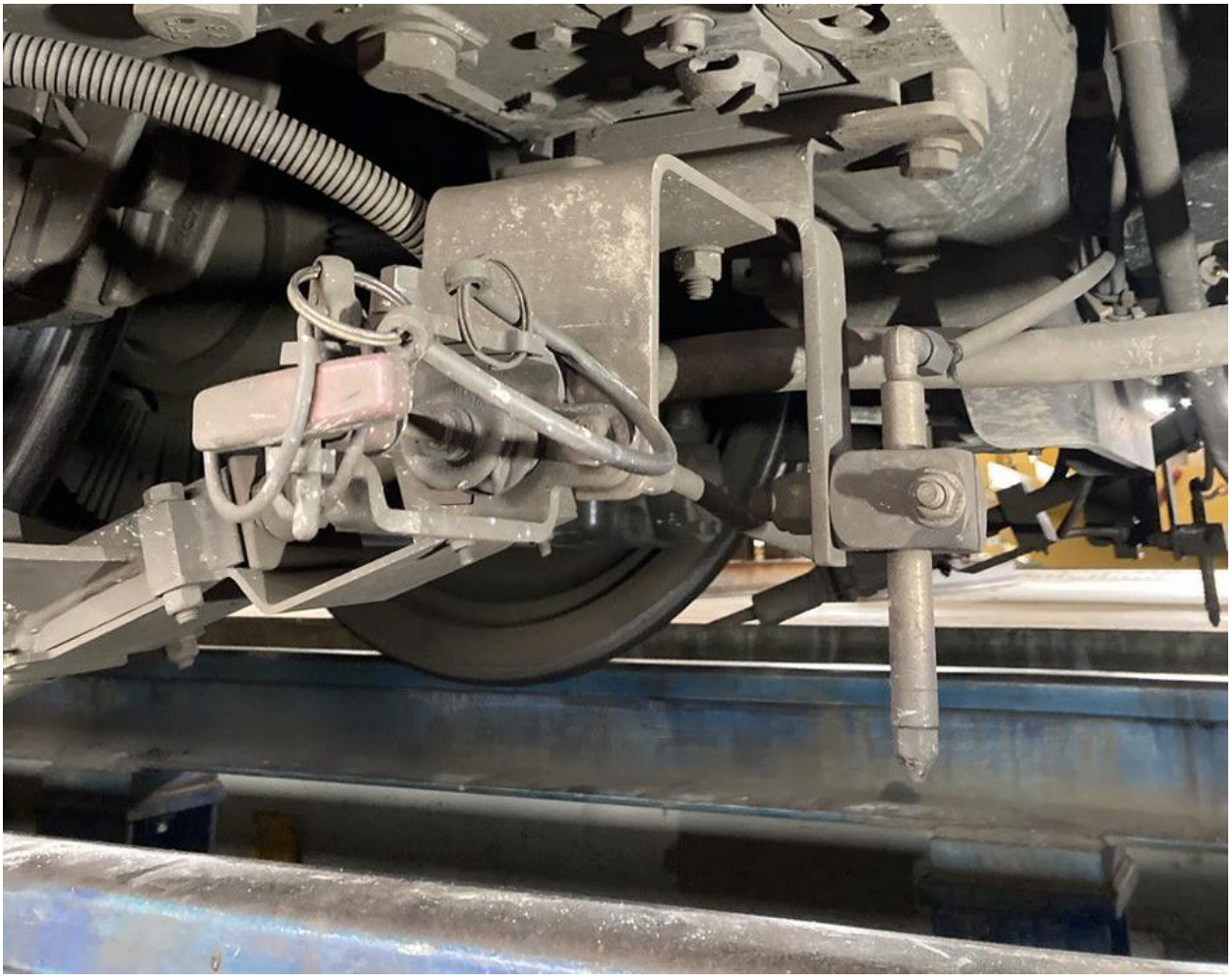
Verwendungsempfehlungen für SKK-Konditioniermittel in Bezug auf Umweltverträglichkeit

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Strecke mit Meterspur
Projekt: 2 SKS / SKK
Modul: 2. Rechtliche Grundlagen

Technischer Bericht



ID: RAILPlusSF-00051

Datum / Status:	29.02.2024 / Freigegeben	Anzahl Seiten 20
Ersteller:	Gaël Vuillème / MOB	
Prüfung:	Michael Stalder / CE cideon engineering Schweiz AG	
Freigabe:	Nikolaus Ritter / zb Zentralbahn AG	

Zitiermodus: Vuillème Gaël, RAILplus / MOB: Umweltverträglichkeit. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00013, 28.3.2024

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	15.07.2023	G. Vuillème	Erste Version
0.2	31.07.2023	M. Stalder	Erste Prüfung von MLSR
0.3	03.11.2023	G. Vuillème	Bericht fertig mit Enwurf BFH ohne AC²T
0.4	15.11.2023	G. Vuillème	Bericht fertig mit Entwurf AC²T
0.5	29.02.2024	G. Vuillème	Entwurf zum Review
0.6	06.03.2024	G. Vuillème	Entwurf zum Review AC2T
0.7	11.03.2024	G. Vuillème	Version zur Freigabe
0.9	18.03.2024	M. Stalder	Bericht verarbeitet und fertig
1.0	18.03.2024	N. Ritter	Finale Korrektur und freigabe des Projektleiters
1.1	09.04.2024	G. Vuillème	Anpassung mit den Bemerkungen von L. Pasquier
2.0	08.05.2024	N. Ritter	Freigabe durch den Projektleiter

Freigabe Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technische Leitung	28.03.2024
2.0	Gesamtleitung	13.06.2024

Status

Öffentlich

Abkürzungen

AB	Appenzeller Bahnen AG
ASm	Aare Seeland mobil AG
AVA	Aargau Verkehr AG
KMR	Karzinogener, mutagener oder reprotoxischer Stoff
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (*Fourier transform infrared spectroscopy*)
GC-FID	Gaschromatografie - Flammenionisationsdetektion (*Gas chromatography – flame ionization detector*)
GC-MS	Gaschromatografie - Massenspektroskopie (*Gas chromatography – mass spectroscopy*)
PAK	Polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff
ICP-OES	Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (*Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy*)
LEB	Compagnie du chemin de fer Lausanne-Echallens-Bercher SA
MGB	Matterhorn Gotthard Bahn
NIST	Nationales Institut (USA) für Normen und Technologie (*National Insitute of Standards and Technology*)
VBBA	Verordnung über die Begrenzung und Beseitigung von Abfällen
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn RBS
SEM-EDX	Rasterelektronenmikroskopie und energiedispersive Röntgenspektroskopie (*Scanning electron microscopy energy-dispersive X-ray spectroscopy, SEM-EDX*)
SKK	Schienenkopfkonditionierung
SKS	Spurkranzschmierung
STEP	Abwasser-Reinigungsanlagen (*STation d'ÉPuration des eaux usées*)
TPF	Transports publics fribourgeois Holding (TPF) SA
ZB	zb Zentralbahn AG

Zusammenfassung

Dieses Dokument beschreibt das Verfahren zur Bestimmung der Umweltverträglichkeit von SKK-Mitteln. In den Sicherheitsdatenblättern einiger Konditionierungsmittel sind mehrere umweltgefährdende Stoffe aufgeführt. Das Risiko einer Umweltverschmutzung muss minimiert werden, indem sichergestellt wird, dass die betreffenden Stoffe nicht mit dem Regen- und Schmelzwasser aus der Fahrbahn getragen werden.

Es werden zwei typische Fälle von Gleisen untersucht. Im ersten Fall entspricht das Gleis den aktuellen Bauvorschriften. Das Wasser fließt zunächst durch den Schotter und anschließend durch einen Filterkörper aus Sand oder Kies. Anschließend werden Wasserproben entnommen. Bei allen Messungen halten die Gefahrenstoffe und andere Indikatoren für das Vorhandensein von SKK die geltenden Normen ein. Die Messungen finden in Gruyères (FR) und Bossonnens (FR) auf dem Netz der TPF und in Stans (NW) auf dem Netz der zb statt.

In der zweiten Zusammenstellung hat das Gleis keinen Schotter. Das Wasser rinnt über eine wasserundurchlässige Oberfläche und wird in einer Kammer gesammelt. Anschließend wird es in die Natur abgeleitet. Dieser Untersuchung ist eine Einschätzung des Zustands des gesammelten Wassers, wenn es in den Schotter eintritt. Ein Teil der Schadstoffe setzt sich im Schlamm in der Sammelstelle ab, der restliche Teil wird in die Umwelt ausgetragen. Beim Verlassen der Kammer kann die Schadstoffkonzentration die Grenzwerte für toxische Einleitungen überschreiten. Bei der Einleitung in einen Wasserlauf sinkt die Schadstoffkonzentration und damit auch die Gefahren. Diese Messungen werden an einer Brücke in Hergiswil (NW) im Netz der zb durchgeführt.

Die Messergebnisse deuten darauf hin, dass die verschiedenen Schadstoffe von den unterschiedlichen Schichten, die das Wasser durchdringt, zurückgehalten werden. Die sehr geringe Wasserlöslichkeit und die Adsorptionseigenschaften der Gleisbestandteile ermöglichen diese Filterung, weshalb auch andere Schadstoffe wie SKS oder Imprägniermittel von Holzschwellen zurückgehalten werden. Die Qualität des Filterkörpers verbessert sich mit der Zeit durch die Bildung eines Sekundärfilters aus Partikeln, die aus dem Gleis kommen.

Das HeadLub 90 von Igralub wird als Referenz für die Tests verwendet, da dieses von der TPF und der zb verwendete Konditionierungsmittel ist. Um die Ergebnisse auf anderen SKK-Mitteln zu übertragen, spielt die Wasserlöslichkeit eine entscheidende Rolle. Dies gilt sowohl für die Grundmatrix als auch für die einzelnen Komponenten. Die Ergebnisse zeigen, dass bei normalem SKK-Einsatz die heutigen Filterkörper ausreichen, um viele Stoffe zurückzuhalten, sofern sie nicht wasserlöslich sind. Die in dieser Studie erzielten Ergebnisse sind auf andere SKK-Produkte übertragbar, sofern die Wasserlöslichkeit vergleichbar ist. Dieses Dokument schlägt ein Laborverfahren zur Messung dieser Löslichkeit vor.

Während der Lebensdauer der Anlagen sammeln sich Schadstoffe im Schotter und im Filterkörper an. Eine höhere Verschmutzung führt zu zusätzlichen Kosten für die Entsorgung oder das Recycling des Gleismaterials. SKK hat einen sehr geringen oder vernachlässigbaren Einfluss, insbesondere bei Holzschwellen aufgrund ihrer Imprägnierung. Im Falle von Metall- oder Betonschwellen ist die Verschmutzung des Schotters mit und ohne SKK ähnlich. Weitere Verschmutzungsquellen aus dem Schienenverkehr sind SKS, Bremssohlen oder Imprägnierungsmittel für Holzschwellen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 6
2 Ziele 7
3 Grundkenntnisse 8
3.1 Zusammenstellung 8
3.2 Erkennung und Filterung 8
4 Testverfahren 10
4.1 Im Labor 10
4.2 In der Praxis 13
5 Testergebnisse 15
5.1 Im Labor 15
5.2 In der Praxis 16
5.2.1 Gefilterte Proben 16
5.2.2 Ungefilterte Proben 17
6 Interpretation 18
6.1 Rückhaltung von Schadstoffen und Verschmutzung von Oberflächenwasser 18
6.2 Verschmutzung von Ballast, Unterbau und Filterkörpern 18
6.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Konditionierungsmitteln 18
7 Schlussfolgerung 19
7.1 Empfehlungen 19
8 Verzeichnis 20
8.1 Referenzen 20
8.2 Abbildungen 20
8.3 Tabellen 20

1 Einleitung

Zu den Untersuchungsgegenständen der Systemführerschaft gehört die Schienenkopfkonditionierung (SKK). Das Ziel der Anwendung ist die Senkung des Reibungskoeffizienten auf der Lauffläche zur Verringerung von Verschleiß und Lärm durch die Anwendung eines Konditionierungsmittels. Im Gegensatz zur Spurkranzschmierung (SKS) kann die SKK den Reibungskoeffizienten nicht auf den niedrigsten Wert senken, sondern muss die Haftung gewährleisten.

Die Einführung von SKK birgt das Risiko einer Umweltverschmutzung, da das Konditionierungsmittel direkt auf den Schienenkopf aufgetragen wird. Es fließt in das Gleis und anschließend potenziell in die Umwelt. Daher ist es notwendig, die Umweltverträglichkeit der Produkte oder ihrer Anwendung sicherzustellen. Die Studie bezieht sich nur auf die normale Verwendung des SKK. Fehlanwendungen und Unfälle werden nicht berücksichtigt.

Mehrere Konditionierungsmittel werden von verschiedenen metrischen Eisenbahnen in der Schweiz verwendet, insbesondere im Rahmen der RAILplus-Forschung. Die Tabelle 1 fasst die Produkte zusammen, die heute von den verschiedenen Eisenbahnunternehmen verwendet werden. Einige Produkte weisen einen ökologischen Anspruch auf. Während die gesamte Feldforschung mit dem HeadLub 90 von Igralub durchgeführt wird, werden in diesem Dokument Kriterien für die Übertragung dieser Ergebnisse auf andere bestehende oder zukünftige Produkte festgelegt.

Eisenbahnunternehmen	Konditionierungsmittel	Hersteller	Bemerkung
ASm, LEB, RBS, BOB	Sintono Terra HLK	Lubcon	
AB, MGB, TPF, ZB	HeadLub 90	Igralub	
AVA	Unbekannt		In der Umfrage P1 wollte AVA im Sommer 2022 Tests durchführen. (Güldenapfel, 2022)
TMR	HeadLub Oec 90	Igralub	

Tabelle 1 Liste der im Jahr 2023 von den Schweizer Meterspurbahnen verwendeten Konditionierungsmittel

In diesem Dokument werden die Ergebnisse von drei verschiedenen Arbeiten vorgestellt. Zunächst eine theoretische Studie von E. Brugger (zb), die im Rahmen der Systemführerschaft durchgeführt wurde und ein Konzept zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von Konditionierungsmitteln vorstellt. Sie stellt die Konditionierungsmittel, das Konzept der Umweltverträglichkeit sowie die geltenden Rechtsgrundlagen und Normen vor.

Zweitens eine Laborstudie, um insbesondere die chemische Zusammensetzung der Produkte zu analysieren und Methoden zur Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit, Toxizität, Bioakkumulation und des Rückhaltevermögens des Gleisfilters zu definieren, die vom österreichischen Tribologie Institut AC2T Research GmbH (AC²T) durchgeführt wurde. Ziel dieser Studie ist es, ein Laborverfahren zur Bewertung von neuen SKK einzuführen, ohne Feldtests durchführen zu müssen. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass sie billiger, reproduzierbarer, aber auch schneller ist. Der Bericht enthält außerdem alle geltenden Normen, Spezifikationen und Vorschriften, die für SKK relevant sind.

Schließlich befasst sich eine von M. Steiner vom Institut für Stadtentwicklung und Infrastruktur der Berner Fachhochschule geleitete Forschungsarbeit mit Feldmessungen von SKK-Freisetzungen in die Umwelt sowie mit Risikobewertung und -management (Steiner, 2024).

Das Testverfahren wird analog zu den Produkten von SKS nach RTE 49410 (Kling, 2017) gewählt, da zum einen beide Produkttypen auf der Schiene abgelegt werden und zum anderen die Texturen ähnlich sind und die Zusammensetzungen auf die gleiche Weise bewertet werden können (Brugger, 2022), (Dörr, 2024).

Die experimentellen Ergebnisse ermöglichen es, die Risiken der Verwendung von SKK zu definieren und zu reduzieren, indem eine geeignete Konditionierungsstrategie, Produktmengen und Anwendungsorte gewählt werden. Die Feldstudien werden auf den Linien der zb und TPF durchgeführt.

2 Ziele

Das Ziel dieser Studie ist es, die Umweltverträglichkeit der Verwendung von SKK für Meterspurige Eisenbahnen in der Schweiz nachzuweisen.

Wenn ein Produkt umweltschädlich ist, bedeutet dies nicht zwangsläufig, dass die Verwendung von SKK unmöglich ist. Wenn es im Gleisfeld bleibt oder die Menge, die die Umwelt erreicht, gering ist, kann die Verwendung von SKK trotzdem als umweltverträglich angesehen werden. E. Brugger beschreibt diese Überlegungen in dem Entscheidungsbaum in Abbildung 1.

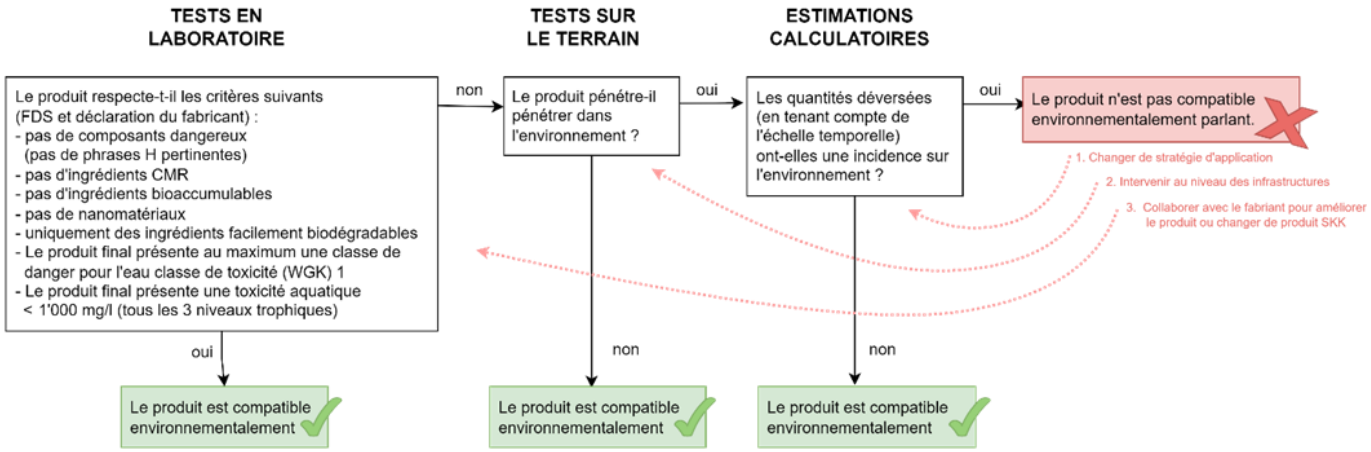


Abbildung 1 Entscheidungsbaum mit Bezug auf der Strategie der SBB. (Brugger, 2022) bezogen auf (CFF CoC WFF, 2020).

Durch die Kenntnis der verwendeten Produkte sowie ihrer problematischen Bestandteile und der angewandten Mengen kann in Feldversuchen abgeschätzt werden, wie viel Konditionierungsmittel in die Umwelt gelangt. Konzentrationsmessungen werden in den Abflüssen sowie in den verschiedenen Schichten des Systems durchgeführt, um die Wirkung und die Anreicherung der einzelnen Elemente (Schotter, Filterkörper...) zu kennen. Anhand dieser Messungen kann bestimmt werden, welche Trassierungselemente des Gleises notwendig sind, um die Schadstoffe aus dem abfliessenden Wasser zu filtern.

Die verschiedenen giftigen Stoffe sammeln sich im Gleis an. Diese Studie ermittelt die Auswirkungen auf die Lebensdauer und die Bedingungen für die Entsorgung von SKK-belasteten Gleiselementen.

Alle Feldanalysen in dieser Studie werden mit einem Konditionierungsmittel durchgeführt. Es werden Kriterien und eine Methode zur Übertragung der Ergebnisse auf andere Produkte festgelegt.

3 Grundkenntnisse

Eine Übersicht über die gesetzlichen Bestimmungen sowie einen Überblick über die Normen, Spezifikationen und Vorschriften für Konditionierungsprodukte finden Sie in (Dörr, 2024).

3.1 Zusammenstellung

Die Produkte, die im MSDS (Material Safety Data Sheet) in den verschiedenen Konditionierungsmitteln als gefährlich angekündigt werden, sind branched ethoxylated nonyl phenol (enthalten in KELTRACK) und Kohlenwasserstoffe (Alkane und Aromaten; enthalten in HeadLub 90). Das dritte Produkt (Sintonno Terra) enthält keine davon. (Steiner, Homes, & Rütti, 2021).

Angesichts der wenigen verfügbaren Informationen können weitere Tests durchgeführt werden (FTIR, ICP-OES, Massenfraktion, Morphologie und Zusammensetzung der festen Bestandteile mittels SEM-EDX) (Dörr, 2024). Verschiedene in (Dörr, 2024) erwähnte Verfahren ermöglichen es, die „biologischen“ Eigenschaften von SKK zu bestimmen. Auf diesem Konzept basieren beispielsweise das europäische Umweltzeichen für Schmierstoffe (EU Ecolabel for Lubricants) und *der Blaue Engel*, das deutsche Umweltzeichen, DE-UZ 178 für biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten (Dörr, 2024).

Die betrachteten SKK-Produkte bestehen zu 1-2 % aus flüchtigen Bestandteilen, zu etwa einem Drittel aus Feststoffen und zu zwei Dritteln aus Öl. Das Elutionsverhalten (Waschen) von SKK wird durch die folgenden physikalisch-chemischen Parameter bestimmt:

- Wasserlöslichkeit der Bestandteile oder Verteilung zwischen der Öl- und Wasserphase, bestimmt mithilfe des Koeffizienten oder seines Logarithmus. Letzterer wird durch Zugabe einer kleinen Menge SKK in einem Zweiphasensystem (n-Octanol und Wasser, jeweils unpolar und polar) gemessen. SKK und SKS haben einen hohen Wert, was eine hohe Sorption an Oberflächen (Ballast, Partikel, Kies, Sand...) und eine hohe Bioakkumulation impliziert.
- Verteilung der öllöslichen Bestandteile zwischen der festen Phase (Sediment und Boden) und dem Wasser (Adsorptionskoeffizient). Diese Werte können für jede Schicht des Weges geschätzt werden, wenn die Eigenschaften der einzelnen Schichten bekannt sind.
- Die Mobilität von Partikeln, insbesondere von Feststoffpartikeln. Sie wird gemessen durch die Herstellung eines Eluats gemäß OLED (Dörr, 2024).

Diese Parameter verändern sich im Laufe der Zeit, insbesondere durch den Eintrag von organischem Material und Partikeln aus der Abnutzung des Schotters (Dörr, 2024), (Steiner, 2024).

3.2 Erkennung und Filterung

Die verschiedenen Tests werden mit dem HeadLub 90 durchgeführt, da dieses in den an dieser Studie beteiligten Streckennetze der TPF und zb verwendet wird. Die Wasserlöslichkeit der Problemstoffe ist gering. Sie neigen daher dazu, an feste Bestandteile, Ballast oder Schwebeteilchen im Wasser adsorbiert zu werden (Steiner, 2024). Bei starkem Regen werden diese Partikel weggespült und können in den Filterkörper gelangen.

Die Filterqualität des Wassers hängt sehr stark von der Struktur des Weges ab. Tabelle 2 zeigt die Wirkung der einzelnen Elemente bei drei verschiedenen Arten der Entwässerung. Die Verwendung von Sand anstelle von Kies im Filterkörper des Entwässerungsgrabens ist zum Beispiel besser.

Entwässerungstyp	Ort und Wirkung der Rückhaltung					
	Gleiskörper	Absatz	Entwässerungs-graben	Natürliches Gelände	Oberflächliches Wasser	Abwasser-reinigungs-anlagen (STEP)
Absatz	+	+		+ bis ++		
Entwässerungsgraben mit Versickerung	+	+	+ bis +++	+ bis ++		
Entwässerungsgraben mit Entsorgung	+	+	+ bis +++		(+)	+ bis ++

Tabelle 2 Entwässerungstypen und Rückhaltungen von Schadstoffen. Die Rückhaltung ist stoffspezifisch und hängt vom Design der Komponenten ab. Der biologische Abbau wird nicht berücksichtigt. + geringe Rückhaltung, ++ mittlere Rückhaltung, +++ hohe Rückhaltung. (Steiner, 2024).

Die Qualität des Filters im Entwässerungsgraben verbessert sich mit der Zeit. Mit den Ablagerungen, die sich ansammeln, bildet sich ein Sekundärfilter auf dem Filterkörper. (Steiner, 2024)

4 Testverfahren

4.1 Im Labor

Die Labormethoden zielen darauf ab, die Löslichkeit und das Sorptionsverhalten von SKK im Gleisbett, insbesondere im Entwässerungssystem, in einem einfachen und kostengünstigen Verfahren zu simulieren. Falls erforderlich, lassen sich dadurch leicht Variationen einführen. Es soll abgeschätzt werden, ob die SKK-Bestandteile im Entwässerungssystem ausgewaschen werden können. (Dörr, 2024).

Festschmierstoffe (Kupfer, Aluminium, Grafit) sind in den für SKK erwarteten Mengen nicht gefährlich. Laut ECHA (European Chemicals Agency) wurde für Aluminium und Grafit keine Gefahr eingestuft. Kupfer ist sehr giftig für das Leben im Wasser. Als Richtwert wird in Anhang 3.2 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) ein Grenzwert von 0,5 bis 1 mg/L Kupfer (gesamt) für die Einleitung von Industrieabwässern in Gewässer oder in die öffentliche Kanalisation angegeben. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die genannten Metalle nur wenige Ionen freisetzen. Wenn sie freigesetzt werden, wird angenommen, dass sie sich durch Sorption an Schotter, Kies und Sand sowie an organisches Material, das sich im Laufe der Zeit ansammelt, binden. Die Schlussfolgerung ist, dass vernachlässigbare Mengen an gelösten Metallen in das Abwasser gelangen. (Dörr, 2024).

Eine Reihe anderer Prozesse wie Verflüchtigung, Abbau durch Mikroorganismen und Sonneneinstrahlung sowie die Verteilung entlang der Schiene durch vorbeifahrende Züge werden hier nicht berücksichtigt. Jeder dieser Prozesse reduziert das Risiko der Wasserverschmutzung. (Dörr, 2024).

Das Lösungs- und Sorptionsverhalten der SKK und ihrer Bestandteile wird nach der Methode zur Herstellung von OLED-Eluaten bestimmt, die entsprechend den folgenden Eigenschaften der SKK angepasst wurde:

- **Löslichkeit organischer und anorganischer Bestandteile.** 1 g SKK wird an den Wänden eines Behälters ausgestrichen. 900 g Wasser werden hinzugefügt (Abbildung 2 links). Die Mischung wird 24 Stunden lang intensiv gerührt (Abbildung 2 in der Mitte). Die feste Phase wird getrocknet und gewogen, um zusätzlich die Löslichkeit in Wasser zu bestimmen. Die Wasserphase (das sogenannte Eluat) wird für zwei Messungen verwendet. Die Konzentration von Kupfer und Aluminium wird mittels ICP-OES gemessen. Die gelösten organischen Bestandteile werden mit *n*-Hexan extrahiert und mittels GC-FID analysiert (Abbildung 2 rechts). Der gesamte Prozess ist dargestellt in (Dörr, 2024).

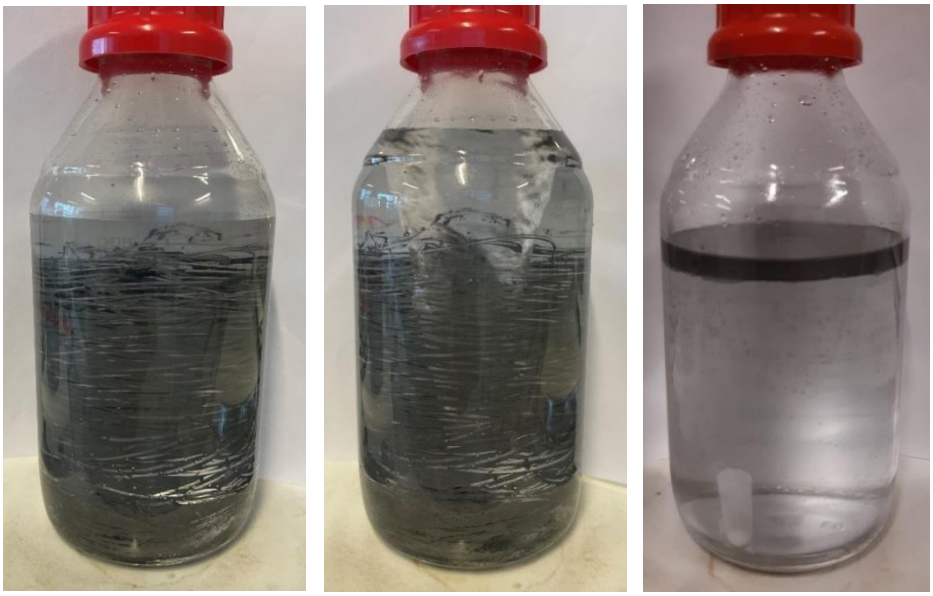


Abbildung 2 Löslichkeit in Wasser. Vorbereitung vor der Mischung (links), während der Mischung (Mitte) und während der Extraktion der organischen Komponenten mit n-Hexan (rechts). (Dörr, 2024).

- **Sorption von SKK auf organisches Material.** 1 g SKK wird auf 90 g organischem Material, Rindenmulch (Abbildung 3) oder Holzspänen (Abbildung 4), verteilt. 900 g Wasser werden hinzugefügt. Die Mischung wird 24 Stunden lang gerührt. Dasselbe Verfahren wird ohne SKK angewandt, um eine Kontamination durch organisches Material auszuschließen. Das Eluat wird auf die gleiche Weise wie bei der Wasserlöslichkeit behandelt.

Abbildung 3 Mischung aus Rindenmulch und SKK in Wasser vor der Mischung (links) und nach der Mischung (Mitte). Entstehendes Eluat (rechts).

Abbildung 4 Mischung von Holzspänen und SKK in Wasser vor der Mischung (links) und nach der Mischung (Mitte). Entstehendes Eluat (rechts).

- **Freisetzung von Metallionen in das Wasser.** 1 g SKK-Feststoff wird in 1000 g Wasser gemischt. Fünf Tage lang wird die Mischung kräftig umgerührt. Alle 24 Stunden wird eine Probe entnommen und die Metallkonzentration mittels ICP-OES nachgewiesen.
- **Sorption von Metallionen** aus festen SKK-Bestandteilen an organisches Material durch Zirkulation von Rindenmulch und Holzspänen in wässrigen Lösungen von Aluminium (bis zu 80 mg Al/kg) und Kupfer (bis zu 200 mg Cu/kg). (Dörr, 2024).

Rindenmulch und Holzspäne sind für Versuche leicht verfügbar und werden als repräsentative organische Materialien ausgewählt, die in den Gleisbereich eingebracht werden, wie z. B. Äste, Blätter usw. und deren Verwitterungsprodukte. Im Rahmen dieser Studie wird entmineralisiertes Wasser verwendet. Im Gegensatz zu natürlichem Wasser (Regen, Schmelzwasser) ist seine Zusammensetzung genau festgelegt, insbesondere der Gehalt an gelösten Salzen. Die Durchführung im Labor erfolgt unter Umgebungsbedingungen (ca. 25 °C). (Dörr, 2024).

Um die Ergebnisse zur Löslichkeit der SKK anhand der Eluate zu bestätigen, wird die Testmethode des Wasserauswaschens (DIN EN 15427-2-1:2022-07, Anhang B; Abbildung 5) angepasst. Hierbei wird eine mit einem SKK-Film präparierte Metallplatte immer wieder mit Wasser besprüht. Nach der „Berieselung“ wird der Massenverlust von SKK verwendet, um eine Schätzung der Löslichkeit zu erhalten (Abbildung 6). (Dörr, 2024).

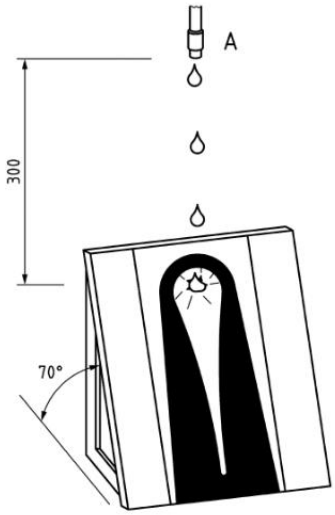


Abbildung 5 Reinigungstest nach DIN EN 15427-2-1. (Dörr, 2024).

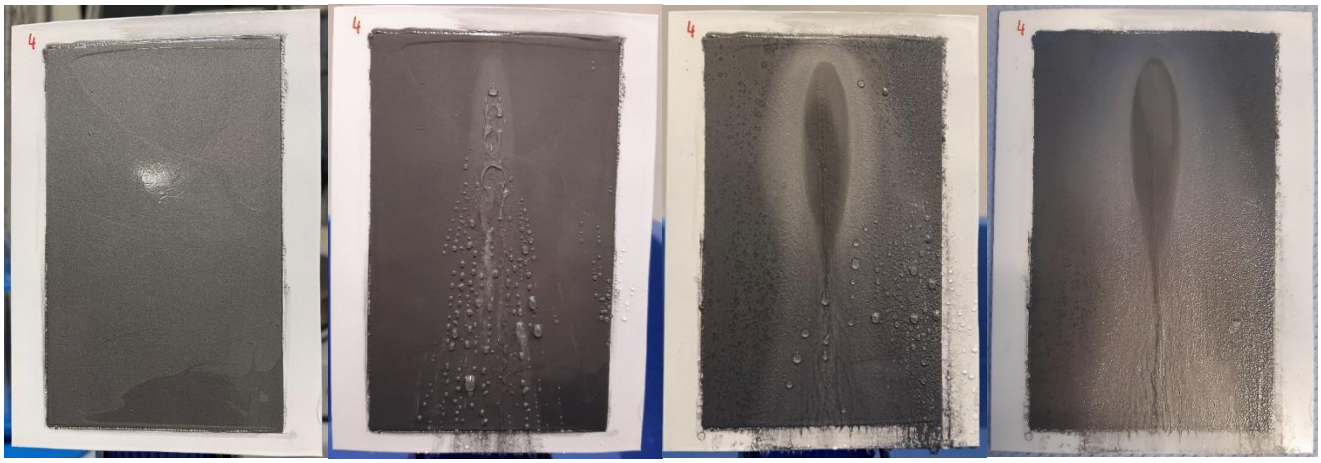


Abbildung 6 Test nach der Reinigung. Von links nach rechts: Die mit SKK beschichtete Platte vor dem Test, während des Tests, am Ende des Tests und nach dem Trocknen. (Dörr, 2024).

Dieses Konzept der Labormethoden wird mit drei Konditionierungsprodukten getestet.

Der Reinigungstest wird in Übereinstimmung mit RTE 21110 (Unterbau und Schotter - Normalspur und Meterspur; (Däppen, 2015)) so modifiziert, dass das „Regen“-Wasser auf die in RTE 21110 definierten Schichten des Schotters (30 cm) als Teil des Oberbaus sowie Kies (50 cm definiert nach (Dörr, 2024)) und Sand (30 cm) als Teile der Drainage geleitet wird. Das Material wird in geeignete Behälter gefüllt, die unten eine kleine Öffnung zum Abfließen des Wassers haben. Die Platten werden mit unterschiedlichen Mengen SKK vorbereitet und in definierter Weise, insbesondere in 15-Minuten-Sequenzen, bewässert, wie in RTE 21110 beschrieben. Es wird beobachtet, ob und wann der SKK mit dem ablaufenden Wasser weggespült wird, was optisch an den Feststoffpartikeln im SKK erkennbar ist. (Dörr, 2024).

4.2 In der Praxis

Die Feldmessungen werden von Dr. M. Steiner von der Berner Fachhochschule (BFH - Berner Fachhochschule) durchgeführt. Ziel der Messungen ist es, SKK-Produkte oder deren Bestandteile im Wasser des Abflusses nachzuweisen. Die Studie basiert auf die Analyse von gelösten oder suspendierten Elementen in Wasserproben, die in den Entwässerungen gesammelt wurden, um festzustellen, ob das Konditionierungsmittel die Umwelt erreicht und, falls ja, wie viel der gefährlichen Produkte vorhanden sind.

Um diese Freisetzungen zu erkennen, werden zwei Substanzen als HeadLub-Indikatoren verwendet. Das heißt, sie sind im SKK vorhanden, aber nicht in anderen Fetten und Ölen, die auf der Strecke verwendet werden. Die Konzentration verschiedener Schadstoffe wie Kupfer, Zink, Eisen und Aluminium werden ebenso gemessen wie die von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). SKK ist nicht die einzige Quelle für diese Schadstoffe. Diese Stoffe befinden sich auch im SKS, in den Bremssohlen, in den Imprägnierungsmitteln der Holzschwellen usw. (Steiner, 2024).

Die Proben wurden an vier Orten gesammelt, Bossonnens (FR), Gruyères (FR), Stans (NW) und Hergiswil (NW). Diese Auswahl beruht auf Kriterien der Zugänglichkeit zu den Entwässerungen sowie zu den verschiedenen Filterschichten. Die Proben wurden manuell während oder nach einem Regen gesammelt.

Bossonnens: Die Proben wurden am Bahnhof von Bossonnens gesammelt (Abbildung 7). Bevor das Wasser in den Abfluss gelangt, durchläuft es den Schotter und einen Filterkörper aus Sand. Die Geometrie des Gleises entspricht den aktuellen Baunormen für die Entwässerung von Bahnanlagen. Die Proben werden in einem Rohr gesammelt. Die Konditionierung begann im Dezember 2022. Eine 0-Messung, vor Beginn der Konditionierung, wurde durchgeführt.

Drei der sieben Züge, die regelmäßig auf der Strecke verkehren, sind mit dem Konditionierungssystem ausgestattet, das nur eingesetzt wird, wenn die Luftfeuchtigkeit unter 85 % liegt. Die Züge konditionieren nur in eine Richtung. Im Durchschnitt konditionieren 16 Züge pro Tag, die jeweils ca. 3070 mm3/km SKK bei trockenem Wetter aufbringen (Pasquier, 2024). Dies entspricht einer Gesamtmenge von 59 g/km/Tag.

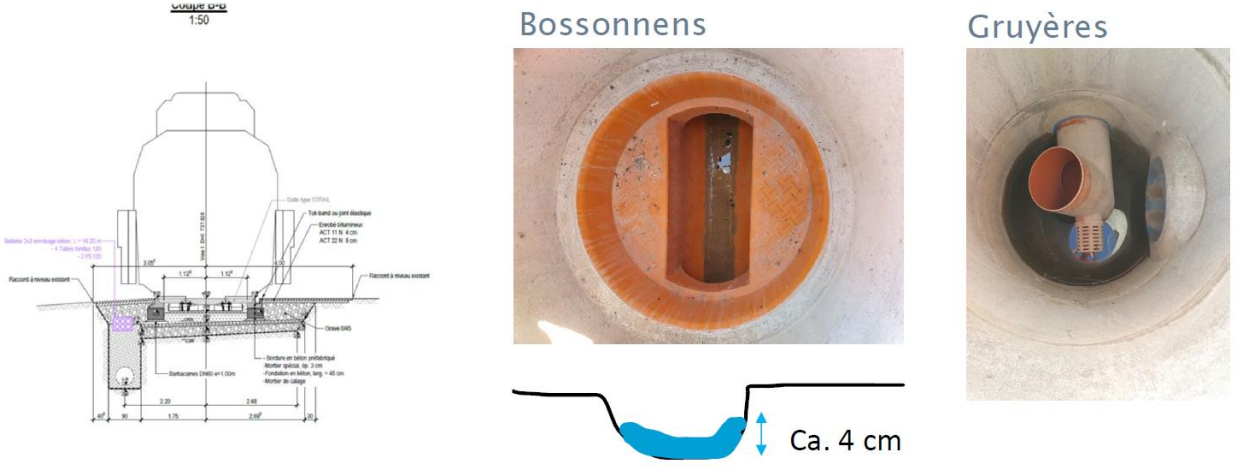


Abbildung 7 Lage der Sammelstelle für Proben von Entwässerungen in Bossonnens und Gruyères. (Steiner, 2024)

Gruyères : Die Sammelstelle befindet sich in der Nähe des Bahnübergangs Le Pas in einer Kammer. Die Bedingungen, die den Einsatz von SKK ermöglichen, sind die gleichen wie in Bossonnens, mit durchschnittlich 9 Zügen pro Tag, die jeweils etwa 1670 mm3/km konditionieren. (Pasquier, 2024). Dies entspricht insgesamt 18 g/km/Tag SKK.

Die Sammlung der Proben befindet sich in einer Akkumulationskammer (Abbildung 7).

Stans : Diese zb Sammelstelle wird in Stans eingerichtet, um die Wirksamkeit der Filterschichten über einen längeren Zeitraum als auf der TPF-Strecke zu messen. Die Gleisgeometrie ist dort ähnlich. Das Wasser fließt durch den Schotter und eine Sandschicht und wird dann in einer Kammer gesammelt. Wenn die Konditionierungsbedingungen erfüllt sind, werden nach Angaben von ZB 622 g/km/Tag SKK abgegeben.

Abbildung 8 Lage der Sammelstelle für Proben von Entwässerungen in Stans. (Steiner, 2024)

Hergiswil : Die Zentralbahn konditioniert an diesem Ort seit 2016. Dies entspricht dem längsten Anwendungszeitraum in der Schweiz. Die täglich auf die Schiene aufgebrachte Konditionierungsmenge erreicht je nach Wetterbedingungen bis zu 637 g/km/Tag (Daten von zb). Die Menge ist etwa zehnmal höher als bei den TPF. Da die Untersuchung der Umweltauswirkungen erst nach dem Beginn der Anwendung von SKK begann, ist die Ausgangssituation unbekannt. Die Sammelstelle für das Ablaufwasser befindet sich auf der Brücke über den Steinibach (Abbildung 9). Dort gibt es keine Filterschicht, das Wasser aus dem Weg wird direkt in die Schlammsammelkammer geleitet und dann in den Bach abgeleitet. Die Sammelkammer sorgt dafür, dass die Peak-Effekte durch Auflösung abgeschwächt werden.

Die Situation in Hergiswil hat für diese Studie zwei Vorteile. Zum einen ermöglicht sie es, die Verschmutzung im ungünstigsten Fall zu messen: ohne Filter. Andererseits erlaubt sie es, den Zustand des Wassers ohne Filter zu kennen, was ein besseres Verständnis der Filterwirkung der Strecke ermöglicht. Ein Teil der Schadstoffe wird jedoch von den Partikeln adsorbiert und befindet sich im Schlamm am Boden der Kammer wieder.

Abbildung 9 Lage der Sammelstelle für Proben von Entwässerungen in Hergiswil. (Steiner, 2024)

5 Testergebnisse

5.1 Im Labor

Das gesamte Kapitel stammt aus (Dörr, 2024). Die Löslichkeit von SKK variiert je nach verwendetem Verfahren, die Größenordnung bleibt jedoch gleich. Die Löslichkeit organischer Bestandteile in Wasser liegt bei 20 bis 60 mg/kg. Organisches Material, wie Rindenmulch und Holzspäne, bindet SKK, wodurch das Vorhandensein von SKK im Eluat („schmutziges“ Wasser) und damit in der Umwelt unter realen Bedingungen verringert oder sogar verhindert wird.

Die Löslichkeit der anorganischen Bestandteile von SKK in Wasser wird für Aluminium und Kupfer untersucht. Selbst in einem fünftägigen Test mit SKK-Feststoffen wird nur eine geringe Löslichkeit von Aluminium bis zu 4 mg/kg festgestellt; die Löslichkeit von Kupfer bleibt niedriger als 1 mg/kg.

Das Sorptionsverhalten von Metallionen aus den anorganischen Bestandteilen der SKK’s wird für Aluminium- und Kupferionen untersucht. Rindenmulch bindet Kupferionen sehr gut und den größten Teil der Aluminiumionen. Bei den Holzspänen ist die Adsorption aufgrund der Osmose nur teilweise (ca. 40-60 %).

Basierend auf den Ergebnissen von Labormethoden, die unter den angewandten Testbedingungen durchgeführt wurden, kann man schließen, dass:

- jedes Verfahren der Labormethode ermöglicht einzeln die Bewertung des Löslichkeits- und Sorptionsverhaltens der SKK’s. Die Methode zur Vorbereitung des Eluats nach OLED ermöglicht breite Parametervariationen, die weit über die in dieser Studie angewandten Varianten hinausgehen können. Die Einfachheit und breite Anwendbarkeit der Eluatsvorbereitung ermöglicht insbesondere die Untersuchung anderer SKK sowie des Löslichkeits- und Sorptionsverhaltens unter anderen interessierenden Bedingungen, z. B. Wasserqualität, Temperatur und Oberflächen für die Sorption (Schotter, Kies, Sand, zersetztes organisches Material). Der Nachweis der organischen Bestandteile des SKK (Basisöl, Additive) durch Extraktion und GC-FID, wie in der Methode zur Bestimmung des Kohlenwasserstoffindex C10-C40 (DIN EN ISO 9377-2) beschrieben, ist gut möglich. Die Bestimmung gelöster Metalle, insbesondere aus den anorganischen Bestandteilen des SKK, durch optische Emissionsspektrometrie (ICP-OES) ist eine konventionelle Analysemethode mit geringen Nachweis Grenzen.
- die „Bewässerung“ mit einer Methode, die an den Wasserauswaschtest nach DIN EN 15427-2-1:2022-07 angelehnt ist, stellt eine Vereinfachung der Schätzung der Löslichkeit von SKK in Wasser dar. Da sie auf einer gravimetrischen Bestimmung beruht, ist keine Kenntnis der Zusammensetzung des SKK erforderlich. Diese Methode ermöglicht auch eine weitgehende Variation der Parameter, z. B. der Wasserqualität, der Temperatur, der SKK-Menge oder der Dicke des SKK-Films. Wenn der Öl- und Feststoffgehalt des SKK bekannt ist, auch auf der Grundlage einer gravimetrischen Methode, kann die Löslichkeit speziell für die organischen Bestandteile des SKK geschätzt werden.
- die Löslichkeit der organischen Bestandteile von SKK ist gering. Sie liegt je nach verwendeter Methode im Bereich von 20 bis 60 mg/kg.
- die Löslichkeit der anorganischen Bestandteile von SKK ist gering. Aluminium- und Kupferionen wurden in einem Bereich von mg/kg gefunden, typischerweise niedriger als 1 mg/kg.
- SKK wird in einer bestimmten Menge in Schotter, Kies und Sand zurückgehalten. Der Nachweis erfolgte unter Bedingungen mit einer Überkonditionierung (viel größere SKK-Menge als im Betrieb), die nicht der normalen Verwendung von SKK entsprechen.
- organisches Material (Rindenmulch und Holzspäne in dieser Studie), kann die organischen Bestandteile des SKK und die gelösten Metalle (Aluminium und Kupfer) zumindest teilweise binden, wodurch das Risiko einer Verschmutzung durch SKK erheblich verringert wird.

In Bezug auf die Labormethode zur Bewertung des Lösungs- und Sorptionsverhaltens von SKK empfiehlt (Dörr, 2024):

- Festlegung eines Referenz-SKK: Aufgrund der zu erwartenden niedrigen Konzentrationen sollte bei der Durchführung der Tests in verschiedenen Labors ein Referenz-SKK verwendet werden. Auf diese Weise wird die Vergleichbarkeit bekannter SKK mit anderen SKK deutlich verbessert.
- Quantifizierung der organischen Bestandteile von SKK in Wasser: Der Kohlenwasserstoffindex C10-C40 nach DIN EN ISO 9377-2 verwendet als Referenz für die Quantifizierung Dieselkraftstoff nach EN 590 und ein weiteres unbekanntes Schmieröl. Da für die Bewertung eines SKK im Gegensatz zur Norm der jeweilige SKK bekannt ist, sollte für die Quantifizierung die ölige Phase, z. B. lösliches Heptan wie in (Dörr, 2024), verwendet werden.
- Qualitative Bewertung der organischen Bestandteile des SKK in Wasser: Unter Verwendung der öligen Phase des SKK kann auch bestimmt werden, welche Bestandteile des SKK aus der öligen Phase in das Wasser wandern werden. Dies kann durch den Vergleich der Chromatogramme mittels GC-FID erfolgen. Allerdings liefert GC-FID keine Informationen über die chemische Struktur, der in Wasser gelösten und mit n-Hexan extrahierten, organischen Bestandteile von SKK. Bei Bedarf wird eine weitere Bewertung durch Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektrometrie (GC-MS) empfohlen. Der Vergleich mit den Massenspektren aus der NIST-Datenbank lässt Rückschlüsse auf die chemische Struktur der gefundenen SKK-Komponenten zu. Es ist jedoch zu beachten, dass die Zusammensetzung von Schmierstoffen, einschließlich SKK und SKS, das Know-how des jeweiligen Herstellers darstellt. Für solche detaillierten Analysen ist es üblich, Vereinbarungen, insbesondere Geheimhaltungs-vereinbarungen, mit den Schmierstoffherstellern zu treffen. (Dörr, 2024).

5.2 In der Praxis

Die Ergebnisse und Analysen sind nach (Steiner, 2024) wiedergegeben. Die Konzentrationen der beiden Indikatoren, der PAK, des Kohlenwasserstoffindex, von Kupfer, Zink sowie Eisen werden anhand von Proben gemessen, die an verschiedenen Orten entnommen wurden. Abgesehen von den beiden Indikatoren, die das Vorhandensein von SKK messen, ist es nicht möglich, die Quelle der gemessenen Elemente zu bestimmen.

Die Messungen können in zwei Kategorien unterteilt werden. Die erste Kategorie ermöglicht es, den Fall von Stecken zu untersuchen, die nach den aktuellen Standards mit allen Filterschichten gebaut wurden. Sie betrifft die Messpunkte in Gruyères, Bossonnens und Stans. Die zweite Kategorie betrifft ungefilterte Proben aus Hergiswil. Sie erlauben eine Annäherung an die Wasserzustände, bevor es in die Fahrbahn eintritt, liefern aber auch Informationen für alle Orte des Typs „Worst-Case-Szenario“, ohne Filterwirkung. (Steiner, 2024).

5.2.1 Gefilterte Proben

Keine der Wasserproben, die die Filterschichten durchlaufen haben, enthielt eine messbare Menge der beiden Indikatoren, einen Kohlenwasserstoffindex oder PAK. Die Stoffe sind überwiegend an Partikel adsorbiert, die im Ballast oder im Filterkörper verbleiben. Auch für Zink und Kupfer werden wesentlich geringere Konzentrationen als an der Sammelstelle Hergiswil beobachtet. (Steiner, 2024).

Im Gegensatz zum ungefilterten Fall sind die Konzentrationen von Kupfer und Eisen gering oder gar nicht nachweisbar. Die Situation ist ähnlich wie bei Straßenabwässern mit vergleichbarer Filterbehandlung. (Steiner, 2024).

Bei den Null-Messungen (an den TPF-Sammelstellen) ist kein Unterschied vor und mit Konditionierung festzustellen. Zudem zeigen die Messungen in Stans, dass selbst nach jahrelanger Konditionierung SKK hinter dem Filter nicht nachweisbar sind. (Steiner, 2024).

5.2.2 Ungefilterte Proben

Die Produkte von SKK werden im Wasser der Fahrbahn nachgewiesen, insbesondere die beiden Indikatoren und PAK. Ein Teil der problematischen Stoffe wird adsorbiert und konzentriert sich im Schlamm der Sammelkammer. Die Grenzwerte der Gewässerschutzverordnung für die Zink- und Kupferkonzentration werden überschritten, bleiben aber unterhalb von stark verschmutztem Strassenabwasser. (Steiner, 2024).

Durch die Ablagerung des Kammerschlamms wird ein Teil, aber nicht alle der problematischen Stoffe gesammelt. Vermutlich setzen sich nur die groben Partikel ab, die anderen bleiben in der Schwebe und gelangen in den Steinibach. Zudem wird bei starken Regenfällen der Schlamm weggeschwemmt. (Steiner, 2024).

Die Messungen geben keinen Aufschluss über die Konzentrationen im Wasser am Eingang der Sammelkammer, die dem Wasser, wie es in die Sammelkammer eintritt, entsprechen. Aber es lässt vermuten, dass zumindest ein Teil der Grenzwerte für die Wasserqualität überschritten werden. (Steiner, 2024).

Für Situationen ohne Filter, wie in Hergiswil, wird empfohlen, dafür zu sorgen, dass zumindest die Partikel dauerhaft zurückgehalten werden. (Steiner, 2024).

Der in der Kammer gesammelte Schlamm zeigt das Vorhandensein von Schadstoffen, darunter die beiden SKK-Indikatoren. Die Konzentrationen einiger Schadstoffe überschreiten manchmal die Abfallgrenzwerte für Deponien des Typs A (nicht kontaminierte Abfälle) und können in die Kategorie der schwach kontaminierten Abfälle (Deponien des Typs B) nach der Verordnung über die Einschränkung und die Entsorgung von Abfällen (VBVEA) fallen. (Steiner, 2024).

6 Interpretation

6.1 Rückhaltung von Schadstoffen und Verschmutzung von Oberflächenwasser

Das Abwasser von Eisenbahnstrecken mit vergleichbaren Filterschichten wie in Stans, Gruyères und Bossonnens kann in einen Fluss geleitet werden. Dies gilt für die Schienenkopfkonditionierung sowie auch für die Schmierung. Die Schadstoffe werden von den verschiedenen Filtern zurückgehalten. (Steiner, 2024).

Wenn es einen Filterkörper gibt, kann das Wasser in einen Fluss geleitet werden. Wenn dieser nicht vorhanden ist, können die Konzentrationen zumindest teilweise über den Grenzwerten liegen. Diese Ergebnisse können relativiert werden, da der Grenzwert nach einer vollständigen Vermischung im Wasserlauf gilt, während die Messungen im Sammelsystem stattfinden. Steiner empfiehlt, das Gleisabwasser unabhängig von der Verwendung von SKK möglichst mit einem Filterkörper zu behandeln, insbesondere wenn das Wasser über eine lange Strecke gesammelt und in einen Bach eingeleitet wird. (Steiner, 2024).

6.2 Verschmutzung von Ballast, Unterbau und Filterkörpern

Während der Lebensdauer des Filters laden sich Filterkörper und Ballast mit Schadstoffen auf. Bei Erneuerungen müssen diese Abfälle ordnungsgemäß entsorgt werden. Der SKK ist nicht die einzige Quelle für Kohlenwasserstoffe, PAK, Kupfer und Zink, aber er könnte diese Konzentrationen und damit die Kosten für die Entsorgung oder das Recycling erhöhen. (Steiner, 2024).

Um die Verschmutzung des Schotters und der Infrastrukturmaterialien zu bestimmen, wird bei Erneuerungen die Schadstoffkonzentration gemessen. An allen betrachteten Probenahmestellen wird SKS verwendet. Ob SKK verwendet wird oder nicht, hat keinen signifikanten Einfluss auf den Grad der Verschmutzung. Bei Vorhandensein von Holzschwellen sind die Hauptverschmutzungsquellen die Imprägnierungsmittel der Holzschwellen. Es ist anzumerken, dass das Gleismaterial ohne SKK, auch auf den Abschnitten ohne Holzschwellen, manchmal die Grenzwerte für nicht kontaminiertes Material nach der VLED überschreitet. (Steiner, 2024).

Die Schadstoffkonzentrationen im Ballast zeigen, dass dieser nur einen Teil der Schadstoffe zurückhält, der auf ein Viertel, bis die Hälfte geschätzt wird. Ohne die Wirkung anderer Filterschichten wird das Wasser mit verschiedenen Schadstoffen belastet in die Natur geleitet, und zwar unabhängig davon, ob SKK vorhanden ist oder nicht. Dies zeigt, wie wichtig die Art des Materials im Filterkörper des Entwässerungsgrabens ist; die Verwendung von Schotter als Filterkörper wird nicht empfohlen. (Steiner, 2024).

Eine Analyse des Filterkörpers ist nicht verfügbar. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Qualität des Filters auch nach längerer Nutzung erhalten bleibt, da das Gleisabwasser mit den sich absetzenden Partikeln einen Sekundärfilter bildet. Die Lebensdauer des Filterkörpers ist unabhängig von der Nutzung von SKK. (Steiner, 2024).

6.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Konditionierungsmitteln

Viele Stoffe werden im Filterkörper zurückgehalten, vor allem wenn sie von den Partikeln adsorbiert werden, wie z. B. Kupfer, PAK und Kohlenwasserstoffe. Das Vorhandensein von Eisen erleichtert die Adsorption. Um die Ergebnisse des HeadLub 90 aus dieser Studie auf andere Konditionierungsmitteln zu übertragen, ist der entscheidende Faktor die Wasserlöslichkeit des SKK und seiner Bestandteile. Wenn sie vergleichbar ist, sind die Ergebnisse in hohem Maße übertragbar. Sie kann durch den Oktanol/Wasser-Verteilungskoeffizienten (K_{OW}) gemessen werden. Wenn die Wasserlöslichkeit von Bestandteilen oder des Produkts höher ist oder wenn sich die Zusammensetzung des SKK grundlegend von HeadLub 90 unterscheidet, muss seine Gefährlichkeit im Wasser bewertet werden. (Steiner, 2024). (Dörr, 2024) schlägt ein Konzept vor, um diesen Vergleich durchzuführen.
Bei einer höheren Löslichkeit muss die Wasserlöslichkeit der gefährlichen Stoffe bestimmt werden. (Steiner, 2024).
Messungen auf dem Streckennetz der zb zeigen, dass Filterkörper auch für SKS und Zahnstangenfett wirksam sind. (Steiner, 2024).

7 Schlussfolgerung

Das Konditionierungsmittel HeadLub 90, das unter anderem von TPF und zb verwendet wird, enthält mehrere umweltgefährdende Substanzen. Das Wasser, das auf die Gleise fliesst, schwemmt einen Teil dieser Stoffe mit sich und führt, wenn es nicht behandelt wird, zu einer Freisetzung von Schadstoffen in die Umwelt. SKK sind nicht die einzige Quelle für die Verschmutzung der Fahrbahn. So befinden sich beispielsweise Kohlenwasserstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Schwermetalle wie Kupfer und Zink im SKS und Staub, der durch Abrieb von Bremsklötzen oder Holzschwellen entsteht.

Die seitlichen Filterkörper haben einen entscheidenden Einfluss auf die Behandlung von Niederschlagswasser. Ihr Vorhandensein ermöglicht es, das Wasser in die Umwelt abzuleiten. Sie filtern Schadstoffe aus dem SKK und anderen Quellen heraus. Der Schotter hat ebenfalls eine wichtige Filterfunktion, die nach Feldversuchen auf 25 bis 50 % der Schadstoffe geschätzt wird. Dennoch ist er nicht ausreichend. Entscheidend ist die Fähigkeit, Partikel zurückzuhalten. Die Verwendung eines Drainagegrabens mit Filterkörper wird empfohlen, mit oder ohne Verwendung von SKK.

Um die Frage der Filter- und Adsorptionswirkung von Filtermaterial, das in Drainagegräben wie in Stans, Bossonnens und Gruyères eingebaut wird, besser zu verstehen, kann ein Feldversuch unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden. Ein idealer Standort dafür ist Hergiswil, wo die Ein- und Auslaufkonzentrationen sowie der Durchfluss im Auslauf einer solchen Schicht, die z. B. in einen Betonring integriert ist, gemessen werden können.

Das Vorhandensein oder Fehlen von SKK hat nur einen geringen Einfluss auf die PAK- und Kohlenwasserstoffverschmutzung. Die Kosten für die Entsorgung des Gleisabfalls werden daher nicht signifikant erhöht. Bei Abwesenheit einer Holzschwelle ist die Lage unsicher. Das Gleismaterial könnte von der Kategorie nicht verschmutzter Abfall in die Kategorie schwach verschmutzter Abfall übergehen.

Die Ergebnisse für den in dieser Studie untersuchten Headlub 90 sind auf andere SKK übertragbar, sofern die Zusammensetzung ähnlich und die Wasserlöslichkeit ähnlich gering ist. Dieser Vergleich kann nach dem vorgestellten Laborverfahren durchgeführt werden.

7.1 Empfehlungen

- SKK ohne problematische Substanzen verwenden, z. B. auf der Grundlage des Europäischen Umweltzeichens für Schmierstoffe.
- Bei der Verwendung von SKK mit problematischen Stoffen das Löslichkeitsverhalten eines neuen Konditionierungsmittels mit einem bekannten SKK wie z. B. HeadLub 90 vergleichen.
- Unabhängig von SKK das Gleisabwasser mit einem Filterkörper im Sickergraben behandeln.
- Für den Fall, dass es nicht möglich ist, das Ablaufwasser zu filtern, ein System einrichten, um zumindest die Partikel dauerhaft zurückzuhalten, entweder durch einen Filter oder durch regelmäßige Schlammentfernung.
- Verschmutzung des Sickerkörpers untersuchen, um das Rückhaltevermögen problematischer Bestandteile besser zu verstehen und die Anforderungen an die Entsorgung zu präzisieren.
- Die Rückhaltekapazität des Schotters untersuchen, um zu bestätigen, dass der Schotter allein nicht ausreicht, um SKK zu filtern.

8 Verzeichnis

8.1 Referenzen

Brugger, E. (2022). *Compatibilité environnementale du conditionnement du champignon du rail.* Zentralbahn.
CFF CoC WFF. (2020). Schienenkopfkonditionierung: Umweltverträglichkeit.
Däppen, J. (2015). R RTE 21110 - Infrastructure et ballast.
Dörr, N. (2024). *Spezifikation für Schienenkopfkonditionierungsmittel.* AC²T.
Güldenapfel, P. (2022). *Grundlagenscanning Umfrage Bahnen.* RAILplus/KPZ Fahrbahn.
Kling, W. (2017). R RTE 49410 - Lubrification des boudins sur les véhicules de chemins de fer - Voie normale.
Pasquier, L. (2024). *Essais en service SKK aux TPF, RAILplusSF-00032.* RAILplus/TPF.
Steiner, M. (2024). *Schienenkopfkonditionierung - Abschätzung der Gefährdung von Oberflächengewässern beim einjährigen Betrieb von Teststrecken und regulären Strecken (V1.1).* BFH.
Steiner, M., Homes, C., & Rütti, R. (2021). *Schienenkopfkonditionierung, Abschätzung der Gefährdung von Oberflächengewässern beim einjährigen Betrieb von Teststrecken.* BFH.

8.2 Abbildungen

Abbildung 1 Entscheidungsbaum mit Bezug auf der Strategie der SBB. (Brugger, 2022) bezogen auf (CFF CoC WFF, 2020). 7
Abbildung 2 Löslichkeit in Wasser. Vorbereitung vor der Mischung (links), während der Mischung (Mitte) und während der Extraktion der organischen Komponenten mit n-Hexan (rechts). (Dörr, 2024). 10
Abbildung 3 Mischung aus Rindenmulch und SKK in Wasser vor der Mischung (links) und nach der Mischung (Mitte). Entstehendes Eluat (rechts). 11
Abbildung 4 Mischung von Holzspänen und SKK in Wasser vor der Mischung (links) und nach der Mischung (Mitte). Entstehendes Eluat (rechts). 11
Abbildung 5 Reinigungstest nach DIN EN 15427-2-1. (Dörr, 2024). 12
Abbildung 6 Test nach der Reinigung. Von links nach rechts: Die mit SKK beschichtete Platte vor dem Test, während des Tests, am Ende des Tests und nach dem Trocknen. (Dörr, 2024). 12
Abbildung 7 Lage der Sammelstelle für Proben von Entwässerungen in Bossonnens und Gruyères. (Steiner, 2024) 13
Abbildung 8 Lage der Sammelstelle für Proben von Entwässerungen in Stans. (Steiner, 2024) 14
Abbildung 9 Lage der Sammelstelle für Proben von Entwässerungen in Hergiswil. (Steiner, 2024) ... 14

8.3 Tabellen

Tabelle 1 Liste der im Jahr 2023 von den Schweizer Meterspurbahnen verwendeten Konditionierungsmittel 6
Tabelle 2 Entwässerungstypen und Rückhaltungen von Schadstoffen. Die Rückhaltung ist stoffspezifisch und hängt vom Design der Komponenten ab. Der biologische Abbau wird nicht berücksichtigt. + geringe Rückhaltung, ++ mittlere Rückhaltung, +++ hohe Rückhaltung. (Steiner, 2024). 9