



Mattenhof 20  
8051 Zürich  
Tel 043 960 38 22  
Fax 043 960 38 23  
michele.steiner@wst21.ch  
www.wst21.ch

## **Priorisierung von Massnahmen zur Reduktion des Eintrags von Reifenabrieb in Oberflächengewässer**

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU

Zürich, 28. Juni 2023 / ms - fr - pg 1.2

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Ausgangslage.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Methodik und Grundlagen.....</b>	<b>7</b>
3.1	Produktion und Verteilung von Reifenabrieb.....	8
3.1.1	Strassennetz, Fahrleistungskilometer .....	8
3.1.2	Berechnung der Menge Reifenabrieb.....	8
3.1.3	Reifenabrieb im Strassenabwasser .....	10
3.1.4	Verteilung von Reifenabrieb in der Umwelt .....	11
3.2	Rückhalt in der Strassenentwässerung.....	11
3.2.1	Entwässerungsarten von Strassen .....	11
3.2.2	Heutige Entwässerung der Strassen .....	12
3.2.3	Behandlung von Strassenabwasser .....	13
3.2.4	Rückhalt von Entwässerungssystemen und Behandlungstypen.....	13
3.3	Bestimmung der Belastungsschwerpunkte .....	14
3.3.1	Schadstoffeinträge .....	14
3.3.2	Emissionsbasierte Belastung.....	15
3.3.3	Immissionsorientierte Belastung.....	15
<b>4</b>	<b>Eintrag Oberflächengewässer und Massnahmen .....</b>	<b>17</b>
4.1	Produktion von Reifenabrieb .....	17
4.1.1	Nach Strassentyp und Lage der Strasse.....	17
4.1.2	Anteile der Strassenlängen an der Produktion .....	18
4.2	Einträge in die Umwelt.....	20
4.2.1	Herkunft der Einträge in Böden .....	20
4.2.2	Herkunft der Einträge in Oberflächengewässer .....	21
4.3	Massnahmen zur Verringerung des Eintrags.....	23
4.3.1	Massnahmen bei der Produktion von Reifenabrieb .....	23
4.3.2	Massnahmen am Entwässerungssystem .....	23
4.3.3	Massnahmen zur Abschätzung der Reduktion.....	25
4.4	Reduktion des Eintrags.....	26
<b>5</b>	<b>Belastungsschwerpunkte.....</b>	<b>28</b>
5.1	Basierend auf Einträgen der Strassenentwässerung.....	28
5.2	Basierend auf Teileinzugsgebieten (TEZG) .....	30
5.3	Basierend auf Gesamteinzugsgebieten .....	33
5.3.1	Herkunft der Belastung nach Strassentyp.....	34
5.3.2	Belastung unterschiedlicher Fliessgewässer.....	36
5.3.3	Zeitliche Entwicklung der Gewässerbelastung .....	38
5.4	Beurteilung.....	39
5.4.1	Rückhalt: Seen und Flusssedimente .....	39
5.4.2	Weitere Schadstoffe und Einträge, Dynamik.....	39
5.4.3	Datengrundlage - Detailgenauigkeit .....	40

<b>6</b>	<b>Priorisierung</b> .....	<b>41</b>
6.1	Belastung: Konzentrationen oder Frachten?.....	41
6.2	Priorisierung nach Belastungsart.....	42
6.2.1	Immissionsbasiert mittels Konzentrationen .....	42
6.2.2	Immissionsbasiert mittels Konzentrationen und Frachten.....	44
6.3	Welche Strassen priorisieren?.....	45
6.4	Massnahmen .....	46
6.4.1	Priorisierung der Massnahmen.....	46
6.4.2	Temporäre Massnahmen.....	46
6.4.3	Weitere Massnahmen .....	47
<b>7</b>	<b>Folgerungen</b> .....	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>50</b>
	<b>Glossar</b> .....	<b>52</b>

## Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Wasser, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: wst21

Autoren: Michele Steiner, Felix Hermann

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Für diese Studie wurden Daten und Informationen unterschiedlicher Fachdisziplinen verwendet. Dank gebührt folgenden Institutionen und Personen:

BAFU, Urs Helg

BAFU, Harald Jenk

ASTRA, Adrian Gloor

Kanton Bern, Dorothee Wörner

Kanton Fribourg, Oswald Camozzi

Kanton Genf, Theodora Cohn-Liechti

Stadt und Kanton Zürich

Begleitgruppe:

Reto Battaglia (AWA, Kanton Bern)

Theodora Cohen Liechti (DT, Kanton Genf)

Franz-Günter Kari (ERZ, Stadt Zürich)

Alexandra Kroll (Oekotoxzentrum)

Marguerite Trocmé (ASTRA)

Elmar Scheiwiller (AWA/TBA, Kanton Bern)

Stefan Schmid (AWEL, Kanton Zürich)

# 1 Zusammenfassung

Diese Studie zeigt, welche Fliessgewässerabschnitte in der Schweiz durch den Eintrag von Reifenabrieb potenziell am stärksten belastet sind. Die den Berechnungen zugrunde liegende Methodik, oder auch Teile davon, können zudem generell angewendet werden, um die Belastung der Fliessgewässer durch Reifenabrieb abzuschätzen. Damit kann die Priorisierung der Planung der Sanierung von Strassenabschnitten unterstützt werden. Detailabklärungen der Einzugsgebiete sind anschliessend nötig, um die Entwässerungssituation vor Ort zu klären.

Am Anfang der Methodik steht die Reifenabriebproduktion. Die Berechnungen ergeben, dass in der Schweiz auf den Hochleistungsstrassen und den übrigen Strassen pro Jahr rund 10'100 Tonnen Reifenabrieb produziert werden. Davon werden gemäss Modell rund 40 %, oder 4'000 Tonnen pro Jahr, in Oberflächengewässer eingetragen. 23 % gelangen in Schlämme von Strassenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA), von Kläranlagen und von Schlammfassern. 34 % werden weiträumig verweht und gelangen in Böden und 2 % werden in Strassenschultern abgelagert.

Zwei Drittel der Einträge in Oberflächengewässer stammen von Hochleistungsstrassen (HLS), grösstenteils aus Direkteinleitungen und aus Ölabscheidern. Die Anteile der Einträge inner- und ausserorts sind vergleichbar. Im Vergleich zu den übrigen Strassen erfolgen diese Einträge auf einer 20-fach kürzeren Strassenlänge mit entsprechend hohen Belastungen der Fliessgewässer. Ein Drittel der Einträge erfolgt von den übrigen Strassen. Davon fallen drei Viertel innerorts an, der Rest ausserorts und wie bei HLS mehrheitlich von Direkteinleitungen.

Massnahmen wie die Versickerung in der Strassenschulter oder wirkungsvolle SABA sind ausserorts wegen der eher zur Verfügung stehenden Fläche und der weniger dichten unterirdischen Infrastruktur einfacher machbar. Innerorts sind oft nur Absetzbecken oder dezentrale Schachtsysteme möglich, mit einem vergleichsweise geringeren Rückhalt: 65 % - 80% statt über 90 %. Zudem sind dezentrale Schachtsysteme im Unterhalt sehr teuer.

Bei dieser emissionsbasierten Betrachtung ergibt sich damit folgende Priorisierung, wobei in der jeweiligen Kategorie die Strassen mit den höchsten Einträgen Priorität haben: Hochleistungsstrassen ausserorts vor Hochleistungsstrassen innerorts, gefolgt von den übrigen Strassen innerorts und den übrigen Strassen ausserorts.

Wird immissionsorientiert die lokale Belastung der Fliessgewässer zur Priorisierung verwendet, zeigt sich, dass hauptsächlich kleine Fliessgewässer die höchsten Konzentrationen von Reifenabrieb und damit die höchste Belastung aufweisen. Mit zunehmender Grösse des Einzugsgebiets nimmt die Belastung bedingt durch Verdünnung flussabwärts ab.

Der Anteil der Einträge aus Hochleistungsstrassen ist bei den am höchsten belasteten Fliessgewässern am höchsten (84 %) und nimmt mit abnehmender Belastung der Fliessgewässer ab. Doch selbst bei mittelstark belasteten Fliessgewässern beträgt der Anteil der Hochleistungsstrassen 50 %, was deren hohe Priorität bei der Sanierung bestätigt. Die meisten hoch belasteten Fliessgewässer befinden also im Einflussbereich der Entwässerung von Hochleistungsstrassen, wobei die übrigen Strassen die Belastung gerade in Agglomerationen verstärken.

Die wichtigsten Massnahmen am Entwässerungssystem sind der Ersatz von Direkteinleitungen und alten Ölabscheidern mit der Versickerung in der Strassenschulter oder mit SABA mit hohem Rückhalt. Insgesamt kann mit Massnahmen am Entwässerungssystem unter optimistischen Annahmen eine Reduktion der Einträge um 50 % erzielt werden. Für eine höhere Reduktion sind Massnahmen bei der Reifenabriebproduktion auf der Strasse wie beispielsweise abriebärmere Reifen, flüssigere Fahrweise, Reduktion des Verkehrs und weitere notwendig.

Bei Hochleistungsstrassen sind Massnahmen an der Entwässerung im Rahmen der Unterhaltsplanung in etwa 40 bis 60 Jahren abgeschlossen, was zu einer erheblichen Reduktion der Einträge führen wird. Es kann erwartet werden, dass Massnahmen an der Entwässerung der übrigen Strassen mittel bis eher langfristig umgesetzt werden.

## 2 Ausgangslage

Reifenabrieb trägt neben Fahrbahnabrieb, Bremsabrieb und Verbrennungsrückständen und weiteren Quellen massgeblich zur Schadstoffbelastung des Strassenabwassers und damit zur Belastung von Oberflächengewässern und Böden bei. Dabei ist Reifenabrieb die grösste Quelle für den Eintrag von Mikroplastik in Oberflächengewässer [1].

Reifenabrieb besteht aus Mikroplastik, Russ und anorganischen Stoffen. Zu den anorganischen Stoffen gehört beispielsweise Zink, welches als Vulkanisationsbeschleuniger der Lauffläche des Reifens zu einem bis zwei Gewichtsprozent beigemischt wird. Für Zink gilt zudem in der Gewässerschutzverordnung des Bundes (GSchV [2]) eine Qualitätsanforderung für Oberflächengewässer. Die Lauffläche des Reifens enthält auch organische Stoffe, welche als organische Mikroverunreinigungen im Strassenabwasser gemessen werden können. Dasselbe gilt für andere organische Mikroverunreinigungen aus anderen Quellen am Fahrzeug [3-5].

Die Belastung der Oberflächengewässer und des Grundwassers durch die Einleitung oder die Versickerung von Strassenabwasser ist von der Art der Strassenentwässerung und der Behandlung des Strassenabwassers abhängig. Wird über das Bankett in die Strassenschulter entwässert, gelangt Reifenabrieb in die Böden der Strassenschultern. Oberflächengewässer werden in diesem Fall nicht belastet. Da Reifenabrieb in den Strassenschultern zurückgehalten wird, ist die Belastung des Grundwassers gering.

Erfolgt die Entwässerung von Strassen mittels Direkteinleitungen, gelangt Strassenabwasser unbehandelt in Oberflächengewässer. Bei der Behandlung mit einer Strassenabwasser-Behandlungsanlage (SABA) mit einem bewachsenem Sandfilter werden Schadstoffe, auch Reifenabrieb, mit Ausnahme hydraulischer Entlastungen wirksam zurückgehalten. Wie gut auf dies auf organische Mikroverunreinigungen zutrifft, ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

Massnahmen zur Reduktion des Eintrags von Reifenabrieb in Oberflächengewässer reduzieren die Schadstoffbelastung der Oberflächengewässer. Sie können bei der Strassenentwässerung oder bei der Produktion des Reifenabriebs auf den Strassen ansetzen. Letztere umfassen ein breites Spektrum von abriebärmeren Reifen, weniger problematischen Inhaltsstoffe in Reifen über beschleunigungsarmes Fahren bis hin zur Verkehrsreduktion oder Geschwindigkeitsreduktionen. Solche Massnahmen werden teilweise auch im Rahmen anderer umweltrelevanter Themen im Zusammenhang mit dem Strassenverkehr besprochen (CO<sub>2</sub> Reduktion, Lärmemission) und stehen in dieser Studie nicht im Fokus.

Die Priorisierung von Massnahmen am Entwässerungssystem setzt die Kenntnis darüber voraus, auf welchen Strassentypen wo wieviel Reifenabrieb produziert wird und wo Reifenabrieb in Oberflächengewässer eingetragen wird. Sind anschliessend die Faktoren zur Beurteilung der Belastung geklärt, kann die Priorität von Massnahmen festgelegt werden.

An dieser Stelle setzt diese Studie an. Im Rahmen dieses Projekts wird beschrieben, wie die Produktion von Reifenabrieb auf der Fahrbahn quantifiziert werden kann, wieviel Reifenabrieb zur Entwässerung gelangt und wieviel davon wo in Oberflächengewässer eingeleitet wird. Darauf basierend wird die Belastung der Oberflächengewässer mit unterschiedlichen Ansätzen beschrieben, worauf sich schliesslich die Priorisierung von Massnahmen am Entwässerungssystem abstützt.

### 3 Methodik und Grundlagen

In dieser Studie werden Hochleistungsstrassen und die übrigen Strassen mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehr von über 100 Fahrzeugen pro Tag (DTV) berücksichtigt. Die auf diesen Strassen produzierte Menge Reifenabrieb wird mit unterschiedlichen Ansätzen berechnet, welche auf Fahrleistungskilometern beruhen. Ein Ansatz multipliziert die Fahrleistungskilometer mit einem konstanten Reifenabriebwert, der andere nutzt zur Berechnung des Reifenabriebs die auf den Fahrleistungskilometern erbrachte Fahrenergie. Zur Berechnung der Verteilung des Reifenabriebs in der Umwelt und zur Abschätzung des Rückhalts wird mehrheitlich auf Zink als Indikator für Reifenabrieb zurückgegriffen. Bei den übrigen Strassen wurde die Entwässerung der Strassen anhand von Daten von Kantonen und Städten ermittelt und auf das Strassennetz extrapoliert. Bei Hochleistungsstrassen wurden Datenbanken des ASTRA zu Störfallrisiken (STR) und zur Strassenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA) verwendet. Zur Ermittlung der Belastung wird je ein Ansatz basierend auf den Einträgen der Strassenentwässerung, der Belastung von Teileinzugsgebieten sowie der Belastung Fließgewässern entwickelt.

Zur Beurteilung der Belastung von Oberflächengewässern mit Reifenabrieb, zur Abschätzung der Wirkung von Massnahmen und zur Priorisierung von Massnahmen stellen sich folgende Fragen:

- Auf welchen Strassentypen und Strassenabschnitten wird wieviel Reifenabrieb produziert?
- Wie viel Reifenabrieb gelangt ins Entwässerungssystem, wieviel in die Böden?
- Wie gross sind die Anteile der unterschiedlichen Entwässerungssysteme?
- Wie hoch ist der Rückhalt der unterschiedlichen Entwässerungssysteme?
- Wie werden Belastungsschwerpunkte in Oberflächengewässern identifiziert?

Die Systembestandteile, von der Produktion des Reifenabriebs auf der Fahrbahn bis zum Eintrag in Oberflächengewässer, sind schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Die Produktion von Reifenabrieb findet auf Hochleistungsstrassen und den übrigen Strassen statt. Ein Teil der Strassen versickern das Strassenabwasser in der Strassenschulter, der grössere Anteil wird im Trenn- oder Mischsystem entwässert und gelangt mit unterschiedlicher Behandlung ins Oberflächengewässer.

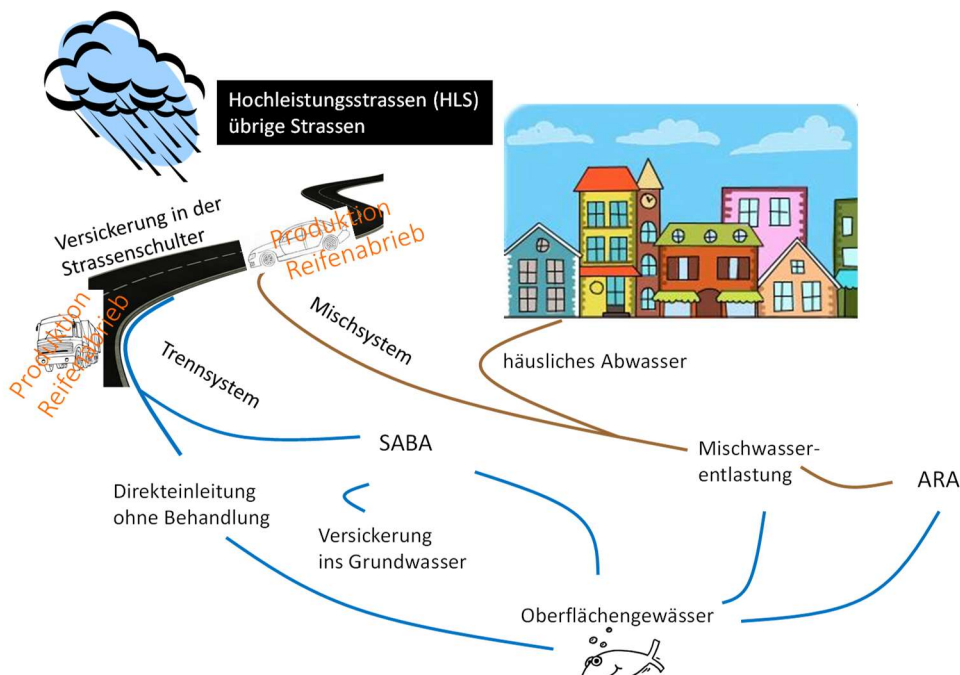


Abbildung 1 Entwässerungstypen der Strassen- und Siedlungsentwässerung.

Daten zur Quantifizierung der Elemente und Prozesse in Abbildung 1 in der räumlichen Auflösung von Strassenabschnitten stehen heute nur teilweise zur Verfügung. Zwar sind Daten zum Strassennetz der Schweiz, die Längen einzelner Strassenabschnitte mit dem durchschnittlichen Verkehrsaufkommen sowie dem Lastwagenanteil grösstenteils bekannt und dank der Open Data Policy des Bundes einfach verfügbar.

Jedoch fehlen detaillierte Angaben zum Reifenabrieb von Personenwagen (PW) und Lastwagen (LKW) bei unterschiedlichen Fahrsituationen und auf unterschiedlichen Strassen. Diesbezüglich gibt es bisher nur durchschnittliche Werte und auch nur für Personenwagen. Ebenso sind Angaben zur Entwässerungsart von Strassen nur in wenigen Kantonen und Städten vorhanden.

Diese Studie hat somit, neben der Fragestellung der Priorisierung von Massnahmen zur Reduktion der Belastung der Oberflächengewässer mit Reifenabrieb, auch zum Ziel, eine Methodik zu entwickeln, um die fehlenden Daten auf Strassenabschnittsebene zu extrapolieren.

Eine solche Methodik bedingt, dass unterschiedliche Ansätze, beispielsweise zur Berechnung des Reifenabriebs angewendet werden. Unterschiedliche Ansätze zeigen, wie robust die Ergebnisse und damit die Aussagen sind und welche Faktoren einen Einfluss auf die Berechnungen haben. Die in dieser Studie verwendete Methodik basiert auf derjenigen des Berichts "Mikroplastik: Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer" [6]. Für die vorliegende Fragestellung wurde die Methodik, deren einzelne Teile anschliessend beschrieben sind, massgeblich erweitert.

## **3.1 Produktion und Verteilung von Reifenabrieb**

### **3.1.1 Strassennetz, Fahrleistungskilometer**

Die Grundlage zur Berechnung der Produktion von Reifenabrieb sind das Strassennetz und die darauf gefahrenen Kilometer unterschiedlicher Fahrzeugkategorien. Das Strassennetz wird unterschieden nach Hochleistungsstrassen (HLS) sowie nach den übrigen Strassen.

Die Fahrleistungskilometer wurden wie folgt berechnet, und zwar für Strassen mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehr von über 100 Fahrzeugen pro Tag. Unterschieden werden Personenwagen und Lastwagen. Busse werden zu den Lastwagen gezählt.

- Fahrleistungskilometer = Strassenabschnittlänge \* Anzahl Fahrzeuge nach Klassen

### **3.1.2 Berechnung der Menge Reifenabrieb**

Die Ursache der Fortbewegung eines Fahrzeugs ist die Kraftübertragung vom Reifen auf die Fahrbahn. Diese ist nur durch Reibung möglich, wodurch Reifenabrieb entsteht. Je mehr Kraft pro Zeit, also Leistung, übertragen wird, desto höher ist der Reifenabrieb. Beispielsweise ist der Reifenabrieb bei häufigem Beschleunigen und Abbremsen höher als bei konstanter Geschwindigkeit, da die eingesetzte Energie höher ist. Im Extremfall, nämlich wenn die auf die Fahrbahn übertragene Leistung zu gross wird, drehen die Räder durch, oder rutschen bei starkem Bremsen ohne Bremsassistent (ABS), und die Energie wird hauptsächlich in Reifenabrieb und Wärme umgesetzt.

Die Kraftübertragung ist variabel. Neben der Energieübertragung spielen Faktoren wie Reifenzusammensetzung, der Fahrzeugtyp, Temperatur, Oberfläche der Fahrbahn und weitere eine wichtige Rolle. Insofern ist es plausibel, dass die Angaben von Reifenherstellern stark differieren.

Erstaunlich ist jedoch, dass es keine standardisierten Angaben zum Abrieb unterschiedlicher Reifentypen, beispielsweise für PW oder LKW und für unterschiedliche Fahrsituationen gibt. Solche werden erst in den nächsten Jahren durch sich in Entwicklung befindende Methoden zur Bestimmung des Reifenabriebs zur Verfügung stehen.



Zur Quantifizierung des Reifenabriebs von PW wird der Mittelwert von 117 mg/km verwendet, wobei das Spektrum im Bereich von 60 mg/km bis 200 mg/km liegt [7]. Angaben zu Abriebwerten von LKW-Reifen sind spärlich und reichen vom 10- bis 30-fachen Werten eines PW [8]. Diese Abriebwerte werden zur Berechnung des Reifenabriebs der vier Modelle verwendet (Tabelle 1).

Typ	Model	Abrieb / Energie	Geschwindigkeit HLS ausserorts / innerorts	Geschwindigkeit übrige Strassen
Fahrleistungskilometer (FLK)	1	FLK * 117 mg/km	Nicht relevant	Nicht relevant
	2	FLK PW * 117 mg/km FLK LKW * 1170 mg/km		
Fahrleistungskilometer (FLK) + Energie	3	PW 0.73 g/kWh LKW 7.3 g/kWh	PW 120 / 90 LKW 90 / 90	PW 80 / 50 LKW 80 / 50
	4	Analog Modell 3, zusätzlich übrige Strassen innerorts Faktor 1.5		

**Tabelle 1** Modelle zur Berechnung der Produktion von Reifenabrieb. HLS=Hochleistungsstrassen. FLK=Fahrleistungskilometer. PW=Personenwagen, LKW=Lastwagen.

### Fahrleistungskilometerbasierte Ansätze

Einer der Ansätze zur Berechnung der Produktion von Reifenabrieb basiert ausschliesslich auf den Fahrleistungskilometern. Dazu werden die pro Strassenabschnitt gefahrenen Kilometer (Fahrleistungskilometer) mit dem spezifischen Abrieb multipliziert. Mit diesem Ansatz gibt es zwei Varianten:

- Modell 1: Für alle Fahrzeugkilometer wird derselbe Abrieb verwendet.
- Modell 2: Für LKW wird der zehnfache Abrieb verwendet.

### Energiebasierter Ansatz

Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrbedingungen bei der Quantifizierung des Reifenabriebs, wie beispielsweise unterschiedliche Geschwindigkeiten und Verkehrsdynamik innerorts und ausserorts, wird ein energiebasierter Ansatz verwendet. Dabei wird angenommen, dass der Reifenabrieb linear mit der eingetragenen Energie zunimmt.

Für PW wird, wie bei Modell 2, ein Reifenabrieb von 117 mg/km verwendet, für LKW das Zehnfache. Der Zusammenhang zwischen dem Energieeintrag und dem produzierten Reifenabrieb wird wie folgt hergestellt:

- Pro 100 km Fahrstrecke braucht ein PW mit Elektroantrieb durchschnittlich 16 kWh
- Pro 100 km Fahrstrecke produziert ein PW 11.7 g Reifenabrieb (117 mg/km)
- Pro kWh entspricht dies  $11.7 \text{ g} / 16 \text{ kWh} = 0.73 \text{ g} / \text{kWh}$

Der Gesamtenergieeintrag wird mittels Fahrleistungskilometer, aufgeteilt nach PW und LKW für jeden Strassenabschnitt aufsummiert. Zur Berechnung der Fahrenergie werden folgende Faktoren berücksichtigt:

- Modell 3: Fahrgeschwindigkeit gemäss Tabelle 1. Für 50 km/h wird eine Leistung am Rad von 4 kW, für 80 km/h eine von 10 kW für 90 km/h von 13 kW und für 120 km/h eine Leistung von 27 kW verwendet.
- Modell 4: Für Beschleunigungen (stop and go) innerorts vor Lichtsignalanlagen etc. wird bei PW die Leistung um Faktor 1.5 von 4 kW auf 6 kW erhöht.

Die verwendeten Geschwindigkeiten sind die maximalen Werte gemäss Strassentyp. In Realität ist die effektive Geschwindigkeiten geringer, wie es in der Modellierung zur Berechnung der

Auswirkung der Geschwindigkeitsreduktion auf die CO<sub>2</sub>-Produktion belegt ist [9]. Steigungen wurden in einer zusätzlichen Variante ebenfalls implementiert. Aufgrund der Unsicherheiten mit der Berechnung der Leistung wurde diese Variante nicht weiterverfolgt.

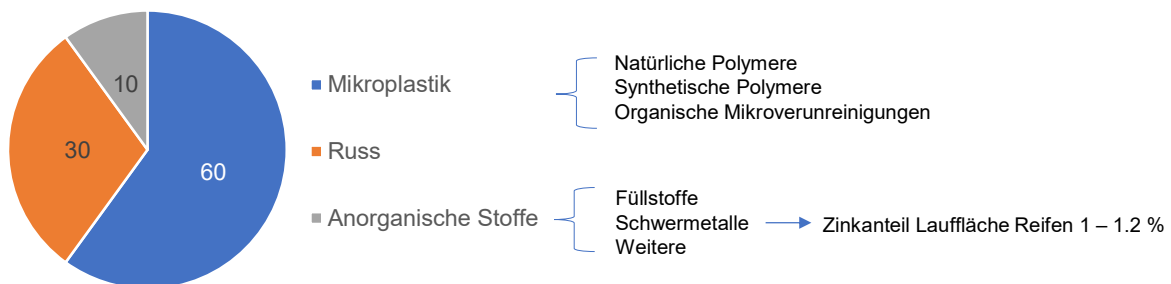
### 3.1.3 Reifenabrieb im Strassenabwasser

Standardisierte Methoden zur Messung von Reifenabrieb im Strassenabwasser gibt es heute noch nicht. Deshalb wird zur Abschätzung der Konzentrationen von Reifenabrieb im Strassenabwasser, zur Verteilung in der Umwelt sowie zum Rückhalt im Entwässerungssystem und in Behandlungsanlagen auf Indikatorstoffe zurückgegriffen. Indikatorstoffe erfüllen folgende Anforderungen möglichst gut:

- Sie liegen nur im Reifenabrieb vor.
- Sie werden im Strassenabwasser standardmässig gemessen.
- Sie werden bei der Leistungsbeurteilung von SABA verwendet.

Reifenabrieb setzt sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, zu 60 % aus Mikroplastik, zu 30 % aus Russ und zu 10 % aus anorganischen Stoffen zusammen. Bei Letzteren ist Zink ein wichtiger Bestandteil, mit einem Anteil zwischen 1 und 1.2 % am Reifenmaterial der Lauffläche [10].

Die Fraktionierung des Reifenabriebs und des Zinks nach partikulärer und gelöster (kleiner 0.45 um Durchmesser der Partikel) Fraktion ist im unteren Teil von Abbildung 2 dargestellt. Mikroplastik, Russ und anorganische Stoffe liegen mehrheitlich als Partikel oder Kolloide vor, weniger als gelöste Stoffe. Zink hingegen, welches bei Funktions- und Leistungsprüfungen von SABA standardmässig gemessen wird, liegt sowohl in partikulärer als auch in gelöster Form vor [11-13].



Zusammensetzung von Reifen		Partikuläre Stoffe	Gelöste Stoffe
60 %	Mikroplastik	X	x
30 %	Russ	X	(x)
10 %	anorganische Stoffe	X	x
Gemessen bei Leistungsprüfungen		GUS, Zink, Kupfer	Zink, Kupfer

**Abbildung 2** Zusammensetzung von Reifenabrieb, partikuläre und gelöste Anteile.

Die mittlere Zinkkonzentration im Strassenabwasser von Hochleistungsstrassen und Strassen mit einem DTV über 15'000 beträgt 449 ug/l bei einer Spannweite zwischen 153 und 904 ug/l [13]. Abschätzungen zeigen, dass davon ein Drittel bis die Hälfte von Reifenabrieb stammt. Der übrige Eintrag erfolgt von zinkhaltigen Beschichtungen von Rückhaltesystemen oder anderen beschichteten Installationen im Strassenbereich und an Fahrzeugen.

Zink ist somit ein idealer Indikator für Reifenabrieb. Ein hoher Zinkrückhalt in SABA ist auch ein Beleg für einen hohen Rückhalt von Reifenabrieb, der partikulären Stoffe als auch der gelösten Schwermetalle. Bei bewachsenen Sandfiltern liegen typische Ablaufkonzentrationen unterhalb von 10 µg/l [13], was einem Zinkrückhalt von über 95 % entspricht. Die gesamten ungelösten Stoffe (GUS), also Partikel mit einem Durchmesser über 0.45 µm, würden ebenfalls in Frage kommen, sind jedoch weniger spezifisch als Zink und weniger sensitiv.

### 3.1.4 Verteilung von Reifenabrieb in der Umwelt

Nach der Produktion auf der Fahrbahn wird Reifenabrieb in der Umwelt verteilt. Bei Trockenwetter verbleibt Reifenabrieb je nach Fahrgeschwindigkeit und Partikelgrösse auf der Fahrbahn, oder wird mit dem Fahrtwind verfrachtet und auf strassennahen Oberflächen abgelagert. Die weiträumigere Verteilung in der Umwelt erfolgt auch durch meteorologisch bedingten Wind.

Bei Regen wird Reifenabrieb von Strassen abgewaschen und gelangt je nach Entwässerungsart entweder in die Strassenschulter oder in ein Entwässerungssystem. Ein Teil des Reifenabriebs gelangt bei Regen mit dem Spritzwasser ebenfalls auf strassennahe Oberflächen, also entweder auf Böden oder vor allem Innerorts auf undurchlässige Oberflächen [14].

Die weiträumigere Verteilung des Reifenabriebs ist ausserorts ausgeprägter als innerorts. Dies ist der Fall, da innerorts Häuser oder Strassenschluchten, ähnlich wie Lärmschutzwände, die weiträumige Verteilung begrenzen. Entsprechend lagern sich innerorts mehr Partikel auf Oberflächen ab, welche bei Regen abgewaschen werden und zur Entwässerung gelangen. Dies bewirkt, dass innerorts der Anteil des zur Entwässerung gelangenden Reifenabriebs höher ist als ausserorts, was sich bei stark befahrenen Strassen innerorts teilweise in hohen Zulaufkonzentrationen von Schadstoffen äussert.

Abschätzungen zur Verteilung des Reifenabriebs und damit zum Eintrag in ein Entwässerungssystem sind in Tabelle 2 beschrieben, unterteilt nach Strassentyp und bezüglich innerorts und ausserorts [6]. Bei HLS ausserorts gelangen 55 % des produzierten Reifenabriebs in ein Entwässerungssystem. Bei den anderen Strassen ausserorts 50 %, da der Pannenstreifen fehlt. Innerorts wird bei beiden Strassentypen davon ausgegangen, dass 80 % des Reifenabriebs in ein Entwässerungssystem eingetragen werden, falls nicht in die Strassenschulter entwässert wird.

Verteilung	Hochleistungsstrassen		übrige Strassen	
	ausserorts	innerorts	ausserorts	innerorts
In ein Entwässerungssystem	55	80	50	80
In Böden	45	20	50	20
Summe	100	100	100	100

**Tabelle 2** Verteilung des Reifenabriebs nach der Produktion auf der Fahrbahn.

## 3.2 Rückhalt in der Strassenentwässerung

### 3.2.1 Entwässerungsarten von Strassen

Die Entwässerungstypen von Strassen, aufgeteilt nach dezentraler und zentraler Entwässerung, sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Zur dezentralen Entwässerung zählen die Versickerung in der Strassenschulter und teilweise die direkte Einleitung in Gewässer ohne Behandlung. Ebenso dezentral ist die Behandlung in Schachtsystemen [15].

Wird Strassenabwasser mit einem Entwässerungssystem zu einer Behandlungsanlage geleitet oder gepumpt, wird dies als zentrale Behandlung bezeichnet. Dabei kann der Behandlungstyp unterschiedlich sein. Die Einleitung ins Mischsystem, also in die öffentliche Kanalisation, entspricht einer zentralen Behandlung, da das Strassenabwasser zu einer zentralen Kläranlage gelangt.

Beschreibung	dezentral	zentral
Versickerung in der Strassenschulter	X	
Direkte Einleitung in die Gewässer	X	X
Entwässerung und Behandlung mit Ölrückhaltebecken		X
Entwässerung und Behandlung mit SABA		X
Entwässerung via Mischwasserkanalisation in die ARA (Mischsystem)		X
Dezentrale Schachtsysteme	X	

**Tabelle 3** Entwässerungstypen von Strassen.

### Innerorts

In Städten und Siedlungen wurde die Strassenentwässerung historisch bedingt oft an das bereits bestehende Mischsystem angeschlossen [16]. Strassenabwasser gelangt damit zusammen mit dem häuslichen Abwasser zur Kläranlage. Die zweite Entsorgungsart war die direkte Einleitung in Oberflächengewässer ohne vorgängige Behandlung.

Mit der Propagierung des Trennsystems im Gewässerschutzgesetz (GSchG, [17]) wurde die Grundlage zur separaten Ableitung und Behandlung von Strassenabwasser gelegt. Die Änderung des Mischsystems in ein Trennsystem mit Behandlung ist innerorts jedoch oft schwierig umzusetzen, da der Untergrund mit Werkleitungen besetzt und die Fläche begrenzt sind.

Möglichkeiten zur Sanierung von Direkteinleitungen sind der Einsatz von zentralen Absetzbecken oder mit SABA mit Retentionsfilterbecken, welche relativ viel Fläche brauchen. Direkteinleitungen können auch mit dezentralen Schachtsystemen ersetzt werden. Allerdings erzielen solche Systeme nur eine begrenzte Schadstoffentfernung und sind im Unterhalt sehr teuer [13].

### Ausserorts

Ausserorts erfolgt die Strassenentwässerung heute, ebenfalls historisch bedingt, häufig via Direkteinleitung oder einfachem Ölabscheider in ein Oberflächengewässer. Dies ist der Fall, da die Versickerung in der Strassenschulter früher oft wegen Bedenken bezüglich Havarien aufgehoben wurde. Die Entwässerung im Mischsystem ist ausserorts selten.

Der Bau von SABA oder die Änderung von Direkteinleitungen zur Versickerung in der Strassenschulter ist ausserorts einfacher als innerorts, da ausserorts mehr Fläche zur Verfügung steht. Dies kann zu Nutzungskonflikten mit landwirtschaftlichen genutzten Flächen führen.

## 3.2.2 Heutige Entwässerung der Strassen

Die Daten zur Entwässerungsart von Hochleistungsstrassen basieren auf den Fachapplikation Störfallrisiken auf Nationalstrassen (STR, [18]) und wurde mit Angaben der MISTRA-SABA Datenbank ergänzt [19]. In der STR-Datenbank sind 75 % der HLS bezüglich der Entwässerungsart erfasst, und zwar auf dem Stand von 2012. Bei übrigen Strassen werden die Daten vom Kanton und der Stadt Zürich verwendet, welche betreffend Entwässerungsart am detailliertesten sind.

Für die Berechnungen werden die in Tabelle 2 beschriebenen Anteile der unterschiedlichen Entwässerungstypen verwendet. Daten des Kantons Bern zeigen bei den übrigen Strassen vergleichbare Grössenordnungen. Die MISTRA-SABA Daten wurden lokal referenziert.

Entwässerungstyp	Hochleistungsstrassen		übrige Strassen	
	ausserorts	innerorts	ausserorts	innerorts
Direkteinleitung	37	39.7	60	40
Strassenschulter	2.8	0.1	17	1
Ölabscheider	41	59.2	-	-
Mischsystem	-	-	10	55
Behandlung in SABA	19.2	1	13	4
Summe	100	100	100	100

**Tabelle 4** Anteile der Entwässerungstypen bezüglich ausserorts / innerorts und Strassentyp. Ob HLS ans Mischsystem angeschlossen sind, konnte nicht eruiert werden.

### 3.2.3 Behandlung von Strassenabwasser

Mit dem Inkrafttreten der BUWAL-Wegleitung "Entwässerung von Verkehrswegen" im Jahr 2002 wurde die Behandlungsart von Strassenabwasser gemäss unterschiedlichen Anforderungen für den Schutz des Grundwassers und von Oberflächengewässern festgelegt. Der bewachsene Bodenfilter galt damals als Standardverfahren für die Behandlung. Allerdings ist dessen Flächenbedarf hoch. Deshalb wurde begonnen, alternative SABA-Typen zur zentralen Behandlung von Strassenabwasser zu testen.

Heute ist die Eignung unterschiedlicher Behandlungsverfahren für Strassenabwasser bekannt und in der Dokumentation "Strassenabwasser-Behandlungsverfahren - Stand der Technik" beschrieben [13]. Für die Anforderungsstufe «erhöht» werden heute die dezentrale Versickerung in der Strassenschulter und die zentrale Behandlung von Strassenabwasser mit bewachsenen Sandfiltern empfohlen. Diese benötigen im Gegensatz zu Bodenfiltern weniger Fläche und haben tiefere Unterhaltskosten. Für die Anforderungsstufe «erleichtert» sind Absetzbecken im Dauerstau gemäss Vorgaben zur Gestaltung und Dimensionierung empfohlen.

### 3.2.4 Rückhalt von Entwässerungssystemen und Behandlungstypen

Der Rückhalt der Entwässerungsarten und Behandlungstypen für Reifenabrieb, basierend auf dem Rückhalt von Zink und Messungen von Mikroplastik, sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Bei Direkteinleitungen wird von einem Rückhalt 15 % ausgegangen. Bei der Einleitung ins Mischwassersystem wird Strassenabwasser nur teilweise in der Kläranlage behandelt, denn bei stärkeren Regen wird ein Teil Mischwassers zusammen mit dem Strassenabwasser unbehandelt in Oberflächengewässer entlastet. Obwohl der Wirkungsgrad der Kläranlage für Reifenabrieb über 90 % beträgt [20, 21], sinkt er dadurch und wird für die Berechnungen hier mit 70 % beziffert. Der Rückhalt in den Böden der Strassenschulter beträgt 100 %, wenn die Schulter nicht an eine Mulde/Rigole mit Einleitung ins Oberflächengewässer ausgebildet ist.

Typ	Beschreibung	Rückhalt
Entwässerungssystem	Direkteinleitung	15 %
	Mischwasserkanalisation: ARA inkl. Entlastungen	50 - <b>70</b> - 80 %
	Versickerung in der Schulter	100 %
Behandlung	Ölabscheider	30 %
	Absetzbecken gemäss Stand der Technik	70 %
	Bewachsene Sandfilter	90 %
	Dezentrale Behandlung / Absetzbecken	70 %

**Tabelle 5** Rückhalt von Reifenabrieb der Entwässerungssysteme und bei der Behandlung.

Basierend auf dem Rückhalt von Zink wird bei Ölabscheidern Typ B ein Rückhalt von 30 % verwendet. Bei Absetzbecken gemäss dem Stand der Technik erreicht der Rückhalt unter Berücksichtigung des hydraulischen Wirkungsgrads 70 %, was auch dezentralen Schachtsystemen entspricht. Für bewachsene Sandfilter und Bodenfilter wird ein Wirkungsgrad von 90 % verwendet [6].

Die Wirkungsgrade in Tabelle 5 sind repräsentativ für die partikulären Stoffe des Reifenabriebs wie Mikroplastik, Russ, PAK und anorganische Stoffe, ebenso für partikuläre und gelöste Schwermetalle. Damit gelten die in dieser Studie gemachten Aussagen auch für die genannten Schadstoffe im Strassenabwasser.

Bei organischen Mikroverunreinigungen zeigen Abschätzungen, dass bei der Behandlung mit bewachsenen Sandfiltern bei einigen dieser Stoffe von einem wirkungsvollen Rückhalt ausgegangen werden kann [5]. Bei Absetzbecken und dezentralen Schachtsystem ist der Rückhalt gelöster Mikroverunreinigungen abhängig von den chemisch-physikalischen Eigenschaften, vor allem betreffend Adsorption an Partikel. Zur Klärung dieser Fragen sind Forschungsarbeiten im Gang.

### **3.3 Bestimmung der Belastungsschwerpunkte**

#### **3.3.1 Schadstoffeinträge**

##### **Regen- und Trockenwetter, Dynamik**

Die Einträge von Strassenabwasser in Oberflächengewässer erfolgen während oder nach Niederschlägen. Bei Trockenwetter finden keine Einträge statt<sup>1</sup>. Bei Regen sind die Einträge zeitlich und örtlich variabel, denn eine Regenfront bewegt sich mit wechselnder Regenintensität.

Die Schadstoffbelastung erfolgt zuerst lokal an der Einleitstelle und verbreitet und verdünnt sich anschliessend, wenn keine weiteren Einträge erfolgen, flussabwärts. Deshalb nehmen die Schadstoffkonzentrationen ab. Während dem anschliessenden Trockenwetter erfolgt entlang der Fliessstrecke eine weitere Verdünnung.

##### **Stoffsenken**

Zusätzlich zur Verdünnung entlang der Fliessstrecke bewirkt die Ablagerung von Reifenabrieb im Sediment von Seen und möglicherweise von Gewässern eine weitere Abnahme der Frachten und Konzentrationen. Bei diesem Prozess werden Reifenabriebpartikel entweder direkt im Sediment abgelagert oder sie adsorbieren an Partikel im Gewässer natürlichen Ursprungs, welche bei Regen eingetragen wurden. Auch gelöste Schadstoffe können durch die Adsorption an Partikel im Sediment abgelagert werden.

Die Belastung der Sedimente in Fliessgewässern durch Einleitungen aus der Siedlungsentwässerung ist anhand von erhöhten Schadstoffgehalten, unter anderem von Zink, nachgewiesen [22]. Allerdings wird für diese Studie nicht davon ausgegangen, dass sich dort wesentliche Schadstoffdepots entwickeln, da Sedimente bei Starkregen resuspendiert und weitertransportiert werden, bis sie in Seen oder strömungsberuhigten Zonen sedimentieren.

Entsprechend wird in dieser Studie für die Modellierung des Rückhalts von Reifenabrieb in den grösseren Seen ein Wert von 95 % angenommen. Dieser Rückhalt resultiert aus der langen Aufenthaltszeit in Seen von wenigen Monaten bis zu über einem Jahr [23]. Zum Vergleich: Die Aufenthaltszeit in Absetzbecken gemäss heutigem Stand der Technik liegt zwischen wenigen Stunden und mehreren Tagen bei einem Rückhalt von 70 % oder darüber für GUS und Zink. Messungen belegen auch, dass partikuläre Stoffe bereits im Nahbereich von Einleitstellen sedimentieren [24].

---

<sup>1</sup> Vorausgesetzt die Fremdwasserabtrennung ist bei Vorhandensein von Fremdwasseranfall gelöst.



## Konzentrationen und Frachten

Verdünnung entlang der Fliessstrecke und Stoffsenken sind Gründe, weshalb die Zinkkonzentrationen bei der NADUF Messstelle im Rhein in Basel "Palmrheinbrücke", meistens deutlich unter 5 ug/l liegen [25]. Dieser Wert unterschreitet die Qualitätsanforderung gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV) von 20 ug/l deutlich. Diese tiefen Konzentrationen dürfen allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Frachten infolge des hohen Durchflusses beträchtlich sind. Für die genannte Messstelle resultieren bei einem Abfluss von 500 m<sup>3</sup>/s Zinkfrachten von 100 kg pro Tag.

## Emissions- und immissionsorientierte Betrachtung

Die Belastung der Oberflächengewässer findet zuerst unmittelbar an der Einleitstelle statt. Je höher die eingeleitete Fracht im Verhältnis zum Teileinzugsgebiet oder zum Gesamteinzugsgebiet ist, desto höher ist die lokale Belastung. Diese verstärkt sich lokal, wenn der vorgelagerte Fliessgewässerabschnitt bereits eine Vorbelastung aufweist.

Zur Bestimmung von Belastungsschwerpunkten werden zwei Ansätze verwendet. Der erste Ansatz bezieht sich auf den lokalen Eintrag der Strassenentwässerung beziehungsweise in Teileinzugsgebiete, der zweite berücksichtigt die Vorbelastung des Fliessgewässers. Für beide Ansätze werden jeweils gemittelte Frachten verwendet. Diese erlauben den Vergleich der Belastung der Gewässer untereinander. Aussagen zu Konzentrationsspitzen und zeitlichen oder örtlichen Belastungsverläufen sind damit nicht möglich.

### 3.3.2 Emissionsbasierte Belastung

Der Eintrag in Oberflächengewässer wird zuerst anhand der spezifischen Einträge aus einem Strassenabschnitt bestimmt. Je höher diese sind, desto höher ist die Belastung an der Einleitstelle. Dieser Ansatz fokussiert auf die Einleitstelle oder präziser auf die Einleitungen in aus einem Strassenabschnitt und beschreibt die pro Strassenlänge eingeleitete Menge an Reifenabrieb unabhängig der Grösse des Fliessgewässers.

Ein Bezug zur Grösse des Oberflächengewässers wird erzielt, indem der spezifische Eintrag pro Teileinzugsgebiet berechnet wird. Dazu werden die rund 22'000 Teileinzugsgebiete (TEZG) der Oberflächengewässer verwendet [26]. Diese lokalen Einzugsgebiete korrelieren in den meisten Gegenden der Schweiz, mit Ausnahme von Karstgebieten, mit der Höhe des Abflusses eines Gewässers und sind präziser verfügbar als gemittelte Abflüsse.

Mit dieser Betrachtungsweise werden die Einträge relativiert. Bei vergleichbaren Einträgen und abnehmender Fläche eines TEZG nimmt die Belastung beispielsweise zu. Umgekehrt nimmt die Belastung vergleichbarer Fläche eines TEZG mit abnehmenden Einträgen ab.

Allerdings ergibt sich bei kleinen lokalen Einzugsgebieten und grossen Oberflächengewässern eine Verfälschung, indem beispielsweise bei einem kleinen TEZG der Aare die spezifische Belastung genauso hoch ausgewiesen wird wie bei einem kleinen Fliessgewässer bei vergleichbarem Eintrag und Grösse des TEZG.

### 3.3.3 Immissionsorientierte Belastung

Bei der immissionsorientierten Betrachtung wird die Vorbelastung eines Oberflächengewässers vor einem Teileinzugsgebiet berücksichtigt. Die Vorbelastung wird berechnet, indem die vor dem betrachteten Teileinzugsgebiet aufsummierte eingetragene Fracht mit derjenigen des aktuellen Teileinzugsgebiets addiert und anschliessend durch die Summe der vorgelagerten Einzugsgebietsfläche mit dem aktuellen TEZG dividiert wird. Der resultierende Wert entspricht einer spezifischen Belastung in kg/km<sup>2</sup>/Tag.

Diese Betrachtung wird ansatzweise bei der Umsetzung des Gewässerschutzes in der Richtlinie des ASTRA zur Entwässerung der Nationalstrassen [15] sowie in der Richtlinie des VSA [28] wird die Belastung implizit durch die Berücksichtigung der Grösse der Fliessgewässer und damit der Einzugsgebiete berücksichtigt. Dabei wird bei der Anforderung an die Behandlung das

hydraulische Einleitverhältnis als Beurteilungskriterium verwendet. Je kleiner der Durchfluss und damit das Einzugsgebiet, eines Fließgewässers im Verhältnis zum eingeleiteten Strassenabwasser ist, desto höher sind die Behandlungsanforderungen.

Ist der Quotient von der im TEZG eingetragenen Fracht zur TEZG - Fläche grösser als der entsprechende Wert oberhalb des Einzugsgebiets, nimmt die Belastung entlang eines Fließgewässers zu, sonst ab. Entsprechend haben die Grösse und Belastung des vorgelagerten Einzugsgebiets einen wesentlichen Einfluss, genauso wie der Rückhalt in Seen von 95 %.



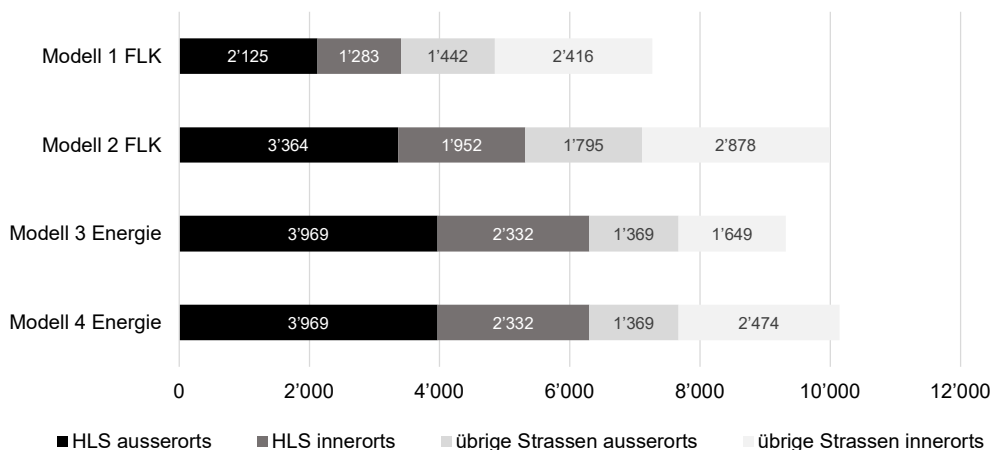
## 4 Eintrag Oberflächengewässer und Massnahmen

Die jährliche Produktion von Reifenabrieb in der Schweiz beträgt rund 10'100 Tonnen. Davon gelangen 40 % in Oberflächengewässer, 34 % in Böden, 21% Schlämme von Behandlungsanlagen, 3 % in Retentionsfilterbecken von SABA und bei der Versickerung über das Bankett 2 % in die Strassenschultern. 56 % des Eintrags in Oberflächengewässer stammen von Direkteinleitungen, 32 % von bestehenden, teilweise schnell durchströmten Ölabscheidern von HLS und 10 % dem Mischsystem der übrigen Strassen. Der Eintrag aus SABA mit bewachsenen Sandfiltern ist vernachlässigbar. Die Einträge erfolgen je zu rund einem Drittel von den HLS innerorts und ausserorts und zu rund einem Viertel von den übrigen Strassen innerorts. 9 % stammen von den übrigen Strassen ausserorts. Mit einer weitestgehenden Sanierung von Direkteinleitungen und Ölabscheidern von HLS und den Direkteinleitungen der übrigen Strassen könnte der Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer im Bereich von 50 % reduziert werden. Realistisch betrachtet ist die Reduktion geringer, weshalb Massnahmen zur Verringerung der Produktion von Reifenabrieb eine zusätzliche Alternative sein können.

### 4.1 Produktion von Reifenabrieb

#### 4.1.1 Nach Strassentyp und Lage der Strasse

Die je nach Berechnungsmodell pro Jahr produzierte Menge Reifenabrieb liegt zwischen 7'266 und 10'148 Tonnen (Abbildung 3). Die geringste Menge resultiert mit Modell 1, welches die Fahrleistungskilometer von PW und LKW gleich gewichtet. Entsprechend ist die Produktion mit Modell 2, welches für den Abrieb von LKW pro Leistungskilometer einen zehnfach höheren Wert verwendet als bei PW, mit rund 1'000 Tonnen pro Jahr höher. LKW haben somit einen massgeblichen Beitrag am Reifenabrieb.



**Abbildung 3** Produktion von Reifenabrieb in Tonnen pro Jahr, dargestellt nach Strassentyp und bezüglich innerorts / ausserorts. HLS=Hochleistungsstrassen.

Das fahrenergiebasierte Modell 3 ergibt eine im Vergleich zu Modell 2 rund 700 Tonnen pro Jahr geringere Produktion von Reifenabrieb. Dieser Unterschied ist gering, da beide Modelle auf Fahrleistungskilometern beruhen. Der fahrenergiebasierte Ansatz von Modell 3 verändert allerdings die Verteilung der Produktion. Im Vergleich zu Modell 2 erhöht sich der Anteil von HLS um 14 % auf 68 % (Abbildung 4). Dies zeigt den Einfluss der höheren Geschwindigkeit auf HLS und dem damit verbundenem höheren Energieeintrag.

Ebenfalls eine Veränderung der Anteile zieht die Erhöhung des Abriebs innerorts auf den übrigen Strassen um den Faktor 1.5 nach sich (Modell 4). Dadurch erhöht sich der Anteil im Vergleich zu Modell 3 innerorts um 6 % von 18 % auf 24 % (Abbildung 4). Die insgesamt produzierte Menge Strassenabrieb erhöht sich im Vergleich zu Modell 3 um 800 t/Jahr auf rund 10'150 t/Jahr.

## Produktion nach Strassentyp

Mit Ausnahme von Modell 1, welches aufgrund der vereinfachten Beschreibung der Abriebproduktion nicht mehr näher betrachtet wird, ist der Anteil der Produktion von Reifenabrieb auf HLS mit 54 % bis 62 % höher ist als der auf den übrigen Strassen (Abbildung 4).

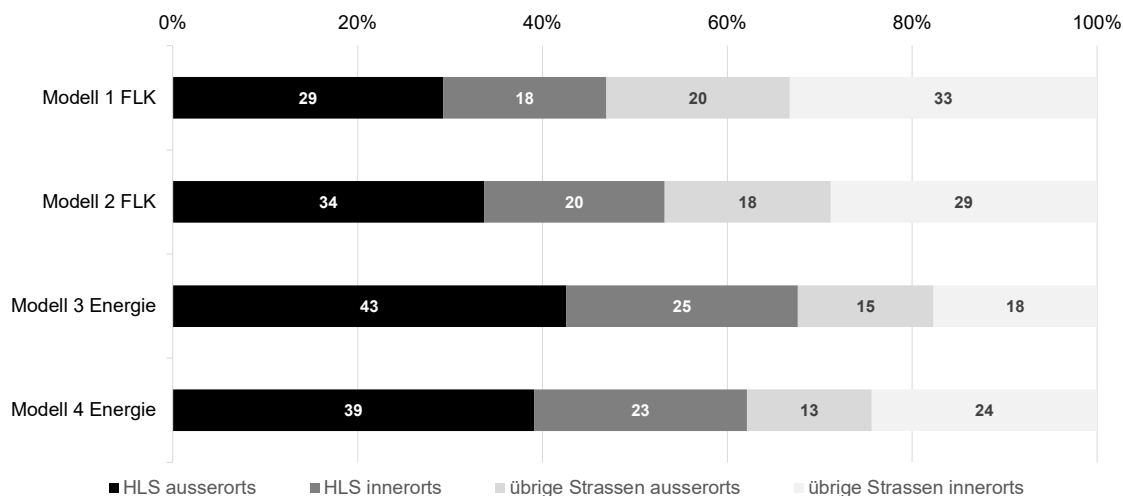
## Produktion innerorts und ausserorts

Bezüglich der Lage der Strassen zeigt sich, dass ausserorts mit einem Anteil von 52 % bis 58 % mehr Reifenabrieb produziert wird als innerorts mit 42 % bis 48 %. Bei den HLS beträgt der Anteil ausserorts rund zwei Drittel gegenüber einem Drittel innerorts (39 % und 23 %). Bei den übrigen Strassen ist das Verhältnis umgekehrt mit einem höheren prozentualen Anteil innerorts.

## Vergleich der Modelle und mit früherer Studie

Die einzelnen Anteile der Modelle zwei bis vier stimmen grösstenteils überein, was zeigt, dass die Ergebnisse robust sind. Die höchsten Anteile an der Produktion haben die HLS ausserorts. An zweiter oder dritter Stelle sind entweder die HLS innerorts oder die übrigen Strassen innerorts. Allen Modellen ist gemeinsam, dass der Anteil der übrigen Strassen ausserorts am geringsten ist.

Die Produktion, berechnet mit Modell 4 mit rund 10'150 Tonnen pro Jahr ist im Vergleich zur früheren Studie mit 13'500 Tonnen pro Jahr geringer [6]. Dies ist der Fall, da in der genannten Untersuchung die gesamtschweizerische Produktion von den Berechnungen der Stadt und des Kantons Zürich auf die gesamte Schweiz hochgerechnet wurde.



**Abbildung 4** Prozentuale Verteilung der Produktion von Reifenabrieb nach Strassentyp und bezüglich innerorts / ausserorts. HLS=Hochleistungsstrassen. FLK= Fahrleistungskilometer.

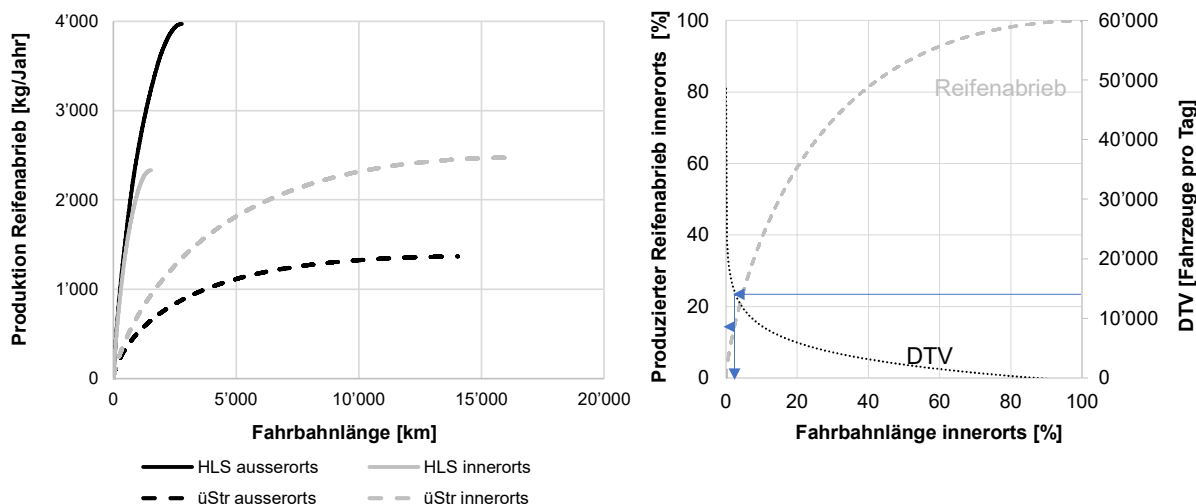
### 4.1.2 Anteile der Strassenlängen an der Produktion

Im Vergleich zu den übrigen Strassen findet bei HLS die Produktion von Reifenabrieb auf einer deutlich geringeren Strassenlänge statt, was anhand der spezifischen Produktion deutlich wird:

- HLS ausserorts / innerorts 2.4 / 2.6 kg/km/Jahr
- Übrige Strassen ausserorts / innerorts 0.1 / 0.13 kg/km/Jahr

Die spezifische Produktion von Reifenabrieb auf HLS ist innerorts und ausserorts rund zwanzigfach höher als jene der übrigen Strassen. Die Bedeutung der HLS widerspiegelt sich auch anhand der gesamtschweizerischen Fahrleistung [31]. Bei der Sanierung der Entwässerung von HLS kann somit pro Strassenkilometer im Vergleich zu den übrigen Strassen eine wesentlich grössere Menge Reifenabrieb behandelt werden.

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 5 auf der linken Seite im Detail dargestellt, indem die summierte Menge des produzierten Reifenabriebs in absteigender Reihenfolge als Funktion der summierten Strassenlänge dargestellt ist. Sichtbar ist die im Vergleich zu den übrigen Strassen vergleichbare oder höhere Produktion von Reifenabrieb auf kürzerer Fahrbahnlänge.



**Abbildung 5** Reifenabriebproduktion als Funktion der Fahrbahnlänge (links). Anteil des produzierten Reifenabriebs der übrigen Strassen innerorts als Funktion des DTV und der Fahrbahnlänge (rechts).

Die Entwässerung der HLS wird im Rahmen der UPlanNS saniert [15]. Bei den übrigen Strassen richten sich die Erfordernisse an die Behandlung nach den Belastungspunkten und der Entwässerungsart [28]. Notwendig ist eine Behandlung für hoch belastetes Strassenabwasser über einem durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) von rund 14'000 Fahrzeugen pro Tag.

Die Berechnungen, dargestellt in Abbildung 5 (rechts) zeigen, dass bei einem DTV über 14'000 2.5 % der Fahrbahnlänge innerorts (401 km) betroffen sind, worauf 15 % des Reifenabriebs produziert werden. Dieselben Grössenordnungen gelten auch ausserorts.

Bei einer Reduktion des Schwellenwerts des DTV auf 10'000 müsste das Strassenabwasser von 7.5 % der Strassenlänge behandelt werden, auf welchen 32 % des Reifenabriebs produziert würden. Die zu sanierende Strassenlänge würde sich damit verdreifachen, die Menge des behandelbaren Reifenabriebs "nur" verdoppeln. Bei einem DTV-Schwellenwert von 5'000 wären 25 % der Strassenlänge und 66 % des Reifenabriebs betroffen (Tabelle 6, blau hervorgehoben).

DTV	Anteil Strasse	Strassenlänge (iO)	Produzierter Reifenabrieb	Spezifischer Reifenabrieb
Fahrzeuge pro Tag	%	km	%	% Abrieb / % Strasse
> 14'000	2.5 (2.5)	401 (-)	15 (-)	6.0
10'000-14'000 (>10'000)	5.0 (7.5)	804 (1'205)	17 (32)	3.4
5'000-10'000 (> 5'000)	17.5 (25.0)	2'818 (4'023)	34 (66)	1.9
2'500-5'000 (>2'500)	25.0 (50.0)	4'007 (8'031)	22 (88)	0.9

**Tabelle 6** Produzierter Anteil Reifenabrieb pro Strassenlänge als Funktion des DTV. Kursive Angaben in Klammern bezeichnen die summierten Werte der DTV-Klassen. iO=innerorts.

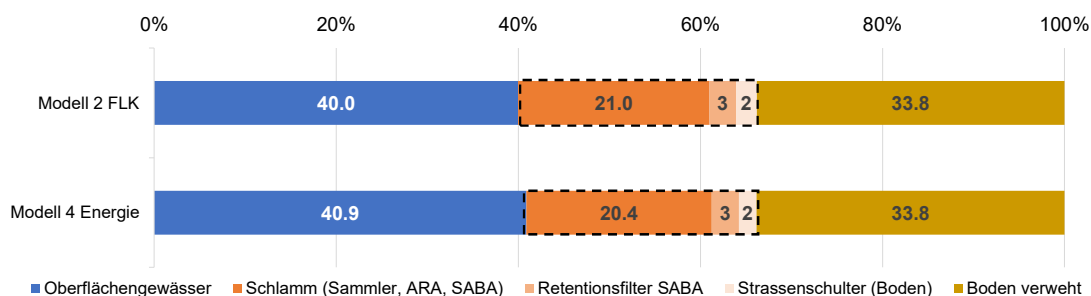
Mit abnehmendem DTV-Schwellenwert sinkt die pro Kilometer produzierte Menge Reifenabrieb. Während bei einem DTV > 14'000 pro Prozent Strassenlänge 6 % Reifenabrieb produziert werden, sind es bei einem DTV von 2'500 bis 5'000 siebenmal weniger (0.9 %). Entsprechend steigen die Kosten pro Kilogramm Reifenabrieb auch um das Siebenfache.

In Anbetracht dessen, dass die Sanierung der Entwässerung der übrigen Strassen vor allem innerorts infolge der dichten Infrastruktur und fehlenden Fläche sehr kostenintensiv ist (Investition und Unterhalt), ist es fraglich ob generell betrachtet eine Sanierung unter dem heutigen Schwellenwert von 14'000 Fahrzeugen pro Tag sinnvoll ist.

## 4.2 Einträge in die Umwelt

Die Anteile der Einträge in die Umwelt sind wenig abhängig von den Modellen, wie es die Ergebnisse von Modell 2 und Modell 4 zeigen. Der Eintrag in Oberflächengewässer ist bei beiden Modellen mit rund 40 % am höchsten, gefolgt vom Eintrag in Böden mit rund 34 %. Der Eintrag in Schlämme beträgt rund 21 %, derjenige in Retentionsfilterbecken von SABA 3 % und derjenige in Strassenschultern 2 %.

Schlämme stammen von Schlammsammlern, Absetzbecken und Ölabscheidern sowie die Anteile des Strassenschlammes im Klärschlamm kommunaler Kläranlagen. Die Einträge in Oberflächengewässer und in Böden sind am höchsten, weshalb diese hinsichtlich Massnahmen in den folgenden beiden Kapiteln weiter aufgeschlüsselt sind. Dazu können auch die 2 % der Einträge in Strassenschultern dazugezählt werden, welche separat ausgewiesen sind.

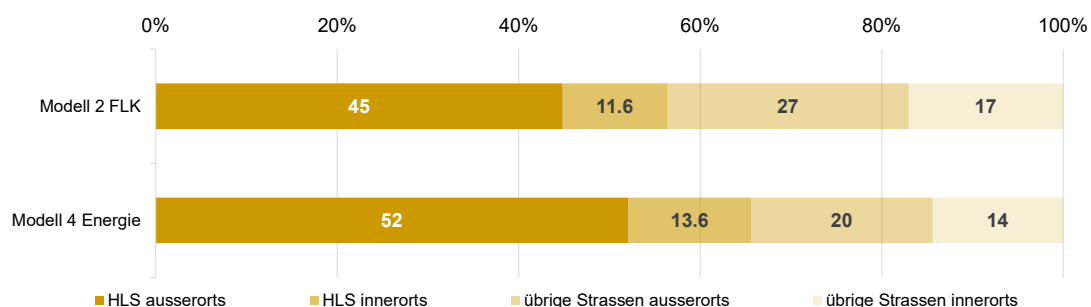


**Abbildung 6** Eintrag von Reifenabrieb in die Umwelt. FLK=Fahrleistungskilometer.

### 4.2.1 Herkunft der Einträge in Böden

Die Herkunft der Einträge in Böden mit einem Anteil von 34 % an der Gesamtproduktion aus Abbildung 6 ist in Abbildung 7 aufgeschlüsselt, wiederum berechnet für Modell 2 und Modell 4. Die Reihenfolge nach Strassentyp und der Lage der Strasse ergibt sich wie folgt:

- HLS ausserorts 45-52%
- übrige Strassen ausserorts 20-27%
- übrige Strassen innerorts 14-17%
- HLS innerorts 12-14%



**Abbildung 7** Herkunft des Eintrags von Reifenabrieb in Böden aufgeteilt nach Strassentyp und innerorts / ausserorts. FLK=Fahrleistungskilometer. HLS=Hochleistungsstrassen.

Nach Strassentyp aufgeteilt sind die Anteile der Hochleistungsstrassen mit 57 % und 66 % höher als diejenigen der übrigen Strassen mit 34 % und 43 %. Die höchsten Anteile stammen von den HLS ausserorts, gefolgt von den übrigen Strassen ausserorts. Insgesamt erfolgen damit 72 % des Eintrags in Böden ausserorts, und 28 % innerorts. Dies widerspiegelt den höheren Anteil des produzierten Reifenabriebs, der ausserorts in Böden gelangt (Tabelle 2). Massnahmen zur Verringerung des Eintrags in Böden sind primär ausserorts anzusetzen und betreffen in erster Linie die Massnahmen zur Verringerung Produktion von Reifenabrieb.

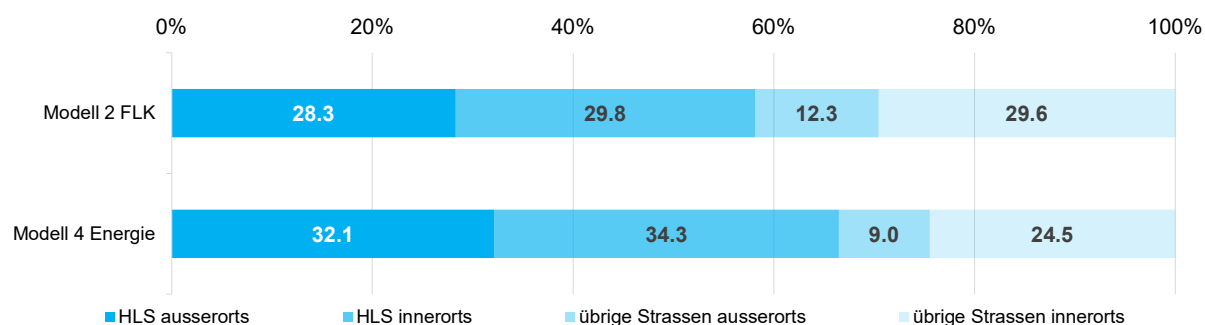
#### 4.2.2 Herkunft der Einträge in Oberflächengewässer

Die Herkunft der Einträge in Oberflächengewässer aus Abbildung 6 ist nach Strassentyp und der Lage der Strasse bezüglich innerorts und ausserorts in Abbildung 8 dargestellt. Die Reihenfolge der Einträge, welche sich zwischen Modell 2 und Modell 4 nicht unterscheidet, lautet wie folgt:

- HLS innerorts 30 – 34 %
- HLS ausserorts 28 – 32 %
- übrige Strassen innerorts 25 – 30 %
- übrige Strassen ausserorts 9 – 12 %

Dabei sind die Anteile der HLS bezüglich innerorts und ausserorts bei beiden Modellen vergleichbar. Der Anteil der Hochleistungsstrassen liegt zwischen 58 % und 66 %, derjenige der übrigen Strassen zwischen 42 % und 34 %. Von Strassen ausserorts werden 41 %, und von Strassen innerorts entsprechend 59 % eingetragen.

Der Grund für die höheren Anteile innerorts liegt bei HLS an der geringen SABA-Dichte innerorts. Verstärkend wirkt, dass innerorts ein Grossteil der SABA vom Typ her Ölabscheider oder Absetzbecken sind, welche im Vergleich zu Retentionsfilterbecken einen geringeren Rückhalt aufweisen. Da innerorts zudem ein kleinerer Teil des Reifenabriebs weiträumig verweht wird, erhöht sich bei beiden Strassentypen der zur Entwässerung gelangende Anteil.



**Abbildung 8** Herkunft der Einträge des Reifenabriebs in Oberflächengewässer nach Strassentyp und innerorts / ausserorts. FLK=Fahrleistungskilometer, HLS=Hochleistungsstrassen.

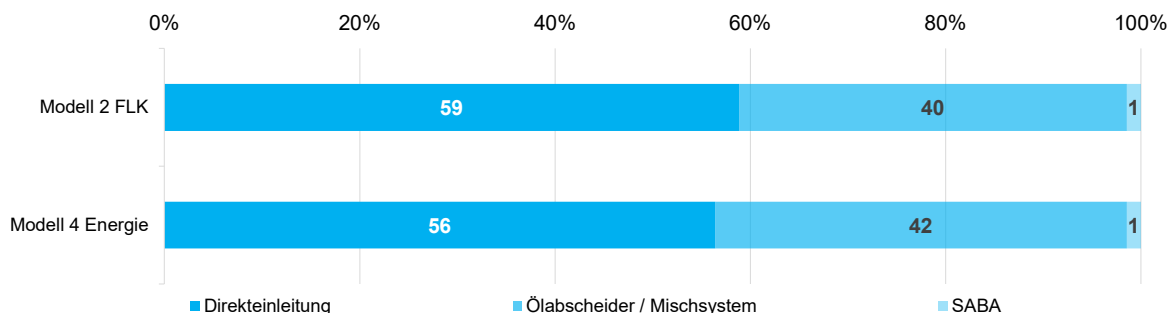
#### Herkunft nach Entwässerungssystem

Die Anteile der Einträge in Oberflächengewässer aus Abbildung 6, aufteilt nach der Art des Entwässerungssystems, sind in Abbildung 9 dargestellt und für beide Modelle vergleichbar.

- Direkteinleitungen mit 56 % und 59 %
- Ölabscheider von HLS und Mischsystem mit 40 % und 42 %
- Behandeltes Strassenabwasser von SABA 1 %

Dies verdeutlicht die Wichtigkeit der Sanierung von Direkteinleitungen und von Ölabscheidern bei der Priorisierung von Massnahmen. Sichtbar wird auch die Wirkung SABA mit einem Anteil an

Einträgen von 1 %, was durch den allerdings noch geringen Anteil der über SABA entwässerten Strassenlänge (Tabelle 4) etwas relativiert wird.

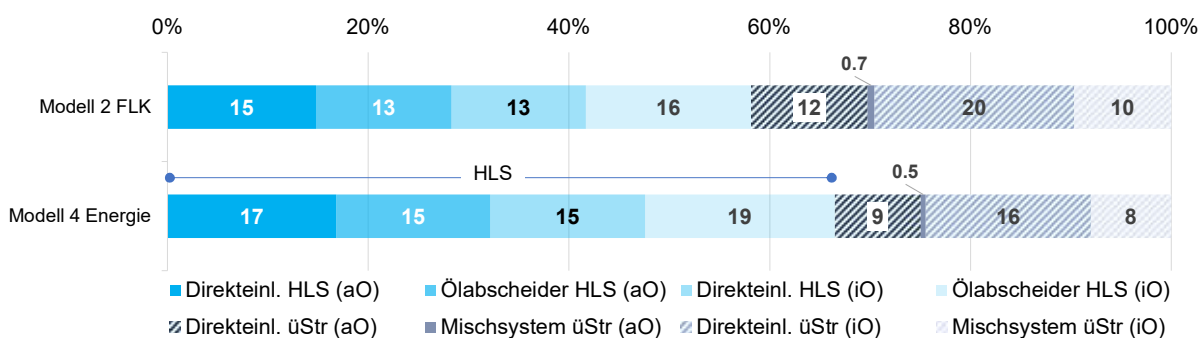


**Abbildung 9** Verteilung des Eintrags nach Art des Entwässerungssystems.

### Herkunft nach Strassentyp, innerorts / ausserorts und dem Entwässerungssystem

Die einzelnen Anteile der Einträge, aufgeschlüsselt nach Strassentyp, der Lage der Strasse bezüglich innerorts und ausserorts sowie nach Art des Entwässerungssystem, sind in Abbildung 10 dargestellt. Wie bisher sind Ergebnisse beider Modelle anteilmässig vergleichbar. Im Folgenden wird auf Modell 4 fokussiert, da dieses die unterschiedlichen Einflussfaktoren wie höhere Geschwindigkeit auf HLS sowie höheren Abrieb auf den übrigen Strassen innerorts abbildet.

Bei den HLS sind die Anteile der Direkteinleitungen ausserorts und innerorts sowie der Einleitungen aus Ölabscheidern ausserorts mit Werten zwischen 15 % und 17 % vergleichbar. Der Anteil der Einleitungen aus Ölabscheidern innerorts ist mit 19 % etwas höher. Bei den übrigen Strassen erfolgt der höchste Eintrag aus Direkteinleitungen innerorts mit einem Anteil von 16 %, gefolgt vom Direkteinleitungen ausserorts mit 9 % und Einleitungen aus dem Mischsystem innerorts mit 8 %. Der Anteil aus dem Mischsystem ausserorts ist mit 0.5 % gering.



**Abbildung 10** Anteile der Einträge nach Entwässerungsart, Strassentyp und innerorts / ausserorts. HLS=Hochleistungsstrassen, üStr.=übrige Strassen, iO=innerorts, aO=ausserorts.

### Priorisierung von Massnahmen anhand der eingetragenen Mengen

Mit einem Anteil am Eintrag von zweit Dritteln liegt die Priorität zur Umsetzung von Massnahmen bei den Hochleistungsstrassen. Aufgrund der vergleichbaren Anteile der eingetragenen Mengen ergibt sich keine weitere Priorisierung bezüglich innerorts und ausserorts oder nach Entwässerungssystem. Bei den übrigen Strassen liegt die Priorisierung aufgrund der eingetragenen Mengen auf Direkteinleitungen innerorts und ausserorts. Einleitungen aus dem Mischsystem innerorts folgen erst anschliessend.

Bei der Sanierung von Direkteinleitungen ist der zusätzlich erreichbare Rückhalt im Vergleich zur Sanierung von Ölabscheidern höher, weshalb Direkteinleitungen erste Priorität haben. Werden die Eingetragenen Mengen und der Rückhalt kombiniert ergibt sich folgende Priorisierung:

- Direkteinleitungen bei HLS innerorts und ausserorts, Direkteinleitungen bei den übrigen Strassen innerorts.
- Ölabscheider bei HLS innerorts und ausserorts.
- Direkteinleitungen ausserorts, Einleitungen in das Mischsystem innerorts.

Bezüglich Machbarkeit ist die Sanierung der Strassenentwässerung ausserorts in der Regel einfacher zu bewerkstelligen als innerorts, was unabhängig von der Belastung von Fliessgewässern betrachtet, ein Argument für die Bevorzugung der Sanierung ausserorts ist. Präzisierungen erfolgen in Kapitel 6.

Wird die Strassenentwässerung vom Mischsystem abgekoppelt und separat behandelt, hat dies den Vorteil, dass Entlastungen aus dem Mischsystem abnehmen und der Gesamtwirkungsgrad bei der Behandlung des kommunalen Abwassers zunimmt.

## 4.3 Massnahmen zur Verringerung des Eintrags

### 4.3.1 Massnahmen bei der Produktion von Reifenabrieb

Massnahmen zur Verminderung des Eintrags von Reifenabrieb in Oberflächengewässer reduzieren entweder die Produktion von Reifenabrieb oder erhöhen den Rückhalt von Reifenabrieb im Entwässerungssystem.

Die Palette von Massnahmen zur Reduktion der Produktion reicht unter anderem von Verkehrsverlagerungen, der Reduktion des PW- und LKW-Verkehrs über Geschwindigkeitsreduktionen und leichtere Fahrzeuge, energie- und damit einem abriebsparenden Fahrstil bis hin zu abriebärmeren Reifen. Einige dieser Massnahmen werden bereits im Rahmen anderer umweltrelevanten Aspekte wie beispielsweise der Lärminderung oder der CO<sub>2</sub>-Reduktion besprochen.

Der Vorteil solcher Massnahmen ist es, dass die diffuse Belastung der Böden und der Oberflächengewässer abnehmen. Massnahmen am Entwässerungssystem hingegen reduzieren «nur» den Eintrag in Oberflächengewässer. Der Fokus dieser Studie liegt auf dem Entwässerungssystem, welches im Rahmen der Sanierung der Strassen angepasst wird.

### 4.3.2 Massnahmen am Entwässerungssystem

#### Änderungen der Entwässerungsart

Die Änderung der Entwässerungsart richtet sich nach den heutigen Vorgaben zur Entsorgung und Behandlung von Strassenabwasser mit folgender Priorität [13, 15, 28]:

1. Dezentrale Versickerung in der Strassenschulter.
2. Behandlung in SABA gemäss dem Stand der Technik und den Anforderungen an die Einleitung in Fliessgewässer oder die Versickerung in den Untergrund.
3. Einleitung in die Mischwasserkanalisation

Erste Priorität hat die Versickerung in der Strassenschulter, da sie der Schadstoffentfernung gemäss der Anforderung «erhöht» entspricht, die Unterhaltskosten dieser Entwässerungsart gering sind und weil Strassenschultern durch Spritzwasser bereits mit Schadstoffen belastet sind. Die Versickerung in der Strassenschulter kann aus diversen Gründen, wie der nicht zur Verfügung stehenden Fläche, Nutzungskonflikten, geotechnischen Aspekten und weiteren nicht überall



umgesetzt werden. Schweizweit liegt das theoretische Potential bei etwa 30 % [27]. Das praktische Potential ist tiefer und liegt im Bereich von 10 %.

Die Sanierung von Direkteinleitungen mit der Versickerung in der Strassenschulter hat hinsichtlich der Erhöhung des Rückhalts von Reifenabrieb das höchste Potenzial von 85 %. In Tabelle 7 sind die Werte der Erhöhung des Rückhalts bei der Änderung der Entwässerungsart oder des Behandlungstyps zusammengefasst.

Bei der Änderung von Direkteinleitungen zur zentralen Behandlung muss möglicherweise das Entwässerungssystem angepasst werden, indem das Strassenabwasser zu einem Tiefpunkt, wo sich die SABA befindet, geleitet oder gepumpt wird. Dies ist ausserorts in der Regel einfacher umzusetzen als innerorts.

Bereich	Massnahme	Erhöhung Rückhalt
Änderung der Entwässerungsart	Direkteinleitung ändern zur Versickerung über die Schulter	85 %
	Direkteinleitungen ändern zu zentraler Behandlung	60 - 80 %
	Direkteinleitungen aufheben, Einleitung ins Mischsystem	65 %
	Mischwasserbehandlung ändern in Trennsystem mit Behandlung	0 - 25 %
Änderung Behandlungstyp	(Alte) Ölabscheider mit modernen Absetzbecken ersetzen.	40 %
	(Alte) Ölabscheider mit bewachsenen Sandfiltern ersetzen.	60 %
	Absetzbecken mit bewachsenen Sandfiltern ersetzen.	25 %
	Direkteinleitungen mit dezentraler Behandlung ersetzen (nur bei den übrigen Stassen).	55 %

**Tabelle 7** Massnahmen am Entwässerungssystem zur Erhöhung des Rückhalts von Reifenabrieb.

Für die Sanierung von Direkteinleitungen ist die Einleitung ins Mischsystem innerorts eine weitere Möglichkeit. Sie setzt eine genügend grosse Kapazität der Kanalisation und der ARA voraus. Ansonsten nehmen die Mischwasserentlastungen zu, was die Gesamtwirkung schmälert. Umgekehrt kann die Strassenentwässerung innerorts vom Mischsystem abgekoppelt werden, wenn die Behandlung des Strassenabwassers im Trennsystem nach der Abkoppelung mindestens mit einem Absetzbecken erfolgt. Solche Massnahmen sind infolge der bestehenden Infrastruktur oft schwierig umsetzbar. Zudem ist immer auch die gesamte örtliche Siedlungsentwässerung in Betracht zu ziehen. Infolge der engen Verknüpfungen zur Siedlungsentwässerung werden diese beiden Sanierungsvarianten in dieser Studie bei den Massnahmen nicht berücksichtigt.

### Änderung des Behandlungstyps

Der Stand der Technik unterscheidet drei Anforderungsstufen «erleichtert», «standard» und «erhöht», wovon für diese Studie die beiden Anforderungsstufen erleichtert und erhöht verwendet werden. SABA gemäss der Anforderung erleichtert sind Absetzbecken im Dauerstau, SABA gemäss Anforderung erhöht sind mit Schilf bewachsene Sandfilter [13].

Die zentrale Behandlung von Strassenabwasser mit SABA ist, wie die Umstellung der Entwässerung dezentral auf zentral, innerhalb von Siedlungen infolge fehlender Flächen, Werkleitungskanälen und weiterer Faktoren schwieriger machbar als ausserhalb von Siedlungen.

Durch die Änderung des Behandlungstyps ist eine Erhöhung des Rückhalts zwischen 25 % bei der Ergänzung von Absetzbecken gemäss Stand der Technik mit bewachsenen Sandfiltern und 60 % beim Ersatz eines Ölabscheiders Typ B oder ähnlich mit einem bewachsenen Sandfilter. Auch bei der Änderung der Behandlung gilt, dass diese ausserorts einfacher umsetzbar ist als innerorts.



### 4.3.3 Massnahmen zur Abschätzung der Reduktion

Zur Abschätzung der Reduktion des Eintrags von Reifenabrieb in Oberflächengewässer wurden basierend auf den bisherigen Erkenntnissen drei Massnahmen ausgewählt. Diese Massnahmen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Nr.	Beschreibung	HLS		übrige Strassen	
		ausserorts	innerorts	ausserorts	innerorts
M1	Direkteinleitungen sanieren mit der Versickerung in der Strassenschulter	X	-	X	-
M2	Direkteinleitungen und ÖA sanieren mit modernen Absetzbecken	X	X	-	X
M3	Absetzbecken sanieren mit SABA mit bewachsenem Sandfilter	X	-	-	-
	Direkteinleitungen sanieren mit SABA mit bewachsenem Sandfilter	X	X	X	-

**Tabelle 8** Massnahmen zur Verminderung des Eintrags von Reifenabrieb in Oberflächengewässer.

#### M1 – Erhöhung der Versickerung in der Strassenschulter ausserorts

Bei dieser Massnahme werden Direkteinleitungen bei HLS und den übrigen Strassen ausserorts um je 10 % mit der Versickerung in der Strassenschulter ersetzt. Damit erhöht sich der Anteil der Versickerung in der Strassenschulter gemäss Tabelle 3 bei HLS von 2.8 auf 12.8 % und bei den übrigen Strassen von 17 % auf 27 %.

#### M2 – Anpassung der Behandlung innerorts und ausserorts Teil 1

Diese Massnahme ändert die Behandlung innerorts. Sie sieht vor, bei den übrigen Strassen in Städten und Agglomerationen 35 % der Direkteinleitungen mit Absetzbecken zu sanieren, denn Absetzbecken können flächensparend unterirdisch gebaut werden. Dies ist zwar kostenintensiv, entschärft aber den Konflikt mit dem Flächenbedarf etwas, da die Fläche über solchen Absetzbecken anderweitig genutzt werden kann. Eine Alternative ist die Versickerung in bewachsenen Mulden kombiniert mit Retention, was dem Schwammstadt-Konzept entspricht. Allerdings muss dazu vor allem innerorts die benötigte Fläche oft erst verfügbar gemacht werden. Das Schwammstadt-Konzept sieht vor, Niederschläge dezentral zu speichern, verzögert zu versickern, zu verdunsten oder zu nutzen. Dies trägt dazu bei, den Wasserkreislauf zu schliessen und Eintrag des Oberflächenabflusses in das Misch- oder Trennsystem zu reduzieren [30].

Anstelle von unterirdischen Absetzbecken könnten auch dezentrale Schacht-Filterssystem eingesetzt werden. Diese haben einen ähnlich hohen Gesamtwirkungsgrad im Bereich von 70 %, sind aber im Betrieb und Unterhalt sehr teuer [13].

Bei Hochleistungsstrassen werden bei dieser Massnahme innerorts 25 % der Direkteinleitungen zugunsten der Behandlung mit Absetzbecken aufgehoben. Ebenso werden alle Ölabscheider, auch ausserorts, zu Absetzbecken gemäss dem Stand der Technik umgebaut.

#### M3 – Anpassung der Behandlung ausserorts und innerorts Teil 2

Diese Massnahme fokussiert auf Sanierungen ausserorts. Bei Hochleistungsstrassen werden 22 % der Direkteinleitungen neu mit SABA behandelt. Dadurch sinkt der Anteil der Direkteinleitungen auf 5 %. Zusätzlich werden alle Ölabscheider zu Absetzbecken umgebaut, wovon 30 % mit einem bewachsenen Sandfilter ergänzt werden. Innerorts werden 14.8 % der Absetzbecken zu SABA mit Retentionsfilterbecken umgebaut.

Bei den übrigen Strassen werden ausserorts die Hälfte der Direkteinleitungen aufgehoben und ebenfalls mit SABA mit bewachsenem Sandfilter ersetzt, was gemäss Kapitel 4.1.2 bereits als nicht mehr realistisch betrachtet werden kann.

### Einschätzung der Massnahmen M1 bis M3

In ihrer Summe entsprechen die Massnahmen M1 bis M3 einer weitestgehenden Sanierung der Entwässerung der HLS und der übrigen Strassen innerorts und ausserorts. Die Anteile an der Reduktion sind für alle drei Massnahmen in Tabelle 9 dargestellt.

Am höchsten sind die Veränderungen bei den Direkteinleitungen bei HLS und den übrigen Strassen und bei den Ölabscheidern bei HLS. Mit einem Anteil von nur noch 5 % haben sich die Direkteinleitungen bei HLS ausserorts um 32 % reduziert. Innerorts beträgt die Abnahme 24.7 %, womit der Anteil der Direkteinleitungen noch 15 % beträgt.

Ausserorts wurde der Anteil der Direkteinleitungen bei den übrigen Strassen von 60 % auf 25 % reduziert, innerorts beträgt er noch 5 % statt wie vorher 40 %. Nach der Umsetzung der Massnahmen gibt es bei HLS keine Ölabscheider des Typs B beziehungsweise schnell durchflossene Ölabscheider mehr. Der Anteil der Absetzbecken gemäss dem Stand der Technik hat vor allem innerorts stark zugenommen, nämlich 69.1 % bei HLS und 35 % bei den übrigen Strassen. Die Zunahme von SABA mit Schilf bewachsenen RFB erfolgt vor allem ausserorts.

Entwässerungsart / Behandlungstyp	Hochleistungsstrassen				übrige Strassen			
	ausserorts		innerorts		ausserorts		innerorts	
Direkteinleitung	5	- 32	15	- 24.7	25	- 35	5	- 35
Schulter	12.8	+ 10	0.1	0	27	+ 10	1	0
ARA	0	0	0	0	10	0	55	0
Ölabscheider	0	- 41	0	- 44	0	0	0	0
Moderne ASB	11	+ 11	69.1	+ 69.1	0	0	35	+ 35
Behandlung RFB	71.2	+ 52	15.8	0	38	+ 25	4	0

**Tabelle 9** Anteile der Entwässerungstypen nach der Sanierung mit Massnahmen M1 bis M3.

## 4.4 Reduktion des Eintrags

Mit der Umsetzung der Massnahmen M1 bis M3 wird der Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer um insgesamt 57 % reduziert (Tabelle 10, Abbildung 11). Ausserorts beträgt die Abnahme bei Hochleistungsstrassen 76 %, bei den übrigen Strassen 49 %. Innerorts beträgt die Abnahme 53 % bei HLS und 38 % bei den übrigen Strassen. Die Gründe für den höheren Rückhalt ausserorts ist der Einsatz von SABA mit bewachsenen Sandfiltern sowie der Erhöhung der Versickerung über die Strassenschulter. Innerorts wurden diese beiden Optionen infolge der oft begrenzten Flächenverfügbarkeit nur begrenzt berücksichtigt.

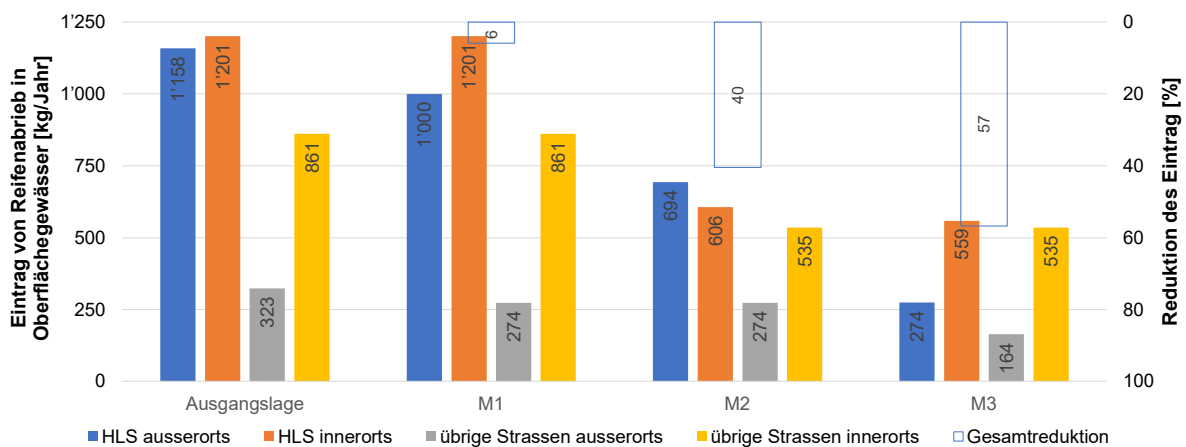
Innerorts ist die limitierte Erhöhung des Rückhalts hauptsächlich auf die Sanierung von Direkteinleitungen und Ölabscheidern mit Absetzbecken zurückzuführen. Zudem bleiben die Anteile des Mischsystems von 55 % mit einer Wirkung von 70 % bestehen. Der Rückhalt der einzelnen Massnahmen ist wie folgt beziffert:

- Massnahme M1 führt zu einer Reduktion von 14 % bei HLS ausserorts und 15 % bei den übrigen Strassen ausserorts führt zu einer Abnahme von insgesamt 6 %.
- Mit einer Gesamtabnahme von 34.6 % zeigt die Massnahme M2 die höchste Wirkung.
- Massnahme M3 führt insgesamt zu einer Reduktion von 16.3%.

Die beschriebenen Massnahmen entsprechend einer weitestgehenden Sanierung der Strassenentwässerung von HLS und den übrigen Strassen. Vor allem bei den übrigen Strassen setzt dies die Sanierung der Entwässerung eines grossen Teils der Strassen voraus (Kapitel 4.1.2), welche bereits bei den gemachten Annahmen wenig realistisch ist. Für einen höheren Rückhalt rücken damit Massnahmen zur Reduktion der Produktion von Reifenabrieb beschrieben in Kapitel 4.3.1 in den Vordergrund.

Nr.	Beschreibung	HLS		übrige Strassen		Pro Massnahme	Summe Massnahmen
		ausserorts	innerorts	ausserorts	innerorts		
M1	Versickerung Strassenschulter	14	0	15	0	5.9	<b>5.9</b>
M2	Direkteinleitungen und ÖA mit modernen ASB sanieren	26	49	0	38	34.6	<b>40.5</b>
M3	ASB zu SABA, Direkteinleitungen zu bew. Sandfilter	36	4	34	0	16.3	<b>56.8</b>
<b>Summe</b>		<b>76</b>	<b>53</b>	<b>49</b>	<b>38</b>		

**Tabelle 10** Reduktion der Einträge in Oberflächengewässer mit den Massnahmen M1 bis M3 in % zu heutigen Einträgen. ASB=Absetzbecken.



**Abbildung 11** Einträge in Oberflächengewässer. Heutige Werte und mit den Massnahmen M1 bis M3 sowie erzielbare Gesamtreduktion. HLS=Hochleistungsstrassen.

## 5 Belastungsschwerpunkte

Bei den Hochleistungsstrassen führen die pro Strassenabschnitt höheren Einträge dazu, dass sie örtlich stärker ins Gewicht fallen als diejenigen der übrigen Strassen. Die übrigen Strassen bewirken zwar auch punktuell hohe Einträge, jedoch nur auf verhältnismässig wenigen Strassenabschnitten und nicht in der Höhe der HLS. Die Einträge aus der Entwässerung der übrigen Strassen erfolgen jedoch in geringerem Ausmass auf einem langen Strassennetz. Folglich stammen die Einträge bei den am höchsten belasteten Teileinzugsgebieten hauptsächlich von HLS. Mit abnehmender Belastung der Teileinzugsgebiete nimmt der Anteil der Einträge der übrigen Strassen zu. Die am stärksten belasteten Fliessgewässer befinden sich deshalb nahe von Hochleistungsstrassen, in Agglomerationen und in Städten. In solchen Gebieten sind kleinere und mittelgrosse Gewässer am stärksten belastet. Bei den grossen Flüssen ist die Belastung bedingt durch die Verdünnung wesentlich geringer.

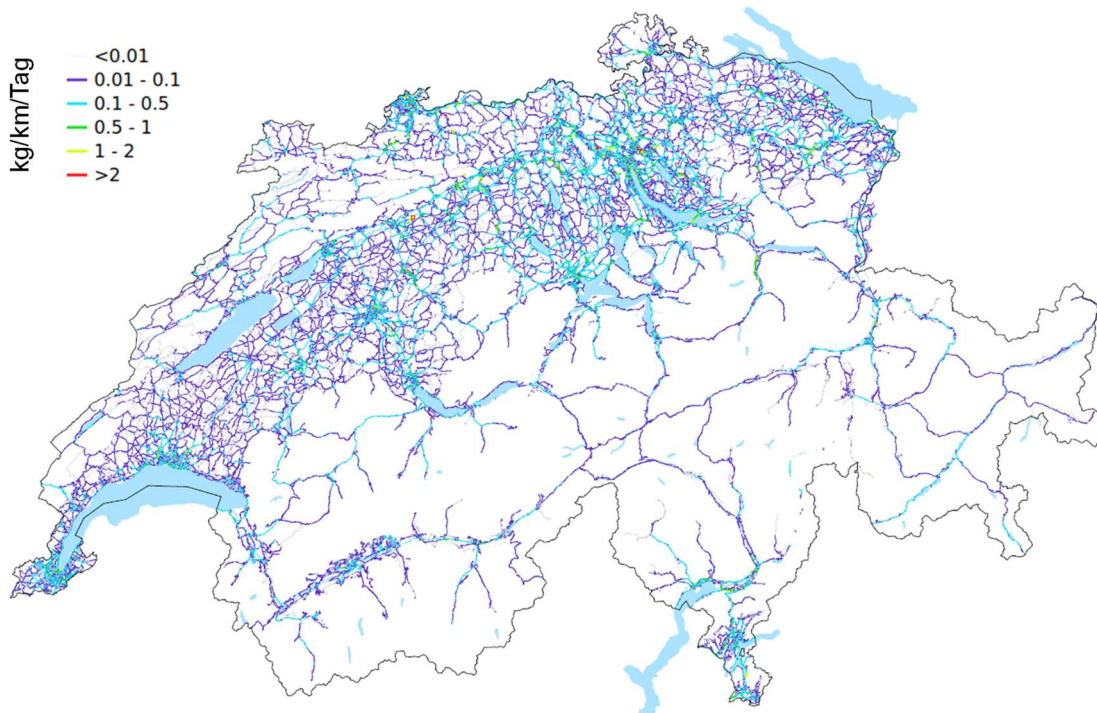
### 5.1 Basierend auf Einträgen der Strassenentwässerung

Beim ersten Ansatz werden die Belastungsschwerpunkte in Fliessgewässern anhand der spezifischen Einträge identifiziert. Berechnet wurden die Einträge in Kilogramm Reifenabrieb pro Kilometer Strassenlänge und pro Tag basierend auf Modell 4. Für Einträge aus HLS, dargestellt in Abbildung 12, korreliert die Belastung mit dem Verkehrsaufkommen. Die Einträge erfolgen mehrheitlich in den drei höchsten Belastungsklassen (grün, gelb und rot), wenige Ausnahmen wie die San Bernardino-Passstrasse erzielen die vierthöchsten Belastungsklasse (hellblau).

Die Einträge der übrigen Strassen sind mit derselben Skalierung in Abbildung 13 dargestellt. Zu sehen sind mehrheitlich Einträge der untersten drei Klassen (grau, dunkelblau, hellblau), vereinzelt gibt es Strassenabschnitte in grün und gelb. Der Vergleich der Einträge von HLS (Abbildung 12) mit denjenigen der übrigen Strassen (Abbildung 13) illustriert den in vorhergehenden Kapiteln festgestellte Sachverhalt: Die spezifischen Einträge der HLS sind höher als diejenigen der übrigen Strassen und konzentrieren sich auf einem kürzeren Strassennetz.



**Abbildung 12** Spezifischer Eintrag von Reifenabrieb: HLS mit SABA. Max=7.8 kg/km/Tag.



**Abbildung 13** Spezifischer Eintrag von Reifenabrieb: Übrige Strassen. Max=3.6 kg/km/Tag.

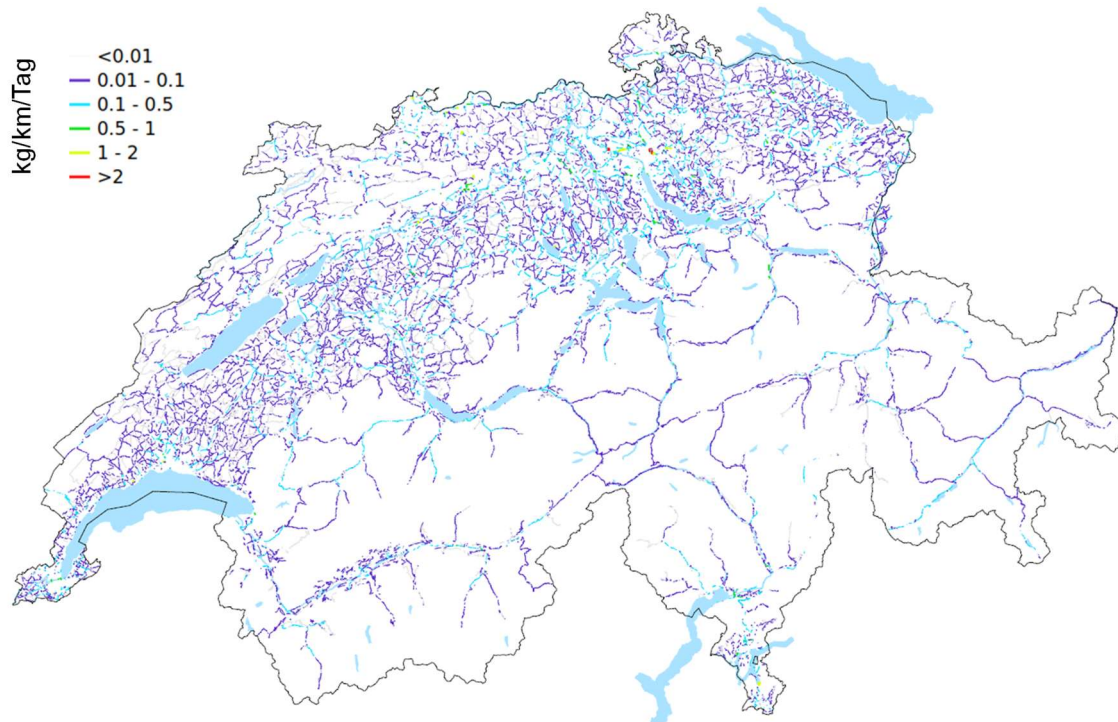


**Abbildung 14** Spezifischer Eintrag von Reifenabrieb. Übrige Strassen innerorts. Max=3.6 kg/km/Tag.

Genauer betrachtet gibt es auch bei den übrigen Strassen in Städten und Agglomerationen Strassenabschnitte mit höheren spezifischen Einträgen. Aufgeteilt nach innerorts und ausserorts in Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen sich solchen Eintragungsschwerpunkte anhand der grünen und gelben Färbung. Dies veranschaulicht die bereits in Kapitel 4.3 festgestellte Tatsache,



dass ein geringer Anteil der übrigen Strassen einen DTV über 14'000 aufweist und damit höhere Einträge bewirkt. Aus dem weitaus grösseren Teil der übrigen Strassen resultieren geringe und sehr geringe Einträge dafür auf einem sehr langen Strassennetz. Dies ist in Abbildung 15 anhand der übrigen Strassen ausserorts dargestellt.



**Abbildung 15** Spez. Eintrag von Reifenabrieb: Übrige Strassen ausserorts. Max=2.4 kg/km/Tag.

## 5.2 Basierend auf Teileinzugsgebieten (TEZG)

Bei diesem Ansatz werden zur Identifikation der Belastungsschwerpunkte die Oberflächengewässer auf der Ebene der Teileinzugsgebiete (TEZG) verwendet. Die Betrachtung unter Berücksichtigung der Gesamteinzugsgebiete erfolgt in Kapitel 5.3. Zur Berechnung der Belastung wurde der spezifische Eintrag in Kilogramm pro Tag und pro Fläche des Teileinzugsgebiets verwendet (Abbildung 16 bis Abbildung 18).

Das Belastungsbild in Abbildung 16 zeigt die spezifischen Einträge der HLS und übrigen Strassen. Die höchsten Werte, schwarz und dunkelgrau eingefärbt, befinden sich im Bereich der HLS, in Agglomerationen und Städten. Ein Beispiel dazu ist der Grossraum Zürich mit einer hohen Dichte an HLS und der übrigen, stark befahrenen Strassen. Andere Beispiele sind der Grossraum Bern, ebenfalls ein Knotenpunkt von HLS oder der Raum Lausanne und das Südtessin.

Die Belastung durch HLS alleine ist in Abbildung 17, diejenige durch die übrigen Strassen ist in Abbildung 18 dargestellt. Verglichen mit Abbildung 16 zeigt Abbildung 17, dass die Belastungen ohne die übrigen Strassen vor allem in den Agglomerationen etwa geringer sind: Grossraum Zürich, Bern, im Raum Lausanne, Genf und im Südtessin.

Die Belastung der TEZG durch die übrigen Strassen alleine, dargestellt in Abbildung 18, ist mehrheitlich gering, betrifft dafür eine grössere Zahl an TEZG. Sie ist in den genannten Agglomerationen sowie im Bereich wichtiger Verbindungsstrassen zwischen Städten und Agglomerationen vorhanden. Zusammengefasst belasten die HLS im Vergleich zu den übrigen Strassen weniger Teileinzugsgebiete und damit weniger Gewässerkilometer, diese dafür umso stärker.



**Abbildung 16** Spezifischer Eintrag von Reifenabrieb in TEZG: HLS (dunkelgelb) und übrige Strassen. Max=59 kg/km<sup>2</sup>/Tag.



**Abbildung 17** Spezifischer Eintrag in TEZG: HLS dunkelgelb eingefärbt. Max=58 kg/km<sup>2</sup>/Tag.



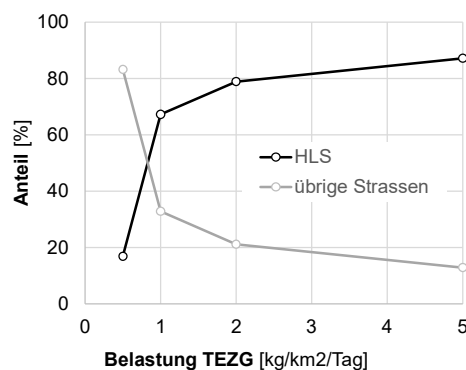
**Abbildung 18** Spezifischer Eintrag in TEZG: Übrige Strassen HLS dunkelgelb. Max=9 kg/km<sup>2</sup>/Jahr.

### Anteile der Strassentypen

Zur Priorisierung von Massnahmen werden die Anteile beider Strassentypen an der Belastung der TEZG betrachtet. Die 170 am stärksten belasteten TEZG, in Abbildung 16 schwarz eingefärbt, haben einen Anteil von 0.7 % an der gesamten Fläche der Teileinzugsgebiete (TEZG ohne Beeinflussung von Strassen ausgenommen).

Sie befinden sich alle in Agglomerationen und in Gebieten mit HLS. Die Klasse mit der zweithöchsten Belastung umfasst zusätzlich 446 TEZG, deren Flächenanteil 4.3 % beträgt. Wie auch bei der am stärksten belasteten Klasse liegen diese TEZG in Agglomerationen oder sind durch die Entwässerung der HLS belastet.

Wird der Anteil der HLS in Abhängigkeit der spezifischen Belastung der TEZG berechnet, zeigt sich, dass der Anteil der HLS mit zunehmender Belastung der TEZG zunimmt (Abbildung 19). Der Anteil der übrigen Strassen nimmt entsprechend ab. Bei den am stärksten belasteten TEZG mit einem Eintrag über 5 kg/km<sup>2</sup>/Tag liegt der Anteil der HLS bei 87 %, bei der vierthöchsten Klasse (0.5–1 kg/km<sup>2</sup>/Tag) noch bei 17 %. Der Anteil der übrigen Strassen verhält sich gegenläufig.



**Abbildung 19** Anteile der spezifischen Einträge als Funktion der spezifischen Einträge.



Bei den am höchsten belasteten Teileinzugsgebieten hat die Sanierung der Entwässerung der HLS somit eine höhere Priorität als diejenige der übrigen Strassen. Aber bereits bei den mittelstark belasteten TEZG gerade in Agglomerationen nimmt die Bedeutung der Einträge der übrigen Strassen zu (Abbildung 18).

Diese Betrachtung ist eine Verallgemeinerung der Zusammenhänge anhand von Durchschnittswerten. Lokal kann die Belastung eines Fließgewässers unterschiedlich sein. Dies ist vor allem abhängig von der effektiv gebauten Strassenentwässerung, welche anders gelöst sein kann als anhand der durchschnittlichen Entwässerungstypen angenommen.

### Wirkung der Strassenabwasser-Behandlung bei HLS

Die Wirkung der Strassenabwasser-Behandlung bei HLS auf die Belastung der TEZG kann anhand der in der MISTRA-SABA Datenbank vorhandenen 190 SABA berechnet werden. In Abbildung 20 sind die Ergebnisse anhand einer Differenzkarte dargestellt. Die Abbildung zeigt die Abnahme des spezifischen Eintrags anhand einer Grünskala: Je höher die Abnahme, desto grüner.

Durch die bereits gebauten oder sich in der Planung befindenden SABA erfolgt eine wesentliche Entlastung der Teileinzugsgebiete. Ausgehend von einem Wirkungsgrad einer SABA mit Retentionsfilterbecken von 90 % wird der Eintrag, und damit die spezifische Belastung eines TEZG entsprechend kleiner. Bei einem Eintrag von 5 kg/km<sup>2</sup>/Tag entspricht dies einer Reduktion auf 0.5 kg/m<sup>2</sup>/Tag, was einer Abnahme von 3 bis 4 Klassen entspricht.



**Abbildung 20** Abnahme des spezifischen Eintrags von HLS in TEZG durch die gebauten oder sich in Planung befindenden SABA gemäss MISTRA SABA (Stand Dezember 2022).

### 5.3 Basierend auf Gesamteinzugsgebieten

Bei der dritten Betrachtungsweise erfolgt Berechnung der Belastung eines Gewässerabschnitts eines TEZG unter Berücksichtigung des vorgelagerten Einzugsgebiets. Dazu werden die Einträge und auch die Verdünnungen in ein Teileinzugsgebiet aus dem gesamten vorgelagerten Einzugsgebiet berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 bis Abbildung 25 dargestellt.

Die Darstellung wurde so gewählt, dass die Grösse eines Fliessgewässers, und damit des Einzugsgebiets, durch die Breite des Fliessgewässers dargestellt wird. Die spezifische Belastung wird wie bisher mit demselben Farbcode von gering belastet mit grau über dunkelblau, hellblau, grün, gelb zu hochbelastet mit rot abgebildet. Zur Orientierung sind die spezifischen Belastungen der Teileinzugsgebiete aus dem vorherigen Kapitel hinterlegt. Die HLS sind dunkelgelb eingezeichnet.

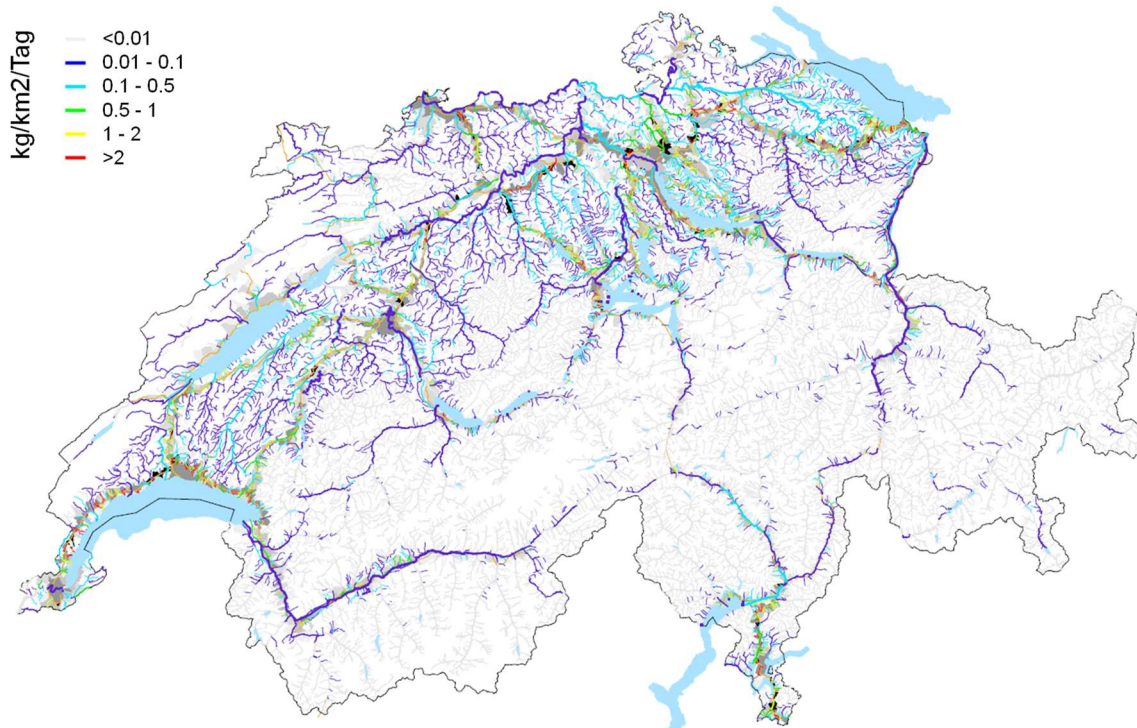
### 5.3.1 Herkunft der Belastung nach Strassentyp

Das Belastungsbild aller Strassen in Abbildung 21 zeigt, dass ein grosser Teil der Fliessgewässer gar nicht (grau) oder nur gering belastet sind (blau). Dazu zählen die grössten Flüsse und viele kleine und mittelgrosse Fliessgewässer. Die höchsten Belastungen, erkennbar an der grünen, gelben und roten Färbung, werden entlang von HLS, in Agglomerationen und Städten erzielt.

Wird nur die Belastung durch die übrigen Strassen betrachtet (Abbildung 22) fällt auf, dass dieselben Fliessgewässer betroffen sind, aber mehrheitlich mit einer kleineren Belastung. Dies ist daran sichtbar, dass die roten, gelben und grünen Fliessgewässerabschnitte im Vergleich zur Gesamtbelastung vor allem entlang von HLS und in Agglomerationen seltener vorkommen. Dies entspricht der Betrachtung der TEZG aus vorherigem Kapitel.

Entsprechend ändert sich die Belastung der Oberflächengewässer, wenn nur HLS betrachtet werden (Abbildung 23). Die betroffenen Flüsse sind weniger zahlreich, dafür stärker belastet. Grüne, gelbe und rote Abschnitte entlang der HLS und in Agglomerationen sind im Vergleich zu den übrigen Strassen zahlreicher.

Auch dies entspricht den bisherigen Betrachtungen, welche zeigen, dass HLS lokal für hohe Einträge und damit für hohe Belastungen sorgen. Zwar entstehen in den Fliessgewässern durch die übrigen Strassen vor allem in Agglomerationen auch teilweise höhere Belastungen, jedoch seltener mit den höchsten Belastungsklassen. Dafür bewirken die übrigen Strassen infolge des deutlich längeren Strassennetzes eine geringe Belastung vieler kleiner Fliessgewässer.



**Abbildung 21** Fliessgewässerbelastung mit Reifenabrieb: HLS, übrige Strassen. Max=59 kg/km<sup>2</sup>/Tag.



**Abbildung 22** Fließgewässerbelastung mit Reifenabrieb: Übrige Strassen. Max=9 kg/km<sup>2</sup>/Tag.



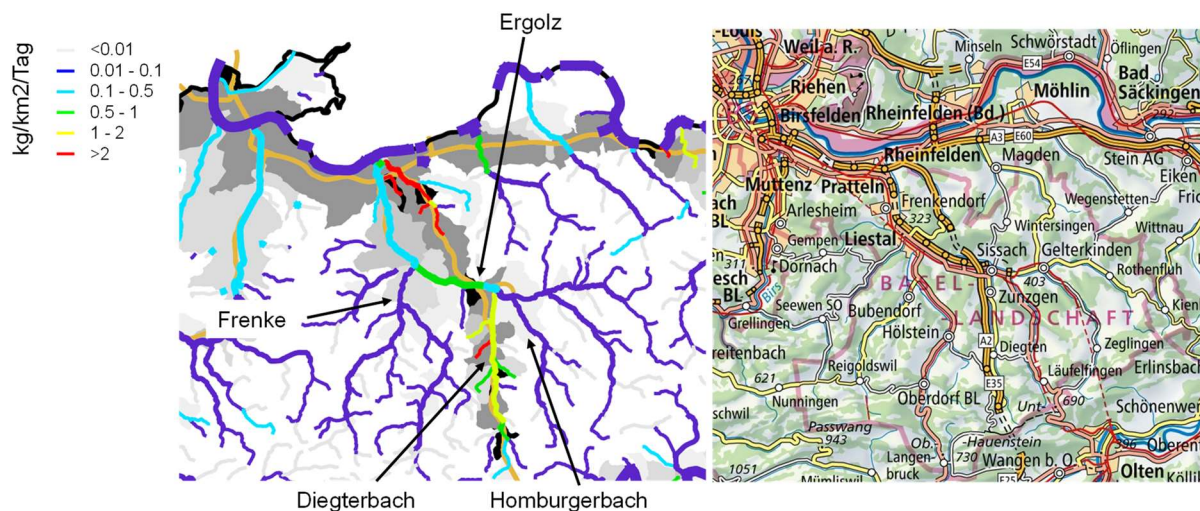
**Abbildung 23** Fließgewässerbelastung mit Reifenabrieb: HLS. Max=58 kg/km<sup>2</sup>/Tag.



### 5.3.2 Belastung unterschiedlicher Fliessgewässer

Die grossen Fliessgewässer wie die Aare oder der Rhein sind mehrheitlich gering belastet, was der dunkelblauen Färbung entspricht. Dies ist plausibel, da sie infolge der grossen Einzugsgebiete einen hohen Durchfluss aufweisen und damit die eingetragenen Frachten verdünnen. Zur Bildung von Belastungsschwerpunkten, und damit zur Priorisierung, ist die regionale Belastung und deren Verlagerung auf Teileinzugsgebietsebene massgebend, was anhand von zwei Beispielen veranschaulicht wird.

Beim ersten Beispiel in Abbildung 24 führen die Einträge der A1 zwischen dem Hauensteintunnel und Basel zu einer hohen Belastung des Diegterbachs, was anhand der gelben Farbe sichtbar ist. Nach der Einmündung des Diegterbachs in die Ergolz erhöht sich dadurch die Belastung der Ergolz, sichtbar am Farbwechsel von dunkelblau zu hellblau. Weiter flussabwärts erfolgt eine weitere Erhöhung von hellblau zu grün. Erst die Mündung der Frenke reduziert die Belastung um eine Stufe auf hellblau. Nach der Mündung in den Rhein ändert sich dessen Belastungsklasse aufgrund des hohen Durchflusses des Rheins nicht.

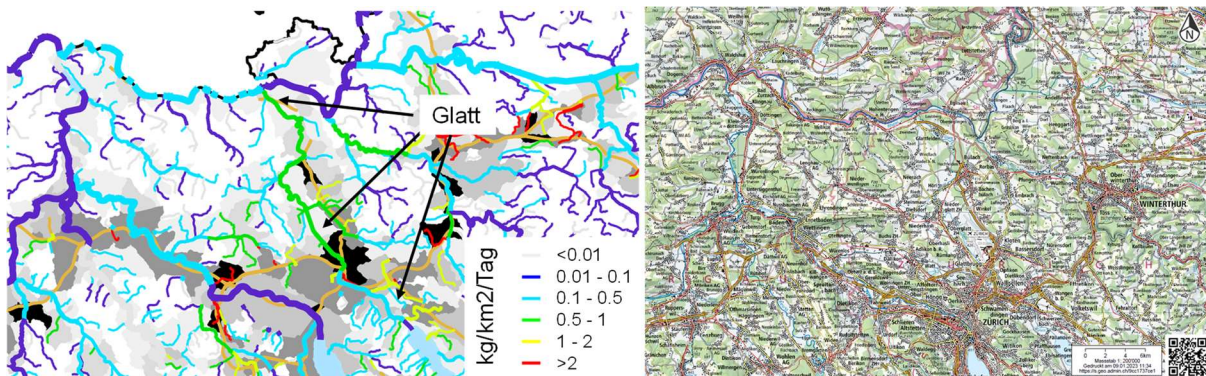


**Abbildung 24** Belastung von Fliessgewässern durch den Eintrag von Reifenabrieb: Region Basel und Basellandschaft.

Beim zweiten Beispiel ist eine ähnliche Situation im Grossraum Zürich anhand der Glatt feststellbar (Abbildung 25). Die hohe Belastung der TEZG, schwarz oder dunkelgrau dargestellt, zeigt die hohe Belastung der Glatt während und nach Durchfliessen dieser Teileinzugsgebiete.

Nach dem Abfluss aus dem Greifensee ändert sich die Belastung von gering (dunkelblau) über hellblau zu grün im Gebiet Wallisellen / Bassersdorf / Dübendorf und bleibt bis zur Mündung in den Rhein auf diesem Wert. Nach der Mündung in den Rhein führt die Belastung der Glatt zu einer Erhöhung der Belastung des Rheins auf hellblau, die erst nach dem Zufluss der Aare nach dem Klingnauer Stausee wieder auf Stufe «dunkelblau» abnimmt.

Die berechnete geringe Belastung des Rheins mit Zink, als Indikator für Reifenabrieb, deckt sich mit Messungen. Seit dem Jahr 2000 liegen die Zinkkonzentrationen an der NADUF-Station «Palmrheinbrücke» unterhalb von 5 µg/l [25]. Effektiv ergeben die mit diesem Modell anhand des mittleren Durchflusses und der eingetragenen Zink-Frachten aus Reifenabrieb eine Zinkkonzentration von 0.3 µg/l, was im Vergleich zu den gemessenen Werten plausibel ist, da Zink auch aus weiteren Quellen der Siedlungsentwässerung stammt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die gemachten Annahmen und die Berechnungen plausibel sind.



**Abbildung 25** Belastung von Fließgewässern durch den Eintrag von Reifenabrieb: Grossraum Zürich.

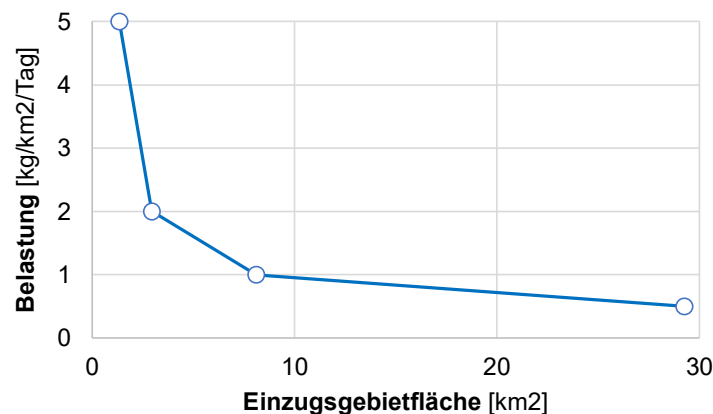
### Am stärksten belastete Fließgewässer

Die am stärksten belasteten Fließgewässer sind in Abbildung 21 bis Abbildung 25 rot eingefärbt. Beispielsweise ist in Abbildung 25 erkennbar, dass solche rot eingefärbten Fließgewässer eher kürzere Fließgewässerabschnitte sind, wogegen grüne Abschnitte, wie anhand der Glatt diskutiert, auch länger sein können. Dieser Zusammenhang, dass Fließgewässer mit hohen Belastungen eher kleine und mittelgrosse Fließgewässer sind, zeigt die Auswertung in Abbildung 26. Dort ist die Belastung der Fließgewässer, beziehungsweise der Einzugsgebiete, der Einzugsgebietsgrösse gegenübergestellt, mit folgenden Ergebnissen:

- Die durchschnittliche Einzugsgebietsgrösse von Fließgewässern mit einer Belastung über 5 kg/km<sup>2</sup>/Tag haben beträgt 1.3 km<sup>2</sup>.
- Bei einer Belastung zwischen 0.5 und 1 kg/km<sup>2</sup>/Tag liegt dieser Wert bei 29 km<sup>2</sup>.

Bei der bereits erwähnten Messstelle «Palmrheinbrücke» in Basel mit einem Einzugsgebiet von rund 28'000 km<sup>2</sup> liegt der Eintrag bei 0.066 kg/km<sup>2</sup>/Tag, was den abnehmenden Trend mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse bestätigt.

Die Frage stellt sich nun, welche Belastung für die Priorisierung massgebend ist. Sind es die eher kurzen, kleinen Gewässerabschnitte mit teilweise sehr hohen Konzentrationen oder sind es die längeren, mittelstark belasteten Fließgewässer mit den dafür höheren Frachten. Diese Thematik wird in Kapitel 6 diskutiert.



**Abbildung 26** Belastung von Fließgewässern als Funktion der Einzugsgebietsgrösse.

### 5.3.3 Zeitliche Entwicklung der Gewässerbelastung

#### Auswirkungen durch den Bau von SABA gemäss MISTRA SABA Datenbank

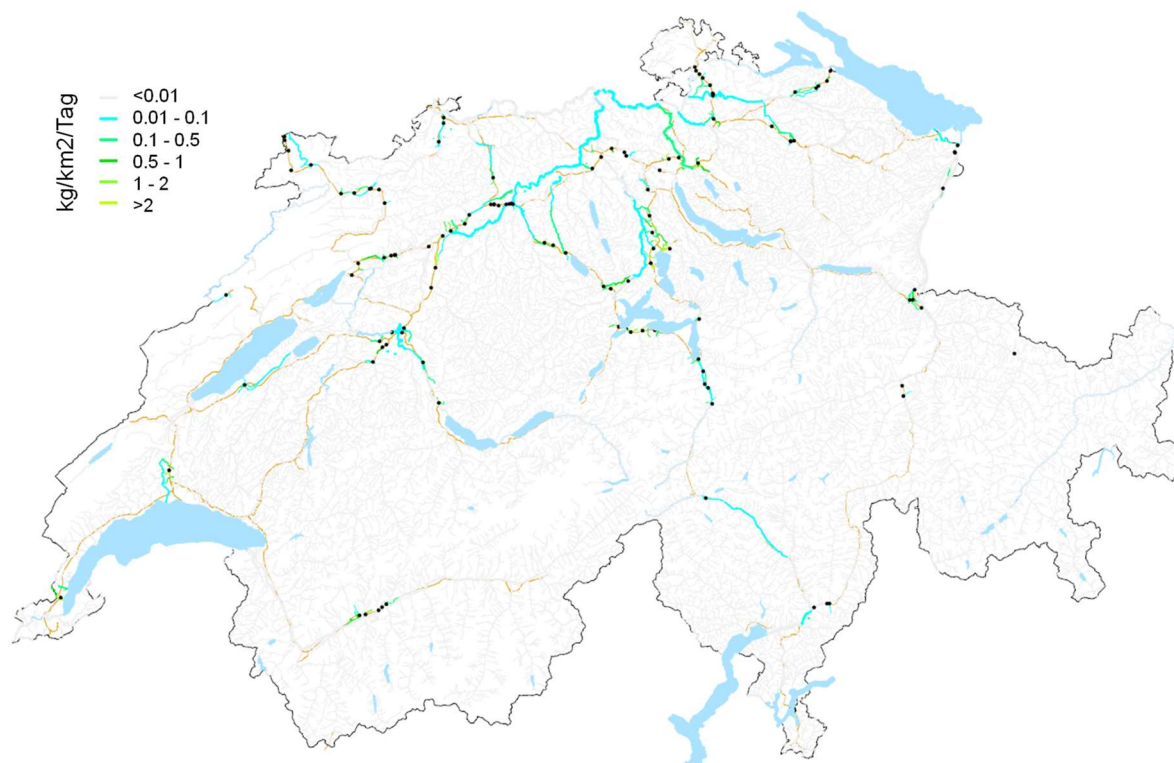
Die Auswirkung der in der MISTRA-SABA Datenbank erfassten SABA auf die Belastung der Fliessgewässer ist als Differenz zwischen dem Zustand ohne und mit diesen SABA in Abbildung 27 dargestellt. Damit wird die Abnahme der Belastung der Fliessgewässer zwischen 1995 und heute wiedergegeben. Die Berechnungen zeigen, dass sich durch den Bau der SABA teilweise eine Abnahme der Gewässerbelastung flussabwärts ergibt. Die Reduktion liegt mehrheitlich im unteren Bereich der Skala und erstreckt sich teilweise über längere Fließstrecken.

#### Auswirkungen im Endausbau

Bei Nationalstrassen sind Anpassungen am Entwässerungsnetz im Rahmen der Unterhaltsplanung Nationalstrassen (UPlaNS) vorgesehen. Diese finden während der nächsten vierzig bis sechzig Jahren statt. Damit reduziert sich die Belastung der Fliessgewässer weiter und die Belastungssituation wird sich allmählich derjenigen der übrigen Strassen in Abbildung 22 angleichen, was einem Endzustand nach der Sanierung der Hochleistungsstrassen entspricht.

Die Sanierung der Entwässerung der übrigen Strassen wird im Rahmen der Erhaltungsplanung sowie bei grösseren Bauprojekten erfolgen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Belastung der Fliessgewässer während den nächsten Jahrzehnten ebenfalls abnehmen wird. Dezentrale Systeme, die in bestehende Schlammsammler eingesetzt werden, können innerhalb kürzerer Zeit für eine Reduktion der Einträge sorgen. Je nach System und Standort ist der Einbau schwierig und oft teuer. Zudem sind sie im Unterhalt sehr teuer und ihr Rückhalt ist begrenzt [16].

Wegen der innerorts hohen Kosten, der begrenzten Fläche und der begrenzten Wirksamkeit von Absetzbecken und dezentralen Schachtsystem ist es fraglich, ob eine Sanierung für Strassen mit einem kleineren DTV als 14'000 Fahrzeuge pro Tag sinnvoll ist.



**Abbildung 27** Abnahme der mittleren Konzentrationen der Fliessgewässer als Folge des Rückhalts in gebauten und projektierten SABA gemäss MISTRA SABA Datenbank (Stand Dezember 2022). Die Liniendicke der Gewässer entspricht der Einzugsgebietsgrösse.



## 5.4 Beurteilung

### 5.4.1 Rückhalt: Seen und Flusssedimente

Mit dem in grösseren Seen angenommenen Rückhalt des Reifenabriebs von 95 % wird ein wesentlicher Anteil in den Sedimenten abgelagert, wodurch diese mit Schadstoffen belastet werden. Als Folge davon sind die Frachten und Konzentrationen im Ablauf der Seen gering. Ein geringerer Rückhalt würde zu etwas höheren Konzentrationen in den grösseren Fließsgewässern führen, das Belastungsbild aber nicht wesentlich verändern.

Wieviel Reifenabrieb, und damit auch Zink und weitere Schadstoffe in den Sedimenten an der Sohle von Fließsgewässern dauerhaft gespeichert und damit die Konzentrationen im Fließsgewässer senken, ist fraglich. Zwar zeigen Sedimentuntersuchungen, dass die Sedimente vieler Fließsgewässer mit Schwermetallen, und dabei insbesondere mit Zink belastet sind, welches auch aus dem Eintrag von Strassenabwasser stammt [22]. Ob sich Reifenabrieb in Sedimenten von Fließsgewässern dauerhaft anreichert, ist jedoch unklar.

Wahrscheinlicher ist, dass sich ein Gleichgewicht zwischen Sedimentation und Adsorption mit der Resuspension bei Hochwässern einstellt, welches einem massgeblichen Rückhalt von Reifenabrieb in Fließsgewässersedimenten entgegenwirkt. Resuspendierte Partikel mit den daran adsorbierten Schadstoffen können sich anschliessend in den grösseren Seen am Seegrund ablagern und werden damit dauerhaft aus der Wassersäule entfernt. Vorbehalten sind Prozesse wie die Desorption von Schadstoffen infolge chemischer Prozesse beispielsweise durch Sauerstoffarmut. Möglich ist zudem, dass sich Sedimente bei stärkerer Wasserführung flussabwärts verlagern.

### 5.4.2 Weitere Schadstoffe und Einträge, Dynamik

#### Schadstoffe im Strassenabwasser und aus Reifenabrieb

Mit Zink als Indikator für Reifenabrieb kann eine ähnliche Belastung der Fließsgewässer auch für weitere Schadstoffe im Strassenabwasser wie beispielsweise GUS, Kupfer, Schwermetalle und PAK erwartet werden, da diese in SABA vergleichbar zurückgehalten werden. Studien zu organischen Mikroverunreinigungen im Strassenabwasser zeigen zudem, dass zahlreiche dieser Stoffe ebenfalls vergleichbar zurückgehalten werden [5]. Ob dies auf weitere organischen Mikroverunreinigungen, welche aus der Lauffläche von Reifen und aus Reifeabrieb freigesetzt werden, wie beispielsweise 6-PPD Quinon [4] und weitere [3] zutrifft, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

#### Weitere Einträge, Zustand der Gewässer

Die Fließsgewässer werden neben Schadstoffen im Strassenabwasser durch weitere Einträge aus der Siedlungsentwässerung belastet. Dazu zählen Einleitungen von Mischwasserentlastungen und von behandeltem Abwasser der kommunalen Abwasserbehandlung. Weitere Schadstoffeinträge erfolgen unter anderem aus der Landwirtschaft und der Industrie. Solche Einträge können Fließsgewässer zusätzlich belasten und die Belastungsschwerpunkte bedingt durch den Eintrag von Strassenabwasser verschärfen.

Dasselbe gilt für Beeinträchtigungen von Fließsgewässern infolge Verbauungen, morphologischer oder hydraulischer Aspekte. Solche können die Belastungsschwerpunkte ebenfalls verschärfen.

#### Hydraulische Belastung, Dynamik

Die Bestimmung der Belastungsschwerpunkte erfolgt in dieser Studie anhand mittlerer Frachten und Konzentrationen. In der Realität treten bei jedem Regen, je nach Regenintensität und Dauer, unterschiedlich ausgeprägte Schadstoffspitzen sowie hydraulische Stossbelastungen auf, worauf kleine Fließsgewässer je nach Einleitverhältnis stärker reagieren als Grosse. Dadurch kann sich das Belastungsbild lokal ändern.

### **5.4.3 Datengrundlage - Detailgenauigkeit**

Die Belastungsschwerpunkte der Fliessgewässer sind massgeblich von der Art der Strassenentwässerung abhängig. Die Daten der 190 SABA aus der MISTRA SABA Datenbank sind ortsgenau. Die sonstigen Angaben zur Entwässerung der HLS beruhen auf den Daten der STR-Datenbank und sind über die HLS gemittelt.

Dasselbe Vorgehen wurde für die übrigen Strassen angewendet, indem die Entwässerungsart innerorts und ausserorts gemäss den Angaben des Kantons und der Stadt Zürich anteilmässig auf die restlichen Strassen übertragen wurde.

Die Anteile der unterschiedlichen Entwässerungsarten können entsprechend der Topografie und weiterer Faktoren regional unterschiedlich sein. Grundsätzlich besteht aufgrund der Daten und Einschätzung der Kantone Bern, Genf, und Fribourg jedoch eine Übereinstimmung darin, dass die Strassenentwässerung der übrigen Strassen mehrheitlich mit Direkteinleitungen und allenfalls ausserorts mit der Versickerung in der Strassenschulter realisiert wurde. Die über SABA entwässerten Strassen spielen eine untergeordnete Rolle.

Die Verwendung einer einheitlichen Verteilung der Entwässerungstypen und damit auch des Rückhalts führt dazu, dass die Belastungsschwerpunkte je besser stimmen, desto grossräumiger sie betrachtet werden. Je kleinräumiger die Betrachtung ist, desto weniger genau sind sie. Konkret bedeutet dies, dass die Belastung der Fliessgewässer einzelner Abschnitte, vor allem in den Oberläufen der Fliessgewässer, in der Realität von den Berechnungen abweichen kann. Je länger ein Fliessgewässer ist, desto genauer stimmen die Berechnungen und damit das Belastungsbild, da die Unterschiede ausgemittelt werden.

Betreffend der Oberflächengewässer sind in Karstgebieten ebenfalls Abweichungen möglich, denn wegen der erhöhten Versickerung in den Untergrund kann in solchen Gebieten der Abfluss in Fliessgewässern bei Regen gering sein, was die Belastung durch eingeleitetes Strassenabwasser erhöht. Davon betroffen ist vor allem das Juragebirge.



## 6 Priorisierung

*Kleine Fliessgewässer im Einflussbereich der Entwässerung von Hochleistungsstrassen, in Agglomerationen und in Städten sind konzentrationsmässig am stärksten belastet, mittelgrosse Gewässer weniger, dafür auf einer längeren Fliessstrecke. Die Sanierung von HLS ist bei den am stärksten belasteten Gewässerabschnitten prioritär. Mit abnehmender Belastung durch HLS nimmt der Anteil des Eintrags der übrigen Strassen zu. Bei konkreten Projekten sind bei der Beurteilung von Belastungsschwerpunkten der Zustand eines Gewässers und übrige Einträge, beispielsweise aus Siedlungsentwässerung zu berücksichtigen. Die wirkungsvollsten Massnahmen zur Verminderung der Einträge sind die Sanierung von Direkteinleitungen und von alten Ölabscheidern mit der Versickerung in der Strassenschulter oder mit SABA mit Retentionsfilterbecken gemäss dem Stand der Technik. Solche Massnahmen sind ausserorts einfacher machbar als innerorts, weshalb innerorts die Umsetzbarkeit und auch deren Wirkung beschränkt sind. Massnahmen zur Verminderung der Produktion von Reifenabrieb sind notwendig, wenn der Eintrag von Reifenabrieb um mehr als 50 % vermindert werden soll.*

### 6.1 Belastung: Konzentrationen oder Frachten?

Bei der **emissionsbasierten** Betrachtung erfolgt die Priorisierung anhand der an der Einleitstelle eingetragenen Fracht. Die Grösse des Fliessgewässers wird nicht berücksichtigt. Dies führt dazu, dass die Priorisierung bei der Behandlung von Strassenabwasser auch bei grossen Fliessgewässern gemäss dem Eintrag von Reifenabrieb erfolgt, dargestellt in Abbildung 12.

Bei der **immissionsbasierten** Betrachtung wird die Belastung eines einzelnen Fliessgewässerabschnitts unter Berücksichtigung des vorgelagerten Einzugsgebiets und der Vorbelastung beurteilt, dargestellt in Abbildung 21. Für die Beurteilung der Belastung stellt sich nun die Frage, ob frachtgemittelte Konzentrationen alleine oder auch Frachten zu berücksichtigen sind.

Sind es nur die Konzentrationen, würde dies bei den am stärksten belasteten Fliessgewässern (rot) dazu führen, dass selbst kleinste Fliessgewässer mit höchsten Konzentrationen als hochbelastet beurteilt würden. Solche, kleinste Fliessgewässer transportieren jedoch relativ geringe Frachten in die anschliessenden Fliessgewässerabschnitte, welche dort schneller verdünnt werden und diese wenig belasten.

Die Auswirkungen der in Fliessgewässerabschnitte eingetragenen Frachten wurden anhand von Abbildung 24 und von Abbildung 25 diskutiert. Hohe Konzentrationen in flussabwärts liegenden Abschnitten können entweder durch den Eintrag aus flussaufwärts liegenden Einzugsgebieten oder aus den Einträgen in die jeweiligen Abschnitte erfolgen. Eine gelbe Belastung entsteht somit entweder aus der Verdünnung flussabwärts aus einer roten, oder durch hohe Einträge im Einzugsgebiet mit bereits gelber oder grüner Belastung.

Diese Unterscheidung ist für die Priorisierung wichtig. Erfolgt eine gelbe Belastungsklasse eines Gewässerabschnitts mehrheitlich aus der Verdünnung der Belastung eines voranliegenden roten Abschnitts, ist die Sanierung des roten Abschnitts prioritär, was die Belastung anschliessend im gelben Abschnitt reduzieren würde.

Die alleinige Betrachtung von Konzentrationen kann also zu einer wenig sinnvollen Priorisierung führen, weil damit kleinste Fliessgewässer in den Fokus gelangen. Letztlich obliegt die Beurteilung der Belastung bei den Bewilligungsbehörden, auch unter Einbezug weiterer Aspekte und Belastungen eines Fliessgewässers.

## 6.2 Priorisierung nach Belastungsart

### 6.2.1 Immissionsbasiert mittels Konzentrationen

Diejenigen Strassen, welche in Fliessgewässern die höchste und zweithöchste Belastungsklasse bewirken, also Fliessgewässer mit der roten und gelben Kennzeichnung gemäss Abbildung 21, sind in Abbildung 28 und in Abbildung 29 dargestellt.

Sowohl für die rote als auch für die gelbe Belastungsklasse sind mehrheitlich HLS massgebend. In Agglomerationen tragen zudem die übrigen Strassen zur Belastung bei, was beispielsweise in den Agglomerationen im Raum Lausanne und Zürich sichtbar wird (Abbildung 29).

Im Detail ausgewertet ist der Anteil der Einträge von HLS bei beiden Belastungsklassen mit rund 84 % und 77 % höher als derjenige der übrigen Strassen. Er nimmt mit abnehmender Belastungsklasse ab, wie dies bereits anhand der Abnahme von der roten zur gelben Belastungsklasse sichtbar ist (Tabelle 11). Dies bestätigt die bisherigen Erkenntnisse, nämlich dass bei Fliessgewässern mit hoher Belastung in erster Linie die Einträge der Hochleistungsstrassen verantwortlich sind.

Belastung	Eintrag in Fliessgewässer				Länge der Strassen			
	Absolut (kg/Jahr)		Anteil (%)		Absolut (km)		Anteil (%)	
	HLS	übrige Strassen	HLS	übrige Strassen	HLS	übrige Strassen	HLS	übrige Strassen
rot	509	96	84.1	15.9	391	1476	20.9	79.1
gelb	364	111	76.6	23.4	414	1979	17.3	82.7

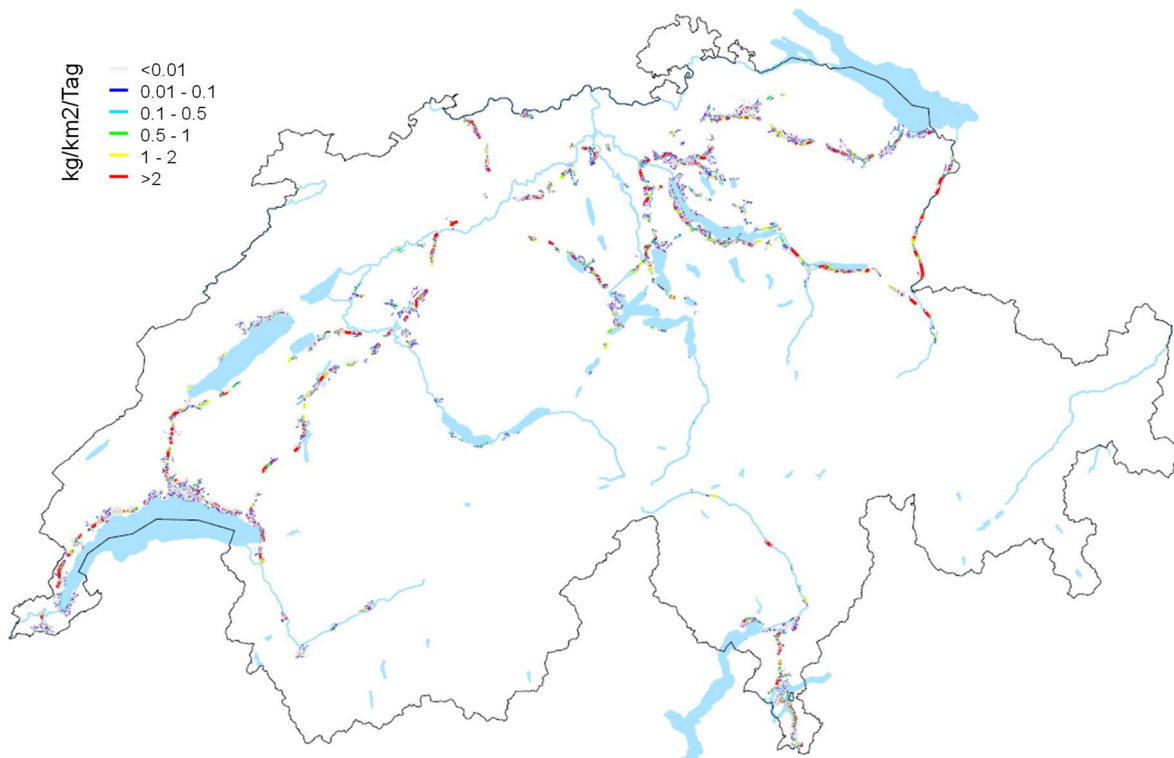
**Tabelle 11** Herkunft der Einträge in die Gewässer gemäss den Belastungsklassen rot und gelb. Die Einträge erfolgen in die Fliessgewässer der jeweiligen Belastungsklassen.

Der vergleichsweise geringe Anteil der übrigen Strassen ist in beiden Karten ansatzweise anhand der zahlreichen grau hinterlegten Strassen beispielsweise in der Region Lausanne sichtbar. Absolut betrachtet ist deren Länge im Vergleich zu HLS, beispielsweise für die rote Belastungsklasse, mit 1'476 Kilometer knapp vierfach grösser, was wegen der tieferen spezifischen Einträge jedoch nicht zu einem höheren Anteil am Eintrag in Fliessgewässer führt.

Für die Priorisierung ist entscheidend, dass der spezifische Eintrag von Reifenabrieb von HLS, ausgedrückt in Kilogramm pro Kilometer im Vergleich zu den übrigen Strassen 15- bis 20-fach höher ist, und zwar für die rote und die gelbe Belastungsklasse.



**Abbildung 28** Strassen die gemäss Abbildung 21 zu den höchstbelasteten, roten Fließgewässerabschnitten führen, mit den jeweiligen Beiträgen der HLS und übrigen Strassen

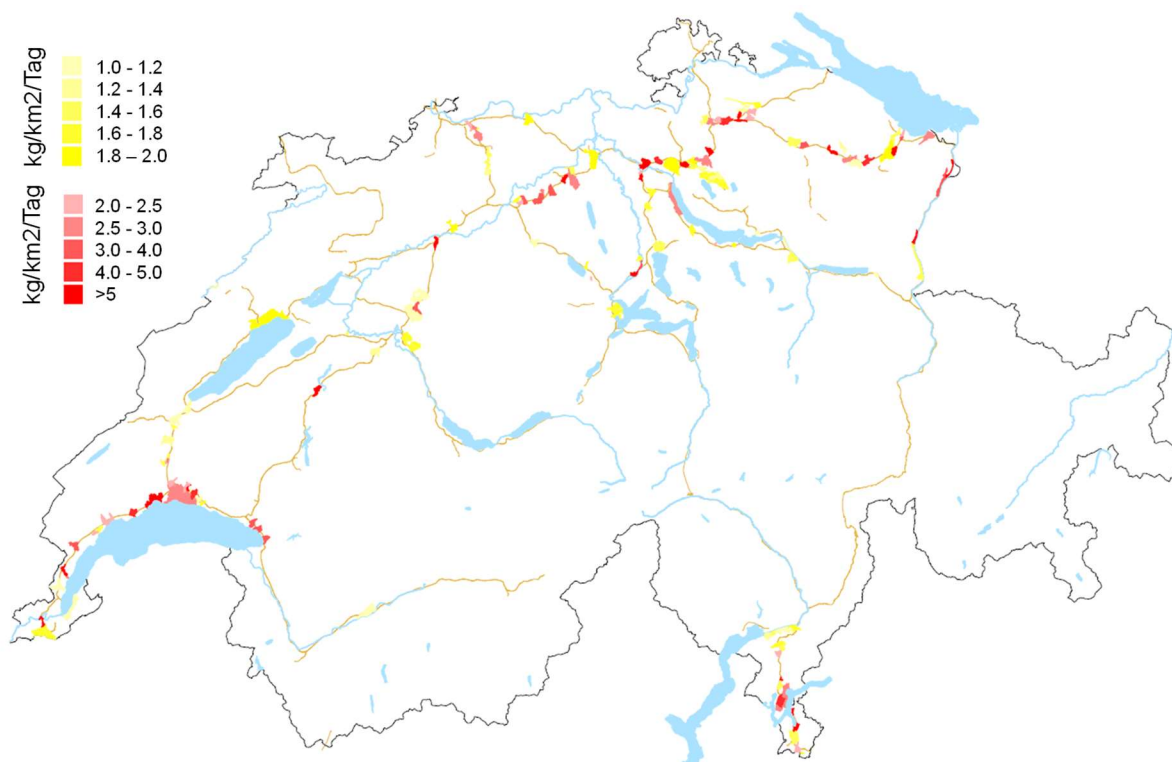


**Abbildung 29** Strassen die gemäss Abbildung 21 zu höchst- und zweihöchstbelasteten Fließgewässerabschnitten (rot und gelb) führen, mit den jeweiligen Beiträgen der HLS und übrigen Strassen.

## 6.2.2 Immissionsbasiert mittels Konzentrationen und Frachten

Um kleinste, stark belastete Fliessgewässer auszuschliessen, wurde bei der höchsten (rot) und der zweithöchsten (gelb) Belastungsklasse ein Grenzwert für die eingetragene Fracht von 10 kg/Tag eingeführt. Berücksichtigt werden damit nur Fliessgewässer mit einem Eintrag über diesem Grenzwert. Diese Limitierung wirkt sich auf die maximalen Einträge aus. Der Maximalwert liegt mit Limitierung bei 11 kg/km<sup>2</sup>/Tag und nicht mehr bei 59 kg/m<sup>2</sup>/Tag wie ohne Limitierung.

In Abbildung 30 sind diejenigen Teileinzugsgebiete dargestellt, welche zu den 76 am stärksten belasteten Fliessgewässern führen, also der roten Kategorie mit Einträgen über 2 kg/km<sup>2</sup>/Tag. Bei der zweithöchsten, gelben Belastungsklasse sind die 107 am stärksten belasteten Teileinzugsgebiete mit Einträgen zwischen 1 und 2 kg/km<sup>2</sup>/Tag abgebildet.



**Abbildung 30** Einzugsgebiete, deren Strassen zu den am höchsten belasteten Fliessgewässern führen. Die Einzugsgebiete berücksichtigen die Frachten der jeweiligen Gesamteinzugsgebiete.

Einzugsgebiete, die zu den am höchsten belasteten Fliessgewässern führen, liegen mehrheitlich im Einflussbereich der Entwässerung von Hochleistungsstrassen. Dazu addieren sich in Agglomerationen die Einträge der übrigen Strassen, beispielsweise im Raum Lausanne, Zürich-Thalwil, Zürich-Wallisellen oder im Raum Lugano.

Ein Beispiel für mehrheitlich durch die Hochleistungsstrassen potenziell stark belastete Fliessgewässer sind die kleinen Fliessgewässer zwischen Aarburg-Oftringen und Aarau, bedingt durch die Entwässerung der Autobahn A1.

Abbildung 30 oder generell die in dieser Studie entwickelte Methodik kann somit als Indikator verwendet werden um potenziell hoch belastete Fliessgewässer zu identifizieren. Bei der Planung der Sanierung von Strassenabschnitten kann damit die Priorisierung unterstützt werden. Detailabklärungen in den Einzugsgebieten sind anschliessend nötig, um die effektive Entwässerungssituation zu klären. Inwiefern die in Abbildung 30 ausgeschlossenen kleinsten, sehr hoch belasteten Fliessgewässerabschnitten berücksichtigt werden sollten, müssen Gewässerökologen beurteilen.

## 6.3 Welche Strassen priorisieren?

### Generell, emissionsbasiert

Zur Priorisierung der zu sanierenden Strassen sind der Eintrag, die Strassenlänge sowie die Machbarkeit massgebend.

- **Eintrag:** Aufgeteilt nach Strassentyp und der Lage der Strasse bezüglich innerorts und ausserorts sind die Einträge der HLS ausserorts und innerorts mit je rund 30 % vergleichbar. Die Einträge der übrigen Strassen innerorts folgen mit einem Anteil von rund 30 % vor den übrigen Strassen ausserorts mit einem Anteil von rund 10 %. Damit rücken bei der Priorisierung die HLS in den Vordergrund, gefolgt von den übrigen Strassen innerorts. Die Einträge sind von den Fahrleistungskilometern und vom Entwässerungstyp abhängig.
- **Betroffene Strassenlänge:** Die eingetragene Menge Reifenabrieb erfolgt bei HLS im Vergleich zu den übrigen Strassen auf einer 15 bis 20-fach geringeren Strassenlänge. Entsprechend müssen bei HLS weniger Strassenkilometer saniert werden, um einen mit übrigen Strassen vergleichbaren Rückhalt zu erzielen, was die Priorisierung der HLS verstärkt.
- **Machbarkeit:** Die Sanierung der Strassenentwässerung mit der Versickerung in der Strassenschulter oder mit SABA mit hohem Schadstoffrückhalt ist ausserorts einfacher machbar als innerorts, denn ausserorts steht die Fläche für Retentionsfilterbecken eher zur Verfügung. Ebenso ist ausserorts weniger hinderliche Infrastruktur vorhanden. Allerdings können auch ausserorts Nutzungskonflikte die Sanierung erschweren.

Zusammengefasst ergibt dies folgende Priorisierung. Innerhalb dieser vier Kategorien haben jeweils die Strassen mit den höchsten Einträgen Priorität. Die übrigen Strassen innerorts haben wegen des höheren Eintrags Priorität vor den übrigen Strassen ausserorts.

1. HLS ausserorts
2. HLS innerorts
3. Übrige Strassen innerorts
4. Übrige Strassen ausserorts

### Priorisierung anhand der Gewässerbelastung, immissionsbasiert

Wird bei der Priorisierung von der Belastung in Fliessgewässern ausgegangen, zeigt sich, dass die höchsten Belastungen bei kleinen Fliessgewässern erfolgen. Die am stärksten belasteten Einzugsgebiete sind in Kapitel 6.2.2 dargestellt.

Der Anteil der Einträge von HLS zwar nimmt mit zunehmender Grösse der Einzugsgebiete und damit ab, bleibt aber massgebend. Entsprechend liegt die Priorisierung auch bei der immissionsbasierten Betrachtung in der Regel bei der Sanierung der Hochleistungsstrassen. Bei Einzugsgebieten die durch Einträge der übrigen Strassen belastet sind, liegen die Schwerpunkte in den Agglomerationen und Entlang von Verbindungsstrassen zwischen Zentren.

Obwohl gemäss den Ergebnissen die Priorisierung bei der Sanierung der HLS liegt, kann **lokal** betrachtet die Sanierung der übrigen Strassen trotzdem eine hohe Priorität haben, nämlich wenn die Belastungen eines Fliessgewässers massgeblich durch die übrigen Strassen erfolgt. Zudem ist abzuwägen, wo im Einzugsgebiet eine Sanierung die grössten Wirkungen hat. Je weiter flussaufwärts eine Reduktion der Einträge erfolgt, desto länger ist die dadurch entlastete Fliessgewässerstrecke.



## 6.4 Massnahmen

### 6.4.1 Priorisierung der Massnahmen

In erster Linie sind diejenigen Massnahmen am Entwässerungssystem umzusetzen, welche den höchsten Rückhalt ermöglichen, also die Anforderung erhöht erreichen [15, 28]. Die empfohlenen Verfahren dazu sind die Versickerung in der Strassenschulter oder die Behandlung mit einer SABA mit einem mit Schilf bewachsenen Retentionsfilterbecken (RFB). Der höchste zusätzliche Rückhalt bei einer Sanierung wird erzielt, indem die Entwässerung mit folgender Priorisierung geändert wird:

1. Direkteinleitungen
2. Kleinen, schnell durchflossenen Ölabscheidern
3. Grösseren Ölabscheidern und Absetzbecken
4. Direkteinleitungen mit dezentralen Schachtsystemen (nur übrige Strassen)

Wie die empfohlenen Verfahren im Stand der Technik [13] zeigen, sind die Investitions- und Unterhaltskosten praktisch unabhängig von der Anforderung an die Behandlung. Die Kosten gemäss Anforderung erhöht mit der Versickerung in der Strassenschulter oder mit einer SABA mit einem mit Schilf bewachsenen RFB beziehungsweise gemäss Anforderung erleichtert mit einem Absetzbecken im Dauerstau sind vergleichbar.

Allerdings brauchen SABA mit RFB gemäss der Anforderung erhöht im Vergleich zu Absetzbecken mehr Fläche. Dafür weisen sie eine hydraulische Retention auf. Absetzbecken im Dauerstau können jedoch auch unterirdisch gebaut werden, was innerorts von Vorteil sein kann, jedoch diese Bauwerke verteuert.

Bei den übrigen Strassen können Direkteinleitungen mit dezentralen Schachtsystemen ausgerüstet werden. Diese haben jedoch nur einen begrenzten Rückhalt und sind sehr teuer im Unterhalt. Wie Absetzbecken im Dauerstau weisen solche Systeme im Gegensatz zu SABA mit RFB keine Retention auf. Absetzbecken im Dauerstau betrieben können jedoch mit einer Retention ergänzt werden, was kostenintensiv ist. Massnahmen wie die Einleitung in die Mischwasserkanalisation oder die Abkoppelung von derselben sind immer im Gesamtkontext der Siedlungsentwässerung zu betrachten.

### 6.4.2 Temporäre Massnahmen

Bis zur Sanierung eines Strassenabschnitts können Jahre oder Jahrzehnte vergehen. Es existieren folgende temporäre Massnahmen, um den Rückhalt von Reifenabrieb zu erhöhen.

Oft sind ältere, schnell durchflossene Ölabscheider oder Absetzbecken nicht für einen wirksamen Rückhalt von Partikeln ausgelegt. Deshalb haben Anpassungen an der Hydraulik positive Effekte auf den Partikelrückhalt. Solche Anpassungen wurden bei einzelnen Bauwerken an Kantonsstrassen bereits realisiert und konnten den Rückhalt von GUS und Zink, und damit auch von Reifenabrieb von 30 % auf über 80% erhöhen. Folgende Anpassungen sind in [13] und [19] detailliert beschrieben.

- Einbau einer Entlastung und einer Durchflussdrosselung
- Gleichmässige Strömungsverteilung im Becken und im Zu- und Ablauf
- Anordnen eines Schlammsumpfs mit Tiefpunkt für das einfache Absaugen
- Erhöhung der Auslaufkote

Eine weitere Massnahme ist die Erhöhung der Unterhaltsintervalle bestehender Ölabscheider und Absetzteichen. Bei Absetzteichen kann die Rückhaltwirkung durch das Entfernen des abgesetzten Schlammes sowie der Vegetation vergrössert werden. Die Erhöhung der Unterhaltsintervalle von Schlammfassammlern kann den Rückhalt begrenzt erhöhen.

### **6.4.3 Weitere Massnahmen**

Wie die Berechnungen zeigen, kann der Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer auch durch eine weitest gehende Sanierung der Entwässerung von Hochleistungsstrassen und der übrigen nur um etwas mehr als die Hälfte reduziert werden.

Vor allem innerorts sind Anpassungen am Entwässerungssystem infolge der zu sanierenden Strassenlängen der übrigen Strassen aufwändig und teuer. Gerade deshalb, aber nicht nur dort, sind Massnahmen, welche die Produktion von Reifenabrieb mindern eine Option, wie folgender theoretische Vergleich zeigt. Würde innerorts der durchschnittliche tägliche Verkehr halbiert, käme dies bezüglich des Eintrags von Reifenabrieb in Fliessgewässer einer weitestgehenden Sanierung der Strassenentwässerung innerorts gleich. Weitere Massnahmen sind in Kapitel 4.3.1 erwähnt beschrieben und in der Fachliteratur detailliert beschrieben.

## 7 Folgerungen

Die in dieser Studie angewendete Methodik ermöglicht es, die durch den Eintrag von Reifenabrieb potenziell am stärksten belasteten Fliessgewässerabschnitte in der Schweiz zu identifizieren oder auch generell die Belastung der Fliessgewässer durch den Eintrag von Reifenabrieb abzuschätzen. Dies unterstützt die Priorisierung der Planung der Sanierung von Strassenabschnitten.

### Einträge und deren Herkunft

Pro Jahr werden auf Schweizer Strassen 10'100 Tonnen Reifenabrieb produziert. Davon gelangen rund 40 % oder 4'000 Tonnen pro Jahr in Oberflächengewässer. Diese Zahlen präzisieren die Angaben aus der vorangehenden Studie von 13'500 Tonnen pro Jahr bei einem Eintrag von 3'400 Tonnen pro Jahr.

Zwei Drittel der Einträge stammen von Hochleistungsstrassen zu etwa gleichen Anteilen innerorts und ausserorts. Der grösste Teil der Einträge stammt aus Direkteinleitungen gefolgt von Ölabscheidern. Das restliche Drittel des Eintrags erfolgt von den übrigen Strassen. Davon stammen rund drei Viertel aus Einträgen innerorts und ein Viertel aus Einträgen ausserorts. Wie bei den Hochleistungsstrassen erfolgen die meisten Einträge aus Direkteinleitungen, gefolgt von Einleitungen aus dem Mischsystem innerorts.

### Emissionsbasierte Priorisierung

Hochleistungsstrassen haben bei der emissionsbasierten Priorisierung Priorität, erstens weil sie für zwei Drittel der Einträge verantwortlich sind und zweitens die Einträge im Vergleich zu den übrigen Strassen auf einer rund zwanzigfach kürzeren Strassenlänge erfolgen. Wird berücksichtigt, dass die Sanierung ausserorts einfacher machbar ist als innerorts, haben HLS ausserorts erste Priorität, vor HLS innerorts. Bei den übrigen Strassen liegt die Priorität aufgrund der höheren Einträge innerorts. Die Priorität liegt jeweils auf den Abschnitten mit den höchsten Einträgen.

### Immissionsbasierte Priorisierung

Wird die Gewässerbelastung als Massstab genommen zeigt sich, dass die anhand der frachtgemittelten Jahreskonzentrationen berechnete Belastung in kleinen Fliessgewässern am höchsten ist. Mit zunehmender Grösse eines Gewässers nimmt die Belastung wegen der Verdünnung ab, weshalb zahlreiche mittelgrosse Fliessgewässer weniger stark belastet sind, dafür auf einer längeren Strecke. Grosse Flüsse wie der Rhein, die Aare und die Rhone sind ebenfalls wegen der Verdünnung am geringsten belastet, wie dies auch Messungen zeigen, transportieren aber die höchsten Frachten. Letztlich obliegt die Beurteilung der Belastung (Frachten und/oder Konzentrationen) bei den jeweiligen Vollzugsbehörden.

Bei den meisten stark belasteten Fliessgewässern stammen die Einträge mehrheitlich von Hochleistungsstrassen, welche in Städten und Agglomerationen durch die Einträge der übrigen Strassen verstärkt werden. Dies bestätigt in den meisten Fällen die bereits bei der emissionsbasierten Betrachtung genannten Priorisierung der Hochleistungsstrassen bei der Sanierung.

Bei der Priorisierung einer Sanierung ist zu prüfen, wie die grösste Wirkung erzielt werden kann. Erfolgt die Hauptbelastung eines Fliessgewässerabschnitts aus Einträgen des voranliegenden Abschnitts, liegt die Priorität im Oberlauf. Ansonsten sind Strassen im jeweiligen Fliessgewässerabschnitt prioritär. Ebenso sind die effektive Entwässerung im Perimeter sowie Belastungen eines Fliessgewässers durch die Siedlungsentwässerung, durch die Landwirtschaft sowie allenfalls weitere Kriterien zu berücksichtigen.

### Massnahmen am Entwässerungssystem

Die wirkungsvollsten Massnahmen am Entwässerungssystem sind das Aufheben von Direkteinleitungen und die Sanierung von alten Ölabscheidern, beides zu Gunsten der Versickerung in der Strassenschulter oder von SABA gemäss dem Stand der Technik. Innerorts können aufgrund

beschränkter Fläche oft nur unterirdische Absetzbecken gebaut werden, welche im Vergleich zu SABA mit Retentionsfilterbecken eine geringere Wirksamkeit im Bereich von 65 % bis 80 % statt von über 90 % aufweisen. Dasselbe gilt für schachtbasierte dezentrale Systeme, welche im Vergleich zu Absetzbecken einen ähnlichen Schadstoffrückhalt aufweisen, aber sehr hohe Unterhaltskosten bewirken. Die dezentrale Versickerung in begrünten Mulden kombiniert mit Retention ist eine weitere Alternative (Schwammstadt). Allerdings sind dazu die entsprechenden Flächen notwendig beziehungsweise zu schaffen.

Die Siedlungsentwässerung ist historisch gewachsen, weshalb bei der Sanierung der Strassenentwässerung oft mit Fremdwasser, beispielsweise aus Einleitungen von Drainagen, zu rechnen ist. Solche Einleitungen sind unerwünscht und von jeder Strassenentwässerung fernzuhalten.

### **Welche Reduktion ist erreichbar?**

Mit Massnahmen am Entwässerungssystem ist eine Reduktion des Eintrags von Reifenabrieb in Oberflächengewässer im Bereich von 50 % erzielbar. Dieser Anteil kann für einzelne Gewässerabschnitte höher oder tiefer sein. Dennoch zeigt der genannte Bereich, dass für eine weitergehende Reduktion Massnahmen bei der Produktion von Reifenabrieb auf der Strasse notwendig sind. Dies trifft insbesondere auf Strassen innerorts zu, bei welchen die Anpassung der Entwässerung oft schwierig und die Wirkung von Massnahmen am Entwässerungssystem beschränkt ist.

### **Bis wann sind Massnahmen realisierbar?**

Bei HLS erfolgt die Sanierung der Entwässerung im Rahmen der Unterhaltsplanung der Nationalstrassen. Es kann erwartet werden, dass die Strassenabschnitte während den nächsten vierzig bis sechzig Jahren saniert sein werden und sich das Belastungsbild demjenigen der übrigen Strassen im heutigen Zustand annähert. Bei Letzteren erfolgt die Sanierung oft im Rahmen von Bauprojekten und die Anpassung der Entwässerung zumindest der stark befahrenen Strassen dauert vermutlich mehrere Jahrzehnte. Mit dezentralen Systemen, vor allem mit solchen die in bestehende Schlammsammler eingesetzt werden können, kann eine Reduktion der Einträge schneller erfolgen, allerdings mit begrenzter Wirkung und zu Lasten sehr hoher Unterhaltskosten.

### **Anwendung der Ergebnisse und der Methodik**

In der Realität kann die kleinräumige Belastungssituation von den hier gezeigten Berechnungen abweichen. Dies ist der Fall, da infolge teilweise fehlender Daten gemittelte Daten zu den Anteilen der unterschiedlichen Entwässerungssystemen, und damit zum Rückhalt, verwendet wurden. Mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse spielt dies eine weniger wichtige Rolle. Bei konkreten Projekten sind bei der Priorisierung die effektiv realisierte Entwässerung im Perimeter und zudem Belastungen der Fliessgewässer durch die Siedlungsentwässerung, durch die Landwirtschaft sowie allenfalls weitere Kriterien zu berücksichtigen.

### **Übertragbarkeit auf andere Stoffe, Datengrundlagen**

Die in dieser Studie angewendete Methodik kann auch verwendet werden, um den Eintrag anderer Schadstoffe sowie die dadurch bedingte Belastung der Fliessgewässer zu berechnen. Wenn künftig weitere Daten zu Entwässerungssystemen vorliegen, ist eine örtliche Präzisierung der Einträge und damit der Belastungsschwerpunkte möglich. Es wird deshalb empfohlen, die Erhebung und anschliessende Digitalisierung der Strassenentwässerung umzusetzen.

### **Forschungsbedarf**

Der Rückhalt von Reifenabrieb in Seen wurde aufgrund von verfahrenstechnischen Überlegungen abgeschätzt. Zur Verifizierung der Annahmen wären Sedimentkerne nötig, anhand welcher ein Zinkprofil oder noch besser ein Reifenabriebprofil direkt bestimmt werden könnte.

## 8 Literatur

- [1] Microplastic release from Tires into the Environment. 2019. Sieber et al. Report ETH / EMPA, March 2019.
- [2] Gewässerschutzverordnung (GschV). 1998. Stand 1. Juni 2018.
- [3] Gelöste organische Mikroverunreinigungen im Strassenabwasser. 2022. Steiner et al., Bericht, BAFU, 6. Mai 2022 v2.0.
- [4] A ubiquitous tire rubber–derived chemical induces acute mortality in coho salmon. 2021. Tian et al. Science 371, 185-189 (2021).
- [5] MICROPROOF - Micropollutants in Road RunOff. Final Report: Sources, fate and treatment of microplastics and organic micropollutants from road transport. 2019, Dröge, R. et al., CEDR Call 2016.
- [6] Mikroplastik: Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer. 2021. Steiner et al., Bericht, BAFU, 21. Juni 2020, v1.1.
- [7] ADAC, 2021. Tire wear particles in the environment. ADAC e.V. Munich, Germany.
- [8] Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden. 2005. Hillenbrand et al., Bericht, Umweltbundesamt, 19/05. ISSN 0722-186X
- [9] Modellierung des BAFU zur Berechnung der Auswirkung einer Geschwindigkeitsreduktion auf den Ausstoss von CO2. Kommunikation.
- [10] Stoffeinträge in den Strassenseitenraum - Reifenabrieb. 2010. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen bast. Verkehrstechnik Heft V188.
- [11] Funktionsprüfung bei der Abnahme und bei periodischen Kontrollen. 2019. Fachhandbuch T/U, 21 001-10469, ASTRA.
- [12] Leistungsprüfung neuer Verfahren. 2019. Fachhandbuch T/U. 21001-10468, ASTRA.
- [13] Strassenabwasserbehandlungsverfahren - Stand der Technik. 2021. BAFU / ASTRA. Dokumentation ASTRA 88002, v2.0.
- [14] Bankette bestehender Strassen. Untersuchung der Versickerung von Strassenabwasser über Strassenrandstreifen an einer bestehenden Strasse. 2006. Schlussbericht, eawag, Berner Fachhochschule, GSA, ASTRA, BUWAL.
- [15] Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen. 2013. Richtlinie, Bundesamt für Strassen ASTRA.
- [16] Siedlungswasserwirtschaft. 2007. Willi Gujer. Springer Berlin, Heidelberg.
- [17] Gewässerschutzgesetz (GSchG). 1991. Stand 1. Januar 2017.
- [18] Umsetzung der Störfallverordnung auf Nationalstrassen Anwendungshandbuch MISTRA-Fachapplikation Störfallrisiken (STR). Stand 2016.
- [19] MISTRA SABA Sofortlösung. [astra.admin.ch](http://astra.admin.ch)
- [20] Mikroplastik in Abwasser und Gewässern. 2016. Livia Cabernard et al. Fachartikel Aqua und Gas Nr. 7/8 (78)
- [21] Mechanistic understanding of microplastic fiber fate and sampling strategies: Synthetic and utility of metal doped polyester fibers. 2019. Michael Schmiedgruber et al. Water Research 155, 423-430.
- [22] Strategie zur Bewertung der Sedimentqualität in der Schweiz. Studie im Auftrag des BAFU. 2022. Casado C. Wildi, M., Ferrari, Benoit J.D., Werner, I. et al., Centre Ecotox/Oekotoxzentrum, Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie, Lausanne.



- [23] Der Zustand der Schweizer Seen. 1994. Schriftenreihe Umwelt Nr. 237. Gewässerschutz. BUWAL.
- [24] Belastung des Zürichsees durch die Strassenentwässerung. 2009. Markus Boller, Michele Steiner und Johanna Mieleitner. Bericht, wst21, 3. Juli 2009.
- [25] Gewässer in der Schweiz – Zustand und Massnahmen. 2022. Bericht, BAFU, 2022.
- [26] [maps.geo.admin.ch](https://maps.geo.admin.ch)
- [27] Versickerungspotenzial für das Strassenabwasser entlang der Böschungen der Nationalstrassen. 2015. Boivin P. und weitere Autoren, (2015). Dokumentation ASTRA 88011 V1.20.
- [28] Abwasserbewirtschaftung bei Regenwetter. 2019, VSA.
- [29] VSS 40 361. Strassenentwässerung – Behandlungsanlagen. Norm.
- [30] Regenwasser im Siedlungsraum. 2022. Bundesamt für Umwelt BAFU, UW-2202-D.
- [31] Verkehrsentwicklung und Verkehrsfluss. 2021. Statistik, Bundesamt für Strassen ASTRA, V1.10.

## Glossar

ARA	Abwasserreinigungsanlage, Kläranlage für kommunales Abwasser
ASB	Absetzbecken
DTV	Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen
EZG	Einzugsgebiet eines Gewässers oder einer Behandlungsanlage
FLK	Fahrleistungskilometer – Auf einem Strassenabschnitt gefahrene Kilometer.
GSchV	Verordnung zum Schutz der Gewässer
GUS	Gesamte ungelöste Stoffe – Messgrösse für Partikel mit einem Durchmesser über 0.45 Mikrometer
HLS	Hochleistungsstrassen. NSG, Art. 2: "Nationalstrassen 1. Klasse sind ausschliesslich für die Benützung mit Motorfahrzeugen bestimmt und nur an besonderen Anschlussstellen zugänglich. Sie weisen für beide Richtungen getrennte Fahrbahnen auf und werden nicht höhengleich gekreuzt." NSG, Art. 3: "Nationalstrassen 2. Klasse sind die übrigen, ausschliesslich dem Verkehr der Motorfahrzeuge offenen Nationalstrassen, die nur an besonderen Anschlussstellen zugänglich sind. Sie werden in der Regel nicht höhengleich gekreuzt."
LKW	Lastwagen
MISTRA	Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr des ASTRA
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PW	Personenwagen
RFB	Retentionsfilterbecken einer SABA
SABA	Strassenabwasser-Behandlungsanlage
STR	Störfallrisiken, Datenbank zu Störfallrisiken
TEZG	Teileinzugsgebiet eines Gewässers
UPlanNS	Unterhaltsplanung Nationalstrassen