

PM10-EMISSIONEN VERKEHR

Teil Schienenverkehr

Schlussbericht

Bern, 10. Januar 2007

Jürg Heldstab, Natascha Kljun, INFRAS

1492A-SYNTHESESBERICHT-070108.DOC



INFRAS

INFRAS

GERECHTIGKEITSGASSE 20
POSTFACH
CH-8039 ZÜRICH
t +41 1 205 95 95
f +41 1 205 95 99
ZUERICH@INFRAS.CH

MÜHLEMATTSTRASSE 45
CH-3007 BERN

WWW.INFRAS.CH

Autoren

Jürg Heldstab, Natascha Kljun, INFRAS AG

Begleitung BAFU

Harald Jenk, Brigitte Gälli Purghart

Mitglieder Projektgruppe

Harald Jenk (Vorsitz), Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Urs Baltensperger, Paul Scherrer Institut (PSI)

Nicolas Bukowiecki, Paul Scherrer Institut (PSI)

Rémy Chrétien, Schweiz. Bundesbahnen (SBB)

Giovanni Danielli, Bundesamt für Verkehr (BAV)

Brigitte Gälli Purghart, Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Robert Gehrig, Eidg. Materialprüfungs- und
Forschungsanstalt (EMPA)

Jürg Heldstab, Autor Schlussbericht, INFRAS

Matthias Hill, Eidgenössische Materialprüfungs- und
Forschungsanstalt (EMPA)

Walter Hürlimann, Bundesamt für Verkehr (BAV)

Natascha Kljun, Autorin Schlussbericht, INFRAS

Peter Lienemann, Eidgenössische Materialprüfungs- und
Forschungsanstalt (EMPA)

Jean-François Madziel, Bundesamt für
Raumentwicklung (ARE)

Christoph Zwicky, Eidg. Materialprüfungs- und
Forschungsanstalt (EMPA)

Übersetzungen

Übersetzungsdienst BAFU (Abstracts und
Zusammenfassung franz., ital.)

INFRAS (Abstract und Zusammenfassung engl.)

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für
den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	4	3.3.2 Empfehlungen	42
Zusammenfassung	7	Verzeichnisse	43
Résumé	9	1 Literatur	44
Riassunto	11	2 Glossar / Abkürzungen	45
Summary	13		
1 Ausgangslage	15		
2 Resultate der Teilstudien	17		
2.1 Verifikation der PM10-Emissionsbilanz für den Schienenverkehr (Teilprojekt SBB)	17		
2.1.1 Warum eine Verifikation?	17		
2.1.2 Neue Emissionsbilanz 2005	18		
a) Bremsabrieb	18		
b) Schienenabrieb	19		
c) Radabrieb	19		
d) Abrieb von Fahrdrabt und Stromabnehmer	19		
e) Hochrechnung auf das Schienennetz Schweiz	20		
2.1.3 Interpretation	21		
2.2 Immissionsmessungen PM10 und Eisen (Teilprojekt EMPA)	22		
2.2.1 Messkampagnen	22		
2.2.2 Messresultate	24		
2.3 Weitergehende Immissionsmessungen (Teilprojekt PSI)	27		
2.3.1 Messkampagnen	27		
2.3.2 Messresultate	27		
2.3.3 Bahnbedingte Eisen- und Kupfer-Immissionen	29		
2.3.4 Grössenverteilungen von Eisen- und Kupfer-Partikeln	30		
2.3.5 Einfluss Meteorologie	32		
2.4 Plausibilitätsanalysen Immissionsmodell (INFRAS/METEOTEST)	32		
2.4.1 Methodisches Vorgehen, Resultate Immissionsmodell	32		
2.4.2 Resultate	34		
a) Vergleich der Eisen-Messwerte mit den Modellwerten	34		
b) Vergleich der Differenz-Messwerte mit den Modellwerten	35		
c) Vergleich des Querprofils Juchhof	36		
2.4.3 Interpretation und Beurteilung	36		
3 Synthese	39		
3.1 Zusammenfassung der Messresultate	39		
3.2 Zusammenspiel der Teilstudien	40		
3.3 Bedeutung der Resultate, Empfehlungen	41		
3.3.1 Bedeutung	41		

Abstracts

- E** The PM10 emissions of rail traffic in Switzerland amount to 850 to 1350 t/a (2004). Ambient concentration measurements at the gateway of Zurich's main station and at the railway line of the Limmattal (with 740 trains per day the most frequently used railway line of Switzerland) show that the PM10 concentration caused by rail traffic is 1.5 to 2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at the most. Concentration modelling approves the compatibility of the emission modelling and concentration measurements.
- Keywords:
PM10 emissions
PM10 concentration
Rail traffic
- D** Die PM10-Emissionen des Schienenverkehrs auf dem schweizerischen Bahnnetz betragen 850–1350 t/a (2004). Immissionsmessungen bei der Einfahrt in den Zürcher Hauptbahnhof und an der Limmattallinie (740 Züge pro Tag, meistbefahrene Bahnlinie der Schweiz) zeigen, dass die PM10-Zusatzbelastung durch den Schienenverkehr max. 1.5–2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ beträgt. Immissionsmodellierungen bestätigen die Kompatibilität zwischen Emissionserhebungen und Immissionsmessungen.
- Stichwörter:
PM10-Emissionen
PM10-Immissionen
Schienenverkehr
- F** Les émissions de PM10 dues au trafic ferroviaire suisse se situent entre 850 et 1350 t/a (valeur 2004). Les mesures d'immissions effectuées à l'entrée de la gare de Zurich et sur la ligne de la vallée de la Limmat (ligne la plus fréquentée de Suisse avec 740 trains par jour) indiquent que la charge supplémentaire en PM10 due au trafic ferroviaire atteint 1,5 à 2,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum. Les modèles d'immissions confirment la compatibilité entre le recensement des émissions et les mesures des immissions.
- Mots-clés:
Emissions de PM10
Valeurs d'immission de PM10
Trafic ferroviaire
- I** Le emissioni di PM10 della rete ferroviaria svizzera ammontano a 850-1350 t/a (2004). Misurazioni delle immissioni all'entrata della stazione centrale di Zurigo e lungo la linea ferroviaria della valle del Limmat (con 740 treni al giorno la linea ferroviaria svizzera più frequentata) provano che i carichi supplementari di PM10 generati dalla ferrovia ammontano a un massimo di 1,5 – 2,0 $\mu\text{g} /\text{m}^3$. Modelli d'immissione confermano la compatibilità tra i rilevamenti delle emissioni e le misurazioni delle immissioni.
- Parole chiave:
Emissioni di PM10
Valori d'immissione di PM10
Traffico ferroviario

Zusammenfassung

Die Emissionen des Schienenverkehrs in der Schweiz wurden 2001 erstmals auf der Basis von Einkaufsstatistiken und groben Annahmen zum Feinstaub-Anteil (PM10) am Materialverschleiss geschätzt und im BUWAL-Bericht "Massnahmen zur Reduktion der PM10-Emissionen" publiziert. Der Umstand, dass diese Emissionen auf der Basis grober Schätzungen bestimmt wurden, war Anlass für weitergehende Studien, welche Immissionmessungen, Emissionsmessungen auf einem Bremsprüfstand und Sensitivitätsanalysen mit einem Immissionsmodell umfassten. Die Resultate dieser Untersuchungen ergaben deutlich geringere Mengen und wurden vom BUWAL 2002 als Statusbericht zu den PM10-Emissionen des Schienenverkehrs in der Reihe Umwelt-Materialien publiziert. Die Untersuchungen zeigten ausserdem weiteren Forschungsbedarf. So fehlten z.B. fundierte Kenntnisse zur Grössenverteilung und zur chemischen Zusammensetzung der Feinstaubteilchen. Im Rahmen eines von BAFU, EMPA, INFRAS, PSI und SBB gemeinsam durchgeführten Projektes wurden die Untersuchungen deshalb in Form von vier Teilstudien, deren Resultate in diesem Bericht zusammengefasst werden, weitergeführt.

Die Teilstudie der SBB umfasste die Erstellung einer verfeinerten Massenbilanz auf der Basis ihrer Einkaufs- und Entsorgungsmengen und weiteren Messungen auf einem Bremsprüfstand. Ihre Resultate bestätigen die Resultate aus dem Jahr 2002 und ergeben für die mechanisch erzeugten PM10-Emissionen des Schienenverkehrs den Bereich von 800–1300 t/a (Bezugsjahr 2004). Fast 60 % davon sind Bremsabriebe. Der Rest stammt von Rädern, Schienen und Fahrdrabt. Personen- und Güterverkehr teilen sich die Summe hälftig auf. Nicht untersucht wurden die Auspuff-Emissionen aus dem Rangierbetrieb mit Diesellokomotiven. Diese betragen gemäss früheren Schätzungen ca. 45 t/a Dieseleruss. Zusammen mit den Dieselerussemissionen liegen die PM10-Emissionen des Schienenverkehrs im Bereich 850–1350 t/a.

Die im Rahmen der zwei Teilstudien von EMPA und PSI durchgeführten Immissionsmessungen zeigen, dass der Eisenbahnverkehr an sehr stark befahrenen Bahnstrecken (Einfahrt Zürich HB, Limmattallinie mit 740 Zügen pro Tag) in unmittelbarer Nähe der Bahnlinie im Jahresmittel eine PM10-Zusatzbelastung von 1.5–2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ verursacht und dass diese bis in 120 m Distanz um ca. 75 % abnimmt. Der Hauptbestandteil ist Eisen (Abrieb von Bremsen, Rädern, Schienen); die Eisenemissionen pro Zug sind bei Güterzügen höher als bei Personenzügen. Mindestens drei Viertel der Eisenimmissionen aus dem Güterzugverkehr sind grobe Partikel mit Partikeldurchmessern von 2.5–10 μm . Beim Personenzugverkehr liegt dieser Anteil bei mindestens 50 %. Vom Schienenverkehr aufgewirbeltes PM10 (zerriebenes, durch Fahrtwind aufgewirbeltes Schottermaterial) wurde bei den Immissionsmessungen im Freien nicht gefunden.

Im Rahmen der vierten Teilstudie konnten die Immissionsmessungen mit dem Partikel-Immissionsmodell des BAFU plausibilisiert werden. Die Teilresultate aus Emissionserhebung, Immissionsmessung und Modellierung sind untereinander kompatibel und ergeben zusammen ein kohärentes Bild für die aktuellen PM10-Emissionen des Schienenverkehrs.

Für künftige Emissions- und Immissionsmodellierungen besteht weiterer Forschungsbedarf, insbesondere in der Bestimmung von rollmaterialabhängigen Emissionsfaktoren.

Résumé

Les émissions du trafic ferroviaire en Suisse ont été évaluées pour la première fois en 2001 d'après les statistiques d'achat et d'après les chiffres approximatifs de poussières fines (PM10) calculés par rapport à l'usure des matériaux. Ces données ont été publiées dans un rapport de l'OFEFP intitulé « Mesures de réduction des émissions de PM10 ». Comme ces émissions avaient été déterminées sur la base d'approximations, il a été procédé à des études complémentaires comprenant des mesures d'immissions, des mesures d'émissions sur un banc d'essai de freinage et des analyses de sensibilité du modèle d'immissions. Les résultats de ces investigations ont révélé des quantités nettement moindres de poussières fines. Ils ont été rassemblés dans une publication de l'OFEFP en 2002 qui fait un bilan des émissions de PM10 dues au trafic ferroviaire (dans la série Document environnement, en allemand avec résumé en français). Ces études ont aussi montré qu'il fallait continuer les recherches, parce qu'il manquait notamment des connaissances approfondies sur la granulométrie et la composition chimique des poussières. Le projet mené conjointement par l'OFEFP, l'EMPA, INFRAS, l'Institut Paul Scherrer et les CFF a été l'occasion de poursuivre les investigations, sous la forme de quatre études sectorielles, dont les résultats sont résumés dans le présent rapport.

L'étude des CFF consistait à affiner le bilan de masse d'après les quantités achetées et éliminées et d'autres mesures sur un banc d'essai de freinage. Les résultats confirment ceux de 2002: entre 800 et 1300 t/a (en 2004) pour les émissions de PM10 d'origine mécanique. Près de 60 % de ces PM10 viennent de l'usure des freins et le reste est dû à la friction des roues, des rails et des caténaires, à proportion égale entre transport de personnes et transport de marchandises. Un domaine n'a pas été examiné: les manœuvres avec les locomotives diesel (émissions de gaz d'échappement). Elles atteignent quelque 45 t/a de suie de diesel d'après les estimations précédentes. Additionnées des émissions de suie de diesel, les émissions de PM10 du trafic ferroviaire varient entre 850 et 1350 t/a.

Les mesures faites lors des deux études sectorielles de l'EMPA et de l'Institut Paul Scherrer démontrent que le trafic ferroviaire des lignes très fréquentées (entrée de la gare de Zurich, ligne de la Limmat avec 740 trains par jour) cause, à proximité immédiate des voies ferrées une surcharge de PM10 de 1,5 à 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle et que cette surpollution décroît d'à peu près 75 % à seulement 120 mètres de distance. La principale composante des poussières est le fer (usure par friction des freins, des roues, des rails); la quantité de particules de fer émises par chaque train est plus élevée avec les convois de marchandises qu'avec les trains de voyageurs. Trois quarts au moins des immissions de fer dues aux trains de marchandises sont des particules grossières d'un diamètre de 2,5 à 10 μm . La proportion baisse à 50 % avec les trains de voyageurs. Il n'a pas été trouvé de PM10 provenant des tourbillons du trafic ferroviaire (poussière de ballast broyée soulevée par le déplacement de l'air) dans l'atmosphère lors des mesures d'immissions.

La quatrième étude sectorielle a permis de rendre plausibles les mesures d'immissions réalisées avec le modèle de l'OFEFP. Les résultats partiels du recen-

sement des émissions, des mesures d'immissions et de la modélisation sont compatibles et donnent une image cohérente des émissions actuelles de PM10 du trafic ferroviaire.

Il reste encore beaucoup de recherches à faire pour les modélisations futures d'immissions et d'émissions, plus particulièrement pour déterminer les facteurs d'émissions dépendant du matériel roulant.

Riassunto

Le emissioni causate in Svizzera dal traffico su rotaia sono state stimate per la prima volta nel 2001 in base a statistiche sugli acquisti e a ipotesi approssimative riguardanti la percentuale di polveri fini (PM10) liberata in seguito all'usura dei materiali. Le stime sono poi state pubblicate nel relativo rapporto dell'UFAFP (ora UFAM) sulle misure volte a ridurre le emissioni di PM10 ("Massnahmen zur Reduktion der PM10-Emissionen", disponibile anche in francese). Poiché si trattava soltanto di stime approssimative, sono stati in seguito effettuati ulteriori studi comprendenti sia misurazioni delle immissioni e delle emissioni su un banco di prova dei freni sia analisi della sensibilità in base a un modello delle immissioni. I risultati di tali analisi, da cui è emersa una quantità di emissioni nettamente inferiore, sono stati illustrati nel rapporto dell'UFAFP del 2002 relativo alla situazione delle emissioni di PM10 causate dal traffico su rotaia (pubblicato nella serie "Umwelt-Materialien", in tedesco con riassunto in italiano). Le analisi hanno inoltre rivelato la mancanza di conoscenze fondate in diversi ambiti (ad es. per quanto riguarda la granulometria e la composizione chimica delle particelle di polvere) e, pertanto, la necessità di compiere ulteriori ricerche. Nel quadro di un progetto realizzato congiuntamente da UFAFP, EMPA, INFRAS, PSI e FFS, sono state pertanto condotti quattro studi parziali, i cui risultati sono riassunti nel presente rapporto.

Lo studio parziale delle FFS comprendeva sia l'elaborazione di un bilancio di massa più preciso sulla base delle quantità acquistate e smaltite sia ulteriori misurazioni su un banco di prova dei freni. Ne è emerso che, nel 2004, le emissioni di PM10 causate dal traffico su rotaia in seguito a processi meccanici sono state di 800–1'300 tonnellate all'anno, il che ha confermato i risultati del 2002. Quasi il 60 per cento di tali emissioni è imputabile all'usura dei freni, mentre il resto è prodotto da ruote, binari e fili di contatto. Il traffico merci e quello passeggeri sono ugualmente responsabili (ognuno con un contributo del 50% alle emissioni totali). Non sono invece state analizzate le emissioni di gas di scarico causate dalle locomotive diesel in manovra, che, secondo le stime precedenti, producono una quantità di fuliggine pari a circa 45 tonnellate all'anno. Le emissioni totali di PM10 generate dal traffico su rotaia, comprese quelle di fuliggine da diesel, sono pertanto comprese tra 850 e 1'350 tonnellate all'anno.

Le misurazioni delle immissioni effettuate nel quadro dei due studi parziali condotti rispettivamente dall'EMPA e dal PSI mostrano che la circolazione ferroviaria su tratte estremamente trafficate (ad es. l'entrata della stazione centrale di Zurigo o la linea della valle della Limmat, con 740 treni al giorno) causa in media ogni anno, nelle immediate vicinanze delle linee, un carico supplementare di PM10 pari a 1,5–2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, che si riduce di circa il 75 per cento solo a una distanza di 120 metri. La percentuale più importante di tale inquinamento è rappresentata dal ferro liberato in seguito all'usura di freni, ruote e rotaie, e le emissioni di ferro registrate per ogni singolo treno sono più elevate nei treni merci che in quelli passeggeri. Almeno i tre quarti delle immissioni di ferro generate dal traffico merci sono costituiti da particelle grossolane con un diametro compreso tra 2,5 e 10 μm . Nel traffico passeggeri, le particelle di tali dimensioni sono almeno il 50 per cento del totale. Nelle immis-

sioni misurate all'aperto, invece, non sono state trovate tracce di PM10 emesso dal traffico su rotaia (materiale polverizzato proveniente dalla massicciata e risollevato dai treni in corsa).

Nell'ambito del quarto studio parziale, le immissioni misurate sono state verificate in base al modello dell'UFAPF relativo alle immissioni di particolato. I risultati parziali del rilevamento delle emissioni, delle misurazioni delle immissioni e della modellizzazione di queste ultime sono compatibili tra loro e, insieme, forniscono un quadro coerente delle emissioni di PM10 causate attualmente dal traffico su rotaia.

Per le future modellizzazioni delle emissioni e delle immissioni saranno necessarie ulteriori ricerche, in particolare al fine di determinare i fattori di emissione che dipendono dal materiale rotabile.

Summary

The emissions of particulate matter (PM10) due to wear of brakes, wheels, rail and contact wire by rail traffic in Switzerland were first estimated in 2001 based on sales statistics and assumptions on the fine particles (PM10) fraction of the total of suspended particles. The results were published by the Swiss Agency of the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) in the report "Massnahmen zur Reduktion der PM10-Emissionen". The fact, that these emissions had been determined on the basis of rough estimations, was the reason for further studies that included concentration measurements along railway lines, measurements on brake units on a test stand and sensitivity analyses using a concentration model. The results of these investigations showed distinctly lower emissions. They were published by the SAEFL as a status report on the PM10 emissions by rail traffic in the Environmental Documentation Series in 2002. The investigations also identified the need for further research. For example, there was still a lack of profound knowledge of the size distribution and the chemical composition of the particles. Therefore, the studies have been continued in the framework of a joint project of the Federal Office for the Environment (FOEN), EMPA, INFRAS, PSI and SBB. The results of the four studies are summarised in the present report.

Study I conducted by the SBB comprehended an update of the material balance and measurements on the test bench. The results confirm the estimate from 2002 and assess the PM10 emissions caused by mechanical processes due to rail traffic in the range of 800 to 1300 t/a (2004). Almost 60 % are brake wear particles. The remaining particles originate from wheels, rails and contact wire. Half of them originate from passenger trains, the other half from freight trains. The exhaust emissions from diesel locomotives operating on shunting yards were not investigated. Following a former study, they amount up to 45 t/a diesel soot. Including the diesel soot emissions the emissions of PM10 of rail traffic are in the range of 850 to 1350 t/a.

Concentration measurements made by the EMPA (Materials Science and Technology Research Institute of the Swiss Federal Institute of Technology Zurich) and the PSI (Paul Scherrer Institute) within studies II and III showed that the rail traffic at several most frequently used railway lines (gateway of the main station of Zurich and the line of Limmattal with 740 trains per day) caused a PM10 concentration of 1.5 to 2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In the distance of 120 m, this value drops by 75 %. The main PM10 component is iron (brake, track, wheel abrasion). The emissions per freight train are higher than per passenger train. At least three quarters of the iron concentration caused by freight trains have particle diameters between 2.5 and 10 μm . For passenger trains this fraction is at least 50 %. PM10 components dispersed by the wake of rail traffic (pulverised gravel material) were not found.

Study IV showed good agreement for the concentration measurements and the results from concentration modelling. The results from the update of the material balance, from the concentration measurements and from the concentration modelling are compatible and present a coherent image of the current emissions of particulate matter by rail traffic.

Further investigations are needed in modelling of future emissions and concentrations, especially in order to determine train-specific PM10 emission factors.

1 Ausgangslage

Im Jahr 2001 hatte das BUWAL für die PM10-Emissionsbilanz der Schweiz erstmals die bahnbedingten PM10-Emissionen abschätzen lassen (BUWAL 2001). Die Schätzung basierte auf einer einfachen Massenbilanz von Einkaufs- und Entsorgungsmengen sowie groben Annahmen über die Anteile von Feinstaub (PM10) am Materialverschleiss. Die Schätzung ergab 2800 Tonnen pro Jahr für die PM10-Emission aus dem Schienenverkehr des schweizerischen Bahnnetzes. Die Höhe der Fracht überraschte damals die Fachwelt, was das BUWAL veranlasste, die Zahl zu verifizieren. Zu diesem Zweck gab die SBB Messungen an einem Bremsprüfstand in Auftrag, das BUWAL liess Immissionsmessungen an Bahnlinien durchführen und Sensitivitätsanalysen mit einem Immissionsmodell durchführen. Die Resultate dieser zweiten Untersuchungen zeigten, dass die Zahl von 2800 Tonnen pro Jahr die tatsächlichen Emissionen wesentlich überschätzte und diese mit grosser Wahrscheinlichkeit im Intervall von 800–1200 Tonnen pro Jahr (Bezugsjahr 2000) liegen müssten. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass der grösste Teil der PM10-Emissionen aus dem Schienenverkehr aus Eisenstaub besteht. Diese Ergebnisse wurden 2002 vom BUWAL in einem Statusbericht zu den PM10-Emissionen des Schienenverkehrs publiziert (BUWAL 2002).

Die Untersuchungen zeigten ausserdem weiteren Forschungsbedarf auf. Insbesondere fehlten fundierte Kenntnisse zur Grössenverteilung und zur chemischen Zusammensetzung der Feinstaubteilchen. In den Jahren 2003/2004 wurden deshalb die Untersuchungen an weiteren bahnexponierten Standorten fortgesetzt. Gleichzeitig führte die SBB die Messungen am Bremsprüfstand weiter und verfeinerte die Erhebungen zum Rad-, Schienen- und Fahrdrabtrieb. Schliesslich erfolgte noch eine Plausibilisierung mit dem PM10-Immissionsmodell des BUWAL. Die neuen Ergebnisse wurden in vier Teilberichten dokumentiert:

- Schweiz. Bundesbahnen: Verifikation der Emissions-Massenbilanz (SBB 2005)
- Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt: PM10-Emissionen des Schienenverkehrs, Teilbericht EMPA, Zusätzliche PM10-Immissionen an stark befahrenen Eisenbahnlinien (EMPA 2005)
- Paul Scherrer Institut: Verifikation der PM10-Emissionen des Schienenverkehrs, zeitlich hoch aufgelöste grössenklassierte Messungen von bahnrelevanten Spurenelementen (PSI 2005)
- INFRAS: PM10-Emissionen des Schienenverkehrs, Resultate Immissionsmodell (INFRAS 2005)

Die wichtigsten Ergebnisse aus den vier Teilstudien sind im vorliegenden Bericht zusammengefasst.

2 Resultate der Teilstudien

2.1 Verifikation der PM10-Emissionsbilanz für den Schienenverkehr (Teilprojekt SBB)

2.1.1 Warum eine Verifikation?

In der Studie „Massnahmen zur Reduktion der PM10-Emissionen“ (BUWAL 2001) wurde erstmals eine nationale PM10-Emissionsbilanz erstellt. Gemäss dieser Studie verursachte der Schienenverkehr im Jahr 1997 2803 Tonnen Feinstaub (PM10), davon 2758 Tonnen Abriebe von Bremsen, Rädern, Schienen und Fahrdrähten und 45 Tonnen Russemissionen aus dem Rangierbetrieb von Diesellokomotiven. Diese Summe entsprach 27% der schweizerischen Verkehrsemissionen bzw. fast 10% der gesamten PM10-Emissionen in der Schweiz.

Der Umstand, dass diese Emissionen auf der Basis grober Schätzungen bestimmt wurden, war Anlass für weitergehende Studien, welche zu einem ersten Statusbericht führten (BUWAL 2002). Aufgrund von Immissionsmessungen, Modellrechnungen und einer verfeinerten Emissions-Massenbilanz kam der Bericht zum Schluss, dass die bahnbedingten Emissionen in der ersten Studie (BUWAL 2001) zu hoch veranschlagt worden waren und dass sie vermutlich im Bereich von 800–1200 t/a liegen. Die Untersuchungen zeigten ausserdem weiteren Forschungsbedarf auf, welcher zu einer zweiten Serie von Immissionsmessungen führte (vgl. Teilberichte EMPA und PSI) und zu vertieften Abklärungen der Emissionen. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Verfeinerung der Emissionsbilanz und sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

Ausgangspunkt für die Abklärungen zur Emissionsbilanz sind die in Tab. 1 aufgeführten Emissionsmengen. Diese wurden basierend auf Angaben der SBB für die Arbeitsunterlage „PM10-Emissionsfaktoren: Mechanischer Abrieb im Offroad-Bereich“ (BUWAL 1999) ermittelt und mit geringfügigen Anpassungen in die PM10-Emissionsbilanz der Schweiz (BUWAL 2001) übernommen.

Verursacher	PM10-Emission 1997 (Zahlen inzwischen überholt, s. Tab. 3)		Annahmen Anteil PM10 (Materialverlust = 100 %)
	t/a	Anteil	
Bremsabrieb	2'066	75 %	100 %
Schienenabrieb	546	20 %	50 %
Radabrieb	124	4 %	50 %
Fahrleitungsabrieb	22	1 %	100 %
Total	2'758	100 %	

Tab. 1: Erste Schätzungen zu den Emissionen des SBB-Schienenverkehrs. Aufstellung der ursprünglich ermittelten Daten (BUWAL 1999). Diese Daten wurden nun revidiert, verbesserte Zahlen siehe Tab. 3. Für die Publikation BUWAL 2001 wurden zusätzlich Russemissionen aus dem Rangierbetrieb in der Höhe von 45 t/a einberechnet. Die Spalte rechts zeigt die damaligen Annahmen zum Anteil des PM10 am Gesamtabrieb.

Nebst Unsicherheiten in der Datengrundlage (beispielsweise waren die PM10-Anteile von Brems-, Rad- und Schienenabrieb nicht bekannt) gab es weitere Gründe, die Emissionsbilanz zu verfeinern. Zum Beispiel beziehen sich die erwähnten Emissionsmengen auf die SBB; die Emissionen anderer Eisenbahngesellschaften auf dem Netz der SBB oder auf ihren eigenen Netzen sind darin nicht enthalten. Ferner wurde nicht zwischen Emissionen des Personen- und Güterverkehrs unterschieden. Aufgrund der unterschiedlichen Technologie (Güterverkehr mehrheitlich mit Grauguss-Klotzbremsen, Personenverkehr vorwiegend Scheibenbremsen) und der unterschiedlichen Netzbelastung (Güterverkehr konzentriert auf Transitkorridore, Personenverkehr eher flächendeckend) wäre es wichtig zu wissen, welche Emissionen dem Güter- bzw. dem Personenschienenverkehr zugerechnet werden müssen.

2.1.2 Neue Emissionsbilanz 2005

Grundlage für die neuen Emissionszahlen bilden aktualisierte Materialbilanzen und Ergebnisse von Prüfstandsmessungen über den PM10-Anteil beim Abrieb.

a) Bremsabrieb

Für die Erhebung des Materialverlustes wurde im Jahr 2001 angenommen, die Bremsklötze bzw. -beläge würden gewechselt, wenn sie noch 40% der ursprünglichen Dicke aufweisen. Tatsächlich dürfen sie maximal bis auf 17% (Klötze) bzw. 25% (Beläge) abgefahren werden. Da in der Praxis nicht primär die Abnutzung der Bremsen, sondern der Unterhaltsrhythmus des Fahrzeugs den Zeitpunkt des Auswechslens bestimmt, wird die maximale Abnutzung in vielen Fällen nicht erreicht. Es wird deshalb eine durchschnittliche Restdicke von 20% (Klötze) bzw. 30% (Beläge) angenommen.

Für den Anteil des PM10 an der Abriebsmenge wurde in der ersten Schätzung für alle Bremssysteme konservativ mit 100 % gerechnet. Die inzwischen durchgeführten Messungen auf einem Bremsprüfstand zeigen, dass bedeutende Anteile jedoch in Form grösserer Teilchen abgerieben werden und deshalb nicht in die Fraktion PM10 fallen.

Bremssohlen/-beläge	PM10-Anteil am Abrieb
K-Sohlen	88 %
GG-Sohlen	15 %
Sinter-Sohlen	15 %
K-Beläge	80 %

Tab. 2: PM10-Anteile am Abrieb. Für die erste Abschätzung (BUWAL 1999) waren noch generell 100 % angenommen worden.

Die neu bestimmten Abriebsmengen und die gemessenen PM10-Anteile führen zu wesentlich niedrigeren Zahlen für PM10-Emissionen durch Bremsabrieb. Das frühere Ergebnis überschätzt die Bremsemissionen um den Faktor 4.5.

b) Schienenabrieb

Der Schienenabrieb kann aus der durchschnittlichen Liegedauer der Geleise (ca. 30 a) und dem durchschnittlichen Profilverlust der ausgewechselten Geleise (ca. 2 mm) abgeschätzt werden. Er entsteht als Abrieb durch den Rad-Schiene-Kontakt sowie durch Schleifen der Schienen (Reprofilieren). Das Schleifen führt nur zu sehr geringen Emissionen, weil der Schleifstaub grösstenteils aufgefangen wird. Die aufgefangene Menge ist bekannt und beträgt etwa die Hälfte des Materialverlustes der Schienen. Dies ist plausibel, wenn man bedenkt, dass mit dem Schleifen die durch das Befahren erzeugte Abweichung vom Sollprofil wieder ausgeglichen werden soll. An einem deutschen Rad-Schiene-Prüfstand wurden die Korngrößen der Abriebspartikel gemessen, die durch den Rad-Schiene-Kontakt entstehen. Es zeigte sich, dass die frühere Annahme für den PM10-Anteil von 50 % zu tief ist und der Wert bei 90 % liegt.

Der Feinstaubanteil des Abriebs aus dem Schienenunterhalt wurde ebenfalls neu geschätzt. Die Schienenköpfe werden periodisch von einem Schleifzug „reprofiliert“. Der Schleifstaub wird abgesaugt und einer Filteranlage zugeführt, welche ca. 90 % des Staubs erfasst. Der in die Umgebung entweichende Staub wurde optisch untersucht und besteht zu ca. 50 % aus PM10.

Das Ergebnis der neuen und detaillierten Untersuchungen führt zu einer PM10-Emission, die nur noch ein Fünftel der ersten Schätzung beträgt.

c) Radabrieb

Die Materialverluste am Rad können anhand des durchschnittlichen Verschleisses von Wagenrädern abgeschätzt werden. Diese Werte sind aufgrund von Erfahrungen aus dem Unterhalt annähernd bekannt, und zwar separat für Personen- und Güterwagen. Daraus konnten die Abriebsmengen berechnet werden.

Aus den Prüfstandsmessungen für die Bestimmung des PM10-Anteils im Schienenabrieb wurde zudem auch auf den PM10-Anteil des Radabriebs geschlossen, nämlich beide 90 %. Bei den früheren Berechnungen (BUWAL 2001) wurde der Anteil lediglich auf 50 % geschätzt.

Mit Hilfe der Abriebsmenge und des PM10-Anteils kann die PM10-Emission berechnet werden. Wegen des höheren PM10-Anteils erhöht sich der Wert gegenüber der früheren Schätzung um den Faktor 1.5.

d) Abrieb von Fahrdrabt und Stromabnehmer

Der Abrieb, der beim Beschleifen des Fahrdrabts entsteht, stellt den geringsten Anteil an den bahnbedingten Emissionen dar. Er wurde bestimmt aufgrund der Netzlänge, der durchschnittlichen Abnutzung und der durchschnittlichen Anzahl Beschleifungen. Die so ermittelte Menge stimmt gut mit den Erfahrungen aus dem Betrieb über die Lebensdauer und die Restdicke des Fahrdrabts überein. Zusätzlich zum Abrieb des Kupferdrabts entsteht Staub von den Kohle-Schleifstücken der Stromabnehmer. Aus Einkaufsstatistiken weiss man, dass die Menge sehr gering ist

(1 t/a). Da keine Daten zur Korngrößenverteilung des Fahrleitungs- und Stromabnehmerabriebs vorliegen, wird angenommen, die Emissionen erfolgen zu 100% als Feinstaub. Diese Bedingung ist in der Realität wahrscheinlich nicht gegeben, sie ist aber für die vorliegende Analyse bedeutungslos.

e) Hochrechnung auf das Schienennetz Schweiz

Werden alle oben erwähnten Beiträge der mechanisch erzeugten PM10-Abriebsemissionen addiert, so erhält man für die Summe 825 t/a (Bezugsjahr 2004). Dies sind nur noch 30 % der früheren Abschätzung für das Jahr 2000 (2758 t/a). Damit sind jedoch nur die Emissionen der SBB erfasst. Es fehlen noch die Emissionen der übrigen konzessionierten Transportunternehmen (KTU). Zusätzlich müssen die im Rahmen des Open Access stattfindenden Verkehre berücksichtigt werden (Fremdverkehre auf dem SBB-Netz, SBB-Verkehre auf Fremdnetzen, SBB-Verkehre im Ausland).

Zuerst wurden die SBB-Emissionen nach Personen- und Güterverkehr aufgeteilt. Via Verkehrsleistungen (Personen-km, Tonnen-km) konnten die Brems-, Schienen- und Radabriebsemissionen hochgerechnet werden, der Abrieb von Fahrdrabt/Stromabnehmer via Zugs-km.

Schliesslich wurde noch dem Umstand Rechnung getragen, dass ein Teil der Güterwagen auf dem Schweizer Netz ausländischer Herkunft ist und ein Teil der SBB-Verkehrsleistung im Ausland erbracht wird. Der vorgängig ermittelte Brems- und Radabrieb bezieht sich auf den Fahrzeugpark der SBB und muss auf das CH-Netz umgerechnet werden. Beim Schienenabrieb ist keine entsprechende Korrektur nötig, da er von der Berechnungsart her die Emissionen durch ausländische Züge auf dem Schweizer Netz bereits enthält. Mit Hilfe der Betriebsstatistiken der SBB konnten die fehlenden respektive zu viel berechneten Emissionen approximativ korrigiert werden. Das Hauptergebnis lässt sich wie folgt zusammenfassen

Quelle	PM10-Emissionen Schienenverkehr 2004 Schweiz			
	Personenverkehr	Güterverkehr	Summe	
	t/a	t/a	t/a	%
Bremsen	354	264	618	60%
Schienen	90	49	139	14%
Räder	82	160	242	24%
Fahrdrabt	20	5	25	2%
Summe	546	478	1024	100%
Anteile	53%	47%	100%	

Tab. 3: PM10-Emissionen des schweizerischen Schienenverkehrs für das Jahr 2004. Beachte: Es sind nur mechanisch erzeugte Partikel aufgeführt. Dieselrusssemissionen aus dem Rangierverkehr sind nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung (ca. 45 t/a PM10, BUWAL 2001).

Die Summe aller PM10-Emissionen beträgt 1024 t/a, Personen- und Güterverkehr teilen sich die Summe im Verhältnis 53 % zu 47 %. 60 % der Summe sind Bremsabriebe.

Nicht separat in der Tabelle aufgeführt sind die Anteile der SBB. Sie betragen 88 % oder 896 t/a, davon 459 t/a aus dem Personenverkehr, 437 t/a aus dem Güterverkehr. Die restlichen 12 % entfallen auf die verschiedenen KTU (BLS, RhB etc.).

Die Tabelle enthält nur die mechanisch erzeugten PM10-Emissionen. Aus dem Betrieb von Diesellokomotiven im Rangierverkehr werden zusätzlich ca. 45 t/a PM10 in Form von Dieselmotoren aus den Auspuffen emittiert (BUWAL 2001). Werden diese noch zur Summe addiert, ergibt sich ein Total der PM10-Emissionen Schienenverkehr von 1069 t/a. Weil die 45 t/a ausschliesslich dem Güterverkehr zuzurechnen sind, ist damit die Aufteilung Personenverkehr (546 t/a) zu Güterverkehr (523 t/a) nahezu ausgeglichen und lautet 51 % zu 49 %.

Für alle Untersuchungen wurden nicht nur mittlere Werte bestimmt, sondern jeweils auch Minima und Maxima abgeschätzt. Diese Rechnung wurde für die mechanisch erzeugten Emissionen der SBB durchgeführt. Um die Streuung des Mittelwerts im Sinne der Statistik zu schätzen, wurde für jeden Beitrag die Differenz zwischen Minimum und Maximum als eine doppelte „Standardabweichung“ interpretiert. Mit den Standardabweichungen konnte via Fehlerfortpflanzungsgesetz die Standardabweichung der Summe berechnet werden. Sie beträgt 23 % des Mittelwerts. Werden diese Unsicherheiten auf das Total der Schienenverkehrsemissionen übertragen ergibt sich folgendes Schlussergebnis:

Die Summe aller mechanisch erzeugten Schienenverkehrsemissionen Schweiz für das Bezugsjahr 2004 liegt im Intervall 800–1300 t/a, Mittelwert 1024 t/a. Werden die Dieselmotoremissionen aus dem Rangierverkehr dazugezählt, erhöht sich der Bereich auf 850–1350 t/a, Mittelwert 1069 t/a.

2.1.3 Interpretation

Die neuen Untersuchungen der SBB liefern eine gute Bestätigung der Emissionsergebnisse, welche im Rahmen des Statusberichtes (BUWAL 2002) publiziert worden sind. Der Bereich der damals geschätzten Summe aller bahnerzeugten PM10-Emissionen deckt sich mit dem neu berechneten Bereich. Im Unterschied zu damals konnten neu alle wichtigen Emissionsprozesse quantifiziert werden, sowohl in Bezug auf den gesamten Materialverlust durch Abrieb als auch auf den PM10-Anteil. Gerade die Kenntnis der PM10-Anteile ist wichtig. Für die erste Erhebung 1999 war man auf grobe Schätzungen angewiesen gewesen, in der Untersuchung 2002 konnten bereits einige Messdaten zum PM10-Anteil im Bremsstaub ausgewertet werden, und neu stehen auch für die weiteren Beiträge genauere Anteile aus Messdaten zur Verfügung. Damit haben die hier dargestellten weiterführenden Untersu-

chungen ermöglicht, die vom Bahnverkehr erzeugten Emissionen realistischer und zuverlässiger abzuschätzen. Sie bestätigten, dass in der ersten Schätzung 1999 insbesondere der Bremsabrieb stark überschätzt worden war. Grund dafür ist, dass nur ein Teil des Bremsabriebs der PM10-Fraktion zuzurechnen ist. Er leistet aber nach wie vor den grössten Beitrag zu den Gesamtemissionen. Ebenfalls überschätzt wurde der Abrieb, der beim Schleifen (Reprofilieren) der Schienen entsteht. Hingegen wurde früher der Radabrieb zu tief veranschlagt, er steht neu an zweiter Stelle hinter dem Bremsabrieb.

2.2 Immissionsmessungen PM10 und Eisen (Teilprojekt EMPA)

2.2.1 Messkampagnen

Der Schwerpunkt der neuen EMPA-Studie (EMPA 2005) liegt auf der Ermittlung der vom Schienenverkehr verursachten PM10-Immissionen sowie auf der Untersuchung, wie diese Immissionen mit der Distanz von der Quelle abnehmen. Zu diesem Zweck wurden

- zwei Messstellen im Einflussbereich der Einfahrt zum Hauptbahnhof Zürich (Röntgenstrasse und Gamperstrasse) sowie eine dritte Messstelle an der stark befahrenen Strecke zwischen Altstetten und Schlieren (Juchhof) ausgewählt, wobei der Abstand zum Rand der Gleisanlagen jeweils rund 10 m betrug (Abb. 1);
- drei Messstellen im Juchhof in unterschiedlicher Distanz zur Bahnlinie (10 m, 36 m, 120 m) eingerichtet, die die Aufnahme eines Querprofils erlaubten.

Damit wurden die zwei wichtigsten Emissionssituationen des Bahnbetriebs, nämlich "Bahnhofeinfahrt" und "Überlandstrecke" abgedeckt. Beide Messorte repräsentieren Extremstandorte mit sehr hohem Verkehrsaufkommen. Die Messstationen Röntgenstrasse und Gamperstrasse liegen mitten im Siedlungsgebiet und charakterisieren damit die Exposition der hier lebenden Bevölkerung. Die Station Juchhof liegt an einer Bahnstrecke mit ausserordentlich hoher Zugsfrequenz. Als Hintergrundstandort diente die NABEL-Station Zürich, Zeughaushof Kaserne.

Um repräsentative Daten zu erhalten, wurden an allen Messorten mehrere Messkampagnen zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt, jeweils abwechselnd Messungen des Bahneinflusses in 10 m Abstand an allen drei Messorten (Kampagnen A1-A3) und Abstandsprofilmessungen im Juchhof (Kampagnen B1-B3), siehe Tab. 4. Bei beiden Kampagnenserien diente die NABEL-Station Zürich, Zeughaushof Kaserne als Referenzstation zur Bestimmung der Hintergrundbelastung.

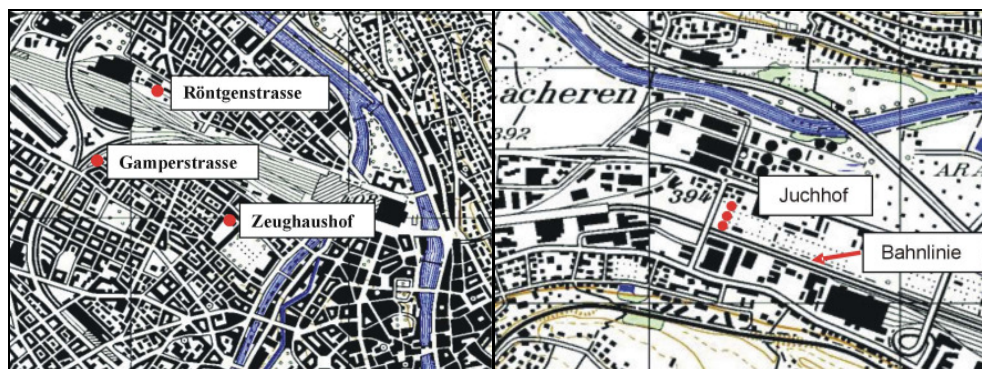


Abb. 1: Situationsplan der Messstellen. Links: Stationen im Bereich der Bahnhofseinfahrt des Hauptbahnhofs Zürich sowie die Hintergrundmessstation Zeughaushof Kaserne (NABEL-Station). Rechts: Juchhof zwischen den Bahnhöfen Schlieren (am linken Bildrand sichtbar) und Zürich-Altstetten (ausserhalb der Karte). Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA057427).

Datum	Messkampagne	Messstandorte	Name
25.06.2003 – 13.08.2003	Kampagnenserie A	Juchhof 10 m, Röntgenstrasse, Gamperstrasse, Zeughaushof (NABEL)	A1
22.08.2003 – 19.10.2003	Kampagnenserie B	Juchhof 10 m, Juchhof 36 m, Juchhof 120 m, Zeughaushof (NABEL)	B1
29.10.2003 – 23.12.2003	Kampagnenserie A	Juchhof 10 m, Röntgenstrasse, Gamperstrasse, Zeughaushof (NABEL)	A2
22.01.2004 – 24.03.2004	Kampagnenserie B	Juchhof 10 m, Juchhof 36 m, Juchhof 120 m, Zeughaushof (NABEL)	B2
02.04.2004 – 08.06.2004	Kampagnenserie A	Juchhof 10 m, Röntgenstrasse, Gamperstrasse, Zeughaushof (NABEL)	A3
12.06.2004 – 03.08.2004	Kampagnenserie B	Juchhof 10 m, Juchhof 36 m, Juchhof 120 m, Zeughaushof (NABEL)	B3

Tab. 4: Übersicht über die Messperioden der einzelnen Messkampagnen.

Die Proben wurden mit High-Volume-Samplern in 24-h Auflösung gezogen. Die gewählte Sammelmethode entspricht dem Referenzverfahren zur Bestimmung der PM₁₀-Belastung der Aussenluft. Die chemische Analyse des Schwebstaubs erfolgte mit Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie direkt an den Quarzfaserfiltern. Die Partikelanzahl wurde zusätzlich in 10-min-Auflösung mit einem optischen Partikelzähler untersucht.

2.2.2 Messresultate

Eine Auswahl von Messresultaten ist in den beiden folgenden Tabellen gegeben.

		Kampagne	Röntgenstrasse	Juchhof 10m	Gamperstrasse	Zeughaus
PM10	µg/m ³	A1	21.04	20.47	20.78	20.19
		A2	31.84	31.71	32.71	29.27
		A3	16.81	17.22	17.70	15.97
Cu	µg/m ³	A1	0.069	0.049	0.047	0.018
		A2	0.124	0.098	0.073	0.030
		A3	0.056	0.048	0.041	0.017
Fe	µg/m ³	A1	1.40	1.13	1.30	0.51
		A2	2.53	2.30	1.93	0.79
		A3	1.37	1.27	1.25	0.43
Ca	µg/m ³	A1	0.35	0.36	0.42	0.41
		A2	0.34	0.30	0.46	0.35
		A3	0.26	0.27	0.35	0.26
S	µg/m ³	A1	1.20	1.20	1.23	1.24
		A2	1.16	1.11	1.22	1.20
		A3	0.76	0.79	0.79	0.85
Fe-Gehalt	%	A1	7.4	5.8	6.6	2.6
		A2	8.1	7.6	6.0	2.6
		A3	8.7	7.7	6.9	2.6
Cu/Fe*)		A1	0.052	0.047	0.037	0.035
		A2	0.051	0.046	0.039	0.032
		A3	0.043	0.037	0.034	0.041

*) Berechnet als Mittelwert der täglichen Cu/Fe-Konzentrationsverhältnisse.

Tab. 5: Mittelwerte der PM10- und der Element-Konzentrationen der drei Messkampagnen A1-A3 an der Röntgenstrasse, im Juchhof (10 m) und an der Gamperstrasse.

		Kampagne	Juchhof 10m	Juchhof 36m	Juchhof 120m	Zeughaus
PM10	µg/m ³	B1	22.4	21.6	21.1	20.9
		B2	34.2	34.0	33.7	31.1
		B3	24.5	24.5	23.7	20.4
Cu	µg/m ³	B1	0.050	0.042	0.023	0.021
		B2	0.078	0.052	0.039	0.018
		B3	0.042	0.025	0.021	0.020
Fe	µg/m ³	B1	1.56	1.03	0.81	0.62
		B2	1.98	1.36	1.08	0.57
		B3	1.24	0.75	0.58	0.46
Ca	µg/m ³	B1	0.29	0.29	0.31	0.35
		B2	0.34	0.34	0.36	0.34
		B3	0.27	0.26	0.29	0.28
S	µg/m ³	B1	0.86	0.82	0.84	0.98
		B2	1.07	0.90	0.99	1.06
		B3	0.88	0.82	0.83	0.98
Fe-Gehalt	%	B1	7.5	5.0	3.9	2.9
		B2	6.2	4.2	3.3	1.9
		B3	5.6	3.5	2.7	2.3
Cu/Fe*)		B1	0.033	0.047	0.025	0.030
		B2	0.043	0.042	0.036	0.029
		B3	0.035	0.034	0.036	0.041

*) Berechnet als Mittelwert der täglichen Cu/Fe-Konzentrationsverhältnisse.

Tab. 6: Mittelwerte der PM10- und der Element-Konzentrationen der drei Abstandskampagnen B1-B3 am Juchhof.

Die durchschnittlichen, durch den Eisenbahnverkehr verursachten PM10-Zusatzbelastungen an den drei bahnbelasteten Messstandorten (berechnet als Differenzen der PM10-Konzentrationen in rund 10 m Entfernung von den Geleisen minus der urbanen Hintergrundsbelastung) betragen rund 1.5–2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Messunsicherheit beträgt für die PM10-Differenzen $\pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (95%-Vertrauensbereich).

Hauptsächlicher Bestandteil des bahnemittierten PM10-Schwebstaubs ist Eisen. Die mittlere Eisen-Zusatzbelastung beträgt rund 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei einer Messunsicherheit von $\pm 10\%$. Nimmt man an, dass das Eisen vorwiegend in oxidierter Form (z.B. Fe_2O_3) vorliegt, entspricht dies mehr als 75% des bahnbedingten PM10.

Weitere klar bahnbedingte Elemente des PM10-Schwebstaubs sind Kupfer, Mangan und Chrom sowie weniger ausgeprägt auch Nickel, obwohl sie im Vergleich zu Eisen quantitativ nur sehr gering zur PM10-Belastung beitragen, am meisten noch Kupfer mit etwa 3%.

Die bahnbedingten Zusatzbelastungen dieser Elemente nehmen mit zunehmendem Abstand von den Geleisen rasch ab. In 120 m Entfernung betragen sie nur noch rund 25% der in 10 m Entfernung gemessenen Zusatzbelastungen.

An allen drei Standorten emittierte der Eisenbahnverkehr keine signifikanten Mengen mineralischer Partikel mit einem Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$. So sind für geogene Partikel typische Elemente wie Calcium, Aluminium, Magnesium und Natrium gegenüber der Hintergrundkonzentration im Durchschnitt nicht erhöht. Dies ist ein wichtiger Befund, da solche Emissionen z.B. aus zerriebenem und durch den Fahrtwind aufgewirbeltem Schotter durchaus denkbar gewesen wären.

Ebenso ist für den vor allem von Feuerungen und Verkehr emittierten Schwefel sowie für das von Industrie und Verkehr emittierte Blei erwartungsgemäss kein signifikanter Unterschied zwischen Bahn- und Hintergrundstandorten zu sehen.

Kohlenstoffhaltige Emissionen des Bahnverkehrs wurden in dieser Studie nicht untersucht. Aus Resultaten einer ausserhalb dieses Projektes durchgeführten Untersuchung im Perronbereich kann geschlossen werden, dass diese weniger als 10 % des bahnbedingten PM10 ausmachen (SBB 2004).

Markante Unterschiede des Cu/Fe-Verhältnisses zwischen Werktagen und Sonntagen am Standort Juchhof lassen vermuten, dass die spezifischen Eisenemissionen von Güterzügen höher liegen, als die von Personenzügen. Meteorologische Schwankungen und die zu geringe Anzahl von Messwerten für Sonntage lassen aber keine zuverlässige Quantifizierung dieses Unterschieds zu.

Die untersuchten Standorte, Juchhof als Repräsentant einer Überlandstrecke sowie Röntgenstrasse und Gampferstrasse als Repräsentanten einer Bahnhofseinfahrt, weisen für schweizerische Verhältnisse mit rund 740 Zügen/Tag (550 Personenzüge, 190 Güterzüge) sehr hohe Zugsfrequenzen auf. Bei Abschätzungen der zusätzlichen

PM10-Immissionen durch Eisenbahnen an anderen Standorten kann deshalb entsprechend den lokalen Zugsfrequenzen von geringeren Zusatzbelastungen ausgegangen werden.

Messungen mit einem zeitlich hoch auflösenden Partikelzähler (10 Minuten) wurden nach Windrichtungen getrennt aufgetragen. Die folgende Abbildung zeigt am Beispiel der Messstation Juchhof (10 m Abstand von der Bahnlinie) ein Resultat, das in seiner Aussage auch für die übrigen Stationen Gültigkeit hat: Die grüne Linie in der Grafik links stellt die Häufigkeit der Windrichtungen dar, aufgeteilt in 12 Sektoren. Die anderen beiden Darstellungen sind Belastungswindrosen, welche die durchschnittliche Partikelkonzentration (in Anzahl Partikel/m³) je Grössenklasse pro Sektor anzeigen. Aus der mittleren Grafik folgt, dass die höchsten Konzentrationen von kleinen Partikeln (0.3–1 µm) mit Werten über 1.5·10⁸ Partikel/m³ aus nördlichen Richtungen, Sektoren 1 und 2, eingetragen werden. Dort befindet sich aber keine Bahnlinie, sondern die Nationalstrasse A1 (knapp 600 m von der Messstation Juchhof 10 m), was einen Hinweis auf den Strassenverkehr als wichtige Quelle feiner Verbrennungspartikel gibt. Bei den gröberen Partikel (>3 µm) weist ein Maximum aus Süden, aus Sektor 6, dort wo die Bahnlinie liegt, auf den Bahnverkehr als Emissionsquelle. (Ein weiteres Maximum aus Nordnordwest, Sektor 12, wurde nicht interpretiert, stammt aber sicher nicht aus dem Bahnverkehr, weil dort keine Bahnlinie durchführt. Hingegen kommt aus dieser Richtung auch der Strassenverkehr als Grobstaubemittent in Frage, der bekanntermassen erhebliche Mengen gröberer Abriebspartikel emittiert.) Das Resultat bedeutet, dass der Bahnverkehr mehrheitlich gröbere Partikel emittiert und kaum kleinere Partikel, ein Resultat, das mit Befunden der weitergehenden Immissionsmessungen (PSI) gut übereinstimmt (siehe dazu folgendes Kapitel).

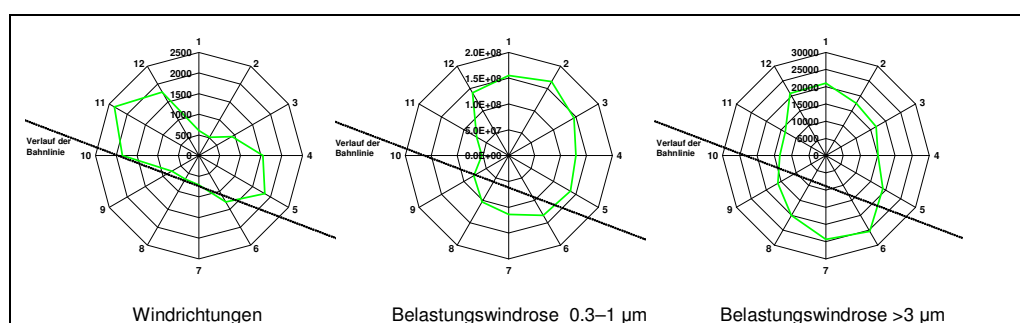


Abb. 2: Windrosen für die Messstation Juchhof 10 m (Die Messstation befindet sich im Zentrum; oben ist Norden, unten Süden. Die Bahnlinie, fette Linie, verläuft südlich der Messstation). Bild links: Die grüne Umrandung gibt die Häufigkeit der Windrichtungen in Sektoren 1-12 an (Anzahl der 10-Minutenwerte in). Bild Mitte: Belastungswindrose: Durchschnittliche Partikelkonzentration je Sektor (Anzahl Partikel/m³) für kleine Partikel (Durchmesser 0.3-1.0 µm). Bild rechts: Belastungswindrose für grössere Partikel (> 3 µm).

2.3 Weitergehende Immissionsmessungen (Teilprojekt PSI)

2.3.1 Messkampagnen

Anlässlich des Projektes „Verifikation der PM₁₀-Emissionen des Schienenverkehrs“ (PSI 2005) untersuchte das PSI die Tagesgänge luftgetragener Spurenelemente und deren Bezug zum Schienenverkehr. Dazu wurden während zweier Messkampagnen mit einem dreistufigen Staubsammler (Impaktor) im Stundentakt Aerosolproben in den Grössenbereichen 0.1–1 µm, 1–2.5 µm und 2.5–10 µm gesammelt und mittels Synchrotron-Röntgenfluoreszenzspektrometrie auf Spurenelemente analysiert. Die Partikelgrössenverteilungen wurden zusätzlich mit einem optischen Partikelzähler untersucht.

Eine erste Messkampagne (Winterkampagne) fand vom 25.11.2003 bis 31.01.2004 in Zürich-Juchhof statt. Die Messstation befand sich in zehn Metern Entfernung von der Limmattalbahnlinie zwischen Zürich-Altstetten und Zürich-Schlieren, am dichtest befahrenen Bahnstreckenabschnitt der Schweiz (vgl. EMPA 2005). Die Strecke wurde meist mit hoher und konstanter Geschwindigkeit passiert, sodass im Wesentlichen kein Bremsabrieb zu erwarten war. Der Zugverkehr setzte sich sowohl aus Personenzügen als auch aus Lokal- und Transitgüterzügen zusammen. Nebst dem Schienenverkehr wurde die Luft am Messstandort durch die Autobahn A1 (200 m Abstand), durch sonstigen Lokalstrassenverkehr sowie durch die lokale Industrie beeinflusst.

Die zweite Messkampagne (Frühlingskampagne) fand vom 19.05.2004 bis 02.07.2004 in Zürich-Röntgenstrasse statt. Die Messstelle liegt direkt an den Geleisen im Einfahrtsbereich des Zürcher Hauptbahnhofs (1 km Entfernung vom Perronbereich). Die dort vorbeifahrenden Züge hatten ihr Tempo bereits stark gedrosselt und standen kurz vor dem Einsatz der Bremsklötze zum definitiven Abbremsen. Nahe der Messstation befindet sich eine grosse Wohnüberbauung, welche die Luft am Messstandort durch wohnsiedlungsspezifische Aktivitäten beeinflusste. Die Personenzugfrequenzen unterschieden sich kaum von denjenigen in Zürich-Juchhof, jedoch fehlte der gesamte Transitgüterverkehr.

2.3.2 Messresultate

An beiden Standorten wurde Schwefel, Chlor, Kalzium, Chrom, Mangan, Eisen, Kupfer, Zink, Brom sowie Blei in den drei Grössenklassen (PM₁: 0.1–1 µm, PM_{2.5}-PM₁: 1–2.5 µm und PM₁₀-PM_{2.5}: 2.5–10 µm) nachgewiesen. In Zürich-Röntgenstrasse wurde zusätzlich Kalium, Titan, Vanadium, Nickel und Rubidium auf den Luftfilterproben gefunden (Abb. 3).

Insgesamt lagen die Konzentrationen für Zürich-Röntgenstrasse im Mittel dreimal tiefer als diejenigen der Station Zürich-Juchhof (Abb. 3). Der Unterschied konnte grösstenteils durch die unterschiedliche Jahreszeit der Messkampagnen und den damit unterschiedlichen vorherrschenden Wettersituationen erklärt werden (vgl.

Abschnitt 2.3.5). Die relative Konzentrationsverteilung der Elemente unterschied sich aber an den beiden Standorten nicht wesentlich. Von den nachgewiesenen Spurenelementen wiesen grobkörniges Eisen, grobkörniges Kalzium sowie grob- und feinkörniger Schwefel die höchsten Massenkonzentrationen auf ($1-6 \mu\text{g m}^{-3}$).

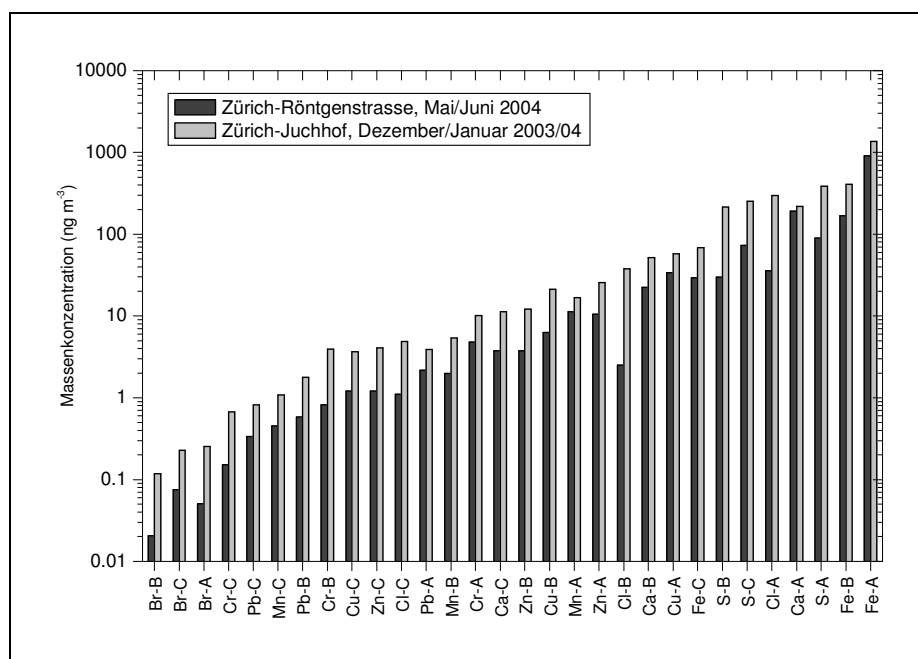


Abb. 3: Vergleich der an den beiden Messtandorten gemessenen Elementkonzentrationen (A: 2.5-10 μm , B: 1-2.5 μm , C: 0.1-1 μm).

Mit Hilfe statistischer Analysen konnten folgende Zuordnungen zwischen Indikatoren und Quellen gefunden werden.

Indikatoren	Quellen
Eisen, Kupfer, Mangan, Zink und Chrom	Schienenverkehr
Feinkörniger Schwefel	Sekundäraerosol
Grobkörniger Schwefel zusammen mit grobkörnigem Kalzium	Gips auf Baustellen
Vanadium, Nickel und Rubidium	Schwerölverbrennung (Industrie)
Feinkörniges Blei und Brom	Strassenverkehr
Feinkörniges Chlor und Kalium	Holzverbrennung
Grobkörniges Chlor (Winter)	Streusalz
Grob- und feinkörniges Chlor (Sommer) am Standort Zürich-Röntgenstrasse	Vermutlich Kunststoffverbrennung KVA

Tab. 7: Im Feinstaub gefundene Elemente (Indikatoren) weisen auf die Emissionsquellen.

Die statistische Gruppierung der Tagesverläufe der Elementkonzentrationen brachte an beiden Standorten eine signifikante Ähnlichkeit der Verläufe bahnverkehrsrelevanter Elemente (Eisen, Kupfer, Mangan, Zink und Chrom) hervor.

2.3.3 Bahnbedingte Eisen- und Kupfer-Immissionen

Der bahnbedingte Elementanteil am Messstandort Zürich-Juchhof wurde anhand der gemessenen Konzentration und einer Schätzung der Hintergrundbelastung berechnet. Dabei wurde die Hintergrundkonzentration mittels Messwerten der EMPA in Zürich, Zeughaushof Kaserne abgeschätzt (EMPA 2005). Der Hintergrundanteil betrug durchschnittlich rund $\frac{1}{3}$ der Gesamtkonzentration.

Die durch Fahrleitungsabrieb zustande kommende Kupferemission pro Zug kann als nahezu konstant angenommen werden. Dagegen ist der Eisenabrieb eines Güterzuges deutlich grösser als derjenige eines Personenzuges (längere Züge, mehr Rad- und Schienenabrieb). Das Eisen-Kupfer-Verhältnis kann deshalb als Indikator der Schienenverkehrszusammensetzung dienen. Erwartungsgemäss lag das insgesamt in PM10 gefundene Cu/Fe-Konzentrationsverhältnis für den Personenzugverkehr mit $\text{Cu/Fe} \sim 0.1$ rund doppelt bis dreimal so hoch wie für den Güterzugverkehr mit $\text{Cu/Fe} \sim 0.04$ (Abb. 4). Dieses Resultat bestätigt die von der EMPA (2005) beobachtete Zunahme des Cu/Fe-Verhältnisses an Wochenenden (weniger Güterzüge). Unter der Annahme, dass an der Strecke Juchhof keine Bremspartikel gemessen werden, kann das Verhältnis Cu/Fe aus den neuen Emissionszahlen der SBB (Tab. 3) als Verhältnis der Emissionen vom Fahrdrabt (Cu) dividiert durch die Summe aus Rad- und Schienenabrieb (beide Fe) grob geschätzt werden. Für den Personenverkehr ergibt dies 0.12, für den Güterverkehr 0.024. Diese Werte passen von der Grössenordnung sehr gut zu den vom PSI ermittelten Werten.

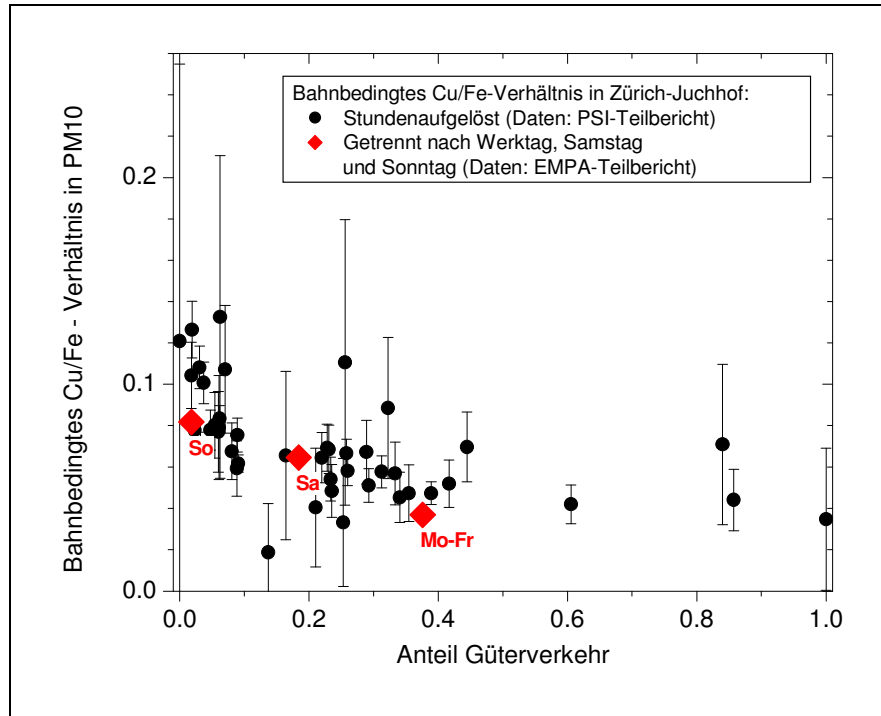


Abb. 4: Bahnbedingtes Cu/Fe – Verhältnis für PM10 versus Güterverkehrsanteil in Zürich-Juchhof. Die Messwerte stellen den Mittelwert über alle Messwerte pro Güterverkehrsanteil plus Standardfehler dar. Als Vergleich sind die in der EMPA-Teilstudie ermittelten Cu/Fe-Verhältnisse angegeben.

Ebenso kann der bahnbedingte Eisen- und Kupferanteil als Funktion der Verkehrszusammensetzung dargestellt werden. Aus den Endpunkten lässt sich der bahnbedingte Anteil bei reinem Personen- oder Güterverkehr abschätzen. Berücksichtigt man den für Zürich-Juchhof durchschnittlichen Personen- und Güterverkehrsanteil, kann davon ausgegangen werden, dass der Personenverkehr rund 40 % und der Güterverkehr rund 10% zu den gemessenen Eisenimmissionen beitrug. Daraus resultiert ein Bahngesamtbeitrag von 50% für Eisen, der etwas tiefer liegt als der von EMPA ermittelte Wert (66%). Aufgrund der längeren Messdauer (6 Monate EMPA vs. 4 Wochen PSI) ist der EMPA-Wert als repräsentativer zu betrachten. Für Kupfer (hauptsächlich durch Fahrleitungsabrieb verursacht) wurde für dieselbe Zeitdauer am gleichen Standort ermittelt, dass der Personenverkehr 75 % und der Güterverkehr 5 % zu den Gesamtemissionen beitragen.

2.3.4 Grössenverteilungen von Eisen- und Kupfer-Partikeln

Die bahnbedingten Eisen- und Kupferimmissionen in Zürich-Juchhof wurden nach den Anteilen von PM10-PM2.5, PM2.5-PM1 und PM1 aufgeschlüsselt. Insgesamt machte PM10-PM2.5 sowohl für Eisen als auch für Kupfer den grössten Anteil aus (Abb. 5): Drei Viertel der dem Güterzugverkehr zugeschriebenen Eisenimmissionen lagen im groben Grössenbereich (2.5-10 µm) vor (Tab. 8). Für Personenzüge lag

der Grobanteil von Eisen bei etwas mehr als der Hälfte. Diese Grössenverteilungen sind am betrachteten Standort vor allem auf Rad- und Schienenantrieb zurückzuführen, da hier Bremsantrieb eine vernachlässigbare Rolle spielte. Die Unterschiede in den Grössenverteilungen sind auf unterschiedliches Rollmaterial und Achsdrücke bei Personen- und Güterzügen zurückzuführen.

Für die bahnbedingten Kupferimmissionen wurde ebenfalls eine Grössenabhängigkeit von der Zugart gefunden. Der bahnbedingte Kupfergrobanteil (PM10-PM2.5) lag für den Personenverkehr bei rund 60 %, beim Güterverkehr bei 75%. Dieser Unterschied könnte durch den Einsatz unterschiedlicher Lokomotivtypen im Güter- und Personenverkehr bedingt sein, d.h. mit unterschiedlichem Pressdruck des Stromabnehmers gegen die Fahrleitung.

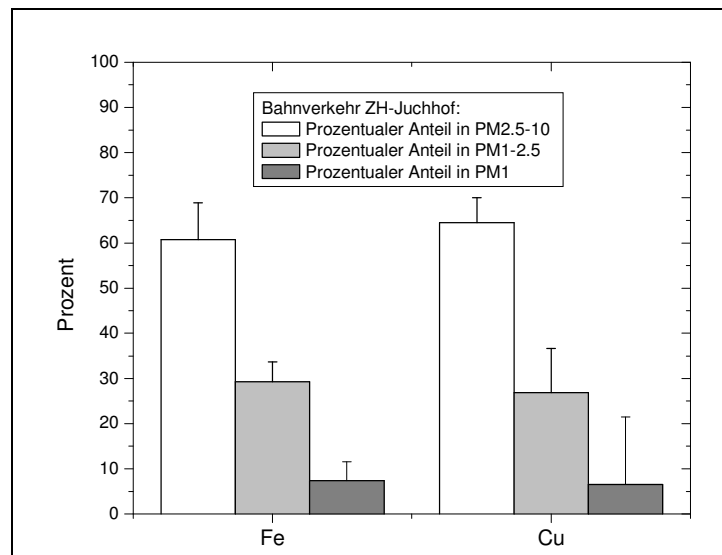


Abb. 5: Anteile nach Grössenklassen für Eisen- und Kupfer-Immissionen in Zürich-Juchhof. (Annahme: alles Fe_{PM1} stammt aus dem Schienenverkehr, vgl. auch Tab. 8). Mittelwerte aller Messwerte und Standardfehler (Datengrundlage: 25.11.2003 – 24.12.2003, 533 Stundenwerte).

Element	Verkehr	PM1 %	PM2.5-PM1 %	PM10-PM2.5 %
Eisen	Güterverkehr	0-7	20-27	73
	Personenverkehr	0-7	37-44	56
Kupfer	Güterverkehr	0-7	18-25	75
	Personenverkehr	0-7	33-40	60

Tab. 8: Grössenanteile der bahnbedingten Eisen- und Kupferimmissionen in Zürich-Juchhof. Der Unsicherheitsbereich ergibt sich durch die zwei unterschiedlichen Annahmen a) Fe_{PM1} stammt vollständig aus Schienenverkehr, b) Fe_{PM1} stammt nicht aus Schienenverkehr.

2.3.5 Einfluss Meteorologie

Die zeitlich hoch aufgelösten Messungen zeigen Tagesganglinien, wie sie in urbanen Gebieten typisch sind. Neben der zeitlichen Aktivität von Schadstoffquellen ist der Einfluss der Meteorologie dominant. Die Tagesgänge der in dieser Studie gemessenen Spurenelemente sind mit wenigen Ausnahmen und unabhängig von ihren Quellen durch das Verhalten der bodennahen Luftschicht geprägt, hauptsächlich durch Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen bei Ausdehnung der bodennahen Luftschichten. Bedingt durch die verstärkte tägliche Verdünnung im Frühling war die Schwankung der in Zürich-Röntgenstrasse gemessenen Tagesverläufe ausgeprägter als jene im Winter in Zürich-Juchhof. Die Beobachtung, dass sich die Tagesgänge in ihrem Verlauf nicht von anderen Standorten unterscheiden, ist eine klare Evidenz dafür, dass die Zusatzbelastung des Schienenverkehrs keine dominante Quelle darstellen kann.

Bei typischen Wetterlagen im Mittelland (Inversion, Westwind, Bisenlage) ist anzunehmen, dass lokal in Zürich gemessene Konzentrationsschwankungen der Tagesmittelwerte oft repräsentativ für die ganze Region sind (vgl. Hüglin, 2000). Die Schwankung der Tagesmittelwerte von Tag zu Tag war meist signifikant grösser als die Konzentrationsschwankungen innerhalb eines Tages.

2.4 Plausibilitätsanalysen Immissionsmodell (INFRAS/METEOTEST)

2.4.1 Methodisches Vorgehen, Resultate Immissionsmodell

Die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST hat im Auftrag und in Zusammenarbeit mit dem BUWAL ein Immissionsmodell entwickelt. Die aktuellsten Ergebnisse sind PM10- und PM2.5-Immissionskarten für die Schweiz für die beiden Bezugsjahre 2000 und 2010 (BUWAL 2003). Für die Modellierung werden vorgängig quellenspezifische Emissionskataster erstellt, die mit Ausbreitungsfunktionen in Immissionen umgewandelt und einander überlagert werden. Die Resultate stehen als Jahresmittelwerte der PM10-Immissionen in einer räumlichen Auflösung von 200 m zur Verfügung. Die Zwecke solcher Modellrechnungen sind

- der Vergleich mit dem Grenzwert der Luftreinhalte-Verordnung für das Jahresmittel der PM10-Immissionen zur Identifikation von Gebieten mit übermässiger Belastung sowie Hinweise auf die dortigen Beiträge der verschiedenen Feinstaub-Emittenten,
- das Bereitstellen von Grundlagen für die Massnahmenplanung der Kantone,
- die Bestimmung der Bevölkerungsexposition (z.B. wie viele Personen wohnen in Gebieten mit übermässiger Belastung), woraus die Zahl luftverschmutzungsbedingter Krankheits- und Todesfälle geschätzt werden kann, inklusive Kosten solcher Gesundheitsschäden.

Selbstverständlich werden auch die Immissionen des Schienenverkehrs in die Modellierung einbezogen. Die Lokalisierung der Schienenverkehrsemissionen geschieht mit Hilfe des Schienennetzes und der Verkehrsfrequenzen. Auf jedem Streckenabschnitt wird die PM10-Emission proportional zur Anzahl Zugsdurchfahrten - genauer zur Anzahl Achs-Durchfahrten - berechnet, und zwar separat für den Personen- und für den Güterverkehr. Für die Immissionskarten BUWAL (2003) wurden folgende Teilsummen der PM10-Emissionen verwendet: 421 t/a für den Personen- und 579 t/a für den Güterverkehr, zusammen 1000 t/a. Die linienförmigen Emissionen des Schienenverkehrs werden in Emissionskataster transformiert, welche ihrerseits mit einer Ausbreitungsrechnung in Immissionskataster umgerechnet werden (Abb. 6).

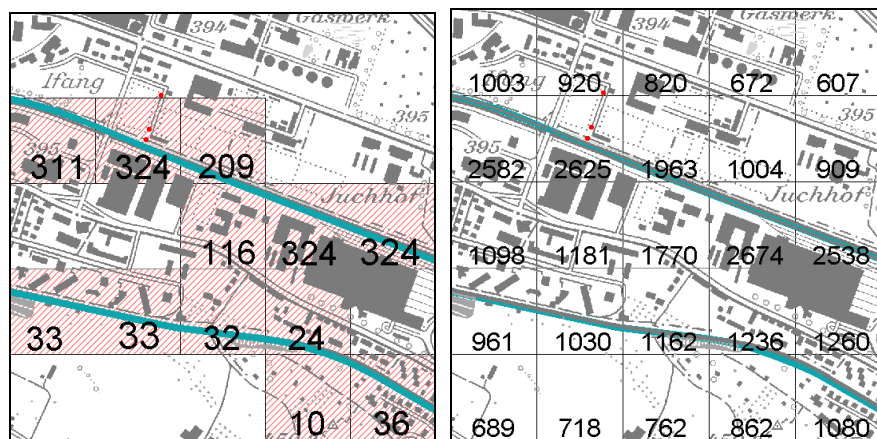


Abb. 6: Grafik links: PM10-Emissionen 2000 aus dem Schienenverkehr (Einheit kg/a pro Zelle à 200m x 200m) am Standort Juchhof, Schlieren/ZH. Grafik rechts: Bahnverursachte PM10-Immissionen 2000 (Einheit 0.001 µg/m³). Die roten Punkte bezeichnen die drei EMPA-Messstationen in 10 m, 36 m und 120 m Distanz zur Bahnlinie. Kartografie: METEOTEST. PK25 © 2003 swisstopo (DV606.1).

Für die Plausibilisierung respektive für den Vergleich mit den Messdaten müssen die Immissionsmodellresultate 2000 in drei Einzelschritten auf das Messjahr 2003 hochgerechnet werden.

- Änderungen in den Zugsfrequenzen an den Messstandorten. Dies geschieht proportional zu den Änderungen der Anzahl Achs-Durchfahrten auf den betroffenen Streckenabschnitten. Beispiel Juchhof: Personenverkehr +18 %, Güterverkehr - 18 %).
- Weil es sich bei den Messwerten nicht um Jahresmittelwerte handelt wie bei den Resultaten des Immissionsmodells, müssen aus den Episoden-Messwerten zunächst Jahresmittel hochgerechnet werden. Die Mittelwerte der Messkampagnen A3 und B1 (Tab. 4) werden als „Sommerwerte“, jene aus den Messkampagnen A2, B2 als „Winterwerte“ interpretiert und die Mittelwerte aus Sommer- und Winterwert als Schätzwert für die gesuchten Jahresmittel benutzt.

- Schliesslich muss die Aufteilung von Personen- und Güterverkehr gemäss der neuesten SBB-Untersuchung aktualisiert werden (siehe vorne Tab. 3). Dies bedingt eine Aufwertung der Personenverkehrsimmissionen um 30 % und eine Reduktion der Güterverkehrsimmissionen um 18 %.

Die auf diese Weise umgerechneten Modellergebnisse werden mit den EMPA-Messwerten verglichen. Alle erwähnten Einzelschritte sind relativ einfache Methoden, um die Modell- mit den Messwerten vergleichbar zu machen. Jeder Schritt braucht aber Annahmen und enthält Unsicherheiten, welche zusätzlich zu den inhärenten Mess- respektive Modellunsicherheiten ins Spiel kommen und sich mit diesen überlagern bzw. die Gesamtunsicherheiten vergrössern. Zudem gilt noch zu beachten, dass ein wesentlicher Unterschied zwischen den Modell- und den Messwerten bestehen bleibt: **Die Messwerte repräsentieren die Immission an einem Raumpunkt, während jeder Modellwert den Mittelwert über eine Fläche von 200 m x 200 m wiedergibt.** Dieser Unterschied kann nicht durch eine einfache und gleichzeitig zuverlässige Transformation überwunden werden, sollte aber bei der Interpretation berücksichtigt werden (Querprofil Juchhof).

Für den Vergleich zwischen Modell- und Messwerten gibt es zwei Möglichkeiten

- Es werden die gemessenen **Eisen-Anteile** mit den Modellwerten verglichen,
- es werden die **Differenzmessungen** (PM10 am Bahnstandort minus PM10 Zürich, Zeughaushof Kaserne) mit den Modellwerten verglichen.

Beide Möglichkeiten wurden ausgeführt, siehe folgendes Kapitel.

2.4.2 Resultate

a) Vergleich der Eisen-Messwerte mit den Modellwerten

Die Eisen-Messungen der EMPA ergeben ca. $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ am „Hintergrundstandort“ Zürich, Zeughaushof Kaserne und Werte zwischen 0.9 und $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an den bahnexponierten Stationen. Für den Hintergrundstandort liefert das Modell den Wert $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, für die übrigen Standorte Werte zwischen 1.0 und $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Das Verhältnis zwischen Modell- und Messwert, variiert mit Werten zwischen 0.9 und 2.5 , im Durchschnitt aller Standorte ist der Quotient 1.6 , was bedeutet, dass das Modell die Messwerte um ca. 60% überschätzt.

Unter Beachtung der grossen Unsicherheiten ist die gefundene Übereinstimmung zwischen Mess- und Modellwerten erstaunlich gut.

Messort	Messdaten		Modelldaten Ant. Schienenv. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Verhältnis Modell/Messung
	Eisen $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Kamp.		
Hintergrundstation Zürich-Zeughaushof, Kaserne	0.6	A2,A3	1.0	1.7
Profilmessung Juchhof				
Juchhof 10m	1.8	B1,B2	2.9	1.7
Juchhof 36m	1.2	B1,B2	2.9	2.5
Juchhof 120m	0.9	B1,B2	1.0	1.1
Stationen Nähe Zürich HB				
Röntgenstrasse	2.0	A2,A3	1.8	0.9
Gamperstrasse	1.6	A2,A3	2.4	1.5

Tab. 9: Messwerte Eisen im Vergleich mit Modelldaten. („Kamp.“ Messkampagne gemäss EMPA Teilstudie). Das Verhältnis Modell/Messung hat bei Übereinstimmung den Wert 1.

b) Vergleich der Differenz-Messwerte mit den Modellwerten

Von den PM10-Messwerten an den Standorten Juchhof, Röntgen- und Gamperstrasse wird der Messwert am Hintergrundstandort Zürich, Zeughaushof Kaserne subtrahiert. Das Resultat kann als Näherungswert für die durch den lokalen Bahnverkehr verursachten PM10-Immissionen interpretiert werden. Aus den Messwerten ergeben sich für die Anteile Werte zwischen 1.4 und 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Modelldaten für den bahnverursachten PM10-Beitrag (gesamter, nicht nur lokaler Schienenverkehr) liegen zwischen 1.0 und 2.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Quotienten, d.h. das Verhältnis zwischen Modell- und Messwert, variieren zwischen 0.7 und 1.7, im Durchschnitt aller Standorte 1.1. Im Mittel über alle Standorte überschätzt das Modell die Messungen um bloss 10 %.

In diesem Fall kann von einer sehr guten Übereinstimmung der Mess- mit den Modellresultaten gesprochen werden.

Messort	Messdaten		Modelldaten Ant. Schienenv. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Verhältnis Modell/Messung
	Differenzwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Kamp.		
Profilmessung Juchhof				
Juchhhof 10m	2.3	B1,B2	2.9	1.3
Juchhof 36m	1.8	B1,B2	2.9	1.7
Juchhof 120m	1.4	B1,B2	1.0	0.7
Stationen Nähe Zürich HB				
Röntgenstrasse	1.7	A2,A3	1.8	1.0
Gamperstrasse	2.6	A2,A3	2.4	0.9

Tab. 10: Differenz der PM10-Messwerte zum Hintergrundstandort Zürich, Zeughaushof Kaserne. im Vergleich mit Modelldaten. „Kamp.“ bezeichnet die Messkampagne (siehe EMPA Teilstudie). Der Quotient ist das Verhältnis zwischen Modell- und Messwert (Idealwert 1).

c) Vergleich des Querprofils Juchhof

Für den Standort Juchhof wurden die Immissionen simultan in drei verschiedenen Entfernungen der Bahnlinie gemessen (10 m, 36 m, 120 m). Abbildung 7 zeigt das Querprofil. Dabei kommt deutlich die Verschiedenheit von Mess- und Modellinformation zum Ausdruck: Die Messwerte repräsentieren punktförmige, die Modellwerte flächenhafte (Treppenfunktion in der Abbildung) Information. Die beiden nächstgelegenen Messstationen (10 m, 36 m) befinden sich innerhalb desselben Rasterquadrats im Modell und haben dementsprechend auch denselben Modellwert.

Das Querprofil der gemessenen Eisenwerte zeigt einen flachen Verlauf. Die Modellwerte verlaufen steiler, sind in der Quellzelle (0–100 m) höher, in der daran anschliessenden Zelle Quellzelle (100–300 m) niedriger als im Modell. Das Querprofil der PM10-Differenzmesswerte zeigt ebenfalls einen relativ flachen Verlauf, aber auf höherem Niveau als die Eisenwerte. Die Übereinstimmung mit dem Modellprofil ist besser als im Fall des Eisens.

2.4.3 Interpretation und Beurteilung

Trotz grosser Unsicherheiten und einfacher methodischer Hilfsmittel zur Aufbereitung der Mess- und Modelldaten stimmen die Resultate der beiden unabhängigen Methoden erstaunlich gut überein. Bei den Eisendaten überschätzt das Modell die Messungen im Durchschnitt um 60 %, bei den Differenzmessungen lediglich um 10 %. Das Resultat der Plausibilisierung darf als Bestätigung der früheren Untersuchungen betrachtet werden, die zu einer Korrektur der PM10-Emissionen aus dem Schienenverkehr von ursprünglich 2800 t/a auf ca. 1000 t/a hinunter führten.

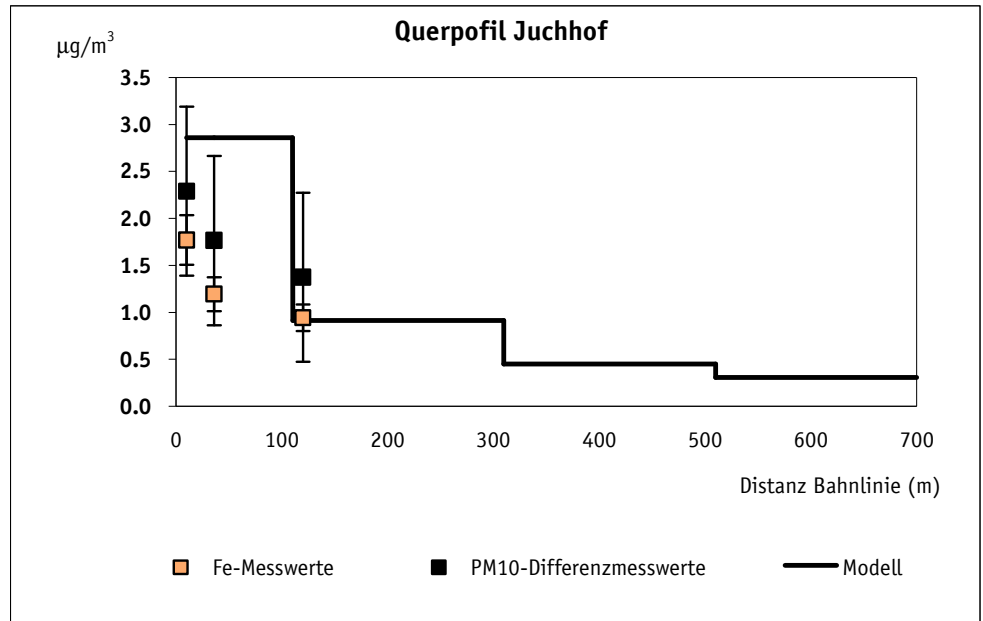


Abb. 7: Gemessenes und modelliertes Querprofil beim Juchhof (Schlieren/ZH). Die farbigen Punkte sind die gemessenen Eisenwerte (Fe) an den drei Stationen mit Fehlerbalken ($\pm 15\%$). Die schwarzen Punkte sind die PM10-Messwerte minus Messwert am Hintergrundstandort Zürich, Zeughaushof Kaserne. Weil es sich um Differenzen handelt sind die Fehler gross ($\pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Die Differenzen zwischen Mess- und Modellwerten liessen sich verringern, indem die PM10-Emissionen, die ins Immissionsmodell gefüttert werden, verringert oder indem Parameter der Ausbreitungsrechnung verändert würden oder eine Kombination von beidem. Die Überschätzungen im Nahbereich und die bessere Übereinstimmung an der entfernter gelegenen Station Juchhof 120 m lassen vermuten, dass die Anpassung der Ausbreitungsparameter der erste Schritt zur Verbesserung wäre. Die Unsicherheiten sind aber zu gross, um mit dem jetzigen Kenntnisstand quantitativ über diese Frage entscheiden zu können. Sicher ist, dass eine Erhöhung der Schienenverkehrsemissionen die gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Modellwerten verschlechtern würden. Damit wird das Intervall für die mechanisch erzeugten PM10-Emissionen des Schienenverkehrs von 800–1300 t/a nach oben begrenzt.

3 Synthese

3.1 Zusammenfassung der Messresultate

- Die jährliche, aus Abriebsprozessen stammende PM10-Emissionsfracht aus dem schweizerischen Schienenverkehrsnetz liegt im Bereich 800–1300 t/a. Diese Zahl gilt zwar für das Bezugsjahr 2004, gibt aber auch für die Vorjahre und die kommenden Jahre die ungefähre Grössenordnung (die Änderungen liegen im Bereich der Änderungen der Fahrleistungen). Nicht untersucht wurden die Auspuff-Emissionen aus dem Rangierbetrieb mit Diesellokomotiven. Diese betragen gemäss früheren Schätzungen ca. 45 t/a Dieseleruss. Zusammen mit den Dieselerussmissionen liegen die PM10-Emissionen des Schienenverkehrs im Bereich 850–1350 t/a.
- 60 % der mechanisch erzeugten Emissionen sind Bremsabriebe. Rad- und Schienenantrieb machen weitere 24 % und 14 % aus.
- Etwas mehr als die Hälfte der mechanisch erzeugten Emissionen stammt aus dem Personenverkehr (53 %), der Rest aus dem Güterverkehr (47 %). Werden die Dieselerussmissionen des Rangierverkehrs mitgerechnet, lautet die Aufteilung 51 % zu 49 %. Bezüglich Bedeutung für die mittlere Emission pro Zugskilometer für Personen- und Güterverkehr siehe Abschnitt 3.3.
- An der stärkst befahrenen Eisenbahnlinie zwischen Zürich und Dietikon (ca. 740 Züge pro Tag) bewirken die PM10-Emissionen eine Zusatzimmission von 1.5–2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, davon mindestens 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Form von Eisen.
- Von den im Juchhof gemessenen Eisenimmissionen gehören ca. 60 % zur Grobfraktion PM10-PM2.5, die restlichen 40 % zur Feinfraktion PM2.5. Der Anteil PM1 liegt zwischen 0–7 %. Die Aufteilung nach Zügen zeigt charakteristische Unterschiede: Im Güterzugsverkehr sind 75 % der Eisenimmissionen in der Grobfraktion, im Personenzugsverkehr nur etwas mehr als die Hälfte. Bei dieser Aussage ist zu beachten, dass am Messstandort vorwiegend Rad- und Schienenantrieb gemessen wird und wenig Bremsabrieb. An Teilstrecken mit mehr Bremsabrieb werden die Anteile der Grobfraktion noch höher liegen.
- Hauptsächlicher Bestandteil der bahnbedingten PM10-Emissionen ist mit mehr als 75% Eisen.
- Neben Eisen sind im bahnverursachten PM10 auch Kupfer, Mangan und Chrom vorhanden, allerdings in weit geringerem Mass. Nach Eisen hat Kupfer mit 3% den grössten Anteil.
- PM10-Emission durch Aufwirbelung (zerriebenes, durch Fahrtwind aufgewirbeltes Schottermaterial) wurde an keinem Standort festgestellt.
- Die in der unmittelbaren Umgebung von Bahngleisen gemessene PM10-Immission nimmt mit zunehmendem Abstand rasch ab. Im Juchhof in 120 m Abstand beträgt sie noch ca. 25 % vom Wert in 10 m Abstand.

3.2 Zusammenspiel der Teilstudien

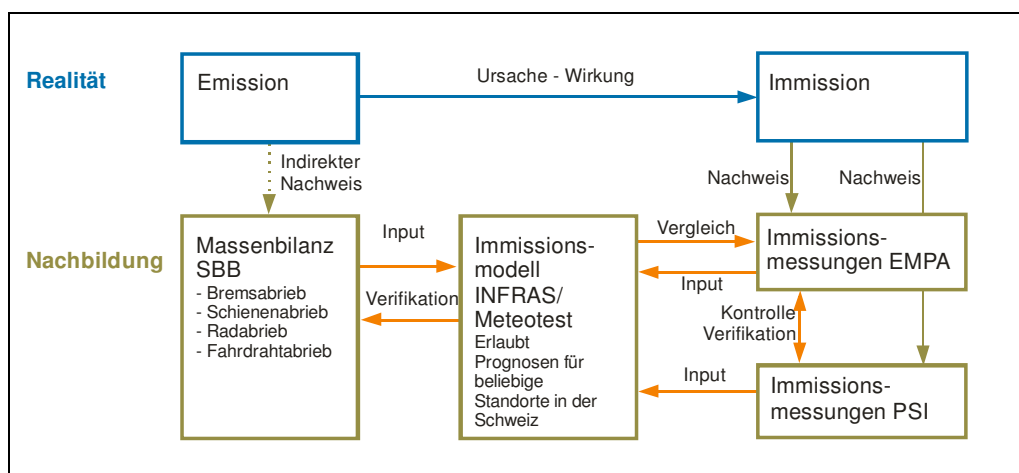


Abb. 8: Teilstudien und ihr Zusammenspiel zur Beantwortung der Frage nach den bahnerzeugten PM10-Immissionen.

Eine direkte Messung der Emissionen aus dem Schienenverkehr ist nicht möglich. Abriebe von Bremsbelägen, Rädern, Schienen, Fahrdrähten und Stromabnehmern lassen sich nicht einfach auf einem Prüfstand messen wie Abgase von Motorfahrzeugen. Deshalb muss eine Kombination von Messungen, Erhebungen und Modellierungen die gesuchten Emissionen eingrenzen. Für den vorliegenden Bericht wurden dazu vier Teilstudien durchgeführt.

Eine Massenbilanz der SBB lieferte erstmals quantitative Daten zu den einzelnen Abrieben, wenn auch noch mit einigen Unsicherheiten. Mit Immissionsmessungen EMPA/PSI konnten bahnerzeugte Emissionen nicht nur nachgewiesen, sondern auch zahlreiche Informationen über deren chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften gewonnen werden. Mit Hilfe des Immissionsmodells INFRAS/Meteotest, das den kausalen Zusammenhang zwischen Emissionen und Immissionen nachbildet, konnte gezeigt werden, dass die geschätzten Schienenverkehrsemissionen tatsächlich etwa die gemessenen Zusatzimmissionen verursachen. Würden höhere Emissionen für den Schienenverkehr ins Modell eingegeben, ergäben sich höhere Modellimmissionen als in Wirklichkeit gemessen werden. Umgekehrt ergäben sich mit niedrigeren Emissionen auch niedrigere Immissionen, die mit den gemessenen Immissionen nicht übereinstimmten. Weil aber die gemessenen und die modellierten Immissionen gut zusammen passen, lässt sich mit gutem Grund schliessen, dass die im Modell eingegebene Emissionsfracht gemäss den neuen Erhebungen der SBB – ungefähr - richtig sein muss.

Die Teilresultate aus Emissionserhebung, Immissionsmessung und Modellierung sind untereinander kompatibel und ergeben zusammen ein kohärentes Bild für die aktuellen PM10-Emissionen des Schienenverkehrs.

3.3 Bedeutung der Resultate, Empfehlungen

3.3.1 Bedeutung

Die neuen Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Resultaten des ersten Statusberichts aus dem Jahr 2002 überein. Die ältere Grobschätzung der Emissionen aus dem Jahr 2001 die fast dreimal höher war, muss definitiv auf den neuen Wert hinunter korrigiert werden.

Die Emissionszahlen können zur Ableitung von durchschnittlichen PM10-Emissionsfaktoren für Abriebemissionen aus dem Schienenverkehr verwendet werden. Mögliche Bezugsgrössen sind z.B. Personenkilometer, Bruttotonnenkilometer und Zugskilometer. Wegen der unterschiedlichen Zugarten auf dem Schweizer Schienennetz eignen sich solchermassen berechnete Emissionsfaktoren aber nur sehr begrenzt für die Untersuchung von konkreten Einzelprojekten. Für solche Fälle müssen die Emissionsfaktoren insbesondere mit Annahmen zur Auslastung verfeinert werden. Zudem sind im Falle kleinräumiger Immissionsberechnungen Annahmen zu treffen, auf welchen Streckenabschnitten Bremsmissionen anfallen oder nicht anfallen. Wegen der geringen Anzahl Prüfstandsmessungen können zur Zeit noch keine nach Bremssystem differenzierten Emissionsfaktoren bestimmt werden.

Zusätzlich zum Hauptziel, die Emissionsfracht zu beziffern, wurden weitere wichtige Erkenntnisse über die Physik und Chemie der Schienenverkehrsemissionen gewonnen. So hat Eisen mit Abstand den grössten Anteil an den Emissionen und der Grossteil der gemessenen Eisenimmissionen gehört zur Grobfraktion PM10-PM2.5. Ein weiteres, wichtiges Ergebnis ist die Beobachtung, dass die Messungen keinerlei Hinweise auf die Aufwirbelung von feinstem Schotterstaub beim Schienenverkehr geben.

Ausserdem zeigen die Resultate, mit welcher bahnverursachten PM10-Immissionsbelastung an der stärkst befahrenen Bahnlinie Zürich-Dietikon mit 740 Zügen/Tag gerechnet werden muss, nämlich mit maximal $1.5\text{--}2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dieser Wert gilt unmittelbar neben den Geleisen. Mit zunehmender Distanz fällt die Belastung rasch ab. An weniger stark befahrenen Bahnlinien ist mit entsprechend geringeren Belastungen zu rechnen.

Wie oben erwähnt teilt sich die gesamte PM10-Emissionsfracht je zur Hälfte auf Personen- und Güterverkehr. Aus dem Umstand, dass das Verhältnis der Zugskilometer von Personen- und Güterzügen ca. 4-5 (2000-2004) beträgt (BFS 2006), kann geschlossen werden, dass die mittlere Emission pro Zugskilometer im Güterverkehr etwa 4-5 Mal grösser ist als im Personenverkehr.

Schliesslich zeigte sich, dass zur Unterscheidung von Personen- und Güterzügen das Konzentrationsverhältnis zwischen Kupfer und Eisen benutzt werden kann (Personenzugverkehr Cu/Fe ~ 0.1 , Güterzugverkehr Cu/Fe ~ 0.04). Bisher fehlte ein solcher Indikator.

3.3.2 Empfehlungen

Die Zuverlässigkeit der Resultate liesse sich mit vertieften Forschungen am Bremsprüfstand und am Rad-Schiene-Prüfstand noch verbessern. Die dabei zu gewinnenden Erkenntnisse würden es ermöglichen, realistische Prognosen der zukünftigen Entwicklung der bahnbedingten Emissionen vorzunehmen, differenzierte Emissionsfaktoren für unterschiedliches Rollmaterial zu bestimmen sowie Massnahmen zur Reduktion der Feinstaubemissionen des Schienenverkehrs zu erarbeiten. Aus diesem Grund sind weitere Forschungsarbeiten wünschenswert.

Verzeichnisse

1 Literatur

BFS 2006: Bundesamt für Statistik, Zeitreihen Eisenbahnen: Betriebsleistungen 1990-2004, Nr. su-b-11-OeV-zr-e-b, Bern 2006.

BUWAL 1999: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Arbeitsunterlage 16, PM10-Emissionsfaktoren: Mechanischer Abrieb im Offroad-Bereich, Carbotech, 1999

BUWAL 2001: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Massnahmen zur Reduktion von PM10-Emissionen, Umwelt-Materialien Nr. 136; Electrowatt Engineering, Bern 2001.

BUWAL 2002: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft; PM10-Emissionen des Verkehrs, Statusbericht Teil Schienenverkehr, Umwelt-Materialien Nr. 144, Bern

BUWAL 2003: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft; Modelling of PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010, Umwelt-Materialien Nr. 169, Bern

BUWAL 2004: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1980 – 2030, Schriftenreihe Umwelt Nr. 355, Bern

EMPA 2005: Eidg. Materialprüfung- und Forschungsanstalt: PM10-Emissionen des Schienenverkehrs, Teilbericht EMPA, Zusätzliche PM10-Immissionen an stark befahrenen Eisenbahnlinien, Dübendorf

INFRAS 2005: PM10-Emissionen des Schienenverkehrs, Resultate Immissionsmodell, Zürich

PSI 2005: Paul Scherrer Institut, Labor für Atmosphärenchemie: Verifikation der PM10-Emissionen des Schienenverkehrs, Zeitlich hoch aufgelöste grössenklassierte Messungen von bahrelevanten Spurenelementen, Villigen

SBB 2004: Schweiz. Bundesbahnen: Persönliche Mitteilung von R. Chrétien, Bahn-Umwelt-Center

SBB 2005: Schweiz. Bundesbahnen: Verifikation der Emissions-Massenbilanz, BahnUmwelt-Center, Bern

2 Glossar / Abkürzungen

BAFU

Bundesamt für Umwelt (seit 1. Januar 2006)

BUWAL

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (bis 31. Dezember 2005)

Emission

Schadstoff am Ort des Entstehens, z.B. beim Bremsklotz/Wagenrad

EMPA

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Dübendorf /ZH

Immission

Schadstoff am Ort des Einwirkens, z.B. in der Umgebung einer Eisenbahnlinie

KTU

Konzessionierte Transportunternehmen, z.B. BLS, RhB

LRV

Luftreinhalte-Verordnung des Bundesrats vom 16. Dez. 1985, (Stand am 12. Juli 2005, SR. 814.318.142.1)

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

Mikrogramm pro Kubikmeter, gebräuchliche Massen-Konzentrationseinheit für Luftschadstoffe

PM10

Feinstaub: Feindisperse Schwebestoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als $10\ \mu\text{m}$.

PSI

Paul Scherrer Institut, Villigen/AG

t/a

Tonnen pro Jahr, gebräuchliche Masseinheit für Luftschadstoffemissionen

TSP (Total suspended particulates)

Gesamtstaub