAK-Summe der 16 Einzelsubstanzen angegeben. Dennoch zeigen Messungen, dass die Anforderung für Einzelsubstanzen im Strassenabwasser bis zum Vierfachen überschritten werden kann. Auch wenn auf dem Weg bis zum Grundwasser eine Verdünnung und ein Rückhalt stattfindet, wird dieser Stoff als kritisch beurteilt.

## Zusammenfassung der kritischen Stoffe

Somit gelten GUS, Kupfer, Zink und PAK als die kritischsten Stoffe im Strassenabwasser, was auch in anderen Untersuchungen ähnlich beurteilt wird [25], [27], [30].

## Gewässerspezifisch wenig relevante Stoffe im Strassenabwasser

Folgende Stoffe liegen im Strassenabwasser in zu geringen Konzentrationen vor, als dass sie für Gewässer relevant sind:

- **BSB<sub>5</sub>** als Mass für die Sauerstoffzehrung
- **Ammonium und Nitrit:** Die Einleitbedingungen für kommunales Abwasser werden nicht erreicht. Vorbehalten bleiben spezielle Einleitsituationen bei geringer Verdünnung im Gewässer.

- **KW-Index:** Konzentrationsmessungen von Kohlenwasserstoffen (C10-C40) zeigen, dass im Strassenabwasser Werte zwischen 100 und 300 ug/l erreicht werden können.
- **Tenside** aus biologischem Abbau sowie aus Scheibenwaschmitteln können zu Schaum führen, sind jedoch gemäss heutigem Kenntnisstand wenig relevant hinsichtlich Gewässerbelastung.

### I.3.2 Indikatorstoffe

Damit ein Schadstoff als Indikator zur Beurteilung von Behandlungsverfahren genutzt werden kann, muss er neben der gewässerökologischen Relevanz folgende Kriterien möglichst gut erfüllen:

- Wird in SABA zurückgehalten und zwar verfahrensspezifisch
- Wird standardmässig bei Leistungs- oder Funktionsprüfungen erhoben
- Ist ein Indikator für weitere Stoffe im Strassenabwasser

Ersteres ist bei GUS, Kupfer, Zink und PAK der Fall. Der zweite Aspekt gilt für PAK jedoch nicht. Der Grund dafür sind die hohen Kosten für die Analytik sowie die anspruchsvollere Probenahme im Vergleich zu GUS, Kupfer und Zink. GUS und Zink sind jedoch Indikatorstoffe für den Rückhalt von PAK [22], [33], womit dieser Nachteil kompensiert ist.

#### GUS

Als gesamt ungelöste Stoffe (GUS) werden diejenigen Stoffe bezeichnet, welche nach einer Membranfiltration mit einem Porendurchmesser von 0.45 um zurückbleiben (ohne Grobstoffe). GUS ist für folgende Stoffe oder Stoffgruppen ein Indikator:

- Für Partikel im Strassenabwasser mit einem Durchmesser über 0.45 um.
- Für Reifenabrieb, da dieser in partikulärer Form vorliegt.
- Für PAK, da diese grösstenteils an Partikel adsorbiert sind.

#### Kupfer und Zink

Kupfer und Zink liegen im Strassenabwasser als Partikel, an Partikel adsorbiert, als Feinpartikel und Kolloide und in chemisch gelöster Form vor. Der feinpartikuläre, kolloidale und gelöste Anteil beträgt je nach Regen 10-50% der totalen Gehalte [17]. Dies ist der Grund, weshalb diese beiden Schwermetalle schwierig aus dem Strassenabwasser zu entfernen sind. Kupfer und Zink sind Indikatoren für

- die Schwermetalle Blei, Chrom, Cadmium, Nickel und weitere.
- Reifenabrieb, da die Lauffläche eines Reifens zu 1% aus Zink besteht. Die Bestimmungsgrenze von Zink ist tiefer als GUS, weshalb Zink für Reifenabrieb der bessere Indikator ist.

### I.3.3 GUS-, Kupfer- und Zinkkonzentrationen im Strassenabwasser

Kennzahlen zu Frachtmittelwerten von GUS, Kupfer und Zink im Zulauf von 15 SABA in der Schweiz sind in Tab. I.2 zusammengestellt. Dabei handelt es sich um Ergebnisse von mindestens einjährigen Messungen an SABA ohne vorgeschaltete Bauwerke, deren Einzugsgebiete einen DTV von über 15'000 Fahrzeuge pro Tag aufweisen. Die Mittelwerte der 15 SABA lauten

- für **GUS** 302 mg/l, für **Kupfer** 98 ug/l und für **Zink** 449 ug/l.

Diese Werte sind im Vergleich zu denjenigen basierend auf Konzentrationsbereichen [35] höher, und zwar vor allem bei GUS und Zink. Die Differenzen sind angesichts der unterschiedlichen Art der Mittelwerte sowie weiterer Standortfaktoren plausibel.

Die Minimal- und Maximalwerte von GUS, Kupfer und Zink im Zulauf der 15 SABA zeigen erwartungsgemäss grosse Unterschiede. Dies wird anhand der Quotienten von Maximalwert und Minimalwert erkennbar, welche mit Werten zwischen 5.9 und 6.5 nahe beieinander liegen.

*Tab. I.2 Kennzahlen zu Konzentrationen von GUS, Kupfer und Zink im Strassenabwasser von Strassen mit einem DTV über 15'000.*

	<b>GUS</b>	<b>Kupfer</b>	<b>Zink</b>
Minimalwert	100	31	153
Maximalwert	646	203	904
<b>Median</b>	<b>290</b>	<b>86</b>	<b>381</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>302</b>	<b>98</b>	<b>449</b>
Mittelwert aus [35]	195	79	315

## II Charakterisierung der Verfahren

### II.1 Behandlungstyp: Vor- und Hauptbehandlung

Die Behandlungsverfahren werden in Vor- oder Hauptbehandlung eingeteilt. Besteht eine SABA nur aus einem Absetzbecken, ist das Absetzbecken die Hauptbehandlung. Bei einer mehrstufigen SABA hat das Absetzbecken hingegen die Funktion einer Vorbehandlung. Die Vorbehandlung verfolgt, je nach Dimensionierung, folgende Ziele.

- Rückhalt von Schwimmstoffen und Grobstoffen, welche Leitungen oder Schieber blockieren können.
- Rückhalt der Sand- und Kiesfraktion zur Reduktion der Feststoffbelastung von Retentionsfilterbecken.
- Rückhalt eines Teils der Schadstoffe zur Reduktion der Belastung der Hauptbehandlung.
- Rückhalt von Havariestoffen und Störfallgut.

Die Aufgabe der Hauptbehandlung ist es, die Schadstoffe so wirksam wie möglich zurückzuhalten. Je nach Gewässer kann die Drosselung des Abflusses auch eine Aufgabe der Hauptbehandlung sein.

### II.2 Hydraulische Kriterien

#### II.2.1 Drosselung des Abflusses

Die Drosselung des Abflusses ist abhängig von der Art des Behandlungsverfahrens. Sie findet bei allen SABA-Typen mit Filtern statt. Bei Absetzbecken und Teichen ist die Drosselung in der Regel gering, es sei denn, sie ist mit einer Retention verbunden. Die Drosselwirkung von Filtern kann gezielt eingesetzt werden, um den kleinen Gewässern maximal zulässigen Durchfluss im Ablauf zu erreichen.

#### II.2.2 Retentionsvolumina

Jede Drosselung des Durchflusses im Ablauf erfordert ein Retentionsvolumen. Dieses ist bei Retentionsfilterbecken durch den Aufstau im Becken vorhanden. Bei technischen Filtern muss für die Retention ein zusätzliches Becken gebaut werden, woraus die Filtrationseinheit meistens mittels Pumpen beschickt wird. Eine Retention kann auch mit Pumpwerken oder Staukanälen bereitgestellt werden, die ausserhalb des SABA Geländes liegen. Mit solch vorgelagerten Bauwerken kann auch bei Absetzbecken betrieben im Dauerstau eine Retention geschaffen werden.

### II.3 Schadstoffentfernung

#### II.3.1 Art der Schadstoffentfernung

Die Kenntnis der Prozesse der Schadstoffentfernung ermöglicht es, die Schadstoffentfernung eines Verfahrens auch ohne Messungen grob abzuschätzen und einzuordnen. Die Prozesse sind in Kapitel 2.2 im Hauptteil des Berichts beschrieben und in Tab. 2.2 den Verfahren zugeordnet. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen der Sedimentation, der Filtration in unterschiedlicher Ausprägung, der Adsorption/Ionenaustausch und biologischem Abbau.

Je nach Behandlungsverfahren laufen unterschiedliche Prozesse gleichzeitig ab. Während bei einem Absetzbecken nur die Sedimentation stattfindet, decken bewachsene Retentionsfilter das Spektrum von unterschiedlichen Filtrationsarten, der Adsorption und des biologischen Abbaus ab [15],[37].

### II.3.2 Stabilität der Schadstoffentfernung

Die Stabilität der Schadstoffentfernung eines Verfahrens bezeichnet dessen Charakteristik, unabhängig von variablen Zulaufkonzentrationen stabile Ablaufkonzentrationen zu erzielen. Neben den dynamischen Schadstofffrachten im Zulauf ist die Stabilität der Schadstoffentfernung in erster Linie verfahrenstechnisch bedingt. Beispielsweise haben Behandlungsverfahren, die auf der Sedimentation basieren, eine weniger stabile Schadstoffentfernung als solche, die eine Filtration aufweisen. Bei der Filtration gibt es Verfahrenstypen mit stabiler Schadstoffentfernung (Retentionsfilterbecken) und solche mit weniger stabiler Schadstoffentfernung (Technische Filter).

In zweiter Linie ist die Stabilität der Schadstoffentfernung betrieblich bedingt, indem bei eintretender Kolmation eines Filters der Durchfluss abnimmt. Mit eintretender Kolmation wird der Schadstoffrückhalt des Filters besser, jedoch steigt durch den abnehmenden Durchfluss die Anzahl der Entlastungen. Dadurch kann die insgesamt zurückgehaltene Schadstofffracht abnehmen. Ein anderes Beispiel ist die Notwendigkeit der regelmässigen Schlammabnahme aus Absetzbecken: Bleibt er zu lange liegen, steigt das Risiko, dass Schlamm bei intensiven Niederschlägen ausgetragen wird. Für eine stabile Schadstoffentfernung ist somit auch der sachgerechte Unterhalt einer SABA entscheidend.

### II.3.3 Havarierückhalt

Dieses Kriterium beschreibt die Eignung eines Behandlungsverfahrens zum Rückhalt von Stoffen aus Havarie und Störfall hinsichtlich folgender Punkte:

- Flexibilität bei der Dimensionierung des Rückhaltevolumens
- Entsorgungsaufwand im Fall einer Havarie
- Isolierung des Havarieguts und die Möglichkeit einer getrennten Entsorgung

## II.4 Betrieb, Unterhalt und Entsorgung

Unter dieser Rubrik werden die für den Betrieb eines Behandlungsverfahrens notwendigen Installationen beschrieben. Ebenso sind typenspezifische Unterhaltsarbeiten aufgeführt.

Die von Behandlungsverfahren abgetrennten Schadstoffe werden im Verfahren selbst oder auf dem Gelände der SABA bis zur Entsorgung gespeichert. Die Speicherung von abgetrenntem Schlamm kann beispielsweise im Schlamm bunker eines Absetzbeckens, in einem separaten Schlammbecken oder auf einem Retentionsfilterbecken als Sedimentauflage erfolgen. Bei dezentralen Systemen muss die Filtereinheit infolge der hohen hydraulischen Belastung periodisch ausgewechselt und entsorgt werden. Bezüglich der Entsorgung werden somit die Eigenheiten der Verfahren beschrieben.

## II.5 Diverse

### II.5.1 Klimaempfindlichkeit

Die Klimaempfindlichkeit von Behandlungsverfahren bezeichnet deren Einschränkungen bei Hitze oder Kälte. Bei technischen Behandlungsverfahren ist die Kälteempfindlichkeit bezüglich Frostsicherheit ein Thema, sobald Pumpen, Druckleitungen und Ventile eingesetzt werden, welche einfrieren können. Bei Retentionsfilterbecken erfolgt eine Abnahme des Durchflusses bei Frost.

### II.5.2 Materialbeschaffung

Die Materialbeschaffung kann bei einigen Anlagentypen ein wichtiger Aspekt sein. Vor allem bei Verfahren mit bewachsenem Bodenfilter ist die Auswahl des passenden Bodens und damit dessen Beschaffung wichtig. Ebenso ist dies der Fall bei Sandfiltern, da die richtige Beschaffenheit des Sandes (gewaschen und rund) sowie die Abstufungen der Körnung wichtig sind. Mit der Materialbeschaffung verbunden sind eventuell auch umfangreiche Materialtransporte.

### **II.5.3 Inbetriebnahme**

Die Inbetriebnahme bezeichnet diejenige Periode, während welcher ein Behandlungsverfahren nach dem Bau noch nicht oder erst teilweise in Betrieb genommen werden kann. Die Inbetriebnahme ist bei bewachsenen Retentionsfiltern wichtig und kann mehrere Monate dauern. Aber auch technische SABA benötigen bei hoher Mechanisierung eine Einfahrphase, während welcher beispielsweise die Steuerung von Aggregaten oder von Schiebern eingestellt wird.

### **II.5.4 Flexibilität bei der Realisierung**

Verfahren mit unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten können flexibler an örtliche Gegebenheiten angepasst werden. Retentionsfilterbecken können beispielsweise zweigeteilt werden, was den Unterhalt vereinfacht und die Betriebssicherheit erhöht. Ist hingegen wenig Fläche vorhanden, ist ein einteiliges Becken vorteilhaft. Bei technischen SABA können Retentionsvolumen, Filtrationseinheit und Schlammstapel getrennt voneinander gebaut werden. Ebenso ist die Flexibilität höher, wenn die Beschickung mit Pumpen erfolgt. Dies geht allerdings zu Lasten der Unterhalts- und Investitionskosten.

### III Leistungsbeurteilung: Kriterien und Klassen

#### III.1 Beurteilung der Schadstoffentfernung

##### III.1.1 Ablaufkonzentrationen

Zur Beurteilung der Schadstoffentfernung werden Ablaufkonzentrationen verwendet. Sie ermöglichen es, das Spektrum der Wirksamkeit der Behandlungsverfahren am genauesten abzubilden. Ablaufkonzentrationen haben zudem einen direkten Bezug zu den Anforderungen an die Gewässerqualität oder an Einleitbedingungen gemäss GSchV [1]. Zur Beurteilung der Ablaufkonzentrationen werden frachtgemittelte Konzentrationen verwendet.

Die Klassierung der Ablaufkonzentrationen erfolgt anhand der fünf Leistungsklassen, die in Tab. III.1 beschrieben sind. Die Konzentrationsbereiche und Abstufungen sind so gewählt, dass sie die Unterschiede der Verfahren abbilden.

Tab. III.1 Klassierung der Ablaufkonzentrationen.

Klasse	GUS [mg/l]	Cu [ug/l]	Zn [ug/l]
5	≤10	≤5	≤10
4	>10 - ≤20	>5-≤10	>10 - ≤20
3	>20 - ≤30	>10-≤15	>20 - ≤30
2	>30 - ≤40	>15-≤20	>30 - ≤40
1	>40	>20	>40

##### III.1.2 Wirkungsgrade

Der Wirkungsgrad beschreibt den von einem Behandlungsverfahren zurückgehaltenen Anteil der Schadstofffracht bezüglich der Zulauffracht, in diesem Fall auf prozentualer Basis. Als Bezugsgrössen gelten die Schadstofffrachten oder die daraus berechneten frachtgemittelten Zulauf- und Ablaufkonzentrationen. Wirkungsgrade haben damit keinen direkten Bezug zu gewässerökologischen Vorgaben.

Wirkungsgrade sind nur bei ähnlichen Zulaufkonzentrationen vergleichbar. Erzielen beispielsweise zwei typengleiche SABA vergleichbare Schadstoffkonzentrationen im Ablauf, die Zulaufkonzentration der einen SABA ist aber höher, ist der Wirkungsgrad beider SABA unterschiedlich. Die geringer belastete SABA würde in der Beurteilung somit schlechter abschneiden, obwohl sie auch bei höheren Zulaufkonzentrationen dieselben tiefen Ablaufkonzentrationen erzielen würde. Dies ist beispielsweise bei Retentionsfilterbecken der Fall. Bei technischen SABA tritt derselbe Effekt auf, wenn die Zulaufkonzentrationen zum Filter nach der Vorbehandlung gemessen werden.

Wegen solcher Zusammenhänge wird die Schadstoffentfernung mit Ablaufkonzentrationen und nicht mit Wirkungsgraden beurteilt. Die Wirkungsgrade dienen jedoch als Richtwerte. Deren Klassierung ist in Tab. III.2 dargestellt. Die Abstufung zwischen 90 % und 60 % erfolgt in Schritten von jeweils 10 %. Wirkungsgrade unter 60 % werden nicht weiter unterschieden.

Tab. III.2 Klassierung der Wirkungsgrade.

	5	4	3	2	1
Wirkungsgrade GUS, Cu, Zn [%]	≥90	≥80 - <90	≥70 - <80	≥60 - <70	<60

## III.2 Hydraulische Leistung und Flächenbedarf

### III.2.1 Spezifischer hydraulischer Durchfluss

Der spezifische hydraulische Durchfluss beschreibt, wie viel Strassenabwasser von einem Behandlungsverfahren pro Quadratmeter Oberfläche des Behandlungsverfahrens und pro Zeit behandelt wird. Die Klassifizierung ist in Tab. III.3 beschrieben.

Insgesamt reichen die Werte von 0.5 bis 180 l/min/m<sup>2</sup>. Diese grosse Bandbreite widerspiegelt die Unterschiede der Behandlungsverfahren von flächigen Filtern wie Retentionsfilterbecken bis hin zu technischen Verfahren mit hohem Durchsatz. Damit die flächenintensiven Retentionsfilterbecken voneinander unterschieden werden können, erstreckt sich die Skala zwischen 1.5-6 l/min/m<sup>2</sup> in Schritten von 1.5 l/min/m<sup>2</sup>.

Tab. III.3 Klassifizierung des spezifischen hydraulischen Durchflusses.

	5	4	3	2	1
Spez. hydraulischer Durchfluss [l/min/m <sup>2</sup> ]	≥ 6	≥4.5 - <6	≥3 - <4.5	≥1.5 - <3	<1.5

### III.2.2 Spezifischer Flächenbedarf eines Behandlungsverfahrens

Der spezifische Flächenbedarf eines Behandlungsverfahrens alleine, also ohne Zufahrten, Zuleitungen, Umschwung und weitere Flächen, beschreibt den Quotienten aus der behandlungsaktiven Fläche eines Verfahrens und der angeschlossenen Strassenfläche. Die Klassierung des spezifischen Flächenbedarfs ist in Tab. III.4 dargestellt und reicht von weniger als 50 m<sup>2</sup>/ha Behandlungsfläche bis über 125 m<sup>2</sup>/ha. Auch bei dieser Klassifizierung liegt der Fokus auf der Unterscheidbarkeit der flächenintensiven Verfahren.

Tab. III.4 Klassifizierung des spezifischen Flächenbedarfs der Behandlungsfläche.

	5	4	3	2	1
Spez. Flächenbedarf Verfahren [m <sup>2</sup> Behandlung / ha EZG]	≤50	>50-≤75	>75-≤100	>100-≤125	>125

### III.2.3 Spezifischer Flächenbedarf einer SABA

Der spezifische Flächenbedarf einer SABA beschreibt die für die gesamte SABA benötigte Fläche im Verhältnis zur angeschlossenen Strassenfläche. Im Vergleich zum spezifischen Flächenbedarf eines Behandlungsverfahrens ist der spezifische Flächenbedarf einer SABA grösser, da sämtliche Einrichtungen wie beispielsweise die Zufahrt, Böschungen, Retentionsvolumen und weitere berücksichtigt werden. Wichtig sind auch vorgelagerte Becken, welche zu einer massgeblichen Flächenreduktion auf dem eigentlichen Gelände einer SABA führen. Der Flächenbedarf desselben SABA-Typs kann somit unterschiedlich hoch ausfallen.

Der Flächenbedarf ist abhängig von örtlichen Gegebenheiten wie der Gestaltung der Zufahrt und des Wendeplatzes, der Zugänglichkeit zu den Becken, vom Vorhandensein von Böschungen und weiteren Aspekten. Die Klassifizierung ist in Tab. III.5 beschrieben.

Tab. III.5 Klassifizierung des spezifischen Flächenbedarfs der gesamten SABA.

	5	4	3	2	1
spezifischer Flächenbedarf SABA [m <sup>2</sup> SABA / ha EZG]	≤60	>60 - ≤120	>120 - ≤180	>180 - ≤240	>240

### III.3 Einfacher Unterhalt

Für den Unterhalt einer SABA ist neben dem zeitlichen und finanziellen Aufwand auch der Schwierigkeitsgrad der auszuführenden Arbeiten und damit die Anforderungen an die Ausbildung und Instruktion der Unterhaltsdienste massgebend. So sind für Unterhaltsarbeiten beim Mähen der Böschung einer Strassenschulter andere Kenntnisse notwendig, als für den Betrieb einer SABA mit Polstofffilter mit Steuerung, Aggregaten und Alarmen.

Die Einfachheit des Unterhalts ist ein qualitatives Kriterium, basiert auf den Erfahrungen der Unterhaltsdienste und wird mit den in Tab. III.6 gewählten Begrifflichkeiten beurteilt.

Tab. III.6 Einfacher Unterhalt und Betrieb

	5	4	3	2	1
Einfacher Unterhalt	einfach	eher einfach	mittel	eher anspruchsvoll	anspruchsvoll

### III.4 Unterhaltsaufwand

Alle Aktivitäten, die für die Funktionsfähigkeit einer SABA notwendig sind, werden unter dem Aspekt „Unterhalt“ zusammengefasst. Zu den Unterhaltsarbeiten gehören folgende:

- Reinigungsarbeiten: Leeren und Reinigen von Becken und Bauwerken, Absaugen und Abführen des Schlamms, Spülen von Leitungen.
- Funktionskontrollen: Schieber, Motoren, Pumpen, Dämmbalken.
- Instandhaltungsarbeiten: Entfernen von Bewuchs, Mähen von Pflanzen, Entfernen von Sedimentauflagen auf Filtern.

Bei Unterhaltsarbeiten spielen SABA-spezifische Faktoren (Zugänglichkeit, Standort, Einbautiefen und weitere) eine Rolle, weshalb die Unterhaltskosten bei gleichen Verfahren unterschiedlich sein können. Ebenso ist die Erfassung der Unterhaltskosten nicht immer gleich, da die Entsorgung teilweise berücksichtigt ist oder nicht. Sind Stunden ausgewiesen, erfolgt die Umrechnung bei Arbeiten an Absetzbecken wie folgt: Stundenansatz für Saugwagen 215 CHF pro Stunde inklusive einer Arbeitskraft. Ansatz zusätzliche Arbeitskraft: 100 CHF pro Stunde.

Folgende Überlegungen unterstützen zudem den Vergleich der Unterhaltskosten ähnlicher Behandlungsverfahren:

- Der Unterhaltsaufwand eines Absetzbeckens ohne Lamellen ist geringer als der eines Absetzbeckens mit Lamellen oder einer SABA mit einem Polstofffilter, da bei letzteren zusätzliche Komponenten unterhalten werden müssen. Die Schlammmenge, und damit die Entsorgungskosten, bleiben jedoch vergleichbar.
- Bei Retentionsfiltern ist das unterhaltsärmste Verfahren am kostengünstigsten. Ein bewachsener Sandfilter benötigt weniger Unterhalt als ein Bodenfilter, da das Mähen entfällt. Ebenso ist der Unterhaltsaufwand des bewachsenen Sandfilters im Vergleich zum Splitt-Kiesfilter geringer, da weder die Sedimentauflage noch kolmatirierte Schichten periodisch entfernt und entsorgt werden müssen (Anhang IV.1.4).

Zum Vergleich der langfristigen Unterhalts- und Entsorgungskosten ist die Gesamtlebensdauer der Filterschichten bei RFB oder der Filtermedien bei technischen Filtern massgebend. Darüber gibt es heute noch zu wenige Angaben.

Zur Klassifizierung in Tab. III.7 werden die Kosten pro Hektare angeschlossener Strassenfläche und pro Jahr verwendet. Der Bereich der erhobenen Daten liegt zwischen 690 und 23'700 CHF/ha/Jahr. Die Klassierung wurde in Schritten von 700 CHF/ha/Jahr durchgeführt, beginnend mit 700 CHF/ha/Jahr bis Klasse 1 mit über 2'800 CHF/ha/Jahr. Dieser Bereich beinhaltet zwei Drittel der Verfahren.

Tab. III.7 Klassifizierung des Unterhaltsaufwands.

	5	4	3	2	1
Spezifische Kosten [CHF/ha EZG/Jahr]	≤700	>700 - ≤1400	>1400 - ≤2100	>2100 - ≤2800	>2800

Die Entsorgungskosten wurden infolge fehlender Daten nicht erhoben. Folgende Abschätzung gibt eine Grössenordnung: Für die Entsorgung von Schlamm werden Kosten von durchschnittlich 165 CHF pro Tonne angesetzt (130 CHF/t bis 200 CHF/t, nass). Pro Hektare Strassenfläche und pro Jahr fallen zwischen 1 und 4 Tonnen Schlamm an, was Entsorgungskosten zwischen 165 und 660 CHF/ha/Jahr bewirkt. Die Entsorgungskosten können somit im Vergleich zu den Unterhaltskosten je nachdem einen nicht zu vernachlässigbaren Teil ausmachen. Wie bei den Unterhaltskosten sind auch bei den Entsorgungskosten die Gesamtlebensdauerkosten zu betrachten, was im Rahmen eines ASTRA-Forschungsprojekts untersucht wird.

### III.5 Investitionskosten

Die spezifischen Investitionskosten werden mit der Einheit Franken pro Hektare entwässertes Einzugsgebiet beziffert. Diese Kosten sind von folgenden Faktoren abhängig:

- Grösse des angeschlossenen Einzugsgebiets
- Hydraulische Dimensionierung der SABA (Hydraulischer Wirkungsgrad)
- Art des Zuflusses: Freispiegelzufluss oder Notwendigkeit von Pumpwerken oder weiteren externen Bauwerken
- Baugrund und Lage des Grundwasserspiegels
- Topographie

Die spezifischen Investitionskosten (CHF/ha) unterschiedlicher SABA-Typen sind prinzipiell nur dann vergleichbar, wenn alle diese Faktoren vergleichbar sind, was selten der Fall ist. Mittlerweile sind jedoch von den meisten SABA-Typen zahlreiche Anlagen gebaut worden, weshalb solche Faktoren im Mittel berücksichtigt sind. Dies betrifft insbesondere die Einzugsgebietsgrösse. In der Auswertung werden deshalb zusätzlich zu den Investitionskosten der im Detail betrachteten SABA auch die Investitionskosten weiterer SABA des gleichen Typs aus dem MISTRA-SABA Kataster genutzt. Bei Anlagen mit einem relevanten Anteil von Bauwerken, welche ausserhalb des SABA-Perimeters liegen, oder Massnahmen im Einzugsgebiet, wird dies erwähnt. Die Klassifizierung ist in Tab. III.8 dargestellt.

Tab. III.8 Klassifizierung der Investitionskosten.

	5	4	3	2	1
Spezifische Kosten [CHF/ha EZG]	≤150'000	>150'000 - ≤200'000	>200'000 - ≤250'000	>250'000 - ≤300'000	>300'000

### III.6 Bauwerkshöhe

Die Bauwerkshöhe eines Verfahrens ist insbesondere bei problematischem Untergrund wie Fels oder bei hohen Grundwasserständen kostenrelevant. In solchen Fällen ist eine geringe Bauwerkshöhe vorteilhaft. Die Bauwerkshöhe ist von zahlreichen Faktoren abhängig, welche teilweise wenig mit dem Verfahren alleine zu tun haben. Erfolgt beispielsweise die Einleitung mehrere Meter unter Terrain, werden die Bauwerke automatisch tiefer, und damit teurer. Massgebend für eine SABA ist zudem die Bauwerkshöhe aller Bauwerke und Komponenten. Auch wenn Retentionsfilterbecken mit einer Bauhöhe im Bereich von 2 m bis 2.5 m nicht hoch sind, brauchen sie eine Vorbehandlung, welche eine Höhe von 3 m übersteigen kann. Dasselbe gilt bei technischen SABA, deren Retention bezüglich Bauhöhe massgebend sein kann. Aus diesem Grund wird für die Bauwerkshöhe keine Klassifizierung verwendet.

## IV Charakterisierung und Leistungsbeurteilung der Verfahren

### IV.1 Retentionsfilterbecken - zentrale Behandlung

#### IV.1.1 Sandfilter bewachsen mit Schilf

Die Filterschicht eines bewachsenen Sandfilters besteht aus rundem, gewaschenem Filtersand mit vorgegebener Korngrössenverteilung, der Bewuchs erfolgt mit geeignetem Schilf [49], (Abb. IV.1). Die Reinigungsleistung beruht massgebend auf der Sedimentfiltration in der Deckschicht. Diese bildet sich über der Sandschicht und besteht aus zurückgehaltenen Partikeln, mineralischen Stoffen und organischer Substanz aus abgestorbenem Schilf.

Das Schilfwachstum sorgt dafür, dass die Deckschicht und der Filter hydraulisch durchlässig bleiben. Dies wird durch das Wachstum des Schilfs und die abgestorbenen und auf dem Filter liegen gebliebenen Schilfbestandteile erreicht. Mit der Zeit bildet sich ein Sekundärfilter (Deckschicht), der sich selbst erneuert und in welchem die wirkungsvolle Sedimentfiltration stattfindet.

Im Sandfilter selbst findet dank der Filtration im Innern der Filterschicht ein zusätzlicher Schadstoffrückhalt statt und sättigt den Filterkörper mit der Zeit. Gemäss heutigen Abschätzungen führt dies nach mindestens 30 Jahren zum Filterdurchbruch mit vermutlich abnehmendem Schadstoffrückhalt [49]. Zeigt sich nach 30 Jahren noch keine Reduktion der Schadstoffentfernung, kann der Filter weiter betrieben werden.



Abb. IV.1 Schematische Darstellung eines bewachsenen Sandfilters.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Sedimentfiltration, Filtration im Innern des Filters, Adsorption, biologischer Abbau
Stabilität der Schadstoffentfernung	Hoch
Vorbehandlung nötig	Ja, zur Entfernung der Grobstoffe und grösserer Partikel
Abflussdrosslung	Ja
Retentionsvolumen vorhanden	Ja
Retentionsvolumen nötig	Ja
Weitere Bauwerke	Nein
Havarierückhalt	Hauptsächlich in der Vorbehandlung
Betrieb	Keine speziellen Installationen notwendig
Unterhalt	Das Schneiden des Schilfs ist erst nach vielen Jahren nötig. Bei Neophytenwachstum ist das RFB temporär einzustauen. Die Dauer des Einstaus ist so kurz wie möglich zu halten, damit der Durchfluss stabil bleibt. Besser sind mehrere temporäre Einstaus nacheinander. Büsche und junge Bäume sind zu entfernen.

Kriterien	Beschreibung
Entsorgung	Schlamm aus der Vorbehandlung, Schilf (selten).
Klimaempfindlichkeit	Der Schilftyp muss der Höhenlage angepasst sein.
Materialbeschaffung	Der Filtersand muss gewaschen und rund sein.
Inbetriebnahme	Das Wachstum des Schilfs braucht mehrere Monate. Vorsichtiges Einfahren und ggf. temporärer Einstau für das Schilfwachstum ist nötig, auch zur Vermeidung von störendem Bewuchs und Neophyten.
Flexibilität Realisierung	Gering. Eine Zweiteilung erleichtert den Betrieb, führt aber zu höheren Kosten und etwas höherem Flächenbedarf.

### Weitere Aspekte

- Der bewachsene Sandfilter und dessen Filterkörper dürfen nicht dauernd eingestaut sein. Temporärer Einstau zur Vermeidung von Unkrautwachstum in der Einwachsphase ist möglich (wenige Wochen). Entsprechende Vorkehrungen zum temporären Einstau sind deshalb vorzusehen.
- Bewachsene Sandfilter können zwar in Versickerungsbecken eingesetzt werden, jedoch kann in diesen Fällen das Schilfwachstum nicht durch Einstau gesteuert werden. Für Versickerungsbecken sind deshalb Bodenfilter besser geeignet. Allerdings haben Versickerungsbecken den Nachteil, dass sie nur bedingt überprüft werden können.

### Leistungsbestimmung

Die Leistungsbestimmung dieses Verfahrenstyps basiert auf dem Forschungsbericht des ASTRA [49]. Die Ergebnisse der untersuchten SABA sind als Durchschnittswert in Abb. IV.2 dargestellt. Aktuelle Funktionsprüfungen bestätigen diese Ergebnisse [48].

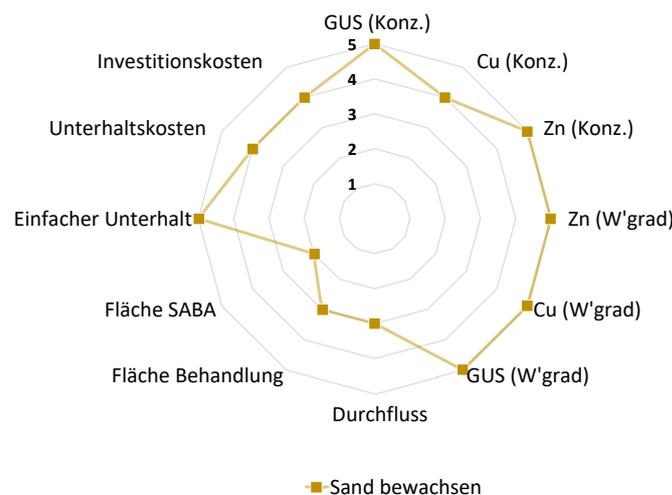


Abb. IV.2 Leistungscharakteristik von SABA mit bewachsenem Sandfilter.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Die Ablaufkonzentrationen von GUS liegen bei den meisten der untersuchten SABA (11 SABA) unterhalb von 10 mg/l bei einem Maximalwert einer SABA von 14 mg/l. Dies ergibt im Mittel 9 mg/l und somit Klasse 5. Bei Kupfer liegt der Mittelwert bei 9 ug/l bei einem Maximalwert einer Anlage von 15 ug/l und einem Minimalwert von 3 ug/l. Dies ergibt im Mittel Klasse 4. Bei Zink liegen die meisten Werte unterhalb von 10 ug/l bei einem Maximalwert von 30 ug/l, was im Mittel 9 ug/l und damit Klasse 5 entspricht.
Wirkungsgrade	Die Wirkungsgrade von GUS, Kupfer und Zink liegen bei allen untersuchten Anlagen über 90 %. Eine SABA mit 86 % bei GUS und 81 % bei Kupfer ist die Ausnahme und ist bedingt durch tiefe Zulaufkonzentrationen.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss von bewachsenen Sandfilter-RFB liegt gemäss neuen Erkenntnissen zwischen 2.2 und 6 l/min/m <sup>2</sup> und im Durchschnitt bei 3.8 l/min/m <sup>2</sup> (Klasse 3) [48].
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf für die SABA entspricht gemäss Auswertungen des SABA-Katasters 163 m <sup>2</sup> /ha bis 370 m <sup>2</sup> /ha, was den Klassen 1 bis 3 entspricht. Klasse 2 wurde gewählt. Für den Flächenbedarf der Behandlung wurde der Wert von 100 m <sup>2</sup> /ha verwendet, was

Kriterien	Beschreibung
	Klasse 3 entspricht.
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt wird von den Unterhaltsdiensten als einfach beurteilt (Klasse 5).
Unterhaltskosten	Die Unterhaltskosten von Sandfiltern liegen durchschnittlich bei 1'000 CHF/ha/Jahr, was Klasse 4 entspricht.
Investitionskosten	Die Investitionskosten liegen durchschnittlich bei 180'000 CHF/ha (Klasse 4). Weitere Angaben zu den Investitionskosten sind in Abb. 4.4 dargestellt.
Bauhöhe	Die Bautiefe der Retentionsfilterbecken beträgt durchschnittlich 2.5 m. Dabei sind die vorgeschalteten Absetzbecken tiefer.

## Beurteilung

Bewachsene Sandfilter zeigen tiefe und stabile Ablaufkonzentrationen und entsprechend hohe und stabile Wirkungsgrade. Die Unterhalts- und Investitionskosten sind gering, ebenso deren Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche. Diese idealen Leistungsmerkmale gehen allerdings zu Lasten des hohen Flächenbedarfs.

## Dimensionierungsvorgaben und Gestaltung

Der Flächenbedarf gemäss Empfehlungen von [49] hat sich aufgrund neuer Messungen bestätigt. Es gilt folgender Richtwert:

- Pro Hektare Strassenfläche werden 100 m<sup>2</sup> Filterfläche benötigt.

Der spezifische Durchfluss liegt bei neueren SABA zwischen 2.2 und 6.8 l/min/m<sup>2</sup> und zeigt keinen Zusammenhang mit dem Flächenverhältnis und damit der Belastung oder der Betriebsdauer. Dafür gibt es drei Erklärungen. Erstens steigt der Durchfluss mit zunehmender Einstauhöhe. Da während einer Funktionsprüfung nicht immer der maximale Einstau erzielt wird, sind die Werte eher zu tief, da nur wenige Monate gemessen wird und während dieser Zeit nicht unbedingt ein Starkregen fällt.

Der zweite Grund für die Unterschiede könnte bautechnischer Natur sein, indem der Durchfluss nach der Sandschicht durch die Konstruktion der Sickerschicht sowie der Art und dem Einbau der Drainageleitung reduziert wird. Der dritte Grund ist die Wahl des Sandes, der von den Vorgaben abweicht [34]. Für den spezifischen Durchfluss werden somit zwei Bereiche angegeben, abhängig von der Grösse des Einzugsgebiets. Um die Unsicherheiten im Zusammenhang mit langen Fließzeiten und längerer Beschickungsdauer der RFB bei grossen RFB zu berücksichtigen, werden zwei Bereiche angegeben.

- Einzugsgebiete kleiner 10 ha 2 - 4 l/min/m<sup>2</sup>
- Einzugsgebiete grösser 10 ha 2 - 3 l/min/m<sup>2</sup>

Als **Vorbehandlung** für bewachsene Sandfilter wurde bereits im Jahr 2017, wenn überhaupt, nur noch ein kleines Absetzbecken empfohlen, das primär auf den Rückhalt der gröberen Kies- und Sandfraktionen ausgelegt ist und gleichzeitig Havariestoffe und Störfallgut zurückhält [49]. Diese Empfehlung ist auch im DWA Arbeitsblatt aus dem Jahr 2019 [41] enthalten. Auch der Kanton Zürich projektiert die bewachsenen Sandfilter seit einigen Jahren mit kleinen Absetzbecken [52]. SABA mit bewachsenem Sandfilter, welche ohne Vorbehandlung gebaut wurden, zeigen nach mehreren Betriebsjahren keine Probleme [53].

Somit kann die Vorbehandlung eines bewachsenen Sandfilters künftig deutlich kleiner dimensioniert werden, was den Flächenverbrauch dieses Behandlungsverfahrens etwas reduziert. Auf die Dimensionierung wird im Anhang IV.2.1 eingegangen.

## Ergebnisse ähnlicher SABA

- Seit einigen Jahren werden einzelne mit Schilf bewachsene Kies-Sandfilter RFB gebaut. Leistungsprüfungen solcher SABA belegen, dass sie bewachsenen Sandfiltern vergleichbar tiefe Ablaufkonzentrationen (Klasse 5 für GUS und Klasse 4 bis 5 für Zink) und hohe Wirkungsgrade für alle drei Stoffe von mehr als 90 % (Klasse 5) aufweisen

[47]. Im Vergleich zum Sandfilter besteht bei diesem Filtertyp jedoch ein gewisses Risiko, dass bedingt durch die gröbere Körnung, ähnlich wie beim Splitt-Kiesfilter, eine schnellere innere Kolmation erfolgt. Eine solche konnte nach der bisher dreijährigen Laufzeit nicht festgestellt werden.

- Sandfilter können auch ohne Schilfbewuchs gebaut werden. Allerdings verlieren sie dann dessen Vorteile (Erhaltung der Durchlässigkeit, Unterdrückung von Neophyten). Es ist zudem mit periodischer Kolmation der Deckschicht ähnlich wie beim Splitt-Kiesfilter und entsprechendem Unterhaltsaufwand zu rechnen.

## IV.1.2 Retentionsfilterbecken mit Oberbodenschicht

Oberboden ist nachgewiesenermassen ein wirksamer Filter für Schadstoffe, der Sedimentfiltration, Filtration im Innern des Filters, Adsorption und biologischen Abbau in sich vereint. Durch den Bewuchs wird zudem die Durchlässigkeit erhalten (Abb. IV.3). Bodenfilter sind deshalb immer mit einer geeigneten Vegetation bewachsen und in der Oberbodenschicht durchwurzelt. Die biologische Aktivität des Bodens ist wesentlich für den Aufbau des Bodengefüges und die Stabilität des Porensystems. Die biologische Aktivität garantiert somit die Funktion des Bodenfilters auf längere Dauer.



Abb. IV.3 Schematische Darstellung eines Retentionsbodenfilters mit Oberboden auf Kiessand (links) und mit Oberboden auf Unterboden (rechts).

Retentionsfilterbecken mit bewachsenem Oberboden gibt es mit einem Filteraufbau, bestehend aus Oberboden und Unterboden oder aus Oberboden auf Sand oder Kiessand. Beim Aufbau mit Ober- und Unterboden wird ein natürlicher Boden nachgebildet. Dieser Aufbau neigt zu präferenziellem Fluss, zudem ist die Verfügbarkeit von geeignetem Unterboden vor Ort nicht immer gegeben. Mit dem Aufbau von Oberboden über Sand oder Kiessand sollen diese beiden Nachteile vermindert werden.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Sedimentfiltration, Filtration im Innern des Filters, Adsorption, biologischer Abbau.
Stabilität der Schadstoffentfernung	Hoch
Vorbehandlung nötig	Ja
Abflussdrosslung	Ja
Retentionsvolumen vorhanden	Ja
Retentionsvolumen nötig	Ja
Weitere Bauwerke	Nein
Havarierückhalt	Hauptsächlich in der Vorbehandlung
Betrieb	Keine speziellen Installationen notwendig
Unterhalt	Grünpflege
Entsorgung	Entsorgung von Schnittgut, Schlamm aus der Vorbehandlung
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Für geeigneten Oberboden und vor allem Unterboden ggf. schwierig.

Kriterien	Beschreibung
Inbetriebnahme	Regenerationszeit für Bodengefüge und Entwicklung der Vegetation frühestens nach 1 Jahr.
Flexibilität Realisierung	Gering. Eine Zweiteilung ermöglicht den intermittierenden Betrieb und damit auch Unterhaltsarbeiten.

### Wesentliche Aspekte

- Geeigneter Boden steht auf der Baustelle nicht immer zur Verfügung. Er sollte aber als knappe Ressource nicht von anderen Orten bezogen werden. Unterboden wird zudem oft zusammen mit dem Aushub entsorgt.
- Boden hat keine konstanten Materialeigenschaften und ist daher nicht mit anderen Baustoffen zu vergleichen. Die fachgerechte Verarbeitung des Bodens erfordert daher besondere Aufmerksamkeit. Sie ist für die einwandfreie Funktion der Anlage wesentlich.
- Ungeeignete Bodenarten sind nicht mischbar mit Zusatzstoffen wie Sand oder Adsorbentmaterialien.
- Das Problem der präferentiellen Fließwege bleibt bestehen.
- Bei Störungen des Bodengefüges durch Verdichtung oder Überlockerung im Unterboden ist eine Reparatur kaum möglich. Der gesamte Filter muss ausgewechselt werden.
- Dauereinstau ist nicht möglich. Bodenfilter müssen regelmässig trockenfallen.
- Am Übergang von der Boden- zur Sandschicht kann sich bei ungeeigneter Gestaltung der Schichten oder Mängel bei der Ausführung langfristig eine Kolmation bilden und eine schlecht durchlässige Grenzfläche bilden.

### Leistungsbestimmung

Die Leistungsbestimmung dieses Verfahrenstyps basiert auf dem Forschungsbericht des ASTRA [47]. Die Ergebnisse zahlreicher untersuchter SABA sind als Durchschnittswert in Abb. IV.4 dargestellt. Aktuelle Funktionsprüfungen der ASTRA Filiale Winterthur bestätigen diese Ergebnisse [48].

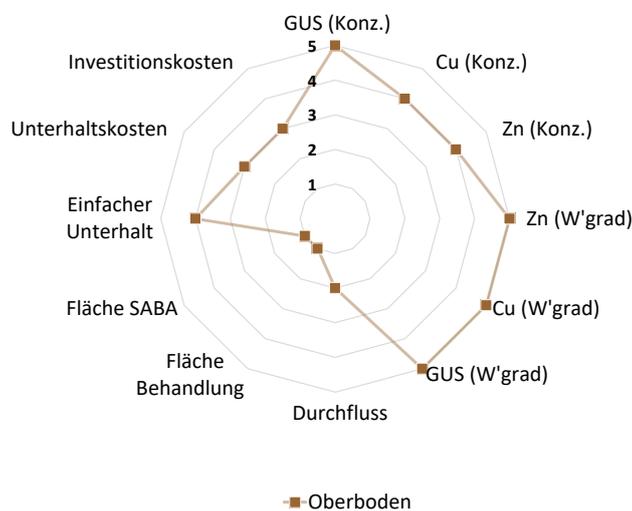


Abb. IV.4 Leistungscharakteristika von SABA mit Oberboden.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Die Ablaufkonzentrationen von GUS liegen bei den meisten der untersuchten SABA (4 SABA) unterhalb von 10 mg/l bei einem Maximalwert einer SABA von 14 mg/l. Dies ergibt im Mittel 9 mg/l und somit Klasse 5. Bei Kupfer liegt der Mittelwert bei 9 ug/l bei einem Maximalwert einer Anlage von 26 ug/l und einem Minimalwert von 6 ug/l. Dies ergibt im Mittel Klasse 4. Bei Zink liegen die Werte zwischen 12 und 24 ug/l und im Mittel bei 17 ug/l, was Klasse 4 entspricht.
Wirkungsgrade	Der Mittelwert des Wirkungsgrads von GUS beträgt 97 %, derjenige von Kupfer 91 % und derjenige von Zink 91 %, was für alle drei Schadstoffe Klasse 5 ergibt.

Kriterien	Beschreibung
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss von RFB mit Oberboden liegt im Durchschnitt bei 2 l/min/m <sup>2</sup> (Klasse 2), bei Einzelwerten zwischen 0.6 und 4 l/min/m <sup>2</sup> . Diese Werte entsprechen neueren Ergebnissen mit einem Durchschnitt von 2.2 l/min/m <sup>2</sup> bei einem Bereich von 1 bis 3.5 l/min/m <sup>2</sup> [48].
Flächenbedarf	Der durchschnittliche Flächenbedarf für Bodenfilter-SABA beträgt gemäss SABA-Kataster 514 m <sup>2</sup> /ha, derjenige der Behandlung 262 m <sup>2</sup> /ha. Der Wertebereich beider Kenngrössen ist gross, da die SABA hydraulisch unterschiedlich dimensioniert und vermutlich unterschiedliches Bodenmaterial verwendet wurde.
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt wird von den Unterhaltsdiensten als einfach beurteilt (Klasse 4).
Unterhaltskosten	Die Unterhaltskosten von SABA mit einem Oberboden-Retentionsfilterbecken betragen durchschnittlich 1'800 CHF/ha/Jahr, was Klasse 2 entspricht.
Investitionskosten	Die Investitionskosten liegen durchschnittlich bei 230'000 CHF/ha, also Klasse 3. Weitere Angaben zu den Investitionskosten sind in Abb. 4.4 dargestellt.
Bauhöhe	Die Bautiefe der Retentionsfilterbecken beträgt durchschnittlich 2.5 m.

### Beurteilung

Retentionsfilterbecken mit Oberboden zeigen eine stabile Schadstoffentfernung mit tiefen Ablaufkonzentrationen. Einzelne erhöhte Werte sind auf die Auswirkung von präferenzzieltem Fluss zurückzuführen, für welchen dieser Filtertyp anfällig ist. Dies ist der Fall, wenn die Auswahl und der Einbau der Bodenschichten nicht fachgerecht erfolgen. Die Unterhaltskosten sowie der Flächenverbrauch sind hoch, was die an und für sich hohe Schadstoffentfernung relativiert.

### IV.1.3 Sandfilter mit Adsorberschichten

Die Idee von Adsorberschichten in nicht bewachsenen Sandfilter-RFB ist es, im Vergleich zu Retentionsbodenfiltern bei geringerem Flächenbedarf einen gleich guten Schadstoffrückhalt zu erzielen.

Adsorberschichten haben die Aufgabe, die gelösten<sup>8</sup> Schwermetalle aus dem Strassenabwasser zu entfernen. Dazu werden die gelösten Schwermetalle an der Oberfläche eines körnigen Adsorbermaterials gebunden. Ergebnisse liegen hauptsächlich von SABA mit Eisenhydroxid-Retentionsfilterbecken vor. Zwar wurden auch RFB mit Adsorberschichten aus Zeolithen gebaut. Da diese wegen der Rücklösungen von Schwermetallen durch den Streusalzeinsatz auf der Fahrbahn im Winter nur im Sommer betrieben werden können, fand dieser Typ keine Verbreitung. Unabhängig davon weisen Adsorberschichten zusätzlich zur Adsorption immer auch eine Filtrationswirkung auf.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Sedimentfiltration, Filtration im Innern des Filters und Adsorption in den Adsorberschichten.
Stabilität der Schadstoffentfernung	Hoch
Vorbehandlung nötig	Ja
Abflussdrosselung	Ja, bedingt durch die limitierte Durchlässigkeit des RFB
Retentionsvolumen vorhanden	Ja, in RFB
Retentionsvolumen nötig	Ja
Weitere Bauwerke	Nein
Havarierückhalt	Hauptsächlich in der Vorbehandlung
Betrieb	Keine speziellen Installationen notwendig
Unterhalt	Beseitigung von Bewuchs auf dem RFB und periodisches Abschälen der Deckschicht
Entsorgung	Entsorgung von Bewuchs und der Deckschicht, langfristig Aufbereitung/Entsorgung der Adsorberschichten
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Unproblematisch

<sup>8</sup> Chemisch gelöste Schwermetalle. Deren Anteil im Strassenabwasser beträgt 10-30 %.

Kriterien	Beschreibung
Inbetriebnahme	Nach Fertigstellung möglich
Flexibilität Realisierung	Gering, allenfalls in der Anordnung der Adsorbenschichten

### Leistungsbestimmung

Die Leistungsbestimmung dieses Verfahrenstyps basiert auf der Leistungsprüfung von zwei SABA an der A1 [45] und einer SABA an der A2 [22]. Die Leistungscharakteristik ist in Abb. IV.5 dargestellt.

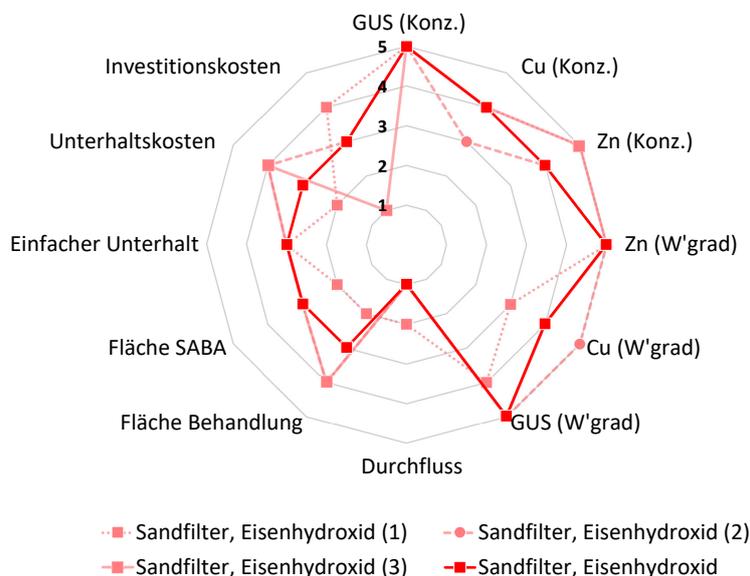


Abb. IV.5 Leistungscharakteristika von SABA mit RFB mit einer Schicht Eisenhydroxid.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Die drei SABA mit einem Eisenhydroxid-RFB erzielen folgende Durchschnittskonzentrationen im Ablauf: GUS 8 mg/l (Klasse 5), Kupfer 8 ug/l (Klasse 4), Zink 13 ug/l (Klasse 4). Die Unterschiede zwischen den SABA liegen bei Kupfer und Zink bei 2 Leistungsklassen und reichen bei Kupfer von 6 bis 13 ug/l und bei Zink von 10 bis 20 ug/l. Bei GUS gibt es keine Unterschiede.
Wirkungsgrade	Der gemittelte Wirkungsgrad für GUS beträgt 93 % (Klasse 5), derjenige für Kupfer 86 % (Klasse 4) und derjenige für Zink 96 % (Klasse 5). Die Unterschiede zwischen den einzelnen SABA liegen bei Kupfer bei 2 Leistungsklassen mit Werten zwischen 79 % und 94 % und bei GUS bei 1 Leistungsklasse (88 % bis 96 %).
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss beträgt im Durchschnitt 1.1 l/min/m <sup>2</sup> , was der Klasse 1 entspricht. Die SABA (1) erzielt mit 1.5 l/min/m <sup>2</sup> Klasse 2, die anderen beiden SABA Klasse 1 und zwar mit 0.8 und 0.9 l/min/m <sup>2</sup> .
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf sowohl der Behandlung als auch der gesamten SABA entspricht durchschnittlich Klasse 3, mit Unterschieden von 1 oder 2 Klassen. Beim Flächenbedarf der SABA reichen die Werte von 145 bis 232 m <sup>2</sup> /h, bei der Fläche für die Behandlung von 62 bis 123 m <sup>2</sup> /ha.
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt wird von den Unterhaltsdiensten als mittelschwer beurteilt (Klasse 3).
Unterhaltskosten	Die Unterhaltskosten liegen zwischen 1'170 und 2'690 CHF/ha/Jahr und im Mittel bei 1'670 CHF/ha/Jahr. Die Unterschiede kommen durch das Entfernen von Bewuchs bei SABA (1) nach längerem Betrieb zustande.
Investitionskosten	Die Investitionskosten bewegen sich zwischen 199'500 (Klasse 4) und 303'700 CHF/ha (Klasse 1) und im Mittel bei 245'500 CHF/ha (Klasse 3). Die relativ hohen Kosten bei SABA (3) kommen durch schwierigere Rahmenbedingungen wie vorgelagerte Spezialbauwerke, Leitungsführung und weitere zustande. Diese Kosten sind in Abb. 4.3 aggregiert und nehmen mit zunehmendem EZG etwas ab.
Bauhöhe	Die Bauwerkshöhe der RFB liegen zwischen 2.75 und 3.3 m.

## Beurteilung

SABA mit Retentionsfiltern mit einer Schicht Eisenhydroxid erzielen tiefe und stabile Ablaufkonzentrationen und hohe Wirkungsgrade. Da der spezifische Durchfluss gering ist, weisen solche SABA einen hohen Flächenverbrauch auf. Die Unterhaltskosten sind, bedingt durch die Pflege der RFB, erhöht und die Investitionskosten sind höher als bei bewachsenen Sandfiltern. Ein Grund dafür sind die teuren Eisenhydroxidschichten.

Bei einem Flächenverhältnis von 100 m<sup>2</sup> RFB-Fläche pro Hektare Strassenfläche und einer Eisenhydroxid-Schichtdicke von 20 cm resultiert ein Volumen von 20 m<sup>3</sup> Eisenhydroxid, was bei einem geschätzten Preis von 2'000 CHF/m<sup>3</sup> Kosten von 40'000 CHF/ha Strassenfläche bewirkt und zur Erhöhung von knapp einer Leistungsklasse führt. Nachteilig wirkt sich auch die separate Entsorgung des Eisenhydroxids nach Erreichen der Standzeit aus.

### IV.1.4 Splitt-Kiesfilter

Der Splitt-Kiesfilter ist vom Typ her betrachtet ein Retentionsfilterbecken mit zweischichtigem Filteraufbau mit der Splittschicht über der Kiesschicht (Abb. IV.6). Die Schadstoffentfernung erfolgt hauptsächlich mittels Sedimentfiltration in der Deckschicht über dem Splitt.



Abb. IV.6 Schematische Darstellung eines Splitt-Kiesfilters.

Die Deckschicht entwickelt sich mit zunehmender Betriebszeit. Umgekehrt dazu nimmt der spezifische Durchfluss mit zunehmender Deckschicht ab. Bis zum Vorhandensein einer für den Schadstoffrückhalt massgebenden Deckschicht beträgt die Einfahrzeit abhängig von der Feststoffbelastung 1 bis 2 Jahre. Während dieser Einfahrzeit nimmt die Schadstoffentfernung mit zunehmender Deckschicht ebenfalls zu.

Die Deckschicht bleibt nur bei trockener und warmer Witterung zwischen Frühjahr und Herbst durchlässig, bedingt durch Rissbildung bei deren Austrocknung. Bei nasskalter Witterung, die vor allem im Spätherbst und Winter auftritt, verstärkt sich die Kolmation der Deckschicht. Das Austrocknen der Deckschicht nimmt mit zunehmender Dicke ab, weshalb sie mit der Zeit weitgehend kolmatisiert. Dann muss sie abgeschält oder aufgekratzt und entsorgt werden. Dieser Kolmationsprozess ist somit reversibel. Der abgeschälte Splitt kann gewaschen und wieder eingesetzt werden. Nach einer solchen Massnahme erhöht sich die Durchlässigkeit deutlich. Die Intervalle zum Abtragen der Deckschicht liegen bei 3 und 5 Jahren.

Der zweite Grund für die Abnahme des Durchflusses ist die irreversible, innere Kolmation des Filters. Diese findet durch die Verlagerung von Partikeln in die Tiefe des Filters statt und schreitet mit zunehmender Betriebsdauer voran [15]. Sie führt dazu, dass Massnahmen, wie das Abschälen oder Aufkratzen der Deckschicht, mit zunehmender Betriebsdauer immer schwächer wirken. Die Erfahrungen mit den beiden SABA zeigen, dass deshalb der Ersatz der Splittschicht alle 7 bis 10 Jahre notwendig ist (Betriebszyklus).

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Vorbehandlung, Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Sedimentfiltration, Filtration im Innern des Filters.
Stabilität der Schadstoffentfernung	Mittel. Dies ist der Fall, da nach Inbetriebnahme noch keine Deckschicht vorhanden ist.

Kriterien	Beschreibung
Vorbehandlung nötig	Nein
Abflussdrosslung	Ja, bedingt durch die limitierte Durchlässigkeit des RFB.
Retentionsvolumen vorhanden	Ja
Retentionsvolumen nötig	Ja
Weitere Bauwerke	Nein
Havarierückhalt	Vorhanden. Entsorgung des Filterkörpers nach Havarie/Störfall nötig.
Betrieb	Keine speziellen Installationen notwendig
Unterhalt	Beseitigung von Bewuchs, periodisches Abschälen und Aufkratzen der Sedimentauflage alle 3 bis 5 Jahre. Entfernen der Splittschicht alle 7 bis 10 Jahre.
Entsorgung	Entsorgung von Bewuchs und der Deckschicht, sowie der Splittschicht.
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Unproblematisch
Inbetriebnahme	Nach Fertigstellung möglich, jedoch mit reduziertem Schadstoffrückhalt während den ersten ein bis zwei Jahren.
Flexibilität Realisierung	Gering

### Leistungsbeurteilung

Die Beurteilung dieses Verfahrenstyps basiert auf der Leistungsprüfung des Splitt-Kiesfilters der SABA Hagnau [28], der SABA Hallmatt [46] und der SABA Baulos Ost [20]. Bei der SABA Hagnau und der SABA Hallmatt sind die Splitt-Kiesfilter Vorbehandlungen, was sich massgeblich in einer kleineren Dimensionierung niederschlägt. Der SABA-Spider ist in Abb. IV.7 dargestellt.

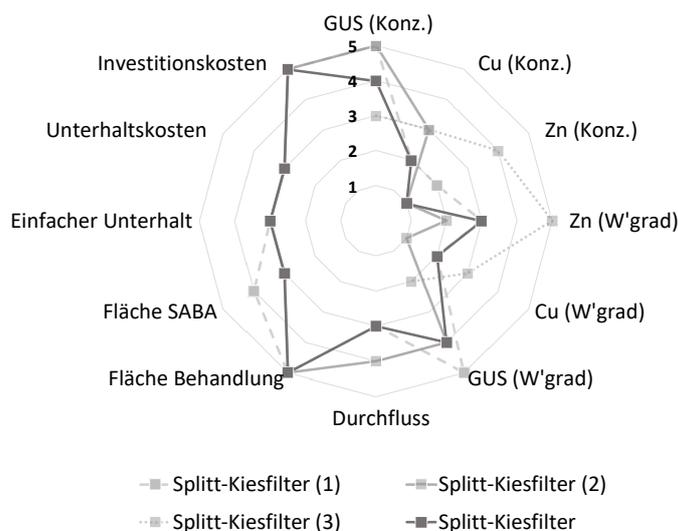


Abb. IV.7 Leistungscharakteristika von Splitt-Kiesfiltern.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Die drei Splitt-Kiesfilter erzielen im Durchschnitt eine GUS-Ablaufkonzentration von 13 mg/l (Klasse 4) bei einer Spannweite zwischen Klasse 3 und Klasse 5. Bei Kupfer sind die Ablaufkonzentrationen praktisch identisch. Mit einem Durchschnitt von 15.4 ug/l wird Klasse 2 erzielt und Klasse 3 knapp verfehlt (15 ug/l). Bei Zink sind die Unterschiede der Ablaufkonzentrationen grösser, was sich im Bereich der Leistungsklassen von 1 bis 4 manifestiert. Im Durchschnitt wird Klasse 1 erzielt (40.4 ug/l) und Klasse 2 (40 ug/l) damit knapp verfehlt.
Wirkungsgrade	Auch bei den Wirkungsgraden liegen die Werte der drei Splitt-Kiesfilter für GUS, Kupfer und Zink relativ weit auseinander, und zwar bei Zink von 64-94 %, bei Kupfer von 57-79 % und bei GUS von 67-91 %. Im Durchschnitt resultieren folgende Leistungsklassen: GUS Klasse 4, Kupfer Klasse 2 und Zink Klasse 3.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss des Splitt-Kiesfilters (1) liegt zwischen 0.5 l/min/m <sup>2</sup> und 5 l/min/m <sup>2</sup> . Diese Unterschiede sind erstens saisonal und zweitens durch die Kolmation

Kriterien	Beschreibung
	beziehungsweise das Aufkratzen der Deckschicht bedingt. Im Durchschnitt beträgt der spezifische Durchfluss von Splitt-Kiesfilter (1) 3.5 l/min/m <sup>2</sup> . Zusammen mit 5 l/min/m <sup>2</sup> von Splitt-Kiesfilter (2) ergibt dies im Mittel 4.3 l/min/m <sup>2</sup> , was Klasse 3 ergibt. Diese Werte sind jedoch nicht volumenspezifisch gemittelt.
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf der Behandlung entspricht der Klasse 5, derjenige des gesamten Splitt-Kiesfilters den Klassen 2 bis 3. Beim letzterem ist zu beachten, dass beide Splitt-Kiesfilter als Vorbehandlung dimensioniert sind, was ihren Flächenbedarf gegenüber einer Dimensionierung als Hauptbehandlung verkleinert.
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt wird von den Unterhaltsdiensten als weniger einfach beurteilt (Leistungsklasse 3). Die Gründe dafür sind das aufwändige Aufkratzen der Deckschicht sowie das Entfernen des Bewuchses.
Unterhaltskosten	Die Unterhaltskosten der beiden Splitt-Kiesfilter betragen 1'570 und 1'680 CHF/ha/Jahr, was der Leistungsklasse 2 entspricht. Beim Splitt-Kiesfilter (1) ist zu erwähnen, dass diesem ein Ölabscheider vorgeschaltet ist, der jährlich gereinigt wird und der 20 % der Schlammfracht zurückhält. Diese Kosten von Splitt-Kiesfilter (1) wären somit höher, da erstens die zu entsorgende Schlammmenge grösser ist und zweitens die Unterhaltsintervalle zum Beseitigen der Sedimentaufflage kürzer wären.
Investitionskosten	Die Investitionskosten der beiden Splitt-Kiesfilter wurden basierend auf den Gesamtkosten der beiden SABA mit Splitt-Kiesfilter als Vorbehandlung geschätzt und betragen 63'700 und 76'600 CHF/ha. Insofern sind diese Kosten nicht mit anderen SABA vergleichbar, da die Grösse als Vorbehandlung im Vergleich zur Grösse als Hauptbehandlung massgeblich kleiner ist.
Bauhöhe	Die Bauwerkshöhe der Splitt-Kiesfilter RFB liegt, je nach Einstauhöhe, bei 3 Metern.

## Beurteilung

Während für GUS tiefe Ablaufkonzentrationen erzielt werden, sind sie für Kupfer und Zink relativ hoch. Dies ist die Folge der im Vergleich zu Sand gröberen Körnung der Filterschichten, aber auch des nach der Inbetriebnahme erst allmählichen Aufbaus der Deckschicht. Die Datenlage ist mit zwei im Detail untersuchten Splitt-Kiesfiltern, die zudem als Vorbehandlung ausgelegt sind, nicht ausreichend. Dies betrifft insbesondere Angaben zum Verlauf des Durchflusses während eines Betriebszyklus, indem die angegebenen Werte nicht volumengemittelt vorliegen. Ein Vorteil dieses Verfahrens sind die geringen Investitionskosten. Nachteilig sind die eher hohen Unterhaltskosten.

## Ergebnisse ähnlicher SABA

- Horizontal durchströmte Kiesfilter wurden manchmal nach Absetzbecken als zweite Vorbehandlung eingesetzt. Die Erfahrungen zeigen, dass Absetzbecken alleine ausreichend sind.

## IV.2 Sedimentationsbasierte Verfahren – zentrale Behandlung

### IV.2.1 Absetzbecken - Betrieb im Dauerstau

In Absetzbecken erfolgt die Schadstoffentfernung durch Sedimentation. Partikel sinken während der Beschickung und zwischen zwei Regenereignissen auf den Boden des Beckens (Abb. IV.8).

Die Absetzzeit zwischen zwei Regenereignissen ist entscheidend, denn je länger diese ist, desto grösser ist die Aufenthaltszeit und desto besser können Partikel absetzen. Dies führt dazu, dass nach einer Regenspauze zuerst das bereits abgesetzte Strassenabwasser in den Ablauf gelangt. Erst wenn das Volumen des aktuellen Regenereignisses grösser ist als das Volumen des Absetzbeckens, gelangt das Strassenabwasser des aktuellen Ereignisses in den Ablauf. Deshalb ist für die Schadstoffentfernung eines Absetzbeckens das spezifische Beckenvolumen ebenso entscheidend wie die Oberflächenbelastung.

Wichtig ist, dass Stossbelastungen bei Starkregen, welche zur Ausschwemmung von abgesetzten Partikeln führen können, vermieden werden. Dazu muss im Zulaufbereich eine Vorentlastung erfolgen. Diese sollte auf eine Jährlichkeit von einem halben oder einem Jahr dimensioniert werden, was einem hydraulischen Wirkungsgrad von 97 %-99 % entspricht. Alle anschliessend beschriebenen SABA sind so gebaut und dimensioniert.

Eine Drosselung im Ablaufbereich ist auch möglich, bedingt aber eine sorgfältige Gestaltung des Zulaufbereichs, da der Wasserspiegel im Becken variabel ist. Absetzbecken im Dauerstau haben ein Rückhaltevolumen für Havariestoffe, aber kein Retentionsvolumen.

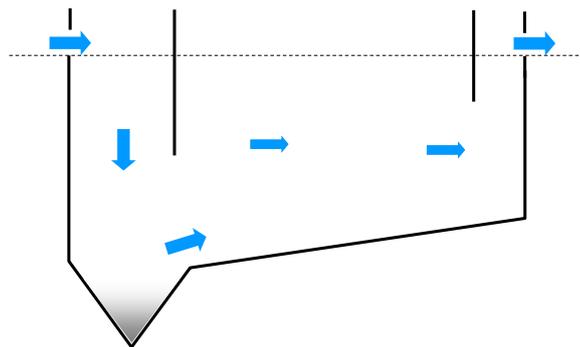


Abb. IV.8 Schematische Darstellung eines Absetzbeckens.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Vorbehandlung, Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Sedimentation
Stabilität der Schadstoffentfernung	Verfahrenstechnisch bedingt gering
Vorbehandlung nötig	Nein
Abflussdrosselung	Nur, wenn der Ablauf gedrosselt ist, was eine Retention bedingt.
Retentionsvolumen vorhanden	Im Betrieb mit Dauerstau in der Regel nicht.
Retentionsvolumen nötig	Nein
Weitere Bauwerke	Keine
Havarierückhalt	Ja
Betrieb	Im Betrieb mit Dauerstau keine weiteren Einrichtungen erforderlich
Unterhalt	Reinigung des Bauwerks
Entsorgung	Entsorgung von Schlamm
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Unproblematisch
Inbetriebnahme	Nach Fertigstellung möglich.
Flexibilität Realisierung	Falls mit Retention betrieben, ist die Trennung von Retentions- und Absetzteil möglich und sinnvoll.

## Leistungsbeurteilung

Die Leistungsbeurteilung von Absetzbecken im Betrieb mit Dauerstau basiert auf drei Leistungsprüfungen [33], [38], [39] sowie weiteren zehn Anlagen betreffend spezifischem Volumen und der Schadstoffentfernung [51]. Die Leistungscharakteristika sind in Abb. IV.9 und in Abb. IV.10 dargestellt. Daten zu Investitionskosten stammen vom SABA-Kataster.

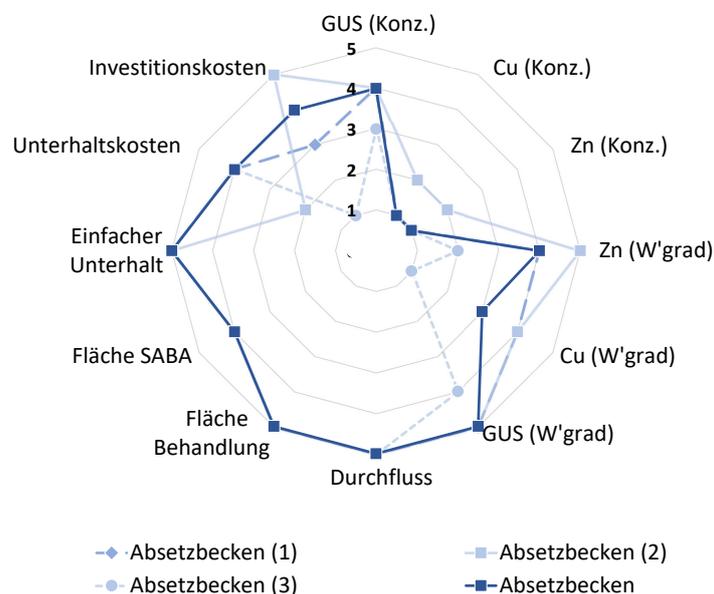


Abb. IV.9 Leistungscharakteristika von Absetzbecken betrieben im Dauerstau.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Absetzbecken im Dauerstau erzielen bei GUS mit einer durchschnittlichen Ablaufkonzentration von 18 mg/l die Klasse 4. Die Werte der einzelnen SABA reichen von 11 bis 30 mg/l. Bei Kupfer und Zink erreichen die Ablaufkonzentrationen Klasse 1. Der Schwellenwert zu Leistungsklasse 2 von 20 µg/l bei Kupfer und 40 µg/l bei Zink wird im Durchschnitt mit Konzentrationen von 48 µg/l bei Kupfer und 87 µg/l bei Zink deutlich verfehlt. Bei Absetzbecken (3) sind die hohen Kupferkonzentrationen auf kupferne Oberleitungen einer Trolleybuslinie zurückzuführen.
Wirkungsgrade	Der Mittelwert des Wirkungsgrads für GUS beträgt 93 % (Klasse 5), derjenige für Kupfer 72 % (Klasse 3) und derjenige für Zink 81 % (Klasse 4). Die erzielten Werte bei GUS liegen zwischen 85 % und 96 %, diejenigen bei Kupfer zwischen 50 % und 86 % und diejenigen bei Zink zwischen 69 % und 90 %.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss liegt im Durchschnitt und auch bei den einzelnen Anlagen bei Klasse 5 (> 6 l/min/m <sup>2</sup> ) und überschreitet diese deutlich (67 bis 171 l/min/m <sup>2</sup> ). Weitere hydraulische Kennwerte sind in Tab. IV.1 zusammengestellt.
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf von SABA mit Absetzbecken liegt mit durchschnittlich 99 m <sup>2</sup> /ha bei Klasse 4, bei einer Bandbreite von 92 bis 110 m <sup>2</sup> /ha. Beim Absetzbecken (3) könnte sogar die Leistungsklasse 5 erzielt werden, da es unterirdisch gebaut ist und ein Teil der Fläche für Parkplätze genutzt wird. Bezüglich des Flächenbedarfs der Behandlung wird durchgehend Klasse 5 erzielt (30 – 33 m <sup>2</sup> /ha).
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt wird von den Unterhaltsdiensten als einfach beurteilt (Klasse 5).
Unterhaltskosten	Die Unterhaltskosten liegen zwischen 743 bis 2'489 CHF/ha/Jahr. Die hohen Kosten bei SABA (2) sind die Folge des kleinen EZG (0.5 ha) sowie von zusätzlichen Schächten, weshalb diese SABA nicht für die Berechnung des Durchschnitts (860 CHF/ha/Jahr, Klasse 4) verwendet wurde.
Investitionskosten	Die Investitionskosten der drei Absetzbecken liegen zwischen rund 125'400 und rund 2'028'300 CHF pro ha EZG. Für den Mittelwert wurden die Kosten des Absetzbeckens (3) nicht verwendet, da sich das Absetzbecken im Stadtzentrum befindet und unterirdisch in grosser Tiefe und befahrbar gebaut wurde. Die Kosten der beiden anderen Absetzbecken liegen im typischen Bereich von Absetzbecken (Abb. 4.3).
Bauhöhe	Die Bauwerkshöhe der betrachteten Absetzbecken liegt zwischen 3.6 m und 8.2 m.

## Beurteilung

Die Vorteile des geringen Flächenbedarfs und der tiefen Investitions- und Unterhaltskosten gehen zu Lasten des Schadstoffrückhalts. Zwar können bei GUS noch Ablaufkonzentrationen der Klasse 4 oder 3 erzielt werden, bei Kupfer und Zink zeigen sich jedoch die verfahrenstechnisch bedingten Limitierungen der Sedimentation. Infolge der hohen feinpartikulären und gelösten Anteile von Kupfer und Zink ist deren Entfernung mit Sedimentation nur begrenzt möglich.

Bei allen drei SABA basiert die Gestaltung auf aktuellen Grundlagen. Im Zulaufbauwerk ist eine Vorentlastung mit einer Jährlichkeit von 1 Jahr angeordnet, die Durchflussverteilung im Zu- und Ablauf des Beckens über den Beckenquerschnitt ist optimal gestaltet, ebenso stimmen die Beckengeometrie und die Beckentiefen. Wie bei anderen SABA-Typen zeigt sich, dass die spezifischen Unterhaltskosten bei SABA mit zunehmendem EZG abnehmen. Die Bauwerkshöhe, und damit auch die Investitionskosten sind bei Absetzbecken stark von örtlichen Gegebenheiten abhängig.

## Dimensionierungsgrundlagen

Zur Herleitung von Dimensionierungsgrundlagen für das spezifische Volumen und die Oberflächenbelastung werden zusätzlich zu den drei SABA die Angaben weiterer Absetzbecken genutzt. Von Absetzbecken mit kompletten Datensätzen zur Hydraulik sind die Kennzahlen in Tab. IV.1 aufgelistet. Die Wirkungsgrade dieser fünf Absetzbecken sind zusammen mit Ergebnissen weiterer Messungen als Funktion des spezifischen Volumens in Abb. IV.10 zusammengestellt und mit Pfeilen vermerkt.

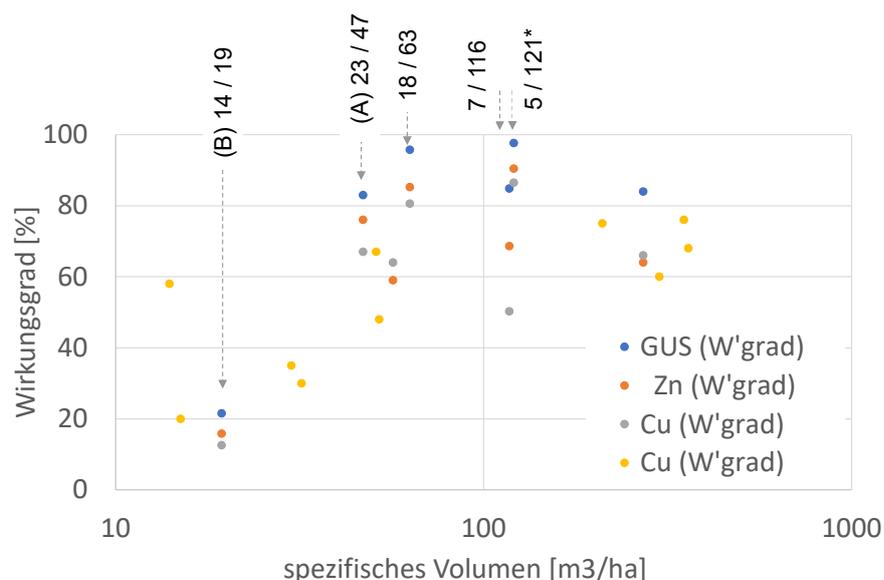


Abb. IV.10 Wirkungsgrade von Absetzbecken als Funktion des spezifischen Volumens.

## Hauptbehandlung

Der Rückhalt von GUS, Kupfer und Zink nimmt ab einem spezifischen Volumen von 50 bis 65 m³/ha nicht mehr zu. Bei höheren spezifischen Volumina sind vereinzelt tiefere Wirkungsgrade erkennbar, was auf unterschiedliche Gestaltung der Becken zurückzuführen ist. Es zeigt sich auch, dass die Oberflächenbelastung eine weniger wichtige Rolle spielt. Zur Dimensionierung von Absetzbecken als Hauptbehandlung werden somit folgende Werte empfohlen. Diese setzen eine zweckmässige Gestaltung des Beckens voraus.

- Oberflächenbelastung bei  $Q_{max}$  ( $Z=1$ ) 10 - 20 m/h
- Spezifisches Volumen (Dauerstau) 50 - 70 m³/ha

Tab. IV.1 Hydraulische Kennwerte von Absetzbecken. EZG 0.5 bis 6.7 ha

	Oberflächenbelastung <sup>9</sup> [m/h]	Spezifisches Wasservolumen [m <sup>3</sup> /ha]
Absetzbecken (1)	5	32/121 (ohne/mit Rückstau)
Absetzbecken (2)	18	63
Absetzbecken (3)	6.5	116
Absetzbecken (A) [42]	23	47
Absetzbecken (B) [21]	14	19

### Vorbehandlung

Wie bereits in Kapitel IV.1.1 beim bewachsenen Sandfilter besprochen, ist als Vorbehandlung nur noch ein kleines Absetzbecken vorzusehen. In der Schweiz gibt es erst wenig Betriebserfahrungen und Funktions- oder Leistungsprüfungen von SABA mit bewachsenen Sandfiltern ohne oder nur kleinen Absetzbecken (bis 10 m<sup>3</sup>/ha). Solche SABA zeigen mit einer bisherigen Betriebsdauer von bis zu 8 Jahren keine nachteiligen Auswirkungen auf den Betrieb des bewachsenen Sandfilters, auch wenn der Rückhalt von Havariegut teilweise im RFB erfolgt.

Aus Abb. IV.10 kann geschlossen werden, dass bei spezifischen Volumina zwischen 10 m<sup>3</sup>/ha und 30 m<sup>3</sup>/ha ein GUS-, Kupfer- und Zinkrückhalt zwischen 15 % und 40 % erreicht werden kann. Damit werden auch Grobsand- und Kiesfraktion zurückgehalten. Aufgrund der praktischen Erfahrung und diesen Kennzahlen ist es heute zweckmässig, die Vorbehandlung für einen bewachsenen Sandfilter wie folgt zu dimensionieren. Der massgebliche Durchfluss für die Oberflächenbelastung ist deutlich geringer als ein einjähriger Regen.

- Oberflächenbelastung bei maximalem Durchfluss 10 - 20 m/h
- Spezifisches Volumen (Wasser) 10 - 30 m<sup>3</sup>/ha

Mit diesen Angaben ist es möglich, das vom ASTRA auf Nationalstrassen geforderte Störfallvolumen von 30 m<sup>3</sup> zu gewährleisten [64].

### Gestaltung

Die genannten Kennzahlen gelten nur, wenn weitere Kennzahlen und Gestaltungsmerkmale erfüllt sind: Geschwindigkeit unter den Tauchwänden, die Tiefe des Absetzbereichs und des Beckens, ungestörter Schlammstapelbereich, die Strömungsverteilung im Zu- und Ablauf eines Absetzbeckens und weitere [19], [23]. Diese Faktoren sind für die Kosten wenig relevant.

### Ergebnisse ähnlicher SABA

Bei Absetzteichen erfolgt die Entfernung der Schadstoffe ebenfalls durch Sedimentation. Absetzteiche werden mit und ohne Drosselung gebaut, entsprechend mit und ohne Retention. Absetzteiche sind flächig und daher weniger tief sind als Absetzbecken und werden in der Regel naturnaher gestaltet als Absetzbecken aus Beton. Eine gleichmässige Strömungsverteilung im Zu- und Ablauf ist oft schwieriger zu erreichen, was in einigen Fällen durch eine grössere Oberfläche wettgemacht wird. Der Unterhalt ist infolge der grösseren Fläche eher aufwändiger als bei Absetzbecken aus Beton. Bei Einhalten der hydraulischen Parameter wird eine mit Absetzbecken betriebenen im Dauerstau vergleichbare Schadstoffentfernung erzielt [44].

<sup>9</sup> Die Oberflächenbelastung gilt für den Durchfluss bei Z=1 (Hauptbehandlung), worauf die betrachteten Anlagen dimensioniert sind. Bei der Vorbehandlung ist es der maximale Dimensionierungsdurchfluss.

## IV.2.2 Absetzbecken, bewirtschaftet

Bewirtschaftete Absetzbecken unterscheiden sich von Absetzbecken betrieben im Dauerstau dadurch, dass sie nach einem Regenereignis und nach Ablauf einer festgelegten Absetzzeit teilweise entleert werden. Dazu wird das abgesetzte Strassenabwasser bis zu einer vorgegebenen Höhe über dem Schlammspiegel abgepumpt. Somit steht für das nächste Regenereignis ein Retentionsvolumen zur Verfügung.

Die Funktionsweise der Schadstoffentfernung ist vergleichbar mit einem Absetzbecken betrieben im Dauerstau. Ist das Volumen des aktuellen Regenereignisses kleiner als das Retentionsvolumen, beruht die Wirkung auf der festgelegten Absetzzeit nach dem Regenereignis. Erst wenn das Volumen des aktuellen Regenereignisses grösser ist als das Retentionsvolumen plus das Volumen des Absetzbereichs, werden die Oberflächenbelastung und die Gestaltung des Absetzbeckens für den Absetzvorgang entscheidend.

Bei bewirtschafteten Absetzbecken ist die hydraulische Gestaltung schwieriger umzusetzen als bei Absetzbecken betrieben im Dauerstau. Dies betrifft vor allem die Wasserverteilung im Zulauf und die Strömungsverteilung bei Teilfüllung und zwar deshalb, weil die Wasserhöhe über der Schlammschicht begrenzt ist. Abstürze dürfen keine erfolgen, ebenso keine Einleitungen in zu grosser Beckentiefe. Beides führt zu einer Resuspension von abgesetztem Schlamm und bewirkt eine deutliche Leistungseinbusse.

Der Vorteil der Retention wird damit durch eine anspruchsvollere Gestaltung und einen geringeren Schadstoffrückhalt relativiert: Denn unabhängig von der Gestaltung ist die mittlere Absetzzeit in einem bewirtschafteten Absetzbecken geringer als in einem Absetzbecken mit Dauerstau. Dies ist der Fall, da die Absetzzeit infolge der Teilentleerung, sei es durch eine gesteuerte Pumpe oder durch eine Drosselung, kürzer ist.

Bei einem Absetzbecken zur Hauptbehandlung kann ein gedrosselter Ablauf mit einer Kombination aus Retentionsbecken und Absetzbecken, betrieben im Dauerstau, realisiert werden. Damit können beide Becken optimal gemäss den Anforderungen gestaltet und dimensioniert werden [38]. Von bewirtschafteten Absetzbecken liegen nur wenige Leistungskennzahlen vor, welche im Hauptteil dieses Dokuments integriert sind [43],[54].

## IV.2.3 Lamellenabscheider

Wie bei Absetzbecken ist auch bei Lamellenabscheidern die Sedimentation der massgebende Prozess der Schadstoffentfernung. Zur Erhöhung der Sedimentation sind zusätzlich Lamellen eingebaut. Die Lamellenelemente sind schräg zur Fliessrichtung angeordnet und werden im Aufstrom beschickt. Dabei sollen sich Partikel auf der Lamellenoberfläche ablagern und schliesslich auf den Boden des Beckens absinken (Abb. IV.11).

Es existieren unterschiedliche Lamellentypen und Systeme, welche im Dauerstau oder bewirtschaftet betrieben werden. Bei einigen Systemen erfolgt die Reinigung des Beckenbodens nach dem Leerpumpen des Beckens mit einer Spülvorrichtung.

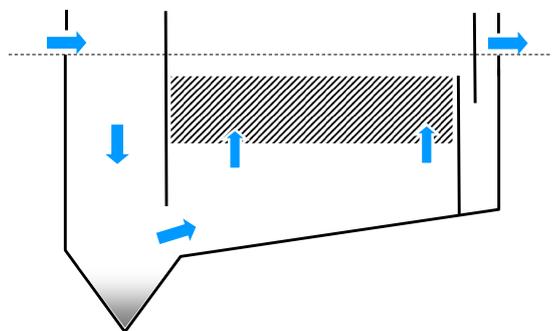


Abb. IV.11 Schematische Darstellung eines Lamellenabscheiders

Lamellenabscheider haben ihren Ursprung in der kommunalen Abwasserbehandlung. Dort sind die Durchflussschwankungen im Vergleich zur Strassenabwasserbehandlung, die

eine starke Dynamik aufweisen, deutlich geringer, denn kommunales Abwasser fällt im Vergleich zu Strassenabwasser stetiger an und Kläranlagen haben eine limitierte hydraulische Kapazität. Dies kann dazu führen, dass abgesetzte Partikel von der Lamellenoberfläche abgewaschen werden und in den Ablauf gelangen, was die Schadstoffentfernung reduziert.

Da sich der Strassenschlamm auf den Lamellen ablagert und je nach Konstruktion die Lamellenkanäle verstopft, müssen Lamellen periodisch gereinigt werden, was je nach Lamellentyp aufwändig ist. Schwierig ist zudem die Reinigung des Beckenbodens unter den Lamellen, da die Zugänglichkeit und die Arbeitshöhe mühsam sind. Zwar gibt es automatische Reinigungsvorrichtungen, diese sind jedoch kostenintensiv.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Vorbehandlung, Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Sedimentation
Stabilität der Schadstoffentfernung	Verfahrenstechnisch bedingt gering
Vorbehandlung nötig	Nein
Abflussdrosslung	Nur, wenn der Ablauf gedrosselt ist, was eine Retention bedingt.
Retentionsvolumen vorhanden	Im Betrieb mit Dauerstau nein, ausser eine Retention ist vorgelagert.
Retentionsvolumen nötig	Nein
Weitere Bauwerke	Keine
Havarierückhalt	Ja
Betrieb	Keine zusätzlichen Einrichtungen nötig
Unterhalt	Reinigung der Lamellen, bzw. Test und Prüfung von automatischen Reinigungsmechanismen (falls vorhanden). Reinigung der Bauwerke auch unterhalb der Lamellen.
Entsorgung	Entsorgung von Schlamm
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Unproblematisch
Inbetriebnahme	Nach Fertigstellung möglich.
Flexibilität Realisierung	Gering. Trennung von Retentions- und Absetzbecken möglich, bzw. bewirtschaftete Becken.

### Leistungsbeurteilung

Die Leistungsbeurteilung beruht auf drei SABA, die jeweils während eines Jahres geprüft worden sind [38], [33]. Die Leistungsklassen sind in Abb. IV.12 dargestellt. Ähnliche Ergebnisse werden bei einem Lamellenabscheider, der als Vorbehandlung eingesetzt wird, erzielt [22].

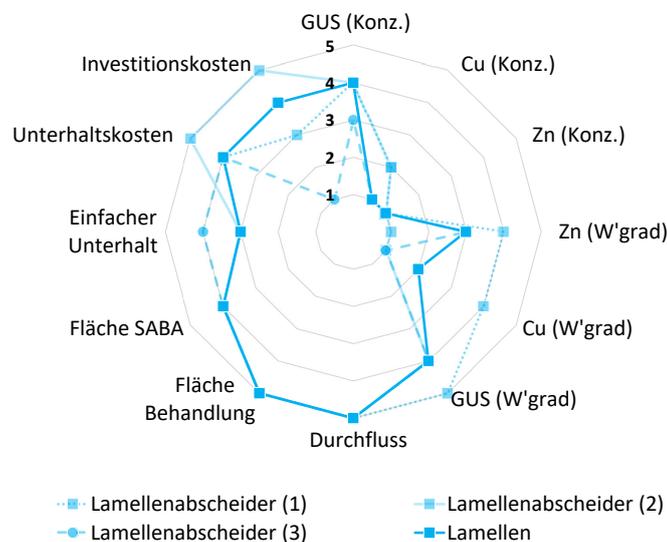


Abb. IV.12 Leistungscharakteristika von Lamellenabscheidern.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Absetzbecken mit Lamellen im Dauerstau erzielen bei GUS mit einer durchschnittlichen Ablaufkonzentration von 19 mg/l Klasse 4, bei Einzelwerten zwischen Klasse 3 und Klasse 4 (12 bis 28 mg/l). Bei Kupfer erzielen zwei SABA die Klasse 2, die andere Klasse 1 mit 87 ug/l. Dies ergibt im Mittel Klasse 1. Auffallend ist der hohe Wert von Lamellenabscheider (3), der wie beim Absetzbecken (3) auf kupferne Oberleitungen einer Trolleybuslinie zurückgeführt wird. Bei Zink wird durchgehend Klasse 1 erzielt mit Werten zwischen 62 ug/l und 113 ug/l. Im Mittel liegt die Zinkkonzentration im Ablauf mit 86 ug/l deutlich über dem Schwellenwert von Klasse 1.
Wirkungsgrade	Der Mittelwert des Wirkungsgrads für GUS beträgt 89 % (Klasse 4), derjenige für Kupfer 63 % (Klasse 2) und derjenige für Zink 73 % (Klasse 3). Die Wirkungsgrade bei GUS liegen zwischen 83 % und 96 %, Bei Kupfer zwischen 47 % und 83 % und bei Zink zwischen 59% und 87 %.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss liegt im Durchschnitt mit 120 l/min/m <sup>2</sup> und auch bei den einzelnen Anlagen bei Klasse 5 (> 6 l/min/m <sup>2</sup> ).
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf von Absetzbecken liegt mit durchschnittlich 96 m <sup>2</sup> /ha bei Klasse 4 mit Werten der einzelnen SABA von 85 bis 110 m <sup>2</sup> /ha. Je nach Betrachtung erzielt Absetzbecken (3) beim Flächenbedarf der SABA Leistungsklasse 5, da es unterirdisch gebaut ist und ein Teil der Fläche für Parkplätze genutzt wird. Bezüglich des Flächenbedarfs der Behandlung wird durchgehend Klasse 5 erzielt (30 bis 33 m <sup>2</sup> /ha).
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt von Absetzbecken mit Lamellen wird von den Unterhaltsdiensten als aufwändiger und schwieriger beurteilt als von Absetzbecken ohne Lamellen. Dies ist der Fall, da die Lamellen und der Bereich des Beckens unter den Lamellen gereinigt werden müssen. Die Werte sind Klasse 3 oder Klasse 4 und im Mittel Klasse 3.
Unterhaltskosten	Die Unterhaltskosten liegen zwischen 634 und 1'071 CHF/ha/Jahr und damit zwischen Klasse 4 und Klasse 3. Im Durchschnitt ergibt dies Klasse 4 (884 CHF/ha/Jahr).
Investitionskosten	Die Investitionskosten der drei Absetzbecken liegen zwischen rund 129'200 und 2'2265'000 CHF pro ha EZG. Für den Mittelwert (182'105 CHF/ha, Klasse 4) wurden die Kosten des Absetzbeckens (3) nicht verwendet, denn dieses wurde im Stadtzentrum unterirdisch, in grosser Tiefe und befahrbar gebaut.
Bauhöhe	Die Bauwerkshöhe der betrachteten Absetzbecken mit Lamellen liegt bei über 4 m.

### Beurteilung

Ein Absetzbecken mit Lamellen braucht wenig Fläche, was wie beim Absetzbecken im Dauerstau zu Lasten der Schadstoffentfernung geht. Nachteilig ist der aufwändige Unterhalt der Lamellen und des Beckenbereichs unter den Lamellen, welcher von allen Unterhaltsdiensten gemeldet wurde. In Kapitel 5.3.2 sind Absetzbecken mit und ohne Lamellen verglichen.

## IV.3 Technische Filter – zentrale Behandlung

### IV.3.1 Polstofffilter

Der Wirkmechanismus beim Polstofffilter ist die Filtration auf Oberflächen (Siebfiltration). Diese erfolgt mit einem Gewebe, auf welchem Fasern angebracht sind. Dieses Gewebe ist auf einem hydraulisch durchlässigen Trägermaterial angebracht und wird durch die hydrostatische Druckdifferenz durchströmt (Abb. IV.13). Bei der Durchströmung legen sich die Fasern zustromseitig auf das Gewebe und bilden dadurch einen feinporigen Filter. Das behandelte Strassenabwasser gelangt via Trägerkonstruktion in den Ablauf.

Die filtrierte Partikel lagern sich im und auf dem Faserfilter ab und bilden eine Deckschicht, die zunehmend kolmatiert und deshalb periodisch entfernt werden muss. Dies erfolgt durch einen Sauger, der das Gewebe absaugt. Dadurch werden die Fasern des Polstoffs aufgerichtet, was das Entfernen der Partikel erleichtert. Das abgesaugte Schlammwasser wird anschliessend in einem Schlammbecken gespeichert, wo sich der Schlamm absetzt.

Wenn der spezifische Durchfluss pro Quadratmeter Polstofffilter bekannt ist, kann der gewünschte Durchfluss im Ablauf einer SABA anhand der Grösse der Filterfläche festgelegt werden. Der Polstofffilter selbst hat keine Retention, weshalb Retentionsbecken notwendig sind. Diese können auch zur Vorbehandlung genutzt werden.

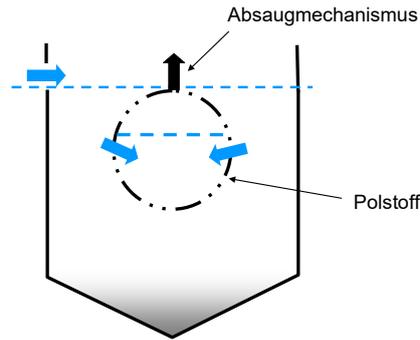


Abb. IV.13 Schematische Darstellung eines Polstofffilters.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Filtration auf Oberflächen (Siebfiltration)
Stabilität der Schadstoffentfernung	Gering
Vorbehandlung nötig	Nein, kann aber mit der Retention kombiniert werden
Abflussdrosslung	Ja, bedingt durch den Polstofffilter
Retentionsvolumen vorhanden	Nein
Retentionsvolumen nötig	Ja
Weitere Bauwerke	Retention, Rückspülvorrichtung für den Polstofffilter, Schlammstapel
Havarierückhalt	In den vorgelagerten Bauwerken möglich
Betrieb	Diverse Pumpen, Steuerung
Unterhalt	Kontrolle von Pumpen, Abreinigungsmechanismus, Schlammstapel und Retentionsvolumen
Entsorgung	Entsorgung von Schlamm aus der Retention und vom Schlammstapel
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Unproblematisch
Inbetriebnahme	Nach Fertigstellung möglich, bedingt Einfahrzeit für die Einstellung der Rückspülung und der Beschickung
Flexibilität Realisierung	Ja, durch unterschiedliche Gestaltung der Bauwerke

### Leistungsbeurteilung

Die Leistungsbeurteilung dieses Verfahrenstyps basiert auf den Ergebnissen der Untersuchungen der SABA Pfaffensteig, Wylerholz und Gäbelbach [31], [34], [36]. Die Ergebnisse sind in Abb. IV.14 dargestellt.

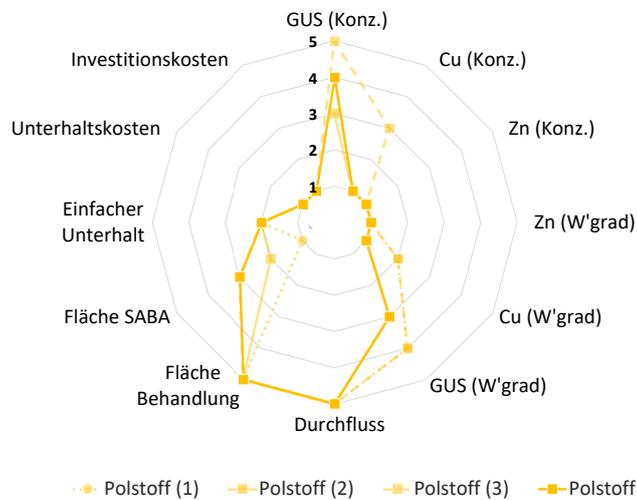


Abb. IV.14 Leistungscharakteristika von SABA mit Polstofffilter. Die Wirkungsgrade sind infolge der Vorbehandlung in der Retention relativ gering.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Die Polstofffilter erzielen im Durchschnitt der drei SABA bei den beiden Schwermetallen Ablaufkonzentrationen gemäss Klasse 1. Bei Kupfer wird der Schwellenwert für Klasse 1 um 25 % überschritten, und bei Zink um das Dreifache (120 ug/l). Bei GUS wird mit einer Ablaufkonzentration von durchschnittlich 18 mg/l die Klasse 4 erzielt. Die Bereiche der Ablaufkonzentrationen der drei SABA lauten wie folgt: GUS von 8 bis 29 mg/l, Kupfer von 12 bis 44 ug/l, Zink von 60 bis 140 ug/l.
Wirkungsgrade	Der Wirkungsgrad für GUS beträgt im Mittel 80 % (Klasse 4), derjenige für Kupfer 58 % (Klasse 1) und derjenige für Zink 55 % (Klasse 1). Die Wirkungsgrade sind jedoch infolge der Vorbehandlung und den damit verbundenen tieferen Zulaufkonzentrationen reduziert. Die Wirkungsgrade der drei SABA liegen bei GUS zwischen 76 % und 82 %, bei Kupfer zwischen 51 % und 65 % und bei Zink zwischen 53 % und 59 %.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss überschreitet mit 42 l/min/m <sup>2</sup> den Schwellenwert von Klasse 5 mit 6 l/min/m <sup>2</sup> um das Siebenfache.
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf einer SABA mit Polstofffilter als Hauptbehandlung, Speicherbecken und einem Becken für die Behandlung des Rückspülwassers liegt zwischen Klasse 3 und Klasse 1. Die tiefste Klasse 1 wird bei derjenigen SABA mit dem kleinsten Einzugsgebiet (4.5 ha) erzielt, und zwar mit einem Wert von 428 m <sup>2</sup> /ha. Das EZG der beiden anderen Anlagen ist mit 10 und 12 Hektaren grösser und die benötigte SABA Fläche mit 148 m <sup>2</sup> /ha und 191 m <sup>2</sup> /ha entsprechend geringer. Für den Durchschnitt wurden nur die Werte der SABA (2) und der SABA (3) mit grossem EZG verwendet. Bezüglich des Flächenbedarfs des Polstofffilters wird durchgehend Klasse 5 erzielt, und zwar mit Werten zwischen 5 m <sup>2</sup> und 7 m <sup>2</sup> Filterfläche pro Hektare Strassenfläche.
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt einer SABA mit Polstofffilter wird als anspruchsvoll beurteilt. Deshalb resultiert die Leistungsklasse 2.
Unterhaltskosten	Die Unterhaltskosten liegen zwischen 3'600 und 10'200 CHF/ha und pro Jahr. Wird die SABA Polstoff (1) mit dem kleinsten EZG von 4 ha nicht berücksichtigt, resultieren im Durchschnitt Unterhaltskosten von 3'935 CHF pro ha pro Jahr, was die Grenze der Klasse 1 mit 2'800 CHF/ha/Jahr um knapp 50 % übersteigt.
Investitionskosten	Die Investitionskosten liegen zwischen rund 865'000 und 364'000 CHF/ha und nehmen mit zunehmender Grösse des EZG ab. Selbst beim grössten EZG von 12.2 ha liegen die Kosten bei rund 364'000 CHF/ha, was den Schwellenwert der Klasse 1 von 300'000 CHF/ha um 20 % überschreitet. Für den Durchschnitt werden die Werte von SABA (2) und SABA (3) verwendet.
Bauhöhe	Die Höhe des Bauwerks für den Polstofffilter beträgt zwischen 3 und 4 m. Massgebend sind jedoch die Höhen für die vorgeschaltete Retention und das Schlammstapelbecken.

## Beurteilung

Polstofffilter zeigen zwar relativ geringe GUS-Ablaufkonzentrationen, stossen aber bei Kupfer und Zink verfahrenstechnisch bedingt an ihre Grenzen. Dies ist der Fall, da Kupfer und Zink zu einem grossen Teil in feinpartikulärer und gelöster Form vorliegen. Deshalb können beide Schwermetalle mit einer Filtration im Bereich von 10 Mikrometern nur begrenzt aus dem Strassenabwasser entfernt werden.

Diesen Nachteil können Polstofffilter weder mit tiefen Unterhalts- noch mit tiefen Investitionskosten oder tiefem Flächenbedarf wettmachen. Der Flächenbedarf ist infolge der zusätzlich benötigten Bauwerke mittelhoch und die Investitions- und Unterhaltskosten sind infolge des hohen Mechanisierungsgrads hoch.

Ob Polstoffe mit feinerem Gewebe und damit mit kleineren Poren eine Verbesserung bringen, ist fraglich. Dies deshalb, da selbst mit einer Halbierung des Porendurchmessers die feinpartikuläre und gelöste Fraktion der Schwermetalle nicht wesentlich besser zurückgehalten werden könnte: Selbst mit 0.45 Mikrometer filtriert verbleiben immer noch zwischen 20-30 % von Kupfer und Zink im Filtrat [17]. Polstofffilter mit feinerem Gewebe würden zudem SABA weiter verteuern, da deren spezifischer Durchfluss tiefer ist und entweder einen grösseren Filter mit mehreren Einheiten oder eine grössere Retention bedingen würde.

Vorteile haben SABA mit Polstofffilter bei ihrer hohen Modularität. So können das Retentionsvolumen, das Filterbecken und auch das Stapelbecken für den Rückspülschlamm optimal an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Die Investitions- und Unterhaltskosten und der Flächenverbrauch nehmen mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse ab. Somit sind SABA mit Polstofffiltern nur für Einzugsgebiete über etwa 10 ha sinnvoll.

### Dimensionierungsgrundlagen und Gestaltung

- Die Dimensionierungsgrundlage für den spezifischen Durchfluss liegt bei allen drei Polstofffiltern bei 42 l/min/m<sup>2</sup> Filterfläche.

### Weitere Ergebnisse

- SABA mit Polstofffilter im Kanton Luzern bestätigt die Ergebnisse [7].

## IV.3.2 Mikrosieb

Der Wirkmechanismus beim Mikrosieb ist die Filtration auf Oberflächen (Siebfiltration). Diese erfolgt mit einem Gewebe, das auf einer Trägerkonstruktion aufgebracht ist und durch die hydrostatische Druckdifferenz durchströmt wird (Abb. IV.15). Die filtrierte Partikel lagern sich auf dem Gewebe ab, bewirken den Aufbau einer Deckschicht und damit eine zunehmende Kolmation. Mit einem Spülmechanismus wird die Deckschicht periodisch entfernt. Das Schlammwasser wird anschliessend aufbereitet, was durch Sedimentation geschieht.

Wenn der Durchfluss pro Quadratmeter bekannt ist, kann der gewünschte Durchfluss im Ablauf einer SABA anhand der Grösse der Filterfläche festgelegt werden. Das Mikrosieb hat keine Retention, weshalb eine Retention notwendig ist. Diese kann zur Vorbehandlung genutzt werden.

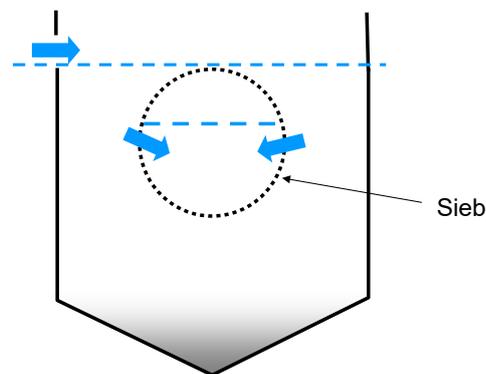


Abb. IV.15 Schematische Darstellung eines Mikrosiebs.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Filtration auf Oberflächen (Siebfiltration)
Stabilität der Schadstoffentfernung	Gering
Vorbehandlung nötig	Nein, kann aber mit der Retention kombiniert werden.
Abflussdrosslung	Ja, bedingt durch das Mikrosieb
Retentionsvolumen vorhanden	Nein
Retentionsvolumen nötig	Ja
Weitere Bauwerke	Retention, Rückspülvorrichtung, Schlammstapel
Havarierückhalt	In den vorgelagerten Bauwerken möglich
Betrieb	Diverse Pumpen, Steuerung
Unterhalt	Kontrolle Pumpen, Abreinigungsmechanismus, Schlammstapel und Retentionsvolumen
Entsorgung	Entsorgung von Schlamm aus der Retention und vom Schlammstapel
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Unproblematisch
Inbetriebnahme	Nach Fertigstellung möglich, bedingt Einfahrzeit für die Einstellung der Rückspülung und der Beschickung
Flexibilität Realisierung	Ja, durch unterschiedliche Gestaltung der Bauwerke

## Leistungsbeurteilung

Die Leistungsbeurteilung dieses Verfahrens basiert auf den Ergebnissen der Untersuchungen der SABA Seetalplatz, der SABA Frohburg sowie einer Testanlage [5], [24]. Die Ergebnisse sind in Abb. IV.16 dargestellt.

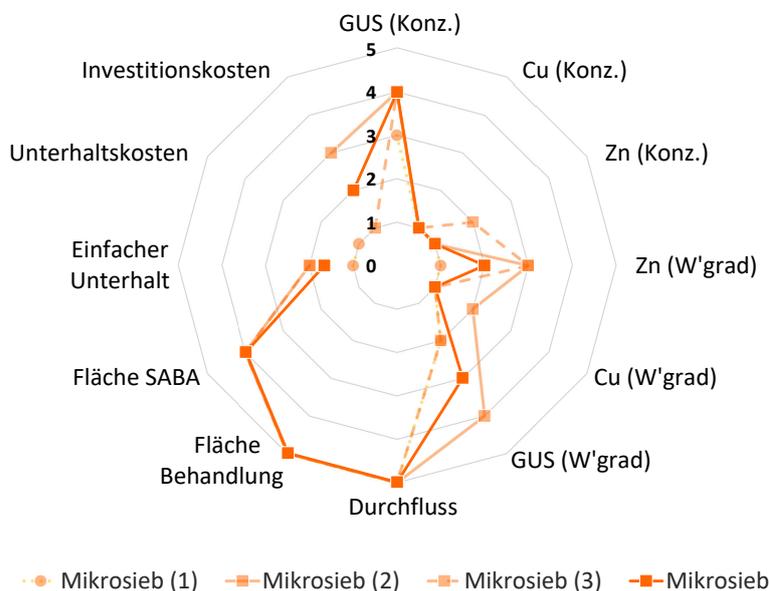


Abb. IV.16 Leistungscharakteristika von SABA mit Mikrosieb. Die Wirkungsgrade sind infolge der Vorbehandlung in der Retention relativ gering.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Das Mikrosieb erzielt im Durchschnitt der drei SABA bei den beiden Schwermetallen Ablaufkonzentrationen gemäss Klasse 1 mit 30 µg/l bei Kupfer und 80 µg/l bei Zink. Bei Kupfer wird der Schwellenwert für Klasse 1 um 50 % und bei Zink um 100 % überschritten. Bei GUS wird mit einer Ablaufkonzentration von durchschnittlich 17 mg/l die Klasse 4 erzielt.
Wirkungsgrade	Der durchschnittliche Wirkungsgrad für GUS beträgt 70 % (Klasse 3), derjenige für Kupfer 53 % (Klasse 1) und derjenige für Zink 65 %, (Klasse 2). Die Wirkungsgrade sind infolge der Vorbehandlung in der Retention und den damit verbundenen tieferen Zulaufkonzentrationen gering.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss von 10 bis 23 l/min/m <sup>2</sup> überschreitet den Schwellenwert von 6 l/min/m <sup>2</sup> für Klasse 5 doppelt bis dreifach.
Flächenbedarf	Der spezifische Flächenbedarf der Behandlung liegt zwischen 13 und 22 m <sup>2</sup> /ha und ist damit sehr gering (Klasse 5). Der spezifische Flächenbedarf der SABA liegt, ohne Berücksichtigung der Zufahrten, bei Klasse 4.
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt einer SABA mit Mikrosieb wird als anspruchsvoll beurteilt. Das Filtermaterial erwies sich in einigen Fällen als wenig robust. Bei einer Anlage konnte keine stabile Rückspülung erzielt werden. Durchschnittlich resultiert die Leistungsklasse 2.
Unterhaltskosten	Bei Mikrosieb (1) liegen die Kosten infolge des hohen Aufwands bei Klasse 1. Zu den Unterhaltskosten bei Mikrosieb (2) und (3) liegen noch keine definitiven Daten vor. Sie dürften gemäss Schätzungen der Unterhaltsdienste der Klasse 2 bis 3 entsprechen.
Investitionskosten	Die Investitionskosten liegen zwischen 210'000 und 355'000 CHF/ha, was Klasse 2 und 3 ergibt und im Durchschnitt Klasse 2 ergibt.
Bauhöhe	Die Höhe des Bauwerks für das Mikrosieb beträgt zwischen 3 und 4 m. Massgebend sind jedoch die Höhen für die benötigte Retention und das Schlammstapelbecken.

## Beurteilung

Das Mikrosieb zeigt zwar relativ geringe GUS-Ablaufkonzentrationen, stösst aber bei Kupfer und Zink verfahrenstechnisch bedingt an seine Grenzen. Dies ist der Fall, da Kupfer und Zink zu einem grossen Teil feinpartikulär und gelöst vorliegen, womit beide mit einer Filtration im Bereich von 10 Mikrometern nur begrenzt aus dem Strassenabwasser entfernt

werden können. Die von Unterhaltsdiensten gemeldeten Schwierigkeiten mit der mechanischen Stabilität des Filtermaterials und der Rückspülung und damit mit einem stabilen Betrieb führen dazu, dass dieses Verfahren nicht empfohlen wird und damit nicht in der weiteren Beurteilung berücksichtigt wird.

### IV.3.3 Schnellfilter, rückgespült

Die Idee des rückgespülten Schnellfilters besteht darin, die Filterfläche im Vergleich zu einem Retentionsfilterbecken zu reduzieren, indem der Schnellfilter hydraulisch sehr hoch und mit Überstau belastet und dafür regelmässig rückgespült wird (Abb. IV.17). Eine im Vergleich zu Retentionsfilterbecken gröbere Körnung des Filtermaterials erhöht den Durchfluss zusätzlich. Der Filter wird vertikal von oben nach unten durchströmt und umgekehrt rückgespült.

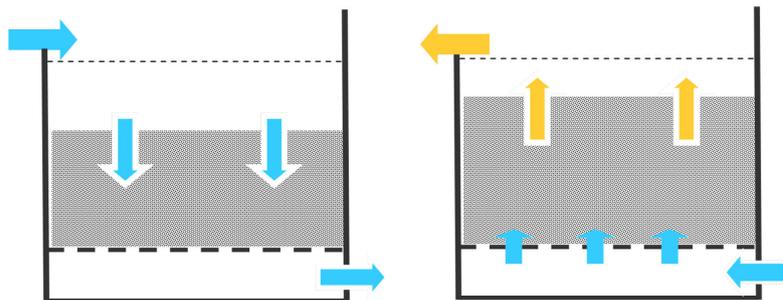


Abb. IV.17 Schematische Darstellung eines Schnellfilters im Betriebsmodus auf der linken und im Rückspülmodus auf der rechten Seite.

Die Rückspülung erfolgt mit Wasser, welches unter Druck durch den Düsenboden von unten in die Filterschicht gepumpt wird. Durch die entstehende Turbulenz im Filterbett werden die Partikel vom Filtermaterial gelöst und mit dem Rückspülwasser ausgetragen. Das partikelreiche Rückspülwasser wird anschliessend in einem Schlammstapelbecken mittels Sedimentation behandelt.

Wenn der spezifische Durchfluss pro Quadratmeter Filterfläche bekannt ist, kann der gewünschte Durchfluss im Ablauf einer Schnellfilter-SABA festgelegt werden. Der Schnellfilter selbst hat keine Retention, weshalb Stapelbecken notwendig sind. Diese können auch zur Vorbehandlung genutzt werden. Die Installationen zur Rückspülung des Schnellfilters bedingen einen hohen apparativen Aufwand und die Behandlung des Rückspülwassers erfordert ein zusätzliches Becken.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Filtration im Filter und Filtration auf Oberflächen (Siebfiltration)
Stabilität der Schadstoffentfernung	Mittel, verfahrenstechnisch bedingt
Vorbehandlung nötig	Je nach Bemessung, kann mit der Retention kombiniert werden
Abflussdrosslung	Ja, bedingt durch die Filtration
Retentionsvolumen vorhanden	Nein
Retentionsvolumen nötig	Ja
Weitere Bauwerke	Schlammstapel, Retention, Vorbehandlung
Havarierückhalt	In den vorgelagerten Bauwerken möglich
Betrieb	Diverse Pumpen, Steuerung, Apparaturen zur Rückspülung des Filters
Unterhalt	Kontrolle von Pumpen, Rückspülvorrichtung, Schlammstapel und Retentionsbecken
Entsorgung	Entsorgung von Schlamm aus Retention, Schlammstapel und Vorbehandlung
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Unproblematisch

Kriterien	Beschreibung
Inbetriebnahme	Nach Fertigstellung möglich, bedingt Einfahrzeit für die Einstellung der Rückspülung und der Beschickung.
Flexibilität der Realisierung	Ja, durch unterschiedliche Gestaltung der einzelnen Bauwerke.

### Leistungsbestimmung

Die Leistungsbeurteilung dieses Verfahrenstyps basiert auf der SABA Halenbrücke [29]. Die Ergebnisse sind in Abb. IV.18 dargestellt.

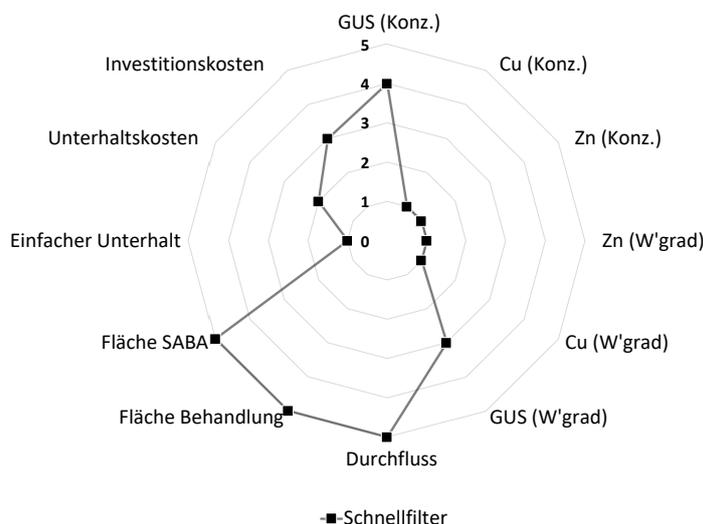


Abb. IV.18 Leistungscharakteristika des rückgespülten Schnellfilters. Die Wirkungsgrade sind bedingt durch die Vorbehandlung relativ gering.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Die Ablaufkonzentration von GUS beträgt 19 mg/l, was Klasse 4 entspricht. Diejenige von Kupfer liegt bei 28 ug/l (Klasse 1) und diejenige für Zink liegt bei 115 ug/l, was ebenfalls Klasse 1 entspricht. Mit einer Konzentration von 115 ug/l wird der Grenzwert der Klasse 1 (40 ug/l) beinahe um Faktor 3 überschritten. Der Klasse 1 Grenzwert für Kupfer von 20 ug/l wird mit 28 ug/l um 40 % überschritten.
Wirkungsgrade	Die Wirkungsgrade lauten wie folgt: GUS 75 %, Kupfer 58 % und Zink 54 %. Dies ergibt die Leistungsklasse 3 für GUS und je Klasse 1 für Kupfer und Zink. Die Wirkungsgrade sind infolge der Vorbehandlung und den damit verbundenen tieferen Zulaufkonzentrationen etwas herabgesetzt.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss ist mit 246 l/min/m <sup>2</sup> sehr hoch und übersteigt den Wert eines bewachsenen Sandfilters 100-fach, was die sehr hohe hydraulische Belastung verdeutlicht.
Flächenbedarf	Der spezifische Flächenbedarf der SABA erzielt mit 34 m <sup>2</sup> /ha die höchste Leistungsklasse. Allerdings sind dabei die Flächen für das Stapelbecken mit einer Retention von 1'800 m <sup>3</sup> sowie die beiden Pumpwerke nicht eingerechnet. Die benötigte Filterfläche des Schnellfilters mit einem Wert von 0.7 m <sup>2</sup> Filter pro Hektare Strassenfläche erzielt ebenfalls die höchste Leistungsklasse.
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt einer SABA mit rückgespültem Schnellfilter wird als sehr anspruchsvoll beurteilt. Deshalb resultiert die Leistungsklasse 1.
Unterhaltskosten	Die Unterhaltskosten liegen mit 2'300 CHF/ha/Jahr, was Klasse 2 ergibt.
Investitionskosten	Die Investitionskosten liegen zwischen rund 239'000 CHF pro ha EZG, was der Leistungsklasse 3 entspricht. Dabei gilt zu beachten, dass die Kosten des Stapelkanals entfallen, da dieser bereits gebaut war. Müsste ein solcher neu erstellt werden, würde dies die Herabstufung um eine oder zwei Leistungsklassen bedeuten.
Bauhöhe	Die Bauwerkshöhe dieses SABA-Typs ist in der Regel von der Dimension des Retentionsvolumens abhängig. Die Höhe der betrachteten SABA beträgt 10.5 m.

### Beurteilung

Der rückgespülte Schnellfilter stösst, wie auch der Polstofffilter und das Mikrosieb beim Rückhalt von Kupfer und Zink verfahrenstechnisch bedingt an seine Grenzen. Diese hohen

Ablaufkonzentrationen bei Kupfer und Zink zeigen die Auswirkung des hohen feinpartikulären und gelösten Anteils, der verfahrenstechnisch bedingt nur teilweise von einem Schnellfilter zurückgehalten werden kann.

Dieser Nachteil wird weder mit tiefen Unterhaltskosten noch mit geringen Investitionskosten wettgemacht. Nachteilig ist auch der anspruchsvolle Unterhalt. Dafür ist der Flächenbedarf gering, allerdings nur verbunden mit der Tatsache, dass zwei Pumpwerke und der grosse Stapelkanal ausserhalb der SABA-Fläche liegen und deshalb nicht berücksichtigt wurden. Bisher liegen keine Ergebnisse anderer typengleicher SABA vor.

#### IV.3.4 Weitere SABA-Typen mit technischen Filtern

Es gibt weitere SABA-Typen mit technischen Filtern, für welche teilweise Leistungskennzahlen vorliegen. Folgende beiden Typen, beide mit Elementen zur Filtration und Adsorption, werden hier erwähnt, um zu verdeutlichen, dass eine hohe Filterbelastung zu reduziertem Schadstoffrückhalt und zu hohen Unterhaltskosten und/oder Investitionskosten für automatische Abreinigungsanlagen führt.

##### Poröse Filter / Adsorber

Dieses Verfahren besteht aus einer Vorbehandlung mit Sedimentation und einer Hauptbehandlung mit einem zylindrischen Filter/Adsorber [50]. Die Flächenbelastung des Filters/Adsorbers ist sehr hoch, indem 1 m<sup>2</sup> Filter pro ha Strassenfläche zur Verfügung steht. Zum Vergleich: Ein bewachsener Sandfilter benötigt 100 m<sup>2</sup> Fläche pro Hektare Strassenfläche. Angesichts dieser hohen Belastung ist die schnelle Kolmation mit dem damit verbundenen hohen Unterhaltsaufwand plausibel.

Wegen der zu Beginn schnellen Durchströmung können auch keine tiefen Ablaufkonzentrationen für Kupfer und Zink erzielt werden. Mit zunehmender Kolmation des Filters/Adsorbers nehmen die Ablaufkonzentrationen zwar ab und der Wirkungsgrad der Behandlungseinheit nimmt zu. Parallel dazu nimmt aber der hydraulische Wirkungsgrad ab, was den Gesamtwirkungsgrad entscheidend reduziert. Die erzielten Leistungskennzahlen sind im Hauptteil beschrieben.

##### Lamellenabscheider plus Filter / Adsorber

Dieses Verfahren besteht aus einem Absetzbecken mit Lamellen sowie einem von unten nach oben durchströmten Filter/Adsorber [40]. Die hydraulische Belastung dieses Systems ist mit 3.3 m<sup>2</sup>/ha Strassenfläche 30-fach höher als bei einem bewachsenen Sandfilter. Ebenso hoch ist der maximal gemessene spezifische Durchfluss von 425 l/min/m<sup>2</sup>. Diese Belastung führt zu einem vergleichsweise geringen Rückhalt der Schadstoffe. Die erzielten Leistungskennzahlen sind im Hauptteil beschrieben.

### IV.4 Dezentrale Verfahren

#### IV.4.1 Versickerung über das Bankett, Mulden-Rigolen

Das Ableiten des Strassenabwassers quer zur Fahrbahn über das Bankett und die anschliessende Versickerung in der bewachsenen Strassenschulter ist ein dezentrales Verfahren. Es entspricht von der Behandlung her betrachtet einem bewachsenen Bodenfilter, jedoch mit viel geringerer hydraulischer und stofflicher Belastung.

Das Ableiten über das Bankett kann mit der Versickerung in einem angrenzenden Versickerungsgraben kombiniert werden. Dieser kann bei schlecht durchlässigen, anstehenden Böden als Mulden-Rigole ausgebildet werden. Dabei wird nach der Bodenpassage das gereinigte und gedrosselt abfliessende Strassenabwasser in der Sammelleitung (Rigole) zum nächsten Gewässer abgeleitet.

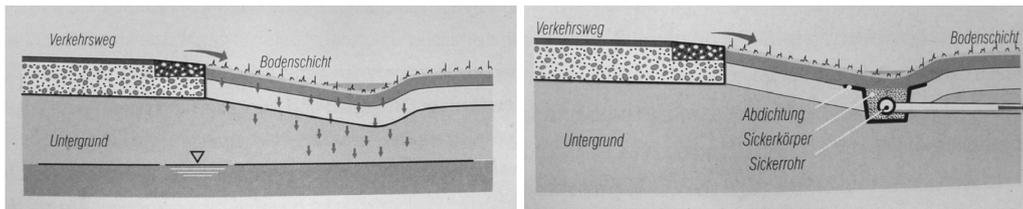


Abb. IV.19 Schematische Darstellung der Entwässerung über Bankett sowie eines Mulden-Rigolen-Systems [2].

Bei der Versickerung in der Strassenschulter werden keine zusätzlichen Bodenflächen mit Schadstoffen der Strasse belastet, sondern nur die ohnehin schon mit Schadstoffen aus der Luftverfrachtung (von der Strasse) angereicherten Böden in den Strassenschultern.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Sedimentfiltration, Filtration im Innern der Filterschichten, biologischer Abbau
Stabilität der Schadstoffentfernung	Hoch
Vorbehandlung nötig	Nein
Abflussdrosslung	Ja, bei Mulden-Rigolen
Retentionsvolumen vorhanden	Keines bei der Versickerung in der Strassenschulter, bei der Mulde ja
Retentionsvolumen nötig	Ja, bei Mulden oder Mulden-Rigolen
Weitere Bauwerke	Keine
Havarierückhalt	In den Bodenschichten
Betrieb	Grünpflege
Unterhalt	Grünpflege
Entsorgung	Entsorgung von Grüngut
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Unproblematisch
Inbetriebnahme	Inbetriebnahme erst nach Anwachsen der Vegetation
Flexibilität Realisierung	Unterschiedliche Gestaltung von Mulden möglich

### Leistungsbestimmung

Die Leistungsbeurteilung dieses Verfahrenstyps basiert auf den Daten der Untersuchungen in Burgdorf sowie in Augsburg [10], [4]. Die Leistungscharakteristik ist in Abb. IV.20 dargestellt.

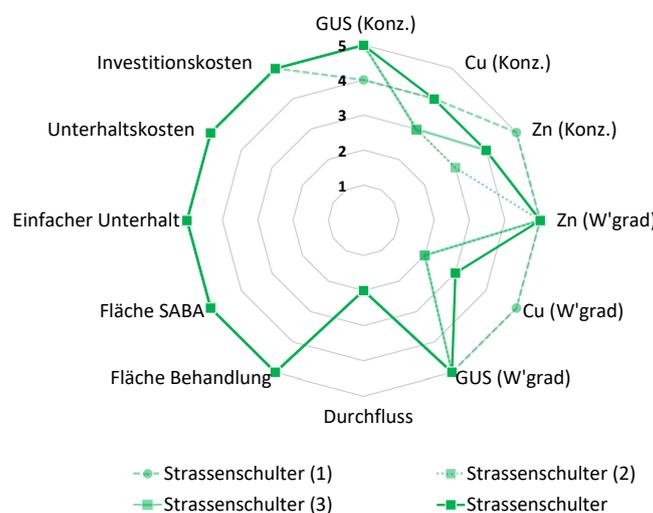


Abb. IV.20 Leistungscharakteristika von Strassenschultern.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Die durchschnittliche Ablaufkonzentration von GUS erzielt Klasse 5, diejenige von Kupfer und Zink Klasse 4. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Strassenschultern sind gering: Eine Leistungsklasse bei GUS und zwei Leistungsklassen bei Kupfer und Zink.
Wirkungsgrade	Der durchschnittliche Wirkungsgrad von GUS und Zink liegt bei Klasse 5. Bei Kupfer resultiert Klasse 3, was auf tiefe Zulaufkonzentrationen zurückzuführen ist.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss liegt im Bereich von Bodenfiltern mit Werten zwischen 1 und 2 l/min/m <sup>2</sup> (Klasse 2).
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf erzielt bei beiden Kriterien die Klasse 5, falls die Fläche für die Strassenschulter vorhanden ist und genutzt werden kann. Bei Mulden oder Mulden-Rigolen ist der Flächenbedarf höher.
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt ist einfach zu bewerkstelligen (Klasse 5)
Unterhaltskosten	Sie entsprechen der Klasse 5, wenn davon ausgegangen wird, dass die Strassenschultern auch ohne Versickerung unterhalten werden.
Investitionskosten	Sie entsprechen Klasse 5, wenn davon ausgegangen wird, dass eine vorhandene Fläche für die Strassenschulter genutzt werden kann.
Bauhöhe	Die Höhe ist geringer als 1 m und damit die niedrigste aller betrachteter Verfahren.

### Beurteilung

Die Versickerung in der Strassenschulter oder in angrenzenden Mulden mit oder ohne Rigolen ist ein wirksames Verfahren zur Schadstoffentfernung und zudem einfach zu unterhalten. Geringe Investitionskosten weist es jedoch nur auf, wenn die Strassenschultern Teil des Strassenperimeters sind. Muss die Fläche für Strassenschultern oder Mulden zusätzlich erworben werden, steigen die Investitionskosten massiv an.

Strassenschultern an stark befahrenen Strassen sind bis zu einem Abstand von einigen Metern unabhängig von der Entwässerungsart durch Spritzwasserverfrachtung und Ablagerung von Partikeln stark mit Schadstoffen belastet. Die Verwendung von Strassenschultern zur Entwässerung erhöht deshalb die Fläche des belasteten Bodens nicht und ist deshalb zu bevorzugen.

Theoretisch sind in der Schweiz rund 30 % der Nationalstrassen zur Entwässerung über die Strassenschulter geeignet [32]. Die Realisierung wird jedoch durch Faktoren wie Topographie, Versickerungseignung, Grundwasserhöhe und weiteren beeinflusst. Bei Kantonsstrassen kann die Anwendbarkeit durch Geh- oder Radwege neben einer Kantonsstrasse oder durch die fehlenden Strassenschultern in Siedlungszonen begrenzt sein.

### Dimensionierungsgrundlagen und Gestaltung

Der Aufbau der Strassenschulter kann wie bis anhin mit Oberboden und/oder Unterboden erfolgen. Dabei sind sandige Oberboden auch mit tiefem Tongehalt vorteilhaft [3]. Dies ist plausibel, da neben der Filtration und Adsorption im Innern des Bodens die Sedimentfiltration wirksam ist.

So betrachtet funktioniert das System ähnlich wie ein bewachsener Sandfilter, indem die Schadstoffentfernung massgeblich in der sich bildenden Sedimentauflage erfolgt [14], [16], [18]. Bei der Zusammensetzung und Gestaltung der Bodenschichten ist unbedingt die mechanische Stabilität der Böschung zu beachten.

## IV.4.2 Poröser Asphalt

Unter dem Begriff poröser Asphalt sind zwei Typen zusammengefasst. Ein Typ (PA) leitet Niederschlagswasser durch die Deckschicht des Strassenbelags bis zur Drainschicht und dann in eine Entwässerungsleitung ab. Semidichter Asphalt (SDA) hat im Vergleich dazu keine durchgehenden Poren.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Filtration oder Ablagerung im Innern des Asphalts
Stabilität der Schadstoffentfernung	Gering
Vorbehandlung nötig	Nein
Abflussdrosslung	Keine
Retentionsvolumen vorhanden	Nein
Retentionsvolumen nötig	Nein
Weitere Bauwerke	Keine
Havarierrückhalt	Gering
Betrieb	Keine weiteren Installationen
Unterhalt	Reinigung des Belags (Typ SDA), diverse Methoden
Entsorgung	Schlamm
Klimaempfindlichkeit	Empfindlich
Materialbeschaffung	Unproblematisch
Inbetriebnahme	Inbetriebnahme nach Installation möglich
Flexibilität Realisierung	Unterschiedlicher Belagsaufbau

### Leistungsbestimmung

Zur Leistungsbeurteilung werden Daten von drei Untersuchungen ausgewertet [55],[56], [57], (Abb. IV.21).

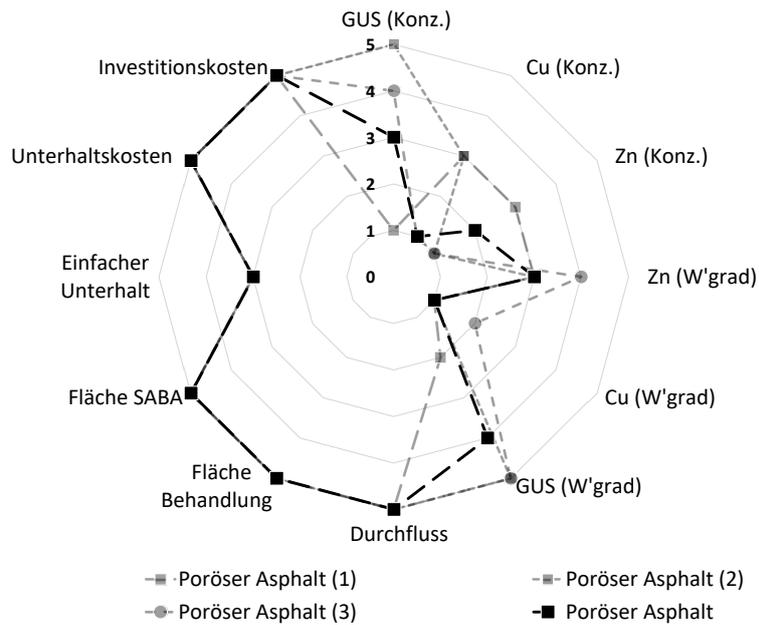


Abb. IV.21 Leistungscharakteristika von porösen Asphalten.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Poröse Asphalte erzielen bei Ablaufkonzentrationen von GUS Werte der Klassen 5 bis 1 und bei Kupfer und Zink solche zwischen Klasse 3 und 1.
Wirkungsgrade	Bei GUS liegt der Bereich zwischen Klasse 5 und 2, bei Kupfer zwischen 2 und 1 und bei Zink zwischen 4 und 3.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss liegt im Durchschnitt und auch bei den einzelnen Untersuchungen bei Klasse 5 (> 6 l/min/m <sup>2</sup> ).
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf erzielt bei beiden Kriterien die Klasse 5.
Einfacher Unterhalt	Der Unterhalt (SDA) ist aufwändiger als der von Strassen ohne porösen Asphalt (Klasse 3), da spezielle Reinigungsfahrzeuge notwendig sind.
Unterhaltskosten	Lärmarme SDA-Beläge innerorts müssen zum Erhalt der Lärminderung gereinigt werden. Somit entstehen keine zusätzlichen Kosten. Der Unterhalt von lärmarmen SDA-Belägen liegt im Bereich von 4'000 CHF/ha/Jahr [63]. Würde also ein Strassenbelag nur zur Behandlung von Strassenabwasser aus SDA-Asphalt projektiert, würden deutliche Mehrkosten im Vergleich zu normalen Belägen resultieren.
Investitionskosten	Poröse Beläge werden zur Lärminderung innerorts eingesetzt. Insofern entstehen für die Entwässerung keine zusätzlichen Investitionskosten.
Bauhöhe	Die Höhe inklusiv der Drainage (PA) beträgt 30-50 cm.

### Beurteilung

Die Angaben zu den Ablaufkonzentrationen und Wirkungsgraden zeigen beim Schadstoffrückhalt eine grosse Bandbreite, die auf unterschiedliche Beläge zurückgeführt wird. In der Schweiz werden seit einigen Jahren sowohl auf Nationalstrassen als auch auf Kantonsstrassen nur SDA-Beläge eingebaut. Durch die hohen Fahrgeschwindigkeiten ist auf Nationalstrassen (> 80 km/h) keine Reinigung der Beläge nötig, innerorts schon. Dies zeigt das im Porenraum von SDA-Belägen innerorts Partikel zurückgehalten werden, was sich in der Reduktion der Lärmdämpfung manifestiert. Somit werden eher GUS, weniger Kupfer und Zink zurückzuhalten. Entsprechend müssen solche Beläge regelmässig gereinigt werden.

Dem limitierten Schadstoffrückhalt stehen Vorteile beim Flächenbedarf (keiner) und bei den Investitions- und Unterhaltskosten (keine) gegenüber, wenn solche Beläge aus Lärmschutzgründen eingebaut werden. Die Datenlage bezüglich SDA-Belägen ist unklar. Für eine schlüssige Beurteilung sind entsprechende Untersuchungen notwendig.

### IV.4.3 Dezentrale schachtbasierte Verfahren

Dezentrale, schachtbasierte Verfahren entwässern typischerweise Strassenflächen zwischen 200 m<sup>2</sup> und 1'000 m<sup>2</sup> pro Systemeinheit. Es gibt zwei Systemtypen. Einer wird direkt in Schlammsammler eingebaut, der andere in einem zusätzlichen Schacht, der von einem oder von mehreren Schlammsammlern beschickt wird (Abb. IV.22). Bei einigen Systemen können mehrere Behandlungseinheiten parallel angeordnet werden, wodurch grössere Strassenflächen angeschlossen werden können.

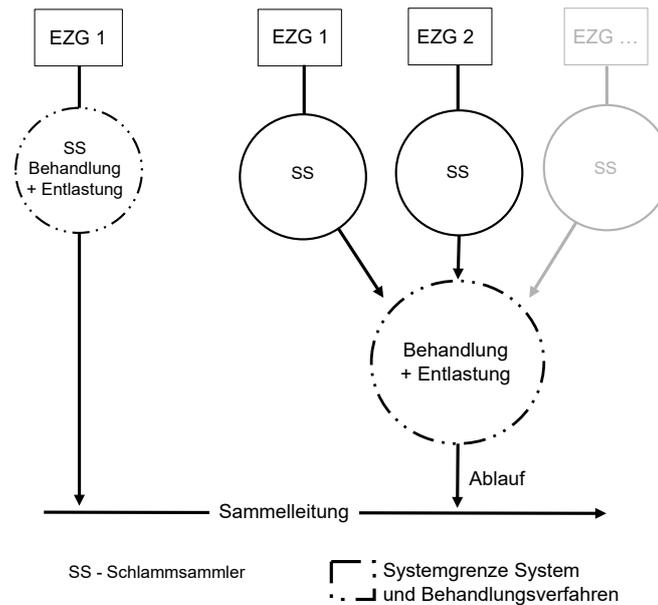


Abb. IV.22 Darstellung von Entwässerungsarten mit dezentralen Systemen.

Dezentrale schachtbasierte Systeme beinhalten meistens ein technisches Element für die Strömungsoptimierung, einen Filter oder einen Adsorber, oder alle drei Elemente zusammen. Allen diesen Systemen ist gemeinsam, dass sie sehr kompakt sind, weshalb meistens eine Retention und eine Vorentlastung fehlen. Entsprechend hoch ist die hydraulische Belastung.

Kriterien	Beschreibung
Behandlungstyp	Hauptbehandlung
Schadstoffentfernung	Systemabhängig: Sedimentation, Filtration auf Oberflächen (Siebfiltration), Filtration im Inneren eines Filters, Adsorption
Stabilität der Schadstoffentfernung	Gering
Vorbehandlung nötig	Nein
Abflussdrosslung	In der Regel gering, da die Entlastung auch in den Ablauf gelangt
Retentionsvolumen vorhanden	Nein oder gering
Retentionsvolumen nötig	Nein
Weitere Bauwerke	Keine
Havarierückhalt	Je nach System mehr oder weniger ausgeprägt möglich
Betrieb	Unterschiedlich
Unterhalt	Unterschiedlich
Entsorgung	Systemabhängig: Filtermaterialien, Filtergewebe, Absaugen von Schlamm
Klimaempfindlichkeit	Unproblematisch
Materialbeschaffung	Unproblematisch
Inbetriebnahme	Inbetriebnahme nach Installation möglich
Flexibilität Realisierung	Systemabhängig

### Leistungsbestimmung

Die Leistungskennzahlen zweier unterschiedlicher Systeme sind in Abb. IV.23 dargestellt. System (1) wird in Schlammsammler eingesetzt, was der linken Seite von Abb. IV.22 entspricht [59]. System (1) besteht aus einem Filtersack für die Filtration. System (2) entspricht der Anordnung auf der rechten Seite Abb. IV.22 [60]. System (1) hat einen Filtersack als Filterelement, während System (2) eine Kombination von Sedimentation und Filtration/Adsorption mit einem Filterelement ermöglicht, und im Aufstrom beschickt wird.

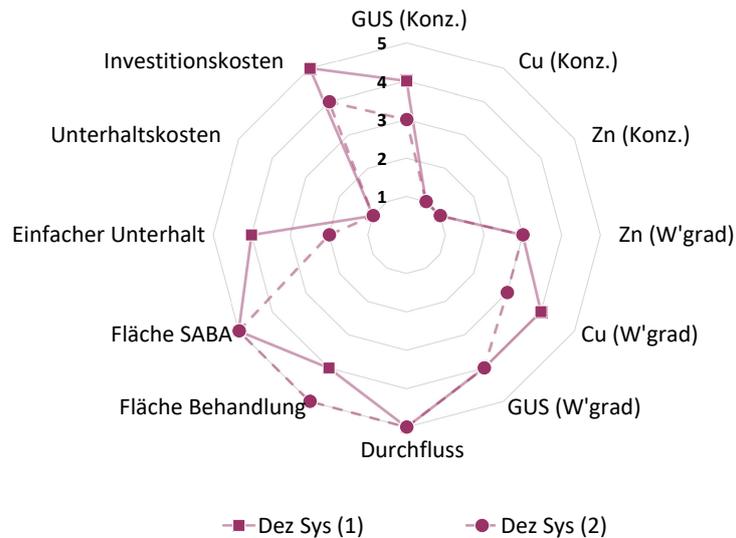


Abb. IV.23 Charakteristika zweier dezentraler schachtbasierter Systeme.

Kriterien	Beschreibung
Ablaufkonzentrationen	Die GUS-Ablaufkonzentrationen beider Systeme sind mit 20 und 24 mg/l vergleichbar (Klasse 4 und Klasse 3). Auch die Kupfer- und Zinkkonzentrationen sind absolut betrachtet vergleichbar. System (1) erzielt bei Kupfer 32 ug/l, System (2) 44 ug/l. Beide Konzentrationen überschreiten den Schwellenwert für Klasse 1 mit 20 ug/l deutlich. Dies ist auch bei Zink der Fall. Mit Werten von 88 ug/l bei System (1) 78 ug/l bei System (2) wird der Schwellenwert für Klasse 1 von 40 ug/l um gut das Doppelte überschritten.
Wirkungsgrade	Die Wirkungsgrade beider Systeme sind für Zink mit 79 % und 76 % ähnlich (Klasse 3). Bei Kupfer ist der Wirkungsgrad bei System 1 mit 83 % (Klasse 4) höher als bei System (2) mit 71 % (Klasse 3). Bei GUS erzielen beide Systeme die Klasse 4 mit 88 % und 81 %.
Spezifischer Durchfluss	Der spezifische Durchfluss beträgt bei System (1) 13 l/min/m <sup>2</sup> und bei System (2) 104 l/min/m <sup>2</sup> , was in beiden Fällen Klasse 5 (> 6 l/min/m <sup>2</sup> ) entspricht. Die Durchflüsse nehmen mit zunehmender Standzeit infolge Kolmation bei beiden Systemen ab.
Flächenbedarf	Der Flächenbedarf für das gesamte System ist mit 25 m <sup>2</sup> /ha (System 1) und 19 m <sup>2</sup> /ha (System 2) gering und unterschreitet den Schwellenwert für Klasse 5 mit 60 m <sup>2</sup> /ha um das Mehrfache. Der Flächenbedarf für die Behandlung ergibt mit 60 m <sup>2</sup> /ha bei System (1) knapp Klasse 5. Mit 11 m <sup>2</sup> /ha bei System (2) wird Klasse 5 deutlich erreicht.
Einfacher Unterhalt	System (1) wird mit Klasse 3 beurteilt, System (2) mit Klasse 1.
Unterhaltskosten	Die Unterhaltskosten von System (1) liegen im Bereich von 7'000 bis 10'000 CHF/ha/Jahr, diejenige von System (2) zwischen 10'000 und 20'000 CHF/ha/Jahr. Der Schwellenwert für Klasse 1 von 2'800 CHF/ha/Jahr wird von System (1) um das Drei- bis Vierfache und bei System (2) um das Vier- bis Siebenfache überschritten.
Investitionskosten	Die Investitionskosten belaufen sich bei System (1) auf 100'000 bis 140'000 CHF/ha (Klasse 5) und bei System (2) auf 90'000 bis 180'000 CHF/ha (Klasse 4 oder 5). Bei System (2) sind allenfalls zusätzliche Kosten für die Zuleitungen der Schlamm-sammler zum System sowie die Ableitung aus dem System zur berücksichtigen, welche die Investitionskosten um eine oder zwei Klassen erhöhen.
Bauhöhe	Die Bauhöhe bei System (1) entspricht der Bauhöhe eines Schlamm-sammlers und beträgt typischerweise 2.25 m, diejenige von System (2) beträgt 2.7 m.

### Beurteilung

System (1) und System (2) haben den geringsten Flächenbedarf aller untersuchter Systeme. Entsprechend hoch ist die hydraulische Flächenbelastung. System (1) hat im Filtersack eine geringe Retention, System (2) keine. Bei beiden Systemen führen stärkere Regen zur Überlastung der Filtereinheit mit Einbussen des Schadstoffrückhalts. Ebenfalls zu Einbussen der Schadstoffentfernung führen die kurzen Aufenthaltszeiten in den Filtern bedingt durch die hohen Durchflüsse. Beide Faktoren bewirken eine geringe Schadstoffentfernung vor allem bei Kupfer und Zink mit hohen feinpartikulären und gelösten Anteilen.

Die hohe hydraulische Belastung der Filter und das Fehlen von Prozessen, welche der Kolmation massgeblich entgegenwirken (Auflockerung durch Bewuchs, Austrocknung),

führt zu deren irreversibler Kolmation. Deshalb müssen die Filtrationseinheiten solcher Systeme regelmässig gespült oder ausgetauscht werden, was die festgestellten sehr hohen Unterhaltskosten zur Folge hat.

Der geringe Flächenbedarf geht bei diesen Systemen zu Lasten der Schadstoffentfernung und der Unterhaltskosten. Vergleichbare Ergebnisse werden auch von anderen Untersuchungen berichtet [61].

## IV.5 Bei projektierten SABA nicht eingesetzte Verfahren

Die folgenden Verfahren wurden während der letzten 15 Jahre in Testanlagen geprüft oder sind Projektideen. Beim Einsatz in Testanlagen sind die Ergebnisse so ausgefallen, dass vom Einsatz in einer SABA abgesehen wurde. Die Gründe dafür lauten je nach Verfahren wie folgt:

- Vergleichsweise geringe Schadstoffentfernung
- Vorzeitige Kolmation und damit hohe Betriebskosten
- Hohe Investitionskosten
- Hohe Betriebskosten
- Verfahrenstechnisch schwierig umsetzbar

Sollte ein solches Verfahren künftig in Betracht gezogen werden, müssten nachvollziehbare Argumente und vor allem Leistungsprüfungen vorliegen, die belegen, dass es im Vergleich zu den empfohlenen Verfahren vorteilhaft ist.

### IV.5.1 Adsorber als Nachbehandlung

Die Idee der Nachbehandlung mit einer Adsorbierschicht entstand aus der Überlegung, im Vergleich zu Bodenfiltern flächensparende SABA zu bauen. Dazu sollte ein nicht bewachsener Sandfilter oder ein Splitt-Kiesfilter mit einer kompakten Adsorber-Nachbehandlung ergänzt werden, damit die Ablaufqualität derjenigen eines Bodenfilters entspricht. Tests solcher Systeme wurden an Versuchsanlagen durchgeführt [17]. Nachdem bewachsene Sandfilter ihre Schadstoffentfernung bei geringerem Flächenbedarf als Bodenfilter unter Beweis gestellt hatten, erübrigte sich eine Nachbehandlung mit Adsorbieren.

### IV.5.2 Membrananlagen

Auch bei Membrananlagen stand die Idee von möglichst kompakten SABA mit trotzdem guter Reinigungsleistung im Vordergrund. Dies ist mit Membranen prinzipiell möglich, da pro Kubikmeter Anlagenvolumen eine hohe Filterfläche zur Verfügung steht. Die Wirkung der Schadstoffentfernung wird durch die Porengrösse festgelegt (Ultrafiltration, Nanofiltration). Dadurch können, je Filtrationstyp, auch feinpartikuläre Anteile von Schwermetallen zurückgehalten werden.

Membranfilter sind vom Funktionsprinzip her betrachtet Siebfilter, welche mit zunehmender Betriebszeit verstopfen und rückgespült oder gereinigt werden müssen. Entsprechend muss das Rückspülwasser gesammelt und aufbereitet werden, welches je nach System zur Abreinigung der Membrane, mit Chemikalien belastet sein kann. Die Membranen selbst müssen auch gereinigt werden. Neben hohen Unterhaltskosten ist mit hohen Stromkosten zu rechnen. Testanlagen zeigten, dass diese über 1'000 CHF/ha Strassenfläche betragen [62]. Infolge des hohen Unterhaltsaufwands und der hohen Anforderungen an den Betrieb wurde dieses Verfahren nicht mehr weiterverfolgt.

### IV.5.3 Flockung und Fällung

Der Idee der Flockung und Fällung besteht darin, die Wirkung von Absetzbecken zu erhöhen. Dies sollte erreicht werden, indem durch Zugabe eines Flockungsmittels die Partikelgrössenverteilung zu Gunsten grösserer Partikel, die besser sedimentieren, verschoben wird.

Die Schwierigkeit besteht darin, das Flockungsmittel proportional zur Schadstofffracht zu dosieren und anschliessend mit dem Strassenabwasser zu durchmischen. Angesichts der Dynamik der Schadstofffracht im Strassenabwasser ist beides schwierig zu realisieren, womit ein Teil der Flockungsmittel nicht reagieren kann. Deshalb ist mit Restgehalten zu rechnen. Diese sind, wie auch die von der Produktion her noch vorhandenen Reststoffe (Monomere), oft toxisch für aquatische Lebewesen. Aus diesen Gründen wurden weder Tests noch Pilotprojekte mit diesen Verfahren realisiert.

## V Zusammenfassung der Daten und Anlagen

Tab. V.1 Zuordnung der Anlagen.

Bezeichnung Grafiken	Anlage oder Anlagen	Literatur
Oberboden	Diverse Anlagen aus dem Forschungsbericht	[49]
Sand bewachsen	Diverse Anlagen aus dem Forschungsbericht	[49]
Kiessand bewachsen	SABA Grütwisen	[47]
Eisenhydroxid (1)	SABA Attinghausen	[22]
Eisenhydroxid (2)	SABA 2	[45]
Eisenhydroxid (3)	SABA 5	[45]
Splitt-Kiesfilter (1)	SABA Hagnau	[28]
Splitt-Kiesfilter (2)	SABA Hallmatt	[46]
Splitt-Kiesfilter (3)	SABA Baulos Ost	[20]
Absetzbecken (1)	SABA 7	[38]
Absetzbecken (2)	SABA A Kilchberg	[39]
Absetzbecken (3)	SABA Escher Wyss	[33]
Absetzb. bewirt.(1)	SABA Chrüzere	[54]
Absetzb. bewirt (2)	SABA Altendorf SZ	[43]
Lamellen (1)	SABA 7	[38]
Lamellen (2)	SABA 9	[38]
Lamellen (3)	SABA Escher Wyss	[33]
Polstoff (1)	SABA Pfaffensteig	[31]
Polstoff (2)	SABA Wylerholz	[34]
Polstoff (3)	SABA Gäbelbach	[36]
Mikrosieb (1)	Testanlage Tiefbauamt des Kantons Bern	[24]
Mikrosieb (2)	SABA Seetalplatz	[5]
Mikrosieb (3)	SABA Froburg	[5]
Schnellfilter	SABA Halenbrücke	[29]
Poröser Filter	SABA Root-Gisikon	[50]
Lamellen/Filter/Ads.	Anlage an der A9 in Giessen, Deutschland	[40]
Strassenschulter (1)	Strassenschulter in Kirchberg, Kanton Bern	[10]
Strassenschulter (2)	Strassenschulter in Augsburg	[4]
Strassenschulter (3)	Strassenschulter in Augsburg	[4]
Poröser Asphalt (1)	CIRIA Report	[55]
Poröser Asphalt (2)	Strasse in Texas	[56]
Poröser Asphalt (3)	Strasse in Niederlanden	[57]
Dez Sys (1)	Filtersack eingesetzt in Schlammsammler	[59]
Dez Sys (2)	System 3P	[60]

## Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
ASTRA	Bundesamt für Strassen
ASB	Absetzbecken
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BSB <sub>5</sub>	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
Cd	Cadmium
Cl	Chlorid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr (Anzahl Fahrzeuge pro Tag)
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff
Einleitbedingungen	Einleitbedingung von kommunalem Abwasser in die Gewässer
EZG	Einzugsgebiet einer SABA
Deckschicht	Schicht auf einer Filteroberfläche, bestehend aus zurückgehaltenem Schlamm
Frachtmittelwert	Wird für Zu- und Ablaufkonzentrationen verwendet. Dabei wird die während der Leistungs- oder Funktionsprüfung insgesamt bestimmte Schadstofffracht im Zu- oder Ablauf durch die entsprechende Wassermenge dividiert.
GSchV	Gewässerschutzverordnung
GUS	Gesamt ungelöste Stoffe
IDF	Intensitäts-Dauer-Frequenz Verläufe von Blockregen gemäss Norm VSS 40 350
KW	Kohlenwasserstoffe
MTBE	Methyl-tert-Butylether
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammonium
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitrit
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrat
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PW	Pumpwerk
Qualitätsziele	Anforderungen an die Qualität von Fließgewässern
RFB	Retentionsfilterbecken
SABA	Strassenabwasser-Behandlungsanlage
Schlammssammler	Entspricht gemäss VSS – Terminologie dem Strassenablauf
Zn	Zink

## Literaturverzeichnis

- 
- [1] Gewässerschutzverordnung (GSchV), Stand 1. Juni 2018. **SR 814.201**
- 
- [2] VSA, 2019, „**Richtlinie Regenwasserentsorgung**“, VSA Glattbrugg.
- 
- [3] Steiner M. (2020), "**Mikroplastik: Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer**", Bericht, wst21, Version 1.1.
- 
- [4] Nadler A., Meißner E. (2007), "**Versickerung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen – Abschlussbericht Entwicklungsvorhaben Oktober 1996 – Oktober 2005**", Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- 
- [5] Osterwalder W. und Humbel P, 2018. "**Funktionsprüfung SABA Seetalplatz und SABA Frohburg**", Bericht ilu AG Dezember 2018.
- 
- [6] Hilliges R., Schriewer, A. und Helmreich, B. (2005), „**Entfernung von Schadstoffen aus Strassenabflüssen einer stark befahrenen Strasse durch ein mehrstufiges Filtersystem**“, Berichte aus Wasser- und Abfallwirtschaft. Technische Universität München.
- 
- [7] Steiner M. und Goosse P, 2021. "**Leistungsprüfung SABA Rothenwald**", Bericht wst21, Juli 2021, v1.0.
- 
- [8] Amt der Vorarlberger Landesregierung und Umweltinstitut Vorarlberg (2007), „**Abwasser- und Bodenuntersuchungen am Retentionsfilterbecken Landesstrasse L 202 Hard-Bregenz (Emissionsmessstelle Bregenzrachbrücke)**“, Abschlussbericht.
- 
- [9] ASTRA (2013), "**Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen**", v1.3.
- 
- [10] Eawag, HSB/HTI Burgdorf, GSA Kt. Bern, ASTRA und BAFU (2006a), „**Untersuchung der Versickerung von Strassenabwasser über Strassenrandstreifen an einer bestehenden Strasse**“, Bericht Eawag Dübendorf.
- 
- [11] ASTRA (2020) "**Fachhandbuch Trasse / Umwelt – Leistungsprüfung neuer Verfahren**", V1.01
- 
- [12] Kaufmann P und Scheiwiller E. (2008), "**Messungen von Regenwasserabflüssen auf der A6 in Allmendingen**", Bericht, ASTRA, Version 2.0
- 
- [13] ASTRA (2020) "**Fachhandbuch Trasse / Umwelt – Funktionsprüfung bei der Abnahme und bei der periodischen Kontrolle**", V1.02
- 
- [14] Boivin P., Saadé M., Pfeiffer H.R., Hammecker C. and Degoumois Y. (2008), "**Dépuraton of Highway Runoff Water into grass-covered Embankments**", Environmental Technology, 29:6, 709-720.
- 
- [15] Boller M. (2000), „**Wasserversorgung: Teil 2, Trinkwasseraufbereitung, Abtrennung partikulärer Stoffe**“, EAWAG/ETHZ, Dübendorf.
- 
- [16] Kocher M. und Bürger M. (2010) "**Schadstoffrückhalt in Banketten und Böschungen**", DWA-Seminar Strassenentwässerung am 2.12.2010 in Fürth.
- 
- [17] Eawag, HSB/HTI Burgdorf, GSA Kt. Bern, ASTRA und BAFU, (2006b), „**Schadstoffe im Strassenabwasser einer stark befahrenen Strasse und deren Retention mit neuartigen Filterpaketen aus Geotextil und Adsorbiermaterial**“, Bericht Eawag Dübendorf.
- 
- [18] Kocher M. und Bürger M. (2010) "**Ganzheitliche Betrachtung von Banketten**", Bericht Bundesanstalt für Strassenwesen.
- 
- [19] VSS 40 361 (2019) "**Strassenentwässerung – Behandlungsanlagen**", VSS Zürich.
- 
- [20] Geiger-Kaiser M., Jäger P. (2005), „**Wirksamkeit von Retentionsfilterbecken zur Reinigung von Strassenoberflächenwässern**“, Amt der Salzburger Landesregierung, Reihe Gewässerschutz.
- 
- [21] Kaufmann P., Ochsenbein U., Scheiwiller E. und Rudin M. (2008b), „**Untersuchung von Ölabscheidern und Schlamm aus Geotextilsäcken nach Scheibenfiltern (3.13\_01)**“, Tiefbauamt des Kantons Bern, Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern, aquawet Gümligen.
- 
- [22] Steiner, M. und Goosse, P. (2009a), „**Abschlussbericht Monitoring SABA Attinghausen**“. Bericht, wst21.
- 
- [23] Grotehusmann D., Kasting U., Hunze. M. (2007), „**Optimierung von Absetzbecken zur Regenwasserbehandlung**“, Publikation in KA – Abwasser, Abfall. 7/2007.
- 
- [24] Kaufmann P., Ochsenbein U., Scheiwiller E. und Rudin M. (2008a), „**Austestung des Systems Huber Mikrosieb und Geotextilsäcke für die Schlammbehandlung. Bericht über die Versuche im SAZ im Jahr 2007 (6.2-01)**“, Tiefbauamt des Kantons Bern, Gewässer- und Bodenschutzlabor des Kantons Bern, aquawet Gümligen.
-

- 
- [25] Fernandes J.N. and Barbosa A.E. (2019), "**PROPER PROJECT - WP1.PREDICTION OF POLLUTANT LOADS AND CONCENTRATIONS IN ROAD RUNOFF**, Task 1.1. Literature review on road runoff pollution on Europe", CEDR Call 2016.
- 
- [26] Dröge, R. und weitere Autoren (2019) "**MICROPROOF - Micropollutants in Road RunOff, Final Report: Sources, fate and treatment of microplastics and organic micropollutants from road transport**", CEDR Call 2016
- 
- [27] Dempsey P. (2009), "**Development of the Highways Agency Water Risk Assessment Tool**", Diffuse Pollution from Road Runoff - Research into practice, London.
- 
- [28] Goosse P. und Steiner M. (2017), "**A2 / SABA Hagnau Schlussbericht, Leistungsprüfung SABA Hagnau: Fokus Splitt-Kiesfilter 2008– 2017**", Bericht, wst21, Version 1.1.
- 
- [29] Scheiwiller Elmar. 2021, "**SABA Halenbrücke - Leistungsprüfung der SABA mit technischem Filter im Jahr 2018/19**", Bericht, ASTRA
- 
- [30] Crabtree W. und andere Autoren. (2002) "**LONG TERM MONITORING OF POLLUTION FROM HIGHWAY RUNOFF: FINAL REPORT**", Highways Agency, Environment Agency, 2002.
- 
- [31] Scheiwiller E. 2014, "**SABA Pfaffensteig (Bümpliz) - Probetrieb und Leistungsprüfung der SABA mit technischem Filter im Jahr 2012/13**", Bericht ASTRA.
- 
- [32] Boivin P. und weitere Autoren, (2015), "**Versickerungspotenzial für das Strassenabwasser entlang der Böschungen der Nationalstrassen**", Dokumentation ASTRA 88011 V1.20
- 
- [33] Steiner M. und Goosse P. 2014, "**Monitoring SABA Escher-Wyss-Platz**", Bericht, wst21, Version 1.4.
- 
- [34] Scheiwiller E. 2019, "**SABA Wylerholz - Leistungsprüfung der SABA mit technischem Filter im Jahr 2017/18**", Bericht ASTRA.
- 
- [35] Fernandes J.N. and Barbosa A.E. (2019), "**PROPER PROJECT - WP1.PREDICTION OF POLLUTANT LOADS AND CONCENTRATIONS IN ROAD RUNOFF**, Task 1.3 Road runoff monitoring data and representative sites", CEDR Call 2016.
- 
- [36] Scheiwiller E. 2016, "**SABA Gäbelbach - Leistungsprüfung der SABA mit technischem Filter im Jahr 2014/15**", Bericht ASTRA.
- 
- [37] Gisi U., Schenker R., Schulin R., Stadelmann F.X. und Sticher Hans. (1990), „**Bodenökologie**“, Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York.
- 
- [38] Steiner M. und Goosse P. 2020, "**Funktionsprüfung SABA A1, 6-Spur Ausbau Härkingen Wiggertal, SABA 7 und SABA 9**", Bericht, wst21, Version 1.4.
- 
- [39] Steiner M. und Goosse P. 2016, "**Funktionsprüfung SABA A in Kilchberg**", Bericht, wst21, Version 1.1
- 
- [40] Welker A. und weitere Autoren, (2018), "**Semizentrale Anlage zur Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen - Messprogramm an der A 485 in Gießen Jahr 2009**", Strasse und Verkehr, 12/2018.
- 
- [41] DWA (2019), "Arbeitsblatt DWA A-178 – Retentionsbodenfilteranlagen" DWA Regelwerk.
- 
- [42] Steiner M. und Goosse P., (2016) "**Monitoring ERO Funktionsprüfung der SABA B und D – Schlussbericht**" Bericht wst21 im Auftrag des Kantons Solothurn.
- 
- [43] Lutz H und Boller M., (2019) "**First-Flush Anlagen**", Aqua und Gas, Nr. 10/2019.
- 
- [44] Revitt M und weitere Autoren, (2020), D3.2 "**Sustainable assessment of measures and treatment systems for road runoffs: Survey of guidelines**", Proper project, Conference of European Directors of Roads (CEDR)
- 
- [45] Steiner M. und Goosse P., (2018), "**Funktionsprüfung SABA A1, 6-Spur Ausbau Härkingen Wiggertal - SABA 0, SABA 1, SABA 2 und SABA 5, September 2015 - Oktober 2017**", Bericht wst21, Version 1.2.
- 
- [46] Scheiwiller E. (2020), "**SABA Hallmatt - Leistungsprüfung der SABA mit vorgeschaltetem Splittfilter und Behandlung mit Bodenfilter im Jahr 2017/18**", Bericht, ASTRA, Version 1.0
- 
- [47] Steiner M. und Goosse P. (2021), "**Funktionsprüfung der SABA Birchstrasse und Grütwisen**", in Arbeit.
- 
- [48] ASTRA Filiale F4, (2021), "**Funktions- und Leistungsprüfungen an SABA der F4**", in Arbeit.
- 
- [49] Pazeller A. und weitere Autoren. (2017), "**Vergleich der Eignung von bewachsenen Boden- und Sandfiltern zur Reinigung von Strassenabwasser**", ASTRA, Forschungsprojekt 2011/204. Nr. 1623.
- 
- [50] Steiner M. und Goosse P., (2016), "**Funktionsprüfung SABA Root-Gisikon - Teil 1 und Teil 2**", Bericht wst21, Version 1.1.
-

- 
- [51] Vollertsen J. und weitere Autoren. (2019), "**PROPER - SUSTAINABLE ASSESSMENT OF MEASURES AND TREATMENT SYSTEMS FOR ROAD RUNOFFS**, Task 3.1. Literature Review on Blue-Green Treatment Solutions", CEDR Call 2016.
- 
- [52] Tiefbauamt des Kantons Zürich. (2014), "**Gewässerschutz an Strassen, Strassenentwässerung. Teil 2 Richtlinie Projektierung und Ausführung von Gewässerschutzmassnahmen**", Baudirektion Kanton Zürich.
- 
- [53] Steiner M. und Goosse P. 2016, "**Funktionsprüfung der SABA 1 und der SABA 2 an der Forchstrasse**", Schlussbericht, wst21, April 2016, v1.1.
- 
- [54] Kaufmann P. und weitere Autoren, (2010), "**Messungen von Regenwasserabflüssen auf der A1 und A6- Messungen der Sedimentation des Strassenabwassers im RRB Chrüzere**", Bericht, ASTRA.
- 
- [55] CIRIA Report C753. (2015), "**The SuDS Manual**", CIRIA, London, UK. ISBN:978-0-86017-760-9.
- 
- [56] Barret M. E. and Shaw C. B. (2006), "**Stormwater Quality Benefits of a Porous Asphalt Overlay**". Center for Research in Water Resources, University of Texas, Austin
- 
- [57] Berbee R. et al. (1999), "**Characterisation and Treatment of Runoff from Highways in the Netherlands Paved with impervious und pervious Asphalt**", Water Environment Research Vol. 71, No 2.
- 
- [58] Perret Jaques und Lopez Pedro, (2017), "Verschmutzungen lärmarmen Beläge vermeiden", Strasse und Verkehr, 9/2017
- 
- [59] Althoff S. und Käser R. (2020), "**Dezentrale Lösung eines zentralen Problems -Strassenabwasserbehandlung mit Filtersack**", Aqua und Gas, 30. Oktober 2020.
- 
- [60] Brögli M., Waldvogel R. und Brodmann R. 2015. "**Strassenabwasserbehandlung Mythenquai Dezentrale Filterschachtsysteme – Testeinbauten**". Bericht, Holinger AG
- 
- [61] Barjenbruch M. und weitere Autoren. (2016), "**Dezentrale Reinigung von Straßenabflüssen**", Projekt im Berliner Umweltentlastungsprogramm UEPII/2.
- 
- [62] Kaufmann P. und weitere Autoren, (2010), "**Austestung des Systems Membranfiltration. Bericht über die Versuche im SAZ im Jahr 2009**". Bericht ASTRA.
- 
- [63] Chanez C. (2021), Besprechungen zur Thematik der porösen Beläge.
- 
- [64] Sicherheitsmassnahmen gemäss Störfallverordnung bei Nationalstrassen
- 
- [65] VSS 40 350 (2019), "**Oberflächenentwässerung von Strassen; Regenintensitäten**", VSS Zürich.
-

# Änderungsverzeichnis

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2021	2.00	30.11.2021	Komplette Revision (Originalversion in Deutsch).
2010	1.00	01.01.2010	Inkrafttreten Ausgabe 2010 (Originalversion in Deutsch).

