



Begleitbericht:
Emissionskataster 2021
zum Eisenbahnlärm

Begleitbericht zum publizierten Eisenbahnlärm Emissionskataster 2021

Autor(en)	Hafner Michael (I-NAT-FW-TAFB-SFB)
Status	freigegeben
Version	V_1.0
Letzte Änderung	14. September 2022
Letzte Änderung durch	Hafner Michael (I-NAT-FW-TAFB-SFB)
Urheberrecht	Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jegliche kommerzielle Nutzung bedarf einer vorgängigen, ausdrücklichen Genehmigung.

Bildlegende Titelseite:

Visualisierung der sonRAIL-Nachtwerte für den EK2021. Die Güterzüge fahren nachts durch den Eppenbergtunnel, darum sind die Emissionen dort höher (rot). Die Entlastung der dortigen Stammstrecke ist eine umgesetzte Lärmschutzmassnahme. Die Nebenstrecken (z.B. Läuferfingerlinie) sind nachts mit Emissionen unterhalb des Schwellenwerts belastet (blau und grün) und können zu keinen Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte führen.

Impressum

SBB AG
Infrastruktur – System Fahrbahn
Hilfikerstrasse 3
3000 Bern 65

Management Summary

Periodisch (i.d.R. alle 5 Jahre) erstellt die SBB im Auftrag des Bundesamtes für Verkehr (BAV) einen netzweiten Lärmemissionskataster über das Normalspurnetz. Der vorliegend berechnete Emissionskataster 2021 dient dem BAV zur Überprüfung der Einhaltung der im Rahmen der Ordentlichen Lärmsanierung und von Ausbauprojekten festgelegten Emissionen. Der letzte Emissionskataster wurde 2016 rückblickend für den Horizont 2015 erstellt. Der aktuelle Emissionskataster wird auf dem Geoportal des Bundes unter dem Namen «Tatsächliche Emissionen» publiziert. Der vorgesehene Emissionskataster 2020 wurde wegen coronabedingten Verkehrsreduktionen ein Jahr zurückgestellt.

Im Unterschied zu den bisherigen netzweiten Emissionsberechnungen wurde erstmals ein neues Emissionsmodell sonRAIL angewendet und anstelle der erlaubten Streckengeschwindigkeiten wurden die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten im Modell berücksichtigt. Gleichzeitig wurden für die wichtigsten Oberbautypen die Emissionsparameter für das sonRAIL Modell ermittelt. Die so berechneten Emissionen wurden mit den Messwerten der permanenten BAV-Monitoring-Stationen verglichen. Da trotz der deutlich erhöhten Komplexität der Modellierung nach wie vor relevante Unterschiede zwischen der modellierten und der situativ gemessenen Lärmemission bestehen, wurde eine Unsicherheitsbetrachtung der Modellierung und Messung vorgenommen und daraus eine Wahrscheinlichkeit der tatsächlichen Emissionsüberschreitung ermittelt.

Nur wenige Streckenabschnitte weisen mit einer hohen Signifikanz (Wahrscheinlichkeit >95%) eine wahrnehmbare und wesentliche Überschreitung der zulässigen Emissionen auf. Auf deutlich mehr Strecken sind nur mit einer Wahrscheinlichkeit von <66% die zulässigen Emissionen überschritten. Gründe für die grosse Unsicherheit bei der Emissionsermittlung sind unter anderem eine systematische Überschätzung der Schienenrauheit im Emissionsmodell als Folge der konstant optimierten Schienenpflege durch die SBB Infrastruktur und die fehlenden Unterscheidungsmöglichkeiten von unterschiedlich lauten Standard-Betonoberbauten, welche bei den 6 Monitoring-Stationen eine Spannweite der Messwerte von über 6 dB aufweisen. Dieser Unterschied kann mit den aktuell zur Verfügung stehenden Modellierungsmöglichkeiten nicht erklärt werden.

Der Emissionskataster 2021 zeigt, dass auf den meisten Strecken die festgelegten und zulässigen Emissionen mit grosser Wahrscheinlichkeit eingehalten werden. Um zu verhindern, dass für Streckenabschnitte unnötigerweise Lärmschutzmassnahmen angeordnet werden, muss die Unsicherheit der Emissionsmodellierung insbesondere hinsichtlich des Oberbaueinflusses reduziert werden. Auch muss gewährleistet werden, dass lärmoptimierte Oberbauten (Stichwort: Schienenpflege und Optimierung der dynamischen Komponenten) adäquat im sonRAIL-Modell abgebildet werden. Dies bedingt eine intensivierete Modellpflege und Modellerweiterungen zur Integration zusätzlicher akustisch relevanter Oberbauparameter, welche im Rahmen von Grundlagerecherchen noch zu ermitteln sind.

Da Lärmschutzmassnahmen langfristige Investitionen darstellen, müssen neben den geplanten Veränderungen des Verkehrsaufkommens auch Änderungen der lärmrechtlichen Beurteilung antizipiert werden. Auch wenn gemäss heutigem Recht die Strecken mit wesentlichen Überschreitungen der zulässigen Emissionen überschaubar sind, ist der Zielpfad zu deutlich schärferen Grenzwerten absehbar. Die Berücksichtigung von Lärmauswirkungen in der strategischen Entwicklung von Oberbauten und Fahrzeugen, sowie beim Unterhalt dieser Komponenten ist deshalb zwingend.

Abkürzungsverzeichnis

ANABEL	App auf der BigData-Plattform der SBB, in welcher die Gleisbelastungsdaten aus den Verkehrsdaten aufbereitet werden.
average	Bezeichnung eines durchschnittlich rauhen Gleises in sonRAIL
bad	Bezeichnung eines sehr rauhen Gleises in sonRAIL
BigData	Plattform bei der SBB, auf welcher grosse Datenmengen beispielsweise vom RCS verarbeitet werden können
DfA	Datenbank für feste Anlagen in welcher die Geometrie- und Sachdaten der SBB-Infrastruktur verwaltet werden.
DNA	In der Datenbank Netz und Anlagen werden zukünftige Verkehrsströme modelliert. Die Basis bilden Fahrplan- und Fahrzeugkonzepte, sowie Wachstumsprognosen des Güterverkehrs.
eff	Bezeichnung der effektiv gemessenen Schienenrauheit an einem konkreten Ort.
EK_fix	Emissionskataster mit den festgelegten Emissionen, welche die Grundlage für im Rahmen von Plangenehmigungsverfahren verfügte Immissionen und Immissionsgrenzwertüberschreitungen sind. Solange die festgelegten Emissionen nicht überschritten sind, darf davon ausgegangen werden, dass auch keine neuen Grenzwertüberschreitungen erfolgen.
EK2015	Emissionskataster unter Berücksichtigung des im Jahr 2015 gefahrenen und im RCS abgewickelten Verkehrs.
EK2021	Emissionskataster unter Berücksichtigung des im Jahr 2021 gefahrenen und im RCS abgewickelten Verkehrs.
EP2035	Emissionsprognose unter Berücksichtigung des im Jahr 2035 (resp. 2040) geplanten Verkehrs wie er in der DNA abgebildet ist. und im RCS abgewickelten Verkehrs.
GG-Sohle	Die Grauguss-Bremssohle ist der alte Standard für Güterwagenbremsen. Diese haben einen guten Reibwert aber den Nachteil, dass die Radlaufflächen aufgeraut werden und das Fahrzeug deshalb hohen Rolllärm erzeugt.
G-NoisES	Das Geospatial Noise Evaluation System der SBB ist eine GIS-Umgebung, welche einerseits die Berechnung von Emissionen aus Verkehrs- und Infrastrukturdaten erlaubt und andererseits die Topographie und Nutzungsdaten entlang der Bahngleise beinhaltet, um Immissionsberechnungen durchführen zu können.
GZ	Güterzüge
K-Sohle	Verbundstoffsohle, welche im Gegensatz zur GG-Sohle die Räder glatt hält.
LL-Sohle	Verbundstoffsohle mit einem vergleichbaren Reibwert zur GG-Sohle, welche aber dennoch die Räder glatt hält. Ermöglicht 1:1 Ersatz von GG-Sohlen ohne grössere Anpassung des Bremsgestänges.
LpAeq,TP	A-bewerteter und gemittelter Schalldruckpegel während einer Zugvorbeifahrt (TP = Train-Pass)
PZ	Personenzüge
RCS	Das Rail Control System überwacht und steuert die Zugsbewegungen auf dem SBB-Netz
SEMIBEL	Schweizerisches Emissions- und Immissionsmodell für die Berechnung von Eisenbahnlärm
smooth	Bezeichnung eines glatten Gleises in sonRAIL
sonRAIL	Eisenbahnlärmemissionsmodell des Bundesamtes für Umwelt
TEL	Der Transit exposure level ist der Lärm während einer Zugsdurchfahrt. Er beinhaltet im Unterschied zum LpAeq,TP auch den ansteigenden und abfallenden Pegel bis 10 dB unterhalb des Vorbeifahrtspegels.
TEL80	Dies ist ein TEL Wert, welcher auf eine Geschwindigkeit von 80 km/h normiert wurde, in der Regel mit dem Umrechnungsfaktor $30 \cdot \text{LOG}_{10}(v/80\text{km/h})$

Inhalt

MANAGEMENT SUMMARY	3
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	4
1. ZIELSETZUNG	7
2. EMISSIONSMODELLE	7
2.1. SEMIBEL (sonRAIL-Fitting)	7
2.2. sonRAIL	7
3. INPUTDATEN UND MODELLIERUNGSANNAHMEN	7
3.1. ANABEL Ist-Verkehr	7
3.1.1. Fahrzeugtyp	8
3.1.2. Bremsbauart	8
3.2. Geschwindigkeiten	8
3.3. Fahrbahndaten	9
3.3.1. Gleisinformationen	9
3.3.2. Oberbautransferfunktionen	9
3.3.3. Zuordnung der vorhandenen Oberbauarten	10
3.3.4. Kurvenradien	10
3.3.5. Brücken	11
3.3.6. Schienenrauheit	11
3.4. Fahrzeugdaten	11
3.4.1. Fahrzeugemissionsparameter	11
3.4.2. Zuordnung der Fahrzeugtypen	14
3.4.3. Äquivalente Bogenrauheit	15
3.4.4. Sekundärlärmquellen	16
3.5. Meterspurbahnen	16
4. UNSICHERHEITSBETRACHTUNG	16
4.1. Geschwindigkeit	17
4.2. Schienenrauheit	17
4.3. Modellvalidierung mit Hilfe der permanenten Monitoring-Stationen	19
4.3.1. Modellierung von Lärmpegeln einzelner Fahrzeugtypen	19
4.3.2. Bestimmung der Standardabweichung unterschiedlicher Messgleise	24
4.3.3. Vergleich der berechneten und gemessenen Jahresemissionen	25

4.3.4.	Gesamtunsicherheit	29
4.3.5.	Reduktionsmöglichkeiten für die Berechnungsunsicherheit	30
5.	VISUALISIERUNG DER EMISSIONSBERECHNUNGEN	31
5.1.	SEMIBEL-Berechnung EK2021	32
5.2.	sonRAIL-Berechnung EK2021	33
6.	VISUALISIERUNG VON EMISSIONSVERGLEICHEN	34
6.1.	Modellvergleich sonRAIL 2021 vs. SEMIBEL 2021	35
6.2.	SonRAIL EK2021 vs. SEMIBEL EK2015	36
6.3.	EK2021 vs. festgelegte Emissionen (EK_fix)	37
6.3.1.	Absolute Emissionsdifferenzen	37
6.3.2.	Wahrscheinlichkeit einer wesentlichen Emissionsüberschreitung	38
6.3.3.	Wahrscheinlichkeit >95% einer wesentlichen Emissionsüberschreitung (exkl. Brücken)	39
7.	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	40
8.	REFERENZEN	42

1. Zielsetzung

Im Auftrag des BAV wurde durch die SBB ein offizieller Lärmemissionskataster mit dem Zeithorizont 2021 (EK2021) berechnet. Im Unterschied zum EK2015 wurde die Berechnung einerseits mit dem schon damals verwendeten SEMIBEL-Modell und zusätzlich mit dem neueren sonRAIL-Modell durchgeführt. Auch konnte der wichtige Inputparameter der Zugsgeschwindigkeit neu durch die effektiven Zugsgeschwindigkeiten, wie sie im täglichen Betrieb gefahren werden, bestimmt werden, so dass im Gegensatz zum Kataster 2015 nicht mehr auf die theoretisch möglichen Streckengeschwindigkeiten abgestützt werden muss.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Modellparameter und Annahmen, welche für die Berechnung mit beiden Modellen getroffen wurden. Der Emissionskataster 2021 selbst ist ein eigenständiges Produkt in Form von verschiedenen Ergebnistabellen. Die Haupttabelle beinhaltet für jeden Streckenabschnitt die berechneten Lärmemissionswerte für den Tag- und Nachtzeitraum. Diese «tatsächlichen Emissionen» werden im Geoportal des Bundes publiziert.

2. Emissionsmodelle

2.1. SEMIBEL (sonRAIL-Fitting)

Auch für die Erstellung des EK2021 wurde das bisherige Emissionsmodell SEMIBEL weiterhin angewendet. Damit kann der Effekt des Modellwechsels dokumentiert werden. Die Modellparameter von SEMIBEL wurden schon für die Erstellung des EK2015 auf die Parameter des sonRAIL-Modells hin gefittet. Der SEMIBEL-Algorithmus für die EK2021 Berechnung weicht nicht von demjenigen für den EK2015 ab. Es ist jedoch zu beachten, dass die beiden wichtigen Inputparameter Bremsbauart und effektive Geschwindigkeit damals anders ermittelt wurden. Auch basiert das sonRAIL-Fitting nicht auf dem aktuell verwendeten sonRAIL sondern auf der ursprünglichen Version vor den Verbesserungen [1] für die Erstellung des EK2021. Nur die Fahrbahnzuschläge wurden dem aktuellen sonRAIL angepasst (vgl. Tabelle 2). Dies resultiert in einer Überschätzung der Emission von ca. 0.5dB. Beim sonRAIL-Fitting wurde von einer durchschnittlich rauen Schiene («average») ausgegangen. Für gut gepflegte Schienen werden die Emissionen deshalb nochmals zusätzlich um ca. 1dB überschätzt.

2.2. sonRAIL

Die in G-NoiseS implementierte sonRAIL Version entspricht im Wesentlichen der aktualisierten und präzisierten Modellbeschreibung durch die Empa [1]. Mit den durchgeführten Testrechnungen konnte bestätigt werden, dass die Implementation korrekt durchgeführt wurde. Auf die im sonRAIL-Modell ebenfalls mögliche Berücksichtigung von aerodynamischen Emissionsquellen wurde verzichtet. Da die aerodynamischen Quellen unter 200 km/h keinen relevanten Beitrag an die Gesamtemissionen liefern, ist dieser Modellteil für die praktische Anwendung im EK2021 nicht von Bedeutung. Dies ist kongruent zu den bisherigen Excel- und WebTool-Implementationen von sonRAIL.

3. Inputdaten und Modellierungsannahmen

3.1. ANABEL Ist-Verkehr

Die tatsächlich gefahrenen Züge für das Jahr 2021 wurden aus dem ANABEL abgegriffen. Diese App läuft innerhalb der BigData-Plattform der SBB und bezieht die Verkehrsinformationen aus dem RCS-System (Rail Control System).

3.1.1. Fahrzeugtyp

Im Basisdatensatz werden alle Fahrzeugtypen identifiziert. Würden die Emissionsparameter pro Fahrzeugtyp vorliegen, könnten diese entsprechend auf das Modell angewendet werden. Da sonRAIL aber nur wenige Fahrzeugtypen (ID) vorsieht, werden die Basisdaten für die Emissionsberechnung auf diese sonRAIL-ID's gemappt. Dies verkleinert die Datenbank massiv und beschleunigt die Emissionsberechnung.

3.1.2. Bremsbauart

Die Bremsbauart ist für das sonRAIL-Modell nur für die Güterwagen von Relevanz. Damit auch mit SEMIBEL, dessen Fahrzeugemissionsparameter auf das Bremssystem referenzieren, gerechnet werden kann, müssen die Bremsbauarten den Fahrzeugen zugeordnet werden. Für die Reisezüge und Lokomotiven erfolgt diese Zuordnung fix über den Fahrzeugtyp, da sich diese nicht verändert. Für den Typ Güterwagen wäre damit keine eindeutige Zuordnung möglich, da diese auch bei sonst baugleichen Fahrzeugen unterschiedliche Bremsbauarten aufweisen können. Insbesondere könnte nicht erkannt werden, ob der Wagen noch mit lauten Bremssohlen (GG) unterwegs war. Deshalb wurde zusätzlich auch ein Abgriff auf das Zuginformationssystem realisiert. Über diese Datenbank kann jedem einzelnen Güterwagen die aktuelle Bremsbauart ausgerüstet werden. Dieses Vorgehen ermöglicht es in Zukunft bei Bedarf auch eine Unterscheidung nach K- und LL-Bremssohlen vorzunehmen. Aktuell beinhaltet das sonRAIL-Modell jedoch nur eine einzige Radrauheit für sanierte Güterwagen beider Bremsbauarten.

3.2. Geschwindigkeiten

Die Geschwindigkeiten im Jahresdurchschnitt werden auf Basis der Signaldurchfahrtszeiten pro Zugskategorie ermittelt. Die Projektion der Signale auf Strecken ist bei Bahnhöfen nicht immer automatisch richtig. Für den EK 2021 wurden zusätzliche manuelle Korrekturen vorgenommen.

Die statistische Mittelung dieser Geschwindigkeiten pro Zugskategorie über das ganze Jahr wurde im Umfeld der BigData-Plattform implementiert. Die so aggregierten Geschwindigkeitsdaten pro Zugskategorie werden dann in Q-GIS auf das DfA Streckennetz projiziert und mit einem Python-Skript verschnitten. Die Dichte der Signale ist bei stark ändernden Geschwindigkeiten höher als bei gleichbleibenden. Somit können auch im Bereich der Bahnhöfe plausible Geschwindigkeiten berechnet werden. Insbesondere wird die Haltezeit für die Berechnung extrahiert, damit diese die Durchschnittsgeschwindigkeit nicht fälschlicherweise reduziert. Nach wie vor wird die Emissionsrechnung deshalb auf Basis von bei Stationen durchfahrenden Zügen erstellt.

Falls in einem Fahrplanjahr längere Zeiten mit reduzierter Geschwindigkeit (Langsamfahrstellen) vorliegen, werden diese statistisch ebenfalls erfasst. Je nach Distanz der auswertbaren Signale (im Bereich von ca. 500 – 5000m) ist die durchschnittliche Geschwindigkeit für einen konkreten Querschnitt mehr oder weniger repräsentativ. Über das ganze Netz betrachtet ist diese Geschwindigkeitsermittlung deutlich zuverlässiger und realitätsnaher als eine rein theoretische Streckengeschwindigkeit. Da bisher für Reisezüge 90% der maximalen Geschwindigkeit und für Güterzüge 80% der maximalen Geschwindigkeit für die Emissionsberechnung berücksichtigt worden sind, gibt es mit der ermittelten Signalgeschwindigkeit auch Streckenabschnitte, wo nun mit höheren Geschwindigkeiten gerechnet wird als noch 2015.

Die so ermittelten Geschwindigkeiten sind deshalb abhängig vom tatsächlichen Verkehrsablauf. Sie orientieren sich nicht mehr an der möglichen Streckengeschwindigkeit. In den Fällen, wo aufgrund von Datenlücken keine Signalgeschwindigkeit berechnet werden konnte, wurde die Geschwindigkeit auf das Minimum von maximaler Streckengeschwindigkeit und maximaler Zugskategorie Geschwindigkeit gesetzt. Geschwindigkeiten kleiner 30 km/h werden für die Emissionsberechnung

auf 30 km/h angehoben. Dies ist notwendig, da das Emissionsmodell für diese Geschwindigkeiten nicht validiert ist.

3.3. Fahrbahndaten

3.3.1. Gleisinformationen

Die Gleisinformationen stammen aus der DfA und liegen zwar sehr detailliert vor, sind jedoch noch nicht überall vollständig und müssen deshalb teilweise aus anderen Quellen eruiert werden. Sie setzen sich zusammen aus den Attributen für die Schwellenart, die Schwellenkappe, die Schwellenbesohlung, die Verlegeart (Schienenbefestigung), die Schienenzwischenlage und das Schienenprofil. Für die aktuelle sonRAIL-Implementierung werden im Modell die Parameter Schwellenart, Schienenzwischenlage und Schienenprofil berücksichtigt (vgl. Kap. 3.3.2).

3.3.2. Oberbautransferfunktionen

Die im ursprünglichen sonRAIL vorliegenden Oberbautransferfunktionen decken nicht alle relevanten Oberbauten der SBB, BLS und SOB ab. Auf Basis von zusätzlichen Messungen wurden weitere Transferfunktionen ermittelt. [2] Damit ist es nun möglich für den grössten Teil des Streckennetzes den Oberbautypen repräsentative Oberbautransferfunktionen (Tabelle 1) zuzuordnen. Sofern in Zukunft für weitere Oberbautypen die Transferfunktionen gemessen werden, kann die Emissionsberechnung noch verbessert werden.

Tabelle 1: Übersicht der für den Emissionskataster 2021 in sonRAIL verwendeten Oberbautransferfunktionen. (USP = Under Sleeper Pad, Zw w = weiche Schienenzwischenlage, LVT = Feste Fahrbahn Low Vibration Track)

f [Hz]	Transferfunktionen der Oberbaukonfigurationen								
	B70-UIC54	B91-UIC60 mit+ohne steife USP	B91-UIC54 Zw w	B91-UIC60 Zw w	BiBlock- UIC54	Stahl- UIC54	Holz-K- UIC54	Holz-Ke- UIC54/60	LVT Zw w UIC60
100	77.1	79.9	77.1	79.9	78.5	72.8	71.3	80.3	69.0
125	78.3	83.0	78.3	83	81.8	73.4	71.9	81.3	80.0
160	80.1	86.7	80.1	86.7	84.4	77	73.4	82.9	82.0
200	80.6	86.8	80.6	86.8	86.8	82.3	74.3	82.3	83.0
250	86.6	86.6	86.6	86.6	89.0	88.5	77.4	83.4	86.5
315	87.3	88.7	87.3	88.7	89.4	92.3	78.5	84.5	90.0
400	86.9	90.3	93.3	93.3	91.2	94.1	83.8	89.8	95.0
500	91.5	93.5	97.5	99.5	93.3	96	89.2	94.2	96.5
630	95.3	96.3	100.3	102.3	91.4	98.1	91.3	96.3	100.5
800	96.1	97.1	101.1	103.1	94.2	101.2	92.7	97.9	101.0
1000	96.1	97.1	101.1	103.1	100	102.5	94.8	99.8	102.0
1250	94.9	94.9	98.9	100.9	96.9	103.2	97.2	101.2	106.0
1600	101.5	101.5	105.5	107.5	100.6	105.1	103.0	106.2	109.0
2000	107	107.0	111	113	104.9	110.5	106.0	109.5	113.5
2500	107.5	107.5	111.5	113.5	106.7	113.1	105.5	109.6	112.0
3150	111.3	111.3	111.3	111.3	108.6	113.9	105.0	109.0	108.0
4000	108.3	108.3	108.3	108.3	109.1	115.1	106.2	110.2	103.5
5000	110.2	110.2	110.2	110.2	109.7	115.2	105.7	109.7	104.5
6300	110.2	110.2	110.2	110.2	109.7	115.2	105.7	109.7	105.5
8000	110.3	110.3	110.3	110.3	109.8	115.3	105.8	109.8	106.5

Mithilfe von normierten sonRAIL-Berechnungen können die pauschalen Emissionszuschläge ermittelt werden. Somit kann auch mit dem SEMIBEL-Modell der akustische Einfluss des Oberbaus berücksichtigt werden. Die Referenz für die Berechnung sind ein glattes Rad und geringer Sekundärlärmeinfluss (fzg_id_05) bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h. Dadurch dominiert der Einfluss des Oberbaus auf die Gesamtemission. Die Berechnungen wurden mit einer mittleren Schienenrauheit vorgenommen («average»). Würde diese Rauheit reduziert, würden sich auch die pauschalen Zuschläge verkleinern. Insofern repräsentieren diese pauschalen SEMIBEL-Zuschläge den ungünstigsten Fall.¹

Tabelle 2: Mit sonRAIL berechnete pauschale Fahrbahnzuschläge gegenüber dem Referenzoberbau (Basis sonRAIL-Fitting) für das SEMIBEL-Modell

Oberbau	B91-UIC60 (Ref)	B70-UIC54	B91-UIC54 Zw w	B91-UIC60 Zw w	BiBlock-UIC54	Stahl-UIC54	Holz-K-UIC54	Holz-Ke-UIC54/60	LVT Zw w UIC60
Zuschlag dB	0	0	+3	+3	0	+2	-1	0	+2

3.3.3. Zuordnung der vorhandenen Oberbauarten

Viele Oberbaukombinationen entsprechen den Typen, welche im sonRAIL-Modell aktuell definiert sind (vgl. Tabelle 1). Die Zuordnung ist dann eindeutig.

Da die DfA (Quelldatenbank für die Oberbautypen) vereinzelt widersprüchliche Kombinationen von Verlegeart und Schwellentyp enthält, mussten in diesen Fällen sinnvolle Oberbaukombinationen substituiert werden. Auch kann es exotische Oberbauten geben, für welche bisher keine spezifische Transferfunktion bestimmt worden ist. Diese speziellen Kombinationen werden im Berechnungscode auf Kombinationen mit bekannten Transferfunktionen gemappt. Folgende Zuordnungen wurden für den EK2021 vorgenommen:

- Eine Beton-BiBlock Schwelle mit weicher Zwischenlage wird wie eine Beton-BiBlock-LVT mit weicher Zwischenlage behandelt.
- Holz- und Stahlschwellen mit weicher Zwischenlage werden zu einer harten Zwischenlage gemappt.
- Für Holzschwellen wird die Verlegeart gegenüber dem Schienenprofil priorisiert. Somit bestimmt die Verlegeart das Schienenprofil. Dies ermöglicht auch die Berechnung der Emissionen von einem Holzoberbau mit Zwischenlagen und dem UIC54 Profil.
- Für Stahlschwellen, Beton-Bi-Block und Bi-Block-LVT wird die Verlegeart und das Schienenprofil ignoriert. Es wird immer auf die Transferfunktion für Stahlschwellen UIC54, Bi-Block UIC54 und LVT UIC60 (weich) gemappt.

Sofern in Zukunft für weitere Oberbaukombinationen Transferfunktionen zur Verfügung stehen, muss dieses Mapping angepasst werden.

3.3.4. Kurvenradien

Da im sonRAIL-Modell ein Kurvenradius zwischen 300 – 1000m zu erhöhten Emissionen führt, wird der gemittelte Radius aus der Geometrie der Hauptgleisachse pro 500m Abschnitt berechnet. Bei sehr engen Radien (<300m), welche bspw. auf dem SOB-Netz vorkommen, können Radien

¹ In der EK2015 Berechnung war für SEMIBEL nur der 1dB Abzug für das UIC54 Profil vorhanden. Inzwischen ist klar, dass dieser Abzug nur in Zusammenhang mit einer starren Befestigung auf der Holzschwelle gilt. Die anderen pauschalen Zuschläge stammen aus [2].

«übersehen» werden. Die Anwendung der äquivalenten Bogenrauheit für die Emissionserhöhung ist nicht unproblematisch und ein bisher wenig validierter Modellbestandteil (vgl. 3.4.3).

3.3.5. Brücken

Im Rahmen des nicht publizierten Pilot EK2019 und der QS-sonRAIL wurde festgestellt, dass die sonRAIL-Brückenzuschläge zu unplausiblen Emissionen führen können. In der Arbeitsgruppe sonRAIL (BAFU/BAV/Empa/SBB) wurde entschieden, dass weiterhin an den pauschalen SEMIBEL-Brückenzuschlägen festgehalten werden soll, solange dieser Modellteil nicht verbessert wurde. Die Brückenzuschläge sind damit im EK2021 identisch zu denen im EK2015.

3.3.6. Schienenrauheit

Die netzweite Emissionsberechnung mit dem sonRAIL-Modell wurde unter Annahme der Schienenrauheit «average» durchgeführt. Auf dieser Basis wurden auch die aktuellen Emissionsparameter von SEMIBEL mit Hilfe eines Curve-Fittings aus dem sonRAIL-Modell ermittelt [4]. Ein Vergleich mit den Messwerten bei den BAV-Monitoring Stationen zeigt aber, dass die damit ermittelten Emissionen zu hoch sind (4.3.3). Auch die bisher durchgeführten Stichprobenmessungen der Schienenrauheit zeigen, dass die tatsächliche Schienenrauheit auf dem SBB-Netz besser ist als «average».

Dieser systematische Fehler des Modellparameters der Schienenrauheit wirkt sich auf die Modellgenauigkeit aus und führt zu einer systematischen Emissionsüberschätzung. Für die Details dazu wird auf Kapitel 4.2 verwiesen.

3.4. Fahrzeugdaten

3.4.1. Fahrzeugemissionsparameter

Das SEMIBEL-Modell benötigt keine Informationen zum Fahrzeugtyp (Baureihe), die Emissionsparameter werden durch die Bremsbauart resp. den Bremsbelag und die Unterscheidung Personen-/Güterverkehr bestimmt. Diese Information stammt inzwischen aus einer anderen Datenquelle als noch 2015. Abweichungen zum EK2015 sind deshalb möglich.

Mit einem Algorithmus werden die Bremsbauarten für SEMIBEL wie folgt ermittelt:

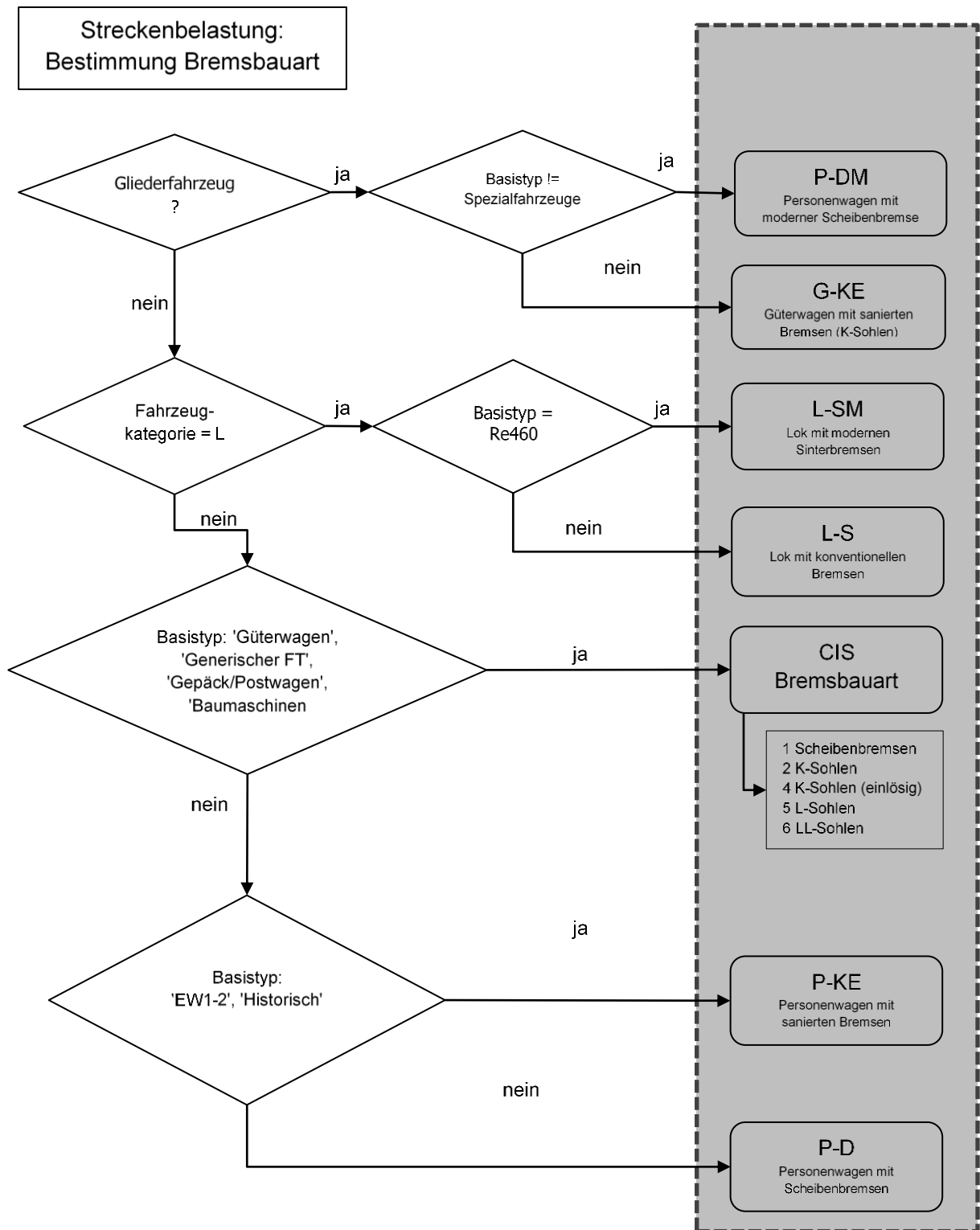


Abbildung 1: Flussdiagramm zur Bestimmung der SEMIBEL-Bremsbauarten aus den Fahrzeug- und Bremsbelag-Informationen. Die Verknüpfung mit der CIS-Datenbank ermöglicht eine korrekte Bremsbelag-Zuordnung (K-/GG-Sohle) für die Güterwagen.

Damit in sonRAIL die korrekten Fahrzeugtransferfunktionen, Radrauheiten, Kontaktfilter und Sekundärlärmquellen verwendet werden, müssen die Fahrzeugtypen den sonRAIL-Fahrzeug-ID zugeordnet werden. Wo eine Fahrzeug-ID in sonRAIL fehlt, werden die Fahrzeugparameter separat zugewiesen. Die folgende Tabelle zeigt die für den EK2021 verwendete Zuordnung.

Tabelle 3: Die Tabelle zeigt die Zuordnung der Fahrzeugtypen aus ANABEL zu den sonRAIL Kategorien. *Da Messungen zeigen, dass eine dritte laute Lokkategorie vermutlich sinnvoll wäre, wurde diese schon implementiert. Da aber das erhöhte Radrauheitsspektrum im Modell (noch) nicht definiert ist, werden die Fahrzeuge nicht lauter berechnet.

code sonrail	basistyp_sonrail	Beschreibung	fzg_id sonrail	Radrauheit	Kontaktfilter	Transferfunktion	Sekundärquellen	Bogenrauheit
1	Triebzug/Wagen_leise	FV-Dosto, DPZ-Wagen, EW4 und IC2000	5	D	50kN/920mm	920mm	Fzg Kat 5	smooth
2	Triebzug_mittel	FLIRT, DTZ, ICN, RV-Dosto, Lötschberger, ETR/ICE/TGV	3	D	100/kN920mm	920mm	Fzg Kat 3	smooth
3	Triebzug_laut	BLS-Jumbo und Domino	7	Re460	50kN/920mm	920mm	Fzg Kat 7	smooth
4	Lok_leise	Re460 und Re465	1	Re460	100/kN920mm	920mm	Fzg Kat 1	smooth
5	Lok_mittel	übrige Loks inkl. eigentlich leisere Re485 (TRAXX)	2	Re420	100/kN920mm	920mm	Fzg Kat 2	smooth
6	Lok_laut	Re450 und Re474 (Siemens)	-	Re420*	100/kN920mm	920mm	Fzg Kat 2	smooth
7	GW_leise	Hupac mit Scheibenbremsen	11	D	50kN/680mm	630mm	Fzg Kat 11	smooth
8	GW_mittel	sanierte Wagen mit K-Sohlen	10	K	50kN/920mm	920mm	Fzg Kat 10	smooth
9	GW_laut	nicht sanierte Wagen mit GG-Sohlen	9	GG	50kN/920mm	920mm	Fzg Kat 9	smooth

3.4.2. Zuordnung der Fahrzeugtypen

In der Basisdatenbank von Anabel für die Verkehrszahlen werden die verschiedenen Fahrzeuge sogenannten Basistypen zugeordnet. Damit eine Emissionsberechnung mit sonRAIL möglich ist, werden diese Basistypen gemäss folgender Tabelle auf die sonRAIL-Typen (vgl. Tabelle 3) gemappt.

Tabelle 4: Zuordnung der ANABEL-Basistypen auf die sonRAIL-Typen.

Basistyp	sonRAIL-Typ
BEST	Triebzug_mittel
Baudiensttraktor	Lok_mittel
Baumaschine	GW_laut
Bpm51	Triebzug/Wagen_leise
Coradia Polyvalent	Triebzug_mittel
DPZ/HVZ	Triebzug/Wagen_leise
DTZ Zürich	Triebzug_mittel
Desiro	Triebzug_mittel
ETR	Triebzug_mittel
EW1-2	Triebzug/Wagen_leise
EW3	Triebzug/Wagen_leise
EW4	Triebzug/Wagen_leise
FLIRT	Triebzug_mittel
FV-Dosto	Triebzug/Wagen_leise
Flirt	Triebzug_mittel
GTW	Triebzug_mittel
Generischer FT	GW_mittel
Gepäck/Postwagen	GW_leise
Giruno	Triebzug_mittel
Güterlokomotive	Lok_mittel
Güterwagen	GW_mittel
Güterwagen schiebengebremst	GW_leise
Historisch	Lok_mittel
IC2000	Triebzug/Wagen_leise
ICE	Triebzug_mittel

Basistyp	sonRAIL-Typ
ICN	Triebzug_mittel
JUMBO	Triebzug_laut
Loktyp Eurosprinter	Lok_laut
Loktyp Traxx	Lok_mittel
Meterspur	Triebzug_mittel
Mireo	Triebzug_mittel
NINA	Triebzug_mittel
NPZ/Domino	Triebzug_laut
RIC-Wagen	Triebzug/Wagen_leise
RV-Dosto	Triebzug_mittel
Railjet	Triebzug/Wagen_leise
Rangierlok	Lok_laut
Rangierlok / Streckenlok	Lok_laut
Re450	Lok_laut
Re460	Lok_leise
Regionaltriebzug DB	Triebzug_laut
Regionaltriebzug SNCF	Triebzug_mittel
SZU	Triebzug_mittel
Spezialfahrzeuge	Triebzug_laut
Streckenlok	Lok_mittel
Streckenlok Diverse	Lok_mittel
TGV	Triebzug_mittel
Traktor	Lok_mittel
lok Grenzverkehr	Lok_mittel
lok Kleine Serien	Lok_mittel
personenwagen Diverse	Triebzug/Wagen_leise

3.4.3. Äquivalente Bogenrauheit

Das Emissionsmodell sonRAIL sieht für Kurven mit einem Radius zwischen 300-1000 m Emissionszuschläge vor. Diese werden durch eine zusätzliche Radrauheit im Modell abgebildet. Es liegen zwei Spektren von äquivalenten Bogenrauheiten vor. Das eine Spektrum soll für wenig auffällige Bogengeräusche verwendet werden (smooth) das andere für «bogenunfreundliche» Fahrzeuge (bad).

Mit Hilfe der Fahrdynamik-Spezialistinnen der SBB wurde die Zuordnung der Fahrzeuggruppen zur äquivalenten Bogenrauheit überprüft. Die Modellierung der Fahrdynamik und der daraus berechneten Reibungskräfte ist Grundlage für die Ermittlung des fahrzeugabhängigen Schienenverschleisses und der Schienenschädigung. Die Resultate fliessen in die Trassenpreisbildung (Verschleissfaktor Fahrbahn) ein. Die Grundlagen und Resultate dieser Berechnungen werden durch das BAV publiziert. [3]

Auch wenn diese berechneten Reibungskräfte vermutlich nicht direkt in einen akustischen Wert übersetzt werden können, liefern sie doch eine Aussage zur sogenannten Kurvenfreudigkeit eines Fahrzeugs. Es scheint zulässig auf Basis dieser fahrdynamischen Simulationen Einschätzungen betreffend der äquivalenten Bogenrauheit vorzunehmen.

In der offiziellen sonRAIL-Dokumentation werden die Ergebnisse der Bogenmessstellen im Kap. 5.3 Geräuschemissionen im Gleisbogen erläutert. *«Bei gleichen Randbedingungen (Geschwindigkeit, Schienenrauheit, Oberbautyp) werden vor allem bei IC2000, EWIV und RIC Bpm Fahrzeugen Pegeldifferenzen zwischen Gerade und Bogen gemessen. Deren Emissionspegel liegen zum Teil deutlich über den Werten des geraden Gleises.»* Im Wesentlichen kann also zusammengefasst werden, dass für IC2000, EWIV und RIC Bpm (EC-Wagen) relevante Pegeldifferenzen zwischen Gerade und Bogen gemessen wurden. Dies ist rückblickend auch aus Sicht der Fahrdynamik-Spezialisten nachvollziehbar. Diese Drehgestelle wurden damals für die NBS mit 200 km/h optimiert. Dadurch sind sie sehr steif ausgefallen. In der Zwischenzeit sind diese Fahrzeugtypen mit HALL-Drehgestellen ausgerüstet, welche im Bogen weicher sind und die Schiene nicht mehr übermässig beanspruchen. Diese Fahrzeuge zeigen in den fahrdynamischen Simulationen deshalb keine Auffälligkeiten mehr. Es ist deshalb gerechtfertigt, für diese Fahrzeug keine besondere äquivalente Bogenrauheit mehr in der Emissionsmodellierung zu verwenden.

Im Kapitel 5.3 *Geräuschemissionen im Gleisbogen* der sonRAIL-Dokumentation werden keine weiteren Fahrzeuge mit erhöhten Bogenemissionen aufgeführt. Für die Re420 wird im Kapitel 5.3.1 ausgeführt: *«Die effektiven Rauheiten sind nur geringfügig von Bogenradius und Fahrgeschwindigkeit abhängig. Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen bogeninnerer und bogenäusserer Schiene. Die Emissionspegel bei Bogenfahrt entsprechen den Werten des geraden Gleises.»*

Auch Simulationen der Fahrdynamikspezialisten und Messfahrten mit der Re420 im Zusammenhang mit dem Einsatz als Lokomotive im S-Bahn Verkehr (HVZ-Lion) haben keine besonderen Auffälligkeiten gezeigt. Die Zuordnung «bad» in der Tabelle 6.1 der sonRAIL Dokumentation dürfte für die Re420 deshalb unzutreffend sein.

In derselben Tabelle wird auch die RoLa als bogenunfreundlich taxiert. Dieses Fahrzeug wurde aber offenbar an der Bogenmessstelle damals gar nicht gemessen. Eine Grundlage für die Zuordnung «bad» haben wir in der sonRAIL-Dokumentation nicht gefunden. Bei den Simulationen für die Trassenpreisberechnungen gehört die RoLa zu den Fahrzeugen mit den geringsten Reibwerten im Bogen. Gegenüber einem klassischen 4-achsigen Güterwagen mit identischer Achslast ist der berechnete Schädigungsfaktor ca. halb so gross, im Vergleich zu einem 4-achsigen Güterwagen mit identischem Bruttogewicht (nicht Achslast) ist der Faktor sogar 4-mal kleiner.

Obige Analysen rechtfertigen für die aktuellen Fahrzeuge keine Beaufschlagung mit der Bogenrauheit «bad» mehr. Selbst die äquivalente Bogenrauheit «smooth» ist möglicherweise in der reinen

Abhängigkeit vom Kurvenradius nicht gerechtfertigt. Gemäss sonRAIL-Dokumentation wurden bei den Bogenmessungen in der Regel gar keine relevanten Emissionszunahmen festgestellt. Dieser Modellteil ist im Moment deshalb als ungesicherter Worst-Case zu betrachten, welcher vermutlich eine nicht ideale Bogenfahrt abbildet. Wenn allein aufgrund dieses Bogenzuschlages wesentliche Emissionszunahmen resultieren, müssen diese relativiert werden. Weder SEMIBEL noch das im europäischen Raum übliche Crossoos kennen einen solchen Kurvenzuschlag.

3.4.4. Sekundärlärmquellen

In sonRAIL werden neben dem Rolllärm auch die sogenannten Sekundärlärmquellen (Aggregate) berücksichtigt. Via eine Transferfunktion «beta» werden auch diese Teilquellen geschwindigkeitsnormiert. Insbesondere für die Fahrzeug-ID 02 (Re420 und vergleichbare Loks) und ID 10 (sanierte Güterwagen) sind auf einer für die Sekundärlärmquellen relevanten Höhe von 2m über SOK teilweise hohe negative Korrekturwerte modelliert. Dies führt dazu, dass die Fahrzeuge mit deutlich geringerer Geschwindigkeit als der Referenzgeschwindigkeit (80 km/h) wieder lauter statt leiser werden. Das Modell führt schliesslich in eine Singularität und kann den Lärm nicht mehr sinnvoll beschreiben. Diesem Problem wird in der aktuellen EK2021 Berechnung so begegnet, dass die Geschwindigkeit für die Sekundärlärmquellen der Lok (ID 02) auf 50 km/h begrenzt ist. Auch wenn das Fahrzeug langsamer fährt, wird diese erhöhte Geschwindigkeit berücksichtigt.

3.5. Meterspurbahnen

Auf Wunsch des BAV werden aktuell auch die Emissionen der Zentralbahn berechnet. Diese ist aber eine Meterspurbahn. Das sonRAIL-Modell wurde für die Normalspur entwickelt und kalibriert. Messungen von Meterspurbahnen wurden keine vorgenommen und berücksichtigt. Damit sind die durchgeführten Emissionsberechnungen mit sonRAIL-Modells nicht validiert. Auch die Verwendung der sonRAIL gefitteten SEMIBEL-Emissionsparameter lässt sich sachlich nicht begründen. Vorliegend wurde deshalb die SEMIBEL Berechnung für die Meterspurbahnen mit den ursprünglichen SEMIBEL Parametern durchgeführt. Dies gewährleistet zumindest eine Vergleichbarkeit mit den festgelegten Emissionswerten der Zentralbahn. Die Berechnung mit sonRAIL wurde ebenfalls durchgeführt, die Resultate sind jedoch nicht sinnvoll nutzbar, da die Fahrzeugtypen in ANABEL für die Meterspur nicht unterschieden werden und die Annahme von mittellauten Triebzügen im Sinne eines Worstcase getroffen wurde. Für zukünftige Berechnungen wäre die Entwicklung eines separaten Meterspur-Emissionsmodells wünschenswert.

4. Unsicherheitsbetrachtung

Die Modellparameter Geschwindigkeit, Schienenrauheit, Radrauheit, Oberbautransferfunktion und Verkehrsmix sind gleichzeitig relevante Unsicherheitsfaktoren.

Im Unterschied zu früheren Berechnungen kann heute die jahresdurchschnittliche Geschwindigkeit ermittelt werden und es muss nicht mehr auf eine rein theoretische Streckengeschwindigkeit abgestützt werden. Wie im Kapitel 4.3.3 ausgeführt, könnte eine separate Tag- und Nachtermittlung evtl. noch Verbesserungen bringen.

Die effektive Schienenrauheit ist aktuell noch nicht fürs ganze Netz bekannt. Im Kapitel 4.2 wird der Einfluss dieses Parameters analysiert.

Sowohl Fehler bei der Geschwindigkeitsermittlung als auch bei der Berücksichtigung der Schienenrauheit führen zu systematischen Abweichungen, welche die Zuverlässigkeit der Modellierung verschlechtern.

Die Radrauheit und die Streuung der Emissionen innerhalb derselben Fahrzeugbaureihe sind für die Ermittlung eines Jahresmittelwerts weniger bedeutsam, solange der Mittelwert mit dem Modell gut prognostiziert wird. Eine Analyse dazu liefert das Kapitel 4.3.1. Vorsicht ist allerdings dann

geboden, wenn an einem Querschnitt kein repräsentativer Fahrzeugmix vorliegt. Da die Streuung gross ist, können im Falle des Vorherrschens von lauten oder leisen Fahrzeugtypen Differenzen im Bereich von 2dB auftreten.

Problematisch für die Validität des Emissionsmodells sind sicher die grossen Emissionsunterschiede von grundsätzlich identischen Oberbautypen (vgl. Kapitel 4.3.2). Ohne bessere Kenntnisse zu den Ursachen dieser Unterschiede bleibt die Modellierungsgenauigkeit stark eingeschränkt. Für den Ist-Zustand, wie er beim Emissionskataster 2021 rückblickend berechnet wird, ist der Verkehrsmix aufgrund der Daten aus dem RCS (Rail Control System) sehr präzise bekannt, daraus werden keine relevanten Unsicherheiten erfolgen.

Aus diesen Analysen wurde eine Gesamtunsicherheitsbetrachtung (4.3.4) durchgeführt und Erkenntnisse für eine Reduktion dieser Unsicherheiten abgeleitet (4.3.5).

Diese Analysen beschränken sich auf den Fall einer geraden Gleisführung. Bei Bogenfahrten ist mit zusätzlichen Unsicherheiten zu rechnen. Es bestehen zwar Ideen für eine detailliertere Modellierung der Bogengeräusche. Die im aktuellen sonRAIL Modell zur Verfügung stehende äquivalente Bogenrauheit ist insofern ungenügend, dass die Bogengeräusche nicht nur vom Radius abhängen, sondern vom Verhältnis der Fahrgeschwindigkeit zur Gleisüberhöhung. Eine solche Modellierung ist zurzeit (noch) nicht möglich.

4.1. Geschwindigkeit

Die Ermittlung der jahresdurchschnittlichen Geschwindigkeiten erfolgt über die Durchfahrtszeiten bei den Signalen. Sofern es innerhalb eines Signalabschnitts einen längeren Bereich mit häufigen Beschleunigungsereignissen hat, ist die Durchschnittsgeschwindigkeit nicht zwingend repräsentativ für einen konkreten, wenige Meter langen Querschnitt. Dieser Effekt ist aber vorwiegend für sehr stark beschleunigende Fahrzeuge (also leichte Regionalzüge) möglicherweise relevant. Ein Vergleich der gemittelten Geschwindigkeiten von FLIRT-Fahrzeugen beim Messquerschnitt der BAV-Monitoring-Station Itingen hat gezeigt, dass ausnahmsweise Abweichungen von 50% möglich sind. Da diese Regionalzüge aber nicht emissionsbestimmend sind, wirkt sich der systematische Fehler nicht relevant auf die Gesamtemission aus.

Tabelle 5: Prozentuale Abweichungen der mittleren Jahresgeschwindigkeiten aus den Signalzeitstempeln zu den örtlich gemessenen Geschwindigkeiten bei den Querschnitten der BAV-Monitoring-Stationen. Auch wenn die Geschwindigkeit bei der Station unterschätzt wird, ist es möglich, dass an einer anderen Stelle des Streckenabschnitts, welcher in der Regel mehrere 100m lang ist, die Geschwindigkeit überschätzt wird. Die Stationen sind ausserhalb von Beschleunigungsbereichen und darum eher durch höhere Geschwindigkeiten dominiert.

Geschwindigkeitsvergleiche zwischen BAV-Monitoring und den Signalzeitstempeln				
Station	R/S/RE	IR	IC/EC	Güterzug
Gland	-3%	4%	-1%	-14%
Itingen	-50%	4%	4%	-6%
Lindau	0%	3%	-3%	-1%
Steinen	-4%	10%	2%	1%
Walenstadt	-7%	-4%	-9%	-3%
Wichtrach	-37%	23%	0%	-3%

4.2. Schienenrauheit

Da sowohl ein Vergleich der Emissionsmodellierung mit den Emissionsmessungen als auch die Rauheitsmessungen bei den BAV Monitoring-Stationen zeigen, dass die effektive Schienenrauheit

kleiner ist, als mit dem sonRAIL-Parameter «average» supponiert, muss davon ausgegangen werden, dass die Emissionen systematisch zu hoch berechnet werden. Die effektive Rauheit liegt näher an der Modellrauheit «smooth» als an «average» (vgl. Abbildung 2). Diese Feststellung ist insofern wenig überraschend, da die Schienenpflege durch die SBB Infrastruktur konstant optimiert wird und der Wert «average» aus einer Zeit stammt, als ein sehr zurückhaltendes Schleifkonzept umgesetzt worden ist. Für die Abschnitte der BAV-Monitoring Stationen wurden zusätzlich Emissionsberechnungen mit der effektiv bei den jeweiligen Stationen gemessenen Schienenrauheit durchgeführt (4.3.3). Mit dieser Optimierung der Modellparameter kann die Differenz von Messung und Berechnung reduziert werden.

In Zusammenarbeit mit IODA² entwickelt die SBB aktuell ein statistisches Modell zur Vorhersage der Schienenrauheit auf dem SBB-Netz unter Berücksichtigung der Schienenbelastung und des Schleifkonzepts [5]. Sobald dieses Modell genügend validiert ist, kann die netzweite Emissionsberechnung auf dieser Basis für das SBB-Netz entsprechend angepasst werden.

Die Berechnungen bei den Monitoring-Stationen zeigen, dass mit dem aktuellen sonRAIL Modellparameter «average» die Emissionen systematisch und um leicht mehr als 1dB überschätzt werden. Diese Abweichung muss bei der Modellunsicherheit und der zukünftigen Optimierung der Emissionsparameter berücksichtigt werden.

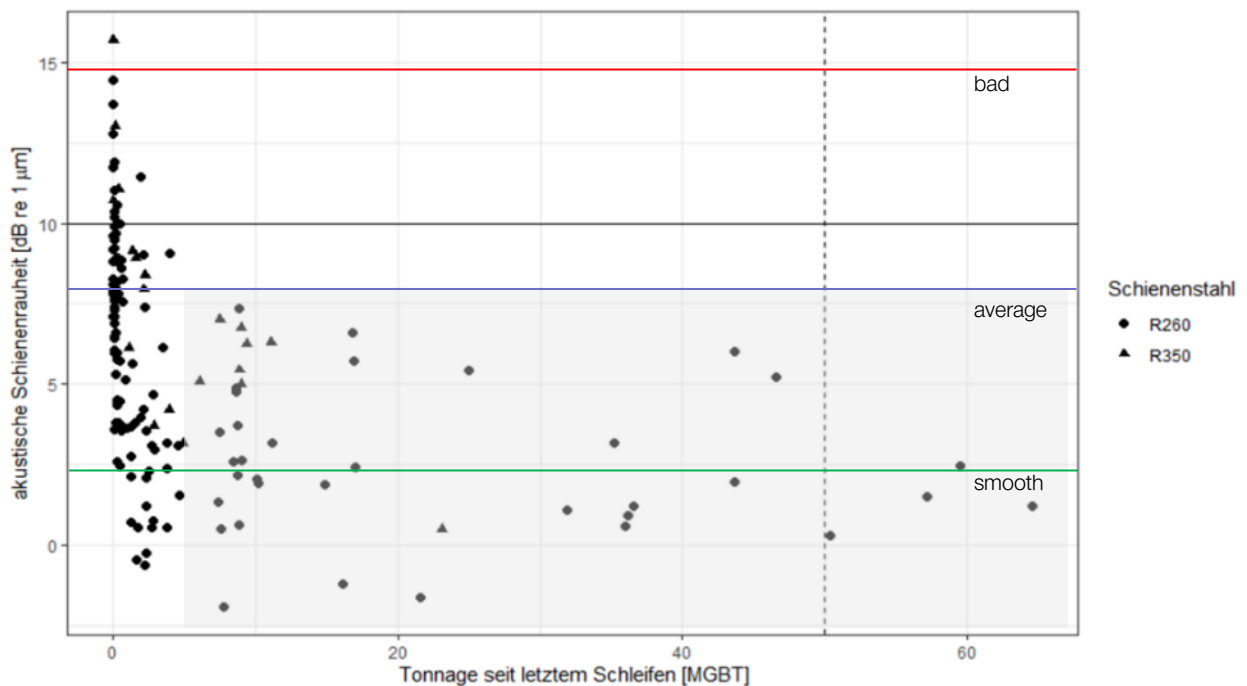


Abbildung 2: Im Rahmen von Stichprobenmessungen auf dem SBB Netz wurden die Einzelwerte der Schienenrauheit in Abhängigkeit vom letzten Schleifzeitpunkt ermittelt. Nach dem Einfahren der Schienen (hellgrauer Bereich) sind die Einzelwerte immer unterhalb des Wertes von der Schienenrauheit «average» aus dem sonRAIL-Modell. Die Werte streuen eher um den Wert «smooth» aus dem sonRAIL-Modell.

² Institut für Optimierung und Datenanalyse IODA an der Berner Fachhochschule (bfh)

4.3. Modellvalidierung mit Hilfe der permanenten Monitoring-Stationen

Das Emissionsmodell sonRAIL wurde seit dessen Basisentwicklung vor ca. 15 Jahren nicht mehr hinsichtlich Gültigkeit für aktuelle Oberbauten, Fahrzeugtypen, Fahrzeugunterhalt und Schleifstrategien (welche beide die Gesamtraumbeeinflussung beeinflussen) überprüft. Grundsätzlich sollte eine Modellvalidierung unabhängig der Emissionskatasterberechnung und periodisch durchgeführt werden. Solche Arbeiten sind zwar geplant, es stehen jedoch noch keine Resultate zu aktuellen Validierungen und gegebenenfalls Justierung der Modellparameter zur Verfügung. Deshalb wird vorliegend ein erster Versuch unternommen, anhand der Messwerte bei den permanenten BAV-Monitoring-Stationen für das Jahr 2021 die Modellunsicherheit abzuschätzen. Diese Validierung beschränkt sich allein auf die Summenpegel im dB(A). Spektrale Werte, welche Basis der sonRAIL-Berechnung sind, werden nicht untersucht. Auch ist es nur möglich, eine Modellvalidierung für den Standard-Beton-Oberbau vorzunehmen, da alle BAV-Monitoring-Stationen mit solchen Oberbautypen assoziiert sind. Aussagen zur Modellvalidität bei Stahl- und Holzschwellen beispielsweise sind nicht möglich. Ebenfalls lassen die Messdaten keine Validierung der Bogenemissionen zu, da sie ausnahmslos in der Geraden ermittelt wurden.

4.3.1. Modellierung von Lärmpegeln einzelner Fahrzeugtypen

In einem ersten Schritt wurde die Verteilung von gemessenen $L_{pAeq,TP}$ Pegeln einzelner Fahrzeugkategorien bei der Monitoring-Station Itingen und teilweise gemittelt über alle Stationen untersucht (Abbildung 3). Die Werte können näherungsweise als normalverteilt betrachtet werden. Für genau definierbare Fahrzeugbaureihen (ICN, IC2000, Flirt) sind die Standardabweichungen im Bereich von ca. 1.5 dB, die Streubreite der einzelnen Fahrzeugbaureihen insgesamt bei rund 9 dB ($6 \times \sigma$). Bei weniger genau definierbaren Baureihen (Personenzüge generell und Güterzüge) sind die Standardabweichungen ca. 3 dB. Dies bedeutet für eine Normalverteilung einer genau definierbaren Baureihe, dass sich innerhalb eines Bereichs von ± 1 dB um den Mittelwert nur gerade ca. 50% der Ereignisse befinden. Die beiden äusseren Quartile der Ereignisse (50% der Grundgesamtheit) haben unter sich eine Differenz > 2 dB. Bei generelleren Gruppen wie Personenzügen oder Güterzügen mit einer Standardabweichung von 3dB befinden sich sogar 75% der Messwerte ausserhalb der 1dB Grenze. Dies zeigt, dass zur Ermittlung einer 1dB Differenz viele Einzelereignisse gemessen werden müssen, um eine signifikante Aussage machen zu können. Beim permanenten BAV-Monitoring sind die Messereignisse zahlreich und ausreichend. Auch ist diese Streuung und Standardabweichung innerhalb der Fahrzeuge für die Ermittlung eines Jahreswertes nicht so relevant, da eine statistische Herausmittlung erfolgt. Wichtig ist einzig, dass die Mittelwerte von Messung und Berechnung übereinstimmen.

Da die Messung Ereignisse mit sehr unterschiedlichen Meteorbedingungen enthält und über ein ganzes Jahr gedauert hat, beinhaltet die ermittelte Unsicherheit zusätzlich zur Streuung der Fahrzeugindividuen auch die Streuung durch unterschiedliche Wettereinflüsse und die Unsicherheit der Messkette selbst. Die Messkette wird zwar periodisch kalibriert, dennoch weist eine Messkette der Klasse 1 eine Unsicherheit von 0.5 dB auf.

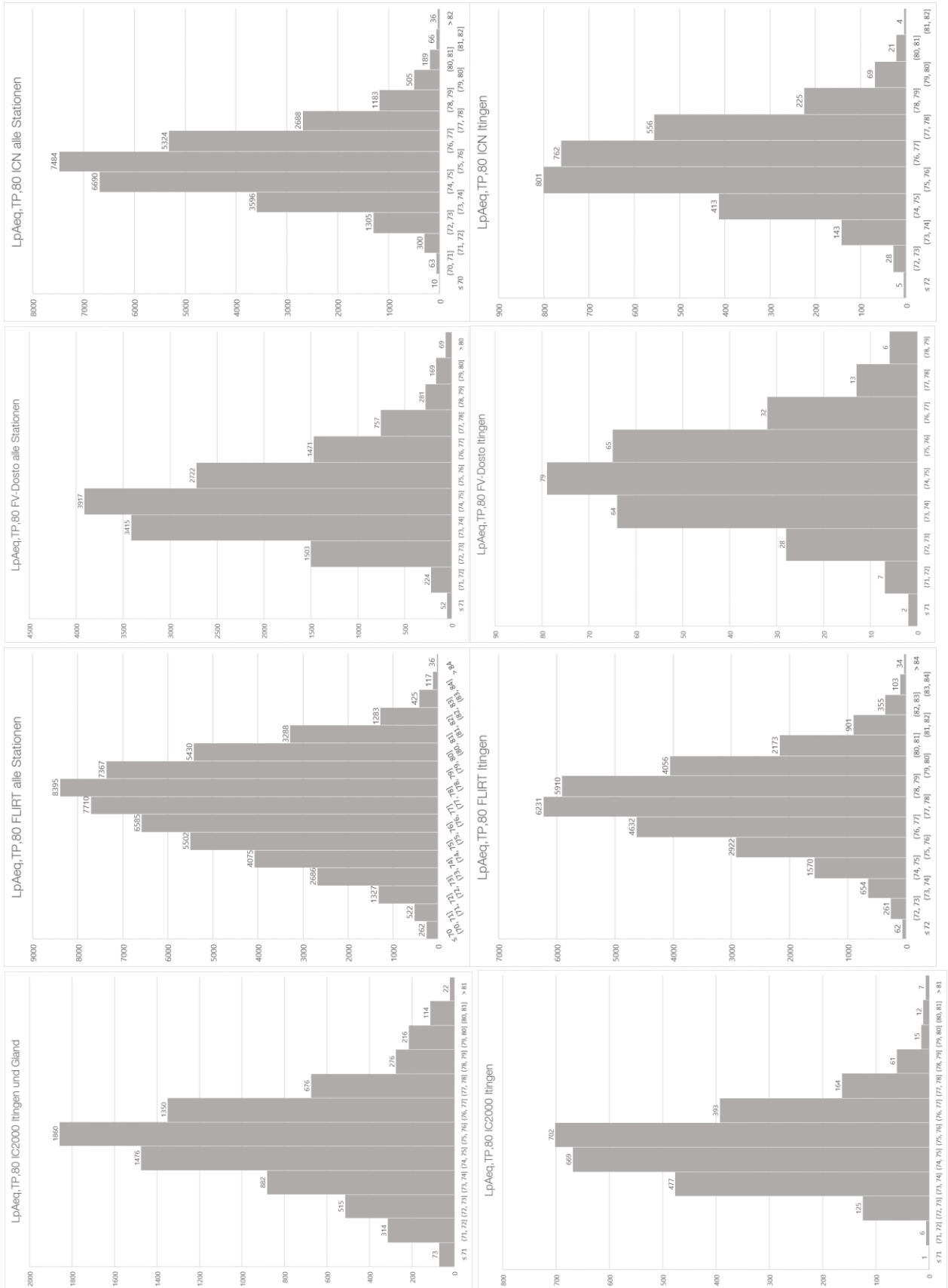
Tabelle 6: Vergleich von gemessenen und berechneten Durchfahrtspegeln. Die Messwerte entsprechen den auf 80km/h normierten $L_{pAeq,TP}$ Medianwerten aus dem BAV-Monitoring. Einerseits für die Messstation Itingen und andererseits (wo möglich) über alle Messstationen. Die sonRAIL Berechnungswerte sind $L_{pAeq,T}$ Werte bei 80 km/h, deshalb wurden nicht die ebenfalls gemessenen und häufig verwendeten TEL80 Werte für den Vergleich hinzugezogen. Da sich die Pegel der Güterzüge am Tag und in der Nacht offenbar im Mittel systematisch leicht unterscheiden, wurden diese auch noch getrennt in der Tabelle aufgeführt.

* Die IC2000-Berechnung beinhaltet neben den Wagen auch eine Lok Re460. ** Die SBB hat die Schienenrauheit bei der Monitoring-Station 2021 gemessen. Die Messwerte entsprechen den Werten, welche auch das Büro Accon im Auftrag des BAV gemessen hat.

Fahrzeug	Median $\pm\sigma$ Messung Itingen	Median $\pm\sigma$ Messung alle Stationen	sonRAIL «average»	sonRAIL «eff SBB»**	Abw. Alle Stationen «average»	Abw. Alle Stationen «eff SBB»	Abw. Itingen «eff SBB»
ICN	76.2 \pm 1.5 dBA	75.3 \pm 1.7 dBA	78.4 dBA	76.4 dBA	+3.1 dB	+1.1 dB	+0.2 dB
FV-Dosto	74.1 \pm 1.8 dBA	74.6 \pm 2.0 dBA	77.4 dBA	73.8 dBA	+2.8 dB	-0.8 dB	-0.3 dB
FLIRT	77.8 \pm 2.0 dBA	76.9 \pm 2.6 dBA	78.4 dBA	76.4 dBA	+1.5 dB	-0.5 dB	-1.4 dB
IC2000*	75.1 \pm 1.5 dBA	75.3 \pm 1.9 dBA	78.3 dBA	75.6 dBA	+3.0 dB	+0.3 dB	+0.5 dB
PZ <100m	77.6 \pm 2.9 dBA	76.5 \pm 3.5 dBA	78.4 dBA	76.4 dBA	+1.9 dB	-0.1 dB	-1.2 dB
PZ >300m	75.1 \pm 2.5 dBA	74.9 \pm 2.3 dBA	78.3 dBA	75.6 dBA	+2.8 dB	+0.6 dB	+0.1 dB
GZ >300m	81.7 \pm 2.7 dBA	81.2 \pm 2.9 dBA	82.8 dBA	81.8 dBA	+1.6 dB	+0.6 dB	+0.1 dB
GZ _{24h} >40Ax	82.1 \pm 2.9 dBA	81.8 \pm 3.0 dBA	82.8 dBA	81.8 dBA	+1.0 dB	0.0 dB	-0.3 dB
GZ _{Nacht} >40Ax	82.6 \pm 2.9 dBA	82.1 \pm 2.9 dBA	82.8 dBA	81.8 dBA	+0.7 dB	-0.3 dB	-0.8 dB
GZ _{Tag} >40Ax	81.8 \pm 2.8 dBA	81.7 \pm 3.0 dBA	82.8 dBA	81.8 dBA	+1.1 dB	+0.1 dB	0.0 dB

In der Tabelle 6 sind die Messwerte und Berechnungswerte für einzelne Fahrzeugtypen und unterschiedliche Schienenrauheiten aufgeführt. Die Begründung für die Berücksichtigung einer geringeren Schienenrauheit liefert das Kapitel 4.2.

Unter Berücksichtigung der effektiven Schienenrauheit ist es mit dem Emissionsmodell möglich, eine gute Übereinstimmung von Messung und Berechnung eines Durchfahrtspegels von einem bestimmten Fahrzeugtyp zu erhalten. Dies gilt einerseits für die Monitoring-Station Itingen als auch für das Mittel der Emissionswerte über alle sechs Monitoring-Stationen. Allerdings muss beachtet werden, dass Itingen nicht zu den leisesten Standorten gehört. Der Oberbau ist schon 35 Jahre alt und besteht aus nicht mehr aktuellen B70 Schwellen. Dies bedeutet, dass für leisere Standorte die Emissionen überschätzt werden. Dies zeigen auch die Emissionsvergleiche für Wichtrach, Steinen und Lindau (vgl. Kapitel 4.3.3).



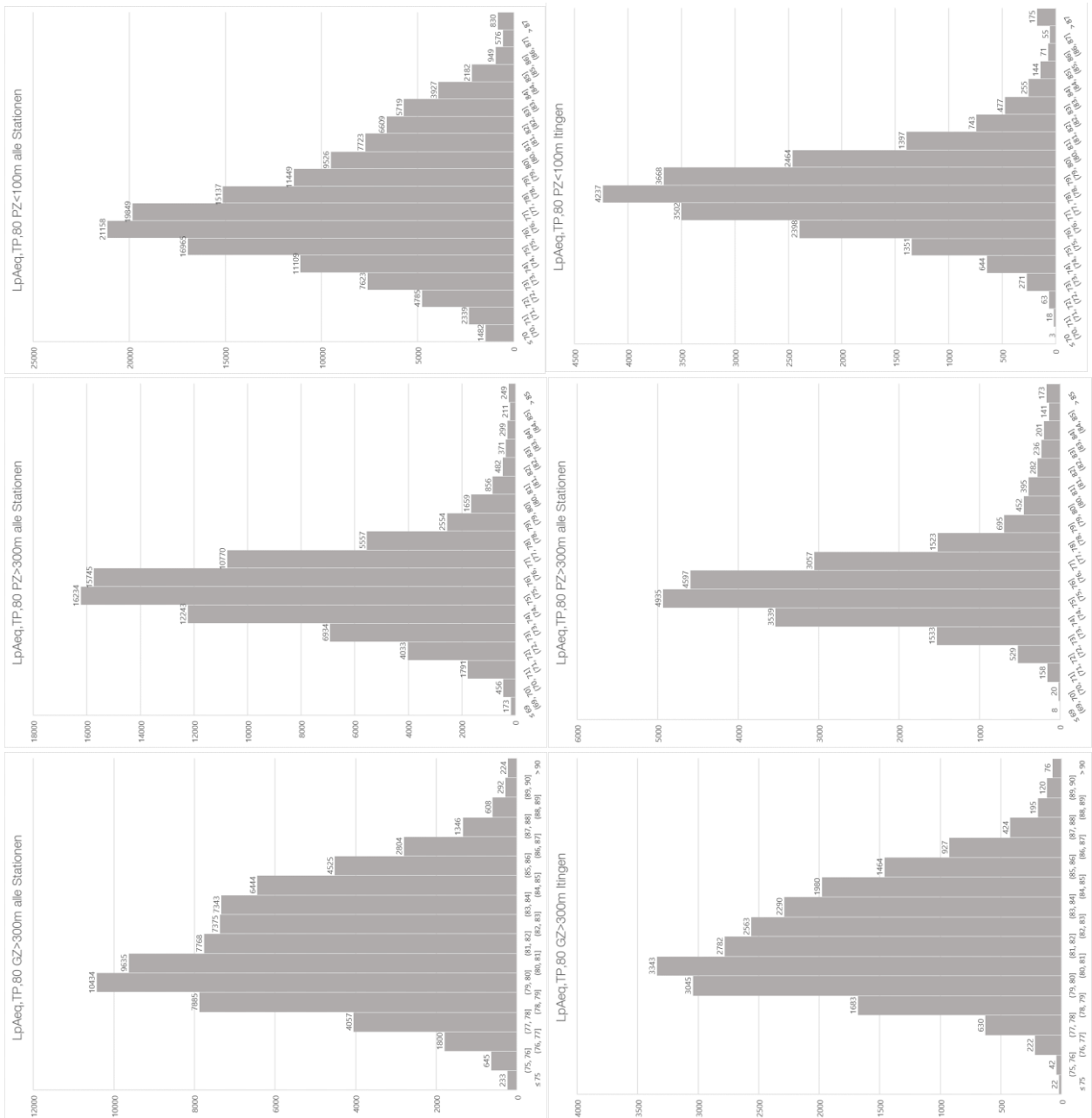


Abbildung 3: Vorangehende und diese Seite. Histogramme der gemessenen und auf 80 km/h normalisierten LpAeq,TP Werte verschiedener Fahrzeugkategorien (ICN, FV-Dosto, FLIRT, IC2000, kurze und lange Personenzüge, sowie lange Güterzüge) bei der Monitoring-Station Itingen und über alle 6 BAV-Monitoring-Stationen gemittelt.

Fazit: Wenn die Fahrzeugzuordnung und die Fahrzeugtransferfunktionen nicht präzise sind, muss mit einer Standardabweichung von 3 dB gerechnet werden (das heisst, 95 % der Fahrzeuge sind zwischen ± 6 dB). Auch wenn die Zuordnung sehr exakt ist und es sich um eine homogene Fahrzeugart handelt, ist die Standardabweichung bei ca. 1.5 dB (95 % der Fahrzeuge sind zwischen ± 3 dB). Da die Zuordnung der Fahrzeugtypen für den Ist-Verkehr zwar theoretisch sehr genau möglich ist, im sonRAIL Modell aber nur wenige Basistypen zur Auswahl vorliegen, gibt es eine zusätzliche Unsicherheit. Aufgrund einem lokal systematisch vom Mittelwert abweichenden Fahrzeugmix kann die Berechnungsunsicherheit schätzungsweise ca. 0.5 dB betragen. Diese Unsicherheit mittelt sich statistisch übers Jahr nicht heraus, das Vorzeichen ist für einen konkreten Abschnitt aber nicht von vornherein bekannt. Auf eine Berücksichtigung dieser Unsicherheit wird folgend deshalb verzichtet.

Die Analyse der ICN, FV-Dosto, FLIRT und IC2000 über alle Gleise der Monitoring-Stationen führt zu einer breiteren Verteilung und einer grösseren Standardabweichung als isoliert an der Monitoring-Station Itingen. Dies ist Resultat der Überlagerung von zwei Streuungen. Einerseits der Streuung innerhalb einer Fahrzeuggruppe und andererseits der Streuung zwischen unterschiedlichen Messquerschnitten, welche im Modell allerdings einen identischen Oberbau aufweisen und (noch) nicht unterschieden werden können (vgl. Kap. 4.3.2)

Der Mittelwert mit der korrekten Berücksichtigung der Schienenrauheit (nicht «average») zeigt eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Emission pro Fahrzeugkategorie für die Monitoring-Station Itingen. Da die Messwerte bei den Stationen sich teilweise deutlich unterscheiden, ist die lokale Unsicherheit einer Berechnung jedoch deutlich grösser.

Vorsicht ist bei der guten Übereinstimmung der Emissionen eines durchschnittlichen Güterzuges geboten. Die Modellierung geht im Moment davon aus, dass ausschliesslich Wagen mit K-Sohlen unterwegs sind. Würden die gemäss einer BAV-Untersuchung als lauter eingestufteten Wagen mit LL-Sohlen im Modell entsprechend berücksichtigt, würde die Modellierung zu einer Überschätzung der Emissionen führen. Fehler in der Modellierung können sich gegenseitig aufheben, so dass die Beseitigung eines Fehlers nicht zwingend zu einer genaueren Gesamtbeurteilung führen muss.

4.3.2. Bestimmung der Standardabweichung unterschiedlicher Messgleise

Der Monitoring-Bericht des BAV für 2021 weist auch die normalisierten TEL80 Werte für Reise- und Güterzüge pro gemessenes Gleis aus.

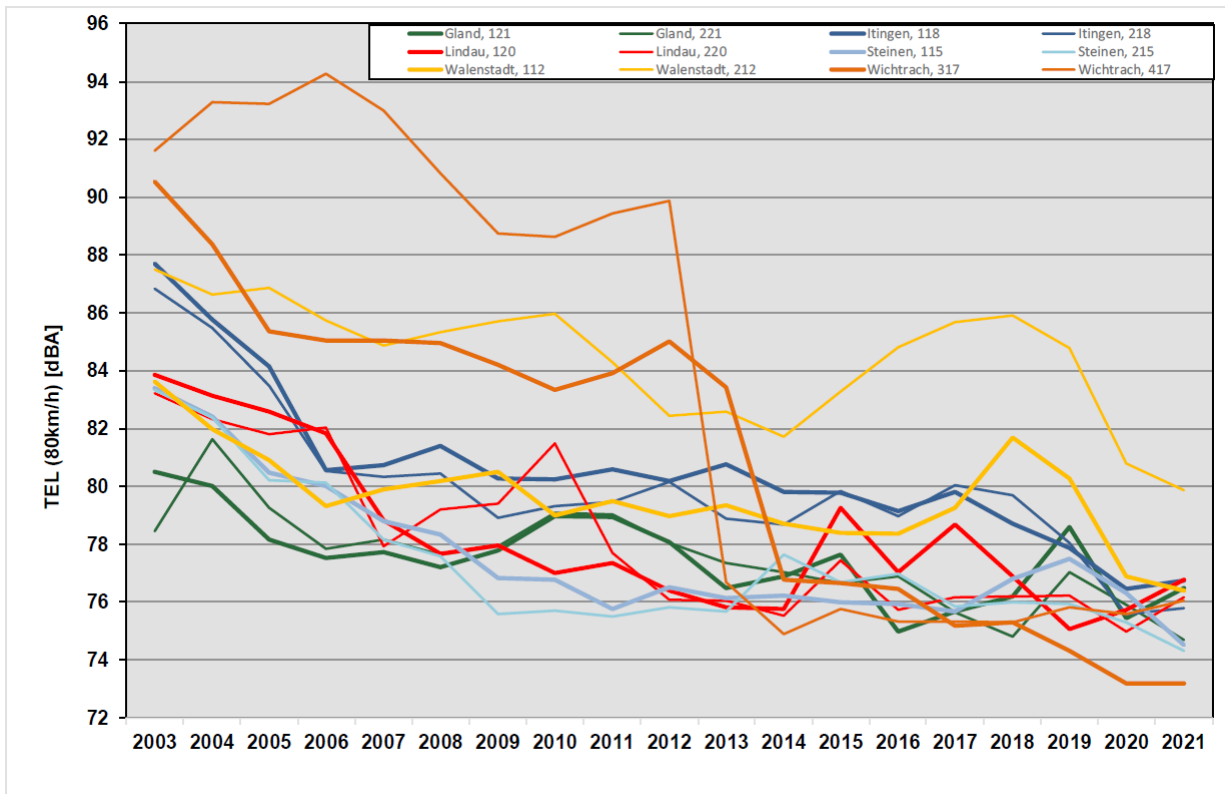


Abbildung 4: Durchschnittliche Vorbeifahrtspegel TEL80 der Personenzüge pro Messgleis (Medianwerte).
(entnommen aus Monitoring Eisenbahnlärm, Jahresbericht 2021, BAV)

Tabelle 7: Durchschnittliche TEL80 Werte für Personenzüge und Güterzüge bei den Monitoring-Stationen für die Messperiode 2021 und die daraus ermittelte Standardabweichung unter Annahme einer Normalverteilung. *Ohne das auffällig laute Gleis in Walenstadt wäre die Standardabweichung bei den PZ 1.2 dB.

Messstation	Gleis	PZ TEL80 24h [dBA]	GZ TEL80 24h [dBA]	GZ TEL80 Tag [dBA]	GZ TEL80 Nacht [dBA]	Diff. T-N
Wichtrach	317	73.2	79.2	78.8	80.0	-1.2
Wichtrach	417	76.0	81.2	80.6	82.3	-1.7
Walenstadt	112	76.3	84.2	84.2	84.4	-0.2
Walenstadt	212	79.9	86.9	87.6	86.2	+1.4
Steinen	115	74.5	81.3	81.6	80.9	+0.7
Steinen	215	74.3	81.0	81.1	80.8	+0.3
Lindau	120	76.9	83.5	83.1	84.1	-1.0
Lindau	220	76.0	83.7	83.7	83.7	0.0
Itingen	118	76.9	82.4	82.0	83.0	-1.0
Itingen	218	74.5	81.7	81.8	81.6	+0.2
Gland	121	76.4	84.5	84.7	84.0	+0.7
Gland	221	74.6	83.9	84.7	83.3	+1.4
Mittelwert		75.8	82.8	82.8	82.9	
Standardabweichung		1.7*	2.0	2.2	1.7	

Die Standardabweichung bei den TEL80 zwischen unterschiedlichen Messtandorten resp. Messgleisen beträgt 1.7dB (d.h. 95 % der Werte liegen zwischen ± 3.4 dB). Dieser Wert entspricht auch der Unsicherheit, welche im Rahmen des sonRAIL-Modells für nicht ganz exakte Berechnungen abgeschätzt wurde (vgl. Kapitel 7 in [6]).

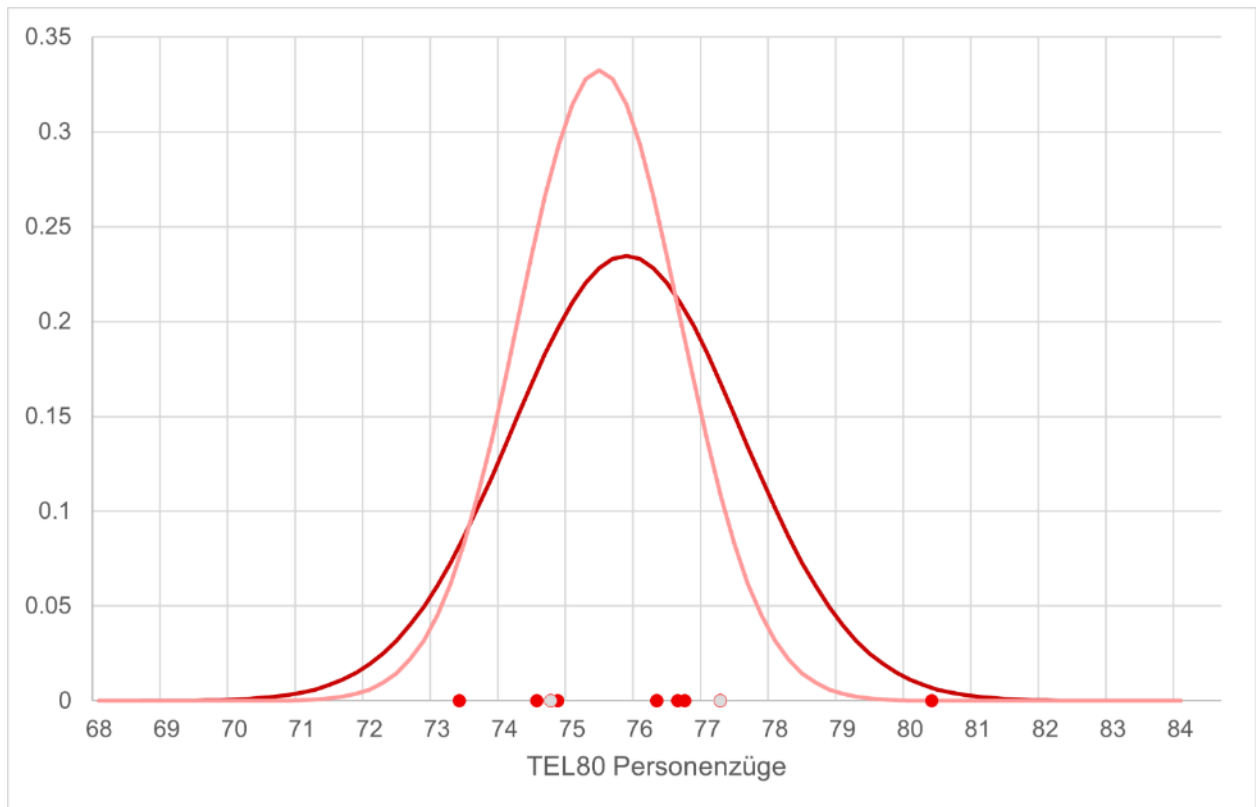


Abbildung 5: Aus den TEL80 für Personenzüge Messwerten der einzelnen Gleise der Monitoring-Messstationen (rote Punkte) kann unter der Annahme einer Normalverteilung eine Wahrscheinlichkeit berechnet werden. Die Verteilung ist breiter, wenn auch das laute Gleis in Walenstadt mitberücksichtigt wird (dunkelrot). Der Mittelwert der beiden Messgleise in Itingen (nicht ausgefüllte Punkte) entspricht ca. dem Mittelwert aller Messstationen und wird deshalb als Referenz zur Validierung des Modells betrachtet. Auch bei den TEL80 der Güterzüge ist Itingen am nächsten beim Mittelwert über alle Stationen.

Im BAV-Monitoring-Bericht wurde auch ein TEL80 Vergleich der Güterzüge durchgeführt. Diese Verteilung hat eine ähnliche Standardabweichung. Interessant ist, dass die TEL80 Werte der Güterzüge für dasselbe Gleis am Tag und in der Nacht bis zu 1.7 dB Abweichung haben (Tabelle 7). Dies zeigt, dass die Güterwagen je nach Typ oder evtl. auch Beladung ein unterschiedliches Emissionspotential aufweisen. Eine Analyse des Einflusses des Ladegewichts auf das Emissionspotential eines Güterwagens wurde bisher nicht durchgeführt.

4.3.3. Vergleich der berechneten und gemessenen Jahresemissionen

Bei den Messquerschnitten der sechs permanenten BAV-Monitoring-Stationen wurden die Emissionen mit dem sonRAIL-Modell und dem SEMIBEL-Modell berechnet. Es wurde einerseits eine Berechnung mit der Schienenrauheit «average» durchgeführt und zusätzlich eine Berechnung mit der jeweils lokal gemessenen und damit effektiven Schienenrauheit «eff».

Ein Vergleich der Modellberechnung und der Monitoring-Messung ist nicht ohne Vorbehalt möglich. Es gibt grundsätzliche Differenzen zwischen dem Messwert und dem Modellwert. Einerseits

wird für die Jahresemission der SEL-Wert verwendet, welcher aus dem aus dem Messsignal in einem Postprocessing geschnittenen TEL-Wert berechnet wird. Dieser Wert unterscheidet sich vom Modellwert $L_{pAeq,TP}$ insofern, dass er die Anstiegs- und Abklingpegel bis 10 dB unterhalb des Vorbeifahrtpegels ebenfalls beinhaltet. Eine Analyse der Messdaten zeigt, dass diese systematische Differenz zwischen $L_{pAeq,TP}$ und TEL im Mittel über alle Zugsdurchfahrten ca. 0.3 dB beträgt. Ebenfalls zu berücksichtigen ist, dass die Messung über das Nachbargleis hinweg erfolgt. Dadurch führt der Ausbreitungsweg über ein Schotterbett. Die Ausbreitung im sonRAIL-Modell vom Quellenort zum Referenzort in 7.5 m Abstand erfolgt nur über das Bahnbankett und nicht ein zusätzliches Schottergleis. Diese spektrale Dämpfungscharakteristik in Abweichung zur reinen geometrischen Verdünnung wurde im Rahmen der sonRAIL-Basismessungen ermittelt (Messstelle 4). Die tatsächliche Dämpfung bei den Monitoring-Stationen dürfte deshalb vermutlich grösser sein. Die Ermittlung dieses Effekts müsste im Rahmen einer Messunsicherheitsbetrachtung erfolgen. Die Annahme scheint vertretbar, dass sich diese beiden Effekte ungefähr kompensieren. Erkenntnisse aus einem laufenden Projekt MineTrack der Empa (Auftraggeber BAFU) könnten helfen, die Vergleichbarkeit zwischen Messung und Modellierung zu erhöhen, indem die Messunsicherheit bestimmt wird.

Eine weitere Messunsicherheit bei den permanenten Monitoring-Stationen entsteht durch die Messung auch bei ungünstigen Umweltbedingungen wie Wind, Regen und insbesondere Schnee. Diese Effekte führen vermutlich eher zu einer Erhöhung der gemessenen Emissionen im Jahresmittel. Starker Regen kann auch zu einer längeren Beeinträchtigung der Messgenauigkeit führen, bis der Windschirm vollständig ausgetrocknet ist. Frequenzen $>1\text{kHz}$ können durch Regenereignisse signifikant beeinflusst werden.³ Solche Frequenzen sind bei Eisenbahnlärm dominant. Zwischen den Schottersteinen liegende gebliebener und gefrorener Schnee kann die Messung auch über längere Zeiträume beeinflussen. Umgekehrt repräsentiert das Emissionsmodell einen idealen Zustand ohne störende Einflüsse. Es wäre deshalb zu erwarten, dass eine Langzeitemissionsmessung tendenziell höhere Werte zeigt als eine Emissionsmodellierung.

Ob allenfalls auch eine Messunsicherheit durch die senkrechte Montage der Mikrofone bei den Stationen und die Verwendung von sehr dauerhaften Wetterschutzvorrichtungen zu berücksichtigen wäre, ist der SBB nicht bekannt.

³ Die ISO-Norm 1996-2:2017 Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2:Determination of sound pressure levels liefert einige Hinweise zur Unsicherheitsbetrachtung von Messungen.

Tabelle 8: Emissionsvergleiche bei den BAV-Monitoringstationen. Die Berechnung wurde sowohl mit dem SEMIBEL-Modell inkl. auf das ursprüngliche sonRAIL-Modell gefittete Emissionsparameter durchgeführt und andererseits mit dem 2021 und 2022 verbesserten sonRAIL Modell. Die sonRAIL Berechnung wurde einerseits mit der Schienenrauheit «average» (sonRAIL avg) und andererseits mit der tatsächlich am Messquerschnitt gemessenen Schienenrauheit «eff» (sonRAIL eff) durchgeführt. Die Rauheitsmessungen wurden ausser in Lindau und Gland im Rahmen der netzweiten Stichprobenmessungen durch die SBB durchgeführt. In Gland wurden Accon-Messungen im Auftrag des BAV verwendet. In Lindau liegt nur eine Messung kurz nach dem Schienenschleifen vor und ist nicht repräsentativ.

Itingen	Leq_Tag	Leq_Nacht
BAV21	77.0	76.3
SEMIBEL	80.4	78.8
<i>Differenz</i>	3.4	2.5
sonRAIL avg	79.4	77.5
<i>Differenz avg</i>	2.4	1.2
sonRAIL eff	77.6	76.0
<i>Differenz eff</i>	0.6	-0.3

Lindau	Leq_Tag	Leq_Nacht
BAV21	79.2	75.3
SEMIBEL	82.1	77.6
<i>Differenz</i>	2.9	2.3
sonRAIL avg	81.6	76.5
<i>Differenz avg</i>	2.4	1.2
sonRAIL eff	-	-
<i>Differenz eff</i>	-	-

Wichtrach	Leq_Tag	Leq_Nacht
BAV21	76.2	75.7
SEMIBEL	81.0	79.4
<i>Differenz</i>	4.8	3.7
sonRAIL avg	80.4	78.2
<i>Differenz avg</i>	4.2	2.5
sonRAIL eff	78.9	77.1
<i>Differenz eff</i>	2.7	1.4

Gland	Leq_Tag	Leq_Nacht
BAV21	76.3	73.3
SEMIBEL	79.6	75.6
<i>Differenz</i>	3.3	2.3
sonRAIL avg	79.3	74.4
<i>Differenz avg</i>	3.0	1.1
sonRAIL eff	77.8	73.4
<i>Differenz eff</i>	1.5	0.1

Steinen	Leq_Tag	Leq_Nacht
BAV21	74.0	74.2
SEMIBEL	79.4	79.3
<i>Differenz</i>	5.4	5.1
sonRAIL avg	77.8	77.2
<i>Differenz avg</i>	3.8	3.0
sonRAIL eff	77.1	76.6
<i>Differenz eff</i>	3.1	2.4

Walenstadt	Leq_Tag	Leq_Nacht
BAV21	76.6	72.9
SEMIBEL	76.9	73.2
<i>Differenz</i>	0.3	0.3
sonRAIL avg	76.0	71.6
<i>Differenz avg</i>	-0.6	-1.3
sonRAIL eff	74.8	70.5
<i>Differenz eff</i>	-1.8	-2.4

Mittlere Abweichung	Leq_Tag	Leq_Nacht	
SEMIBEL	3.4	2.7	Parameterfitting auf altes sonRAIL-Modell
sonRAIL avg	2.5	1.3	Unter Berücksichtigung Schienenrauheit «average»
sonRAIL avg	3.2	1.8	Exkl. Messquerschnitt Walenstadt (ungewöhnlich laut)
sonRAIL eff	2.0	0.9	Unter Berücksichtigung der effektiven Schienenrauheit

Mit dem SEMIBEL-Modell werden die Emissionen um ca. 3 dB überschätzt. Dies entspricht einer Verdoppelung des Verkehrs. Es muss aber berücksichtigt werden, dass die verwendeten Emissionsparameter (A+B) auf ein früheres sonRAIL-Modell gefittet worden sind. Auch mit dem verbesserten sonRAIL-Modell und dem Standardparameter «average» für die Schienenrauheit werden die Emissionen offenbar um ca. 2 dB überschätzt. Wenn der auffällig laute Messquerschnitt Walenstadt nicht berücksichtigt wird, werden auch mit sonRAIL am Tag im Mittel mehr als 3 dB zu hohe Emissionen berechnet. Die grösste Abweichung kann in Wichtrach festgestellt werden, die kleinste (resp. sogar eine leichte Unterschätzung) in Walenstadt. Dies deckt sich mit den durchschnittlichen TEL80 Werten bei den Monitoring-Stationen (vgl. Kapitel 4.3.2).

Wird die effektive gemessene Schienenrauheit bei den Monitoring-Stationen im Modell berücksichtigt, reduziert sich die Abweichung zwischen berechneter und gemessener Emission um ca. 1 dB. Es bleibt aber nach wie vor eine Emissionsüberschätzung von ca. 1 dB übrig.

Bei diesen Vergleichen muss jedoch berücksichtigt werden, dass auch die Messungen nicht ohne Berechnungen auskommen. Bei den Güterzügen mussten beispielsweise aufgrund von ungünstigen Messereignissen (z.B. Zugsbegegnungen) im Mittel 14% der Ereignisse ersetzt werden, d.h. es wurden nur Annahmen eines Lärmpegels verwendet. Dies hat insbesondere auch in Itingen dazu geführt, dass einige Güterzüge mit Personenzügen ersetzt wurden, aufgrund eines falsch zugeordneten Achsmusters. Zusätzlich hatten einzelne Messstationen längere Messausfälle. Diese fehlenden Emissionen wurden über eine Reduktion der Messdauer zwar korrekt kompensiert, dennoch entsprechen diese Messwerte nicht zwingend den tatsächlichen Jahresemissionen. Die Modellberechnung hat diesbezüglich den Vorteil, dass immer jedes Ereignis berücksichtigt werden kann.

Auffällig ist, dass die Emissionen am Tag ca. 1 dB mehr überschätzt werden als in der Nacht. Ein Vergleich mit den tatsächlich durchgefahrenen Achsen und den im Monitoring dokumentierten zeigt zwar, dass vermutlich durch ersetzte Ereignisse am Tag beim Monitoring mehr Achsen «verloren» gehen. Dieser Anteil von wenigen Prozent erklärt aber nur eine Differenz von ca. 0.2 dB.

Eine weitere Erklärung liefert die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Tag und Nacht (Tabelle 9). Die Güterzüge sind bei den Monitoringstationen in der Nacht etwas schneller unterwegs gewesen als am Tag, die Personenzüge umgekehrt bei vier Stationen etwas langsamer. Dies kann wohl damit erklärt werden, dass in der Nacht die Trassen für die Güterzüge freier sind und darum zügiger gefahren werden kann und umgekehrt die Personenzüge weniger Zeitrückstände aufholen müssen. Die Geschwindigkeitsunterschiede sind bei den meisten Stationen im Bereich von 5% und erklären damit gemäss sonRAIL Modell für einen lärmsanierten Güterwagen eine Differenz von ca. 0.5 dB. Die nach Emissionseinfluss gewichtete Gesamtdifferenz ist aber nur im Bereich von wenigen Zehntel-dB. Diese Geschwindigkeitsunterschiede bei den Güterzügen konnte auch mit nach Tagesstunden aufgeschlüsselten Signalzeitstempeln aus dem RCS (Rail Control System) reproduziert werden. Im Emissionsmodell kann diese unterschiedliche Tages- und Nachtgeschwindigkeit pro Zugkategorie zurzeit (noch) nicht berücksichtigt werden.

Aufgrund der Verwendung einer über 24 Stunden und 365 Tage gemittelten Zugsgeschwindigkeit pro Zugkategorie muss davon ausgegangen werden, dass am Tag eine systematische Überschätzung und in der Nacht eine Unterschätzung der Güterzugsemissionen von wenigen Zehntel-dB vorliegt. Die Auswirkung auf die Gesamtemission ist abhängig vom Emissionseinfluss der Güterzüge und damit streckenabhängig.

Auch im Bereich von wenigen Zehntel-dB Tag/Nacht-Unterschied ist der $L_{pAeq,TP,80km/h}$ Wert für Güterzüge (vgl. Tabelle 6). Offenbar sind die Güterzüge in der Nacht etwas lauter als am Tag. Eine mögliche Erklärung wäre die Beladung. In der Nacht sind Güterwagen häufiger beladen und am Tag leer unterwegs. Dies kann sich auf das Lärmpotential auswirken, wird im Modell aber (noch) nicht berücksichtigt. Auch leere Kesselwagen fallen teilweise durch eine veränderte Lärmemission auf.

Es ist schwierig abzuschätzen, ob diese oben aufgeführten Gründe (fehlerhafter Ersatz von Ereignissen, Geschwindigkeitsdifferenz Tag/Nacht und beladene/leere Güterwagen) die systematisch um ca. 1dB kleinere Überschätzung der Emissionen in der Nacht ausreichend erklären. Weitere Erklärungen konnten bisher aber nicht gefunden werden.

Tabelle 9: Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten für Güterzüge und Personenzüge (Tag und Nacht). Eine Geschwindigkeitsdifferenz von 10% entspricht ca. 1 dB. Bei den Monitoring-Stationen wurden nur Züge länger 300m ausgewertet. Betreffend RCS (Rail Control System) wurden alle Züge unabhängig von der Länge ausgewertet. Ein direkter Vergleich ist nur unter Vorbehalt möglich. Da kurze leise Güterzüge eher schneller unterwegs sind als lange, muss sich eine Geschwindigkeitsdifferenz nicht zwingend stark auf die Emissionsberechnung auswirken. Die Emissionsauswirkung der Geschwindigkeitsdifferenz wurde für sanierte Güterwagen (id_10) und einstöckige Personenwagen (id_05) exemplarisch berechnet (Schienenrauheit «smooth»). Die Gesamtemissionsdifferenz berücksichtigt die Gewichtung gemäss Emissionseinfluss der Güterzüge und Personenzüge im Nachtzeitraum.

Station	V_GZ Tag [m/s]	V_GZ Nacht [m/s]	ΔdB (id_10)	V_PZ Tag [m/s]	V_PZ Nacht [m/s]	ΔdB (id_05)	V_GZ RCS [m/s]	V_PZ RCS [m/s]	ΔdB total
Gland	24.8	27.8	1.7	36.2	34.0	-0.8	22.0	34.7	0.9
Ittingen	21.4	23.2	1.0	27.4	27.7	0.2	21.1	24.2	0.8
Lindau	24.4	25.0	0.3	30.7	31.4	0.2	25.3	30.0	0.3
Steinen	19.0	19.5	0.2	24.3	23.6	-0.2	19.4	25.8	0.2
Walenstadt	25.1	25.9	0.5	36.9	35.6	-0.5	24.8	32.5	0.3
Wichtrach	25.8	26.5	0.4	42.6	41.4	-0.5	25.6	34.4	0.2

4.3.4. Gesamtunsicherheit

Als Synthese obiger Unsicherheitsbetrachtungen kann der Versuch einer Ermittlung resp. Abschätzung einer Gesamtunsicherheit vorgenommen werden.

Die systematische Überschätzung der Emissionen durch eine zu hohe Schienenrauheit beträgt ca. 1 dB. Die Differenz der Abweichungen am Tag und in der Nacht im Bereich von 1 dB können zumindest teilweise mit einer unterschiedlichen Durchschnittsgeschwindigkeit und möglicherweise unterschiedlicher Tonnagen erklärt werden. Zurzeit kann diese Unsicherheit von ca. ± 0.5 dB nicht reduziert werden. Am Tag erfolgt eine relative Überschätzung in der Nacht eine Unterschätzung der Emissionen. Des Weiteren besteht eine generelle Überschätzung der Emissionen bei den Monitoring-Stationen von ca. 1dB.

Zu diesen systematischen Unsicherheiten muss die Unsicherheit des unterschiedlichen Oberbauemissionspotentials hinzugezählt werden. Dieses beträgt ca. $2 \cdot 1.7 \text{ dB} = 3.4 \text{ dB}$ (Kap. 4.3.2).

Aus diesen Überlegungen kann folgende Aussage formuliert werden: Die Hypothese, dass aufgrund einer Emissionsberechnung die festgelegte Emission um $> 1 \text{ dB}$ überschritten ist, trifft bei einer Abweichung am Tag von $+4.2 \text{ dB}$ und in der Nacht von $+3.2 \text{ dB}$ mit einer Wahrscheinlichkeit

von 66% zu. Die Tabelle 10 zeigt weitere dB-Werte mit dem zugehörigen Vertrauensintervall. Auf dieser Basis wurden Karten mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten in diesem Bericht erstellt.

Die Berechnungen gehen von der Annahme aus, dass (a) eine wahrnehmbare Zunahme erst ab >1dB vorliegt, (b) die Überschätzung der Schienenrauheit sich systematisch um 1 dB auswirkt, (c) das Modell den Jahreslärmpegel generell um ca. 1dB überschätzt, (d und e) die Geschwindigkeitsüberschätzung am Tag und die Unterschätzung in der Nacht zu einem Fehler von 0.5 dB führt und (f) das Emissionspotential eines Standard-Betonoberbau sich gemäss der Verteilung der TEL80-Werte bei den Monitoring-Stationen verhält. Wenn die Emissionsverteilung der Oberbaucharakteristik einer Normalverteilung entspricht, kann die z-Wert Statistik für die Berechnung des Vertrauensintervalls benutzt werden (Abbildung 5).

Es wurde die Annahme getroffen, dass die Teilunsicherheiten (b-e) unabhängig voneinander sind und somit addiert werden können.

Tabelle 10: Aufgrund der systematischen Unsicherheiten betreffend Geschwindigkeitsermittlung (Tag und Nacht unterschiedlich), tatsächlicher Schienenrauheit und der Streuung innerhalb der Emissionspotentiale identischer Oberbauten (Annahme, dass die Monitoring-Stationen repräsentativ fürs gesamte SBB-Netz sind), sowie einer generellen Überschätzung der Emissionen kann die erforderliche Emissionszunahme für die Erfüllung einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit einer wahrnehmbaren Emissionszunahme berechnet werden. Diese ist für die Emissionsberechnung am Tag anders als für die Nacht. Da sinnvollerweise erst bei einer Wahrscheinlichkeit von >66% eine Überschreitung als signifikant betrachtet wird, ist am Tag erst eine Emissionszunahme von 4.2 dB und in der Nacht von 3.2 dB als wahrnehmbare Veränderung zu betrachten.

Wahrscheinlichkeit einer wahrnehmbaren Emissionszunahme	EK2021 Δ dB Tag	EK2021 Δ dB Nacht
>1%	-0.5	-1.5
>5%	0.7	-0.3
>10%	1.3	0.3
>25%	2.3	1.3
>50%	3.5	2.5
>66%	4.2	3.2
>75%	4.7	3.7
>95%	6.3	5.3
>99%	7.5	6.5

4.3.5. Reduktionsmöglichkeiten für die Berechnungsunsicherheit

Die obige Analyse der unterschiedlichen Ursachen für die Unsicherheit der Emissionsberechnung zeigt, dass es im Wesentlichen drei Möglichkeiten gibt, um die Unsicherheit möglicherweise zu reduzieren.

Erstens kann eine für den Tag- und Nachtzeitraum unterschiedliche Geschwindigkeit pro Zugkategorie oder zumindest für die Güterzüge ermittelt werden. Der Nutzen dürfte aber maximal im Bereich von 0.5 dB Reduktion der Unsicherheit liegen. Mit einer vertieften Datenanalyse müsste der Nutzen dieser Modellerweiterung zuerst noch bestätigt werden. Ebenfalls sollte überprüft werden, ob tatsächlich auch unterschiedliche Ladegewichte der Güterwagen zu unterschiedlichen Emissionen am Tag und in der Nacht führen können.

Zweitens kann ein zusätzliches Modell für die Bestimmung einer realistischen Schienenrauheit verwendet werden. Dies dürfte die Unsicherheit nochmals um ca. 1 dB reduzieren.

Drittens müssten die Oberbautypen entweder im Modell besser unterschieden werden können, so dass die unterschiedlichen TEL80 Werte bei den Monitoring-Stationen reproduziert werden können, oder der Oberbau muss homogener werden (besonders laute Oberbauten wie in Walenstadt werden durch geeignete Massnahmen verhindert). Dieser Punkt dürfte zu einer weiteren Reduktion der Unsicherheit im Rahmen von ca. 1 dB beitragen.

Im vorliegenden Bericht konnte die Unsicherheit betreffend Bogengeräuschen mangels Grundlagen nicht untersucht werden. Es ist aber klar, dass die Unsicherheit der Emissionsberechnung für Bogenfahrten höher ausfällt als für Geraden.

5. Visualisierung der Emissionsberechnungen

Im Folgenden werden Übersichtskarten mit berechneten Emissionen unter unterschiedlichen Modellannahmen und Verkehrshorizonten dargestellt. Die Farbgebung wurde so gewählt, dass blaue und grüne Strecken Werte unterhalb des Schwellenwertes (Tag 65dB und Nacht 55dB) aufweisen. Bei so tiefen Emissionen können Grenzwertüberschreitungen in der Regel ausgeschlossen werden, da schon in einem Abstand von 4m die Immissionsgrenzwerte eingehalten sind.

Durch die Verschneidung der Informationen von Verkehr, Schwellentyp, Schienenprofil, Zwischenlage, Bogenradius, Brückentyp und Geschwindigkeit entsteht eine hohe Granularität der Abschnitte mit homogenen Emissionen (Abbildung 6). Eine Reduktion dieser Granularität geht zwingend mit einem Verlust der Modellgenauigkeit her und ist deshalb nicht erwünscht. Grundsätzlich kann es aber Sinn machen, Emissionsabschnitte für die Weiterverwendung wieder zusammenzufassen. Der EK2021 umfasst über 40'000 Emissionsabschnitte. Im Emissionsplan 2015 (Basis der Ordentlichen Lärmsanierung) war es 6-mal weniger Abschnitte. Durch die Zusammenfassung von Emissionsabschnitten zu Emissionsklassen wird die Übersichtlichkeit gewährleistet.

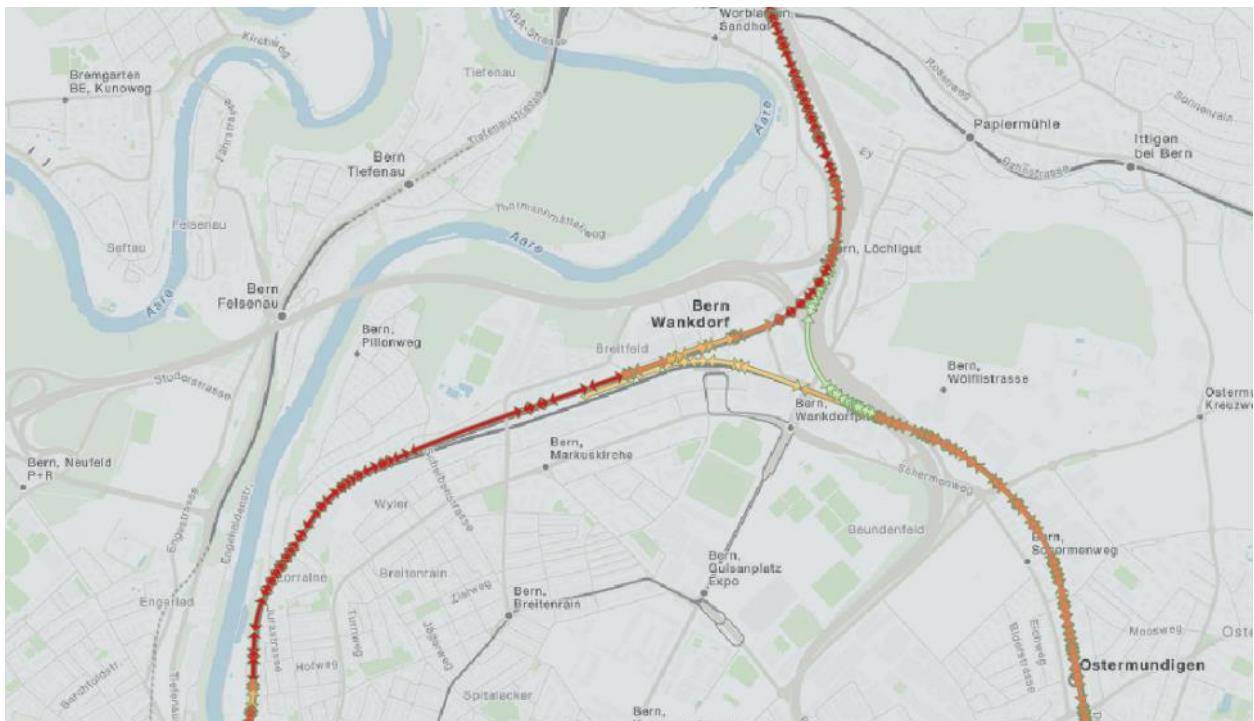


Abbildung 6: Jeder Doppelpfeil symbolisiert einen Emissionsabschnitt mit konstanter Emission. Die realisierte Granularität ist damit ausgesprochen gross.

5.1. SEMIBEL-Berechnung EK2021

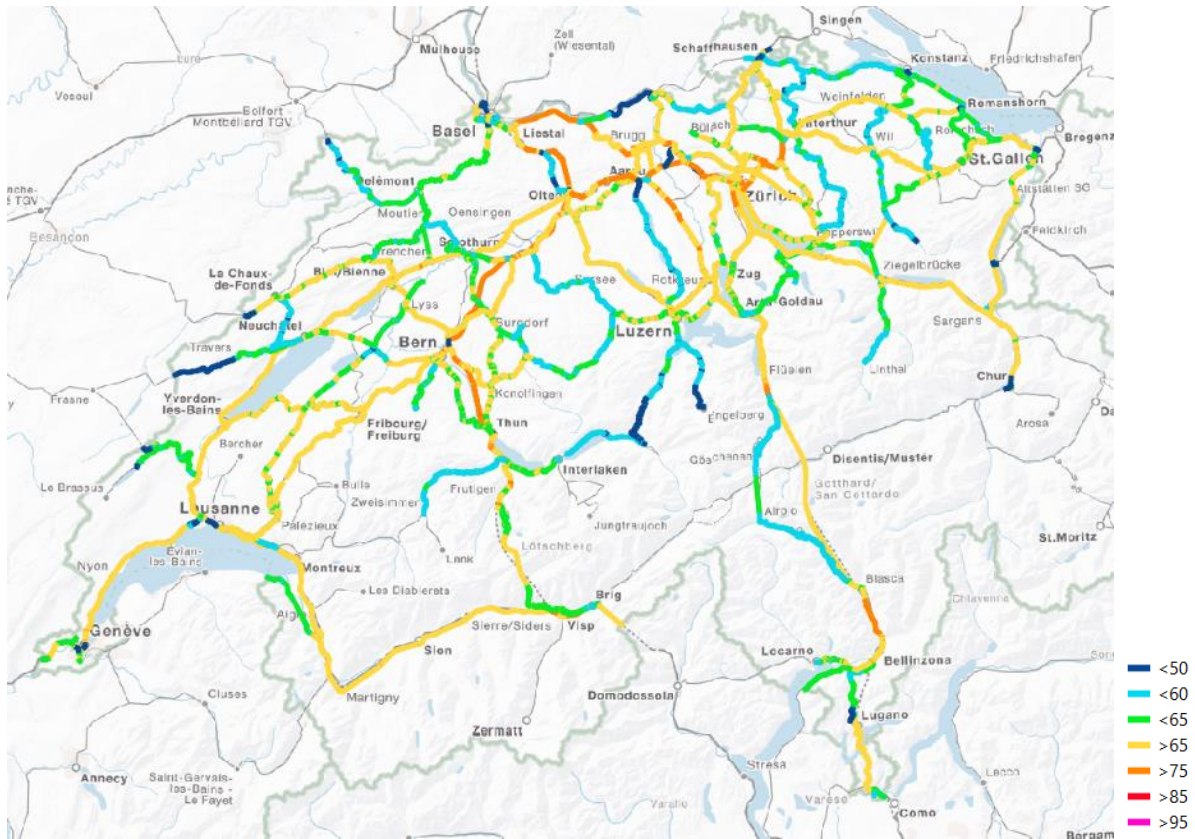


Abbildung 7: Visualisierung der SEMIBEL Emissionen 2021 am Tag.

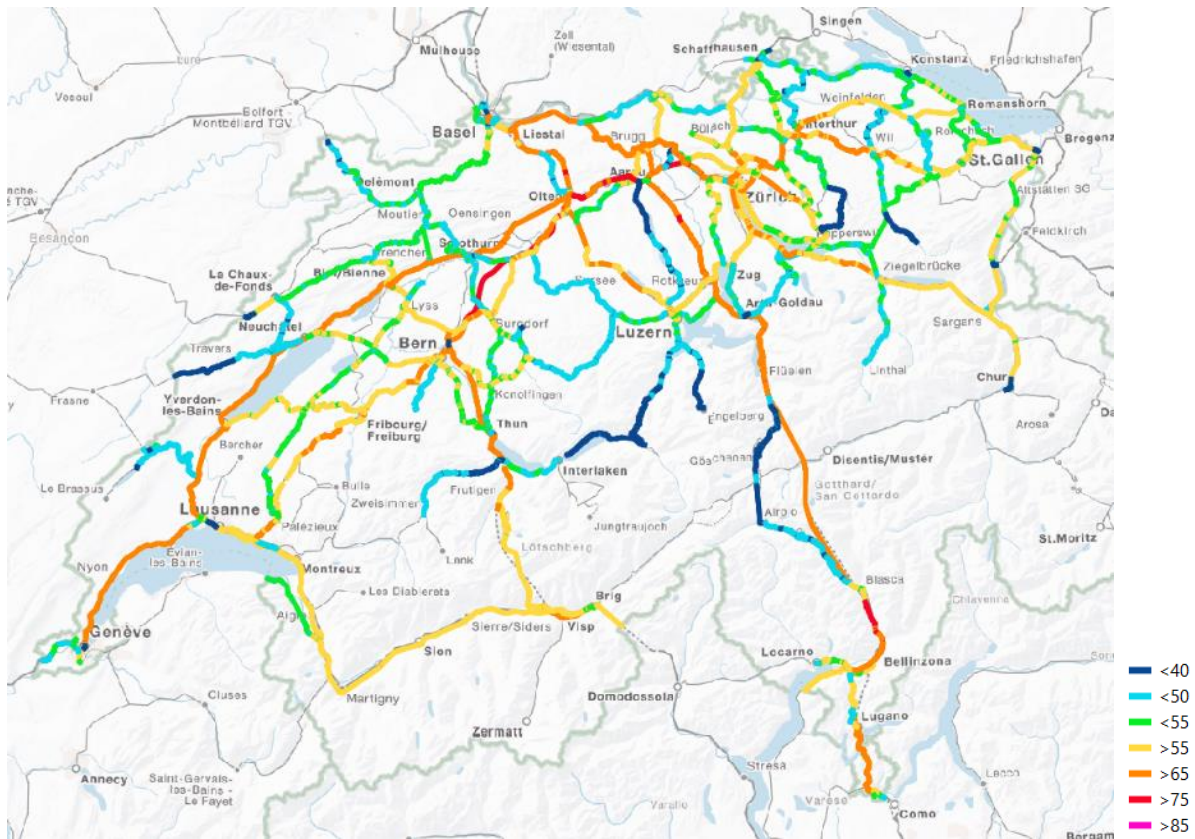


Abbildung 8: Visualisierung der SEMIBEL Emissionen 2021 in der Nacht.

5.2. sonRAIL-Berechnung EK2021

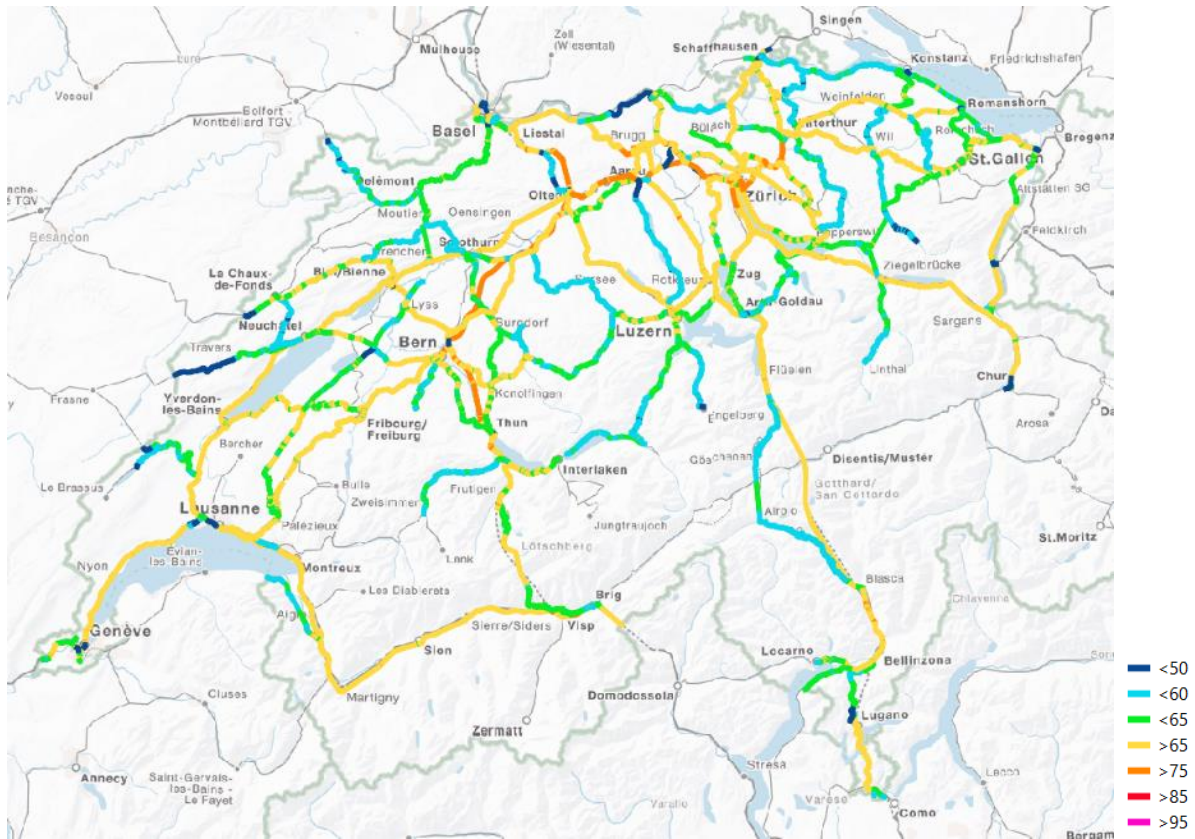


Abbildung 9: Visualisierung der sonRAIL Emissionen 2021 am Tag.

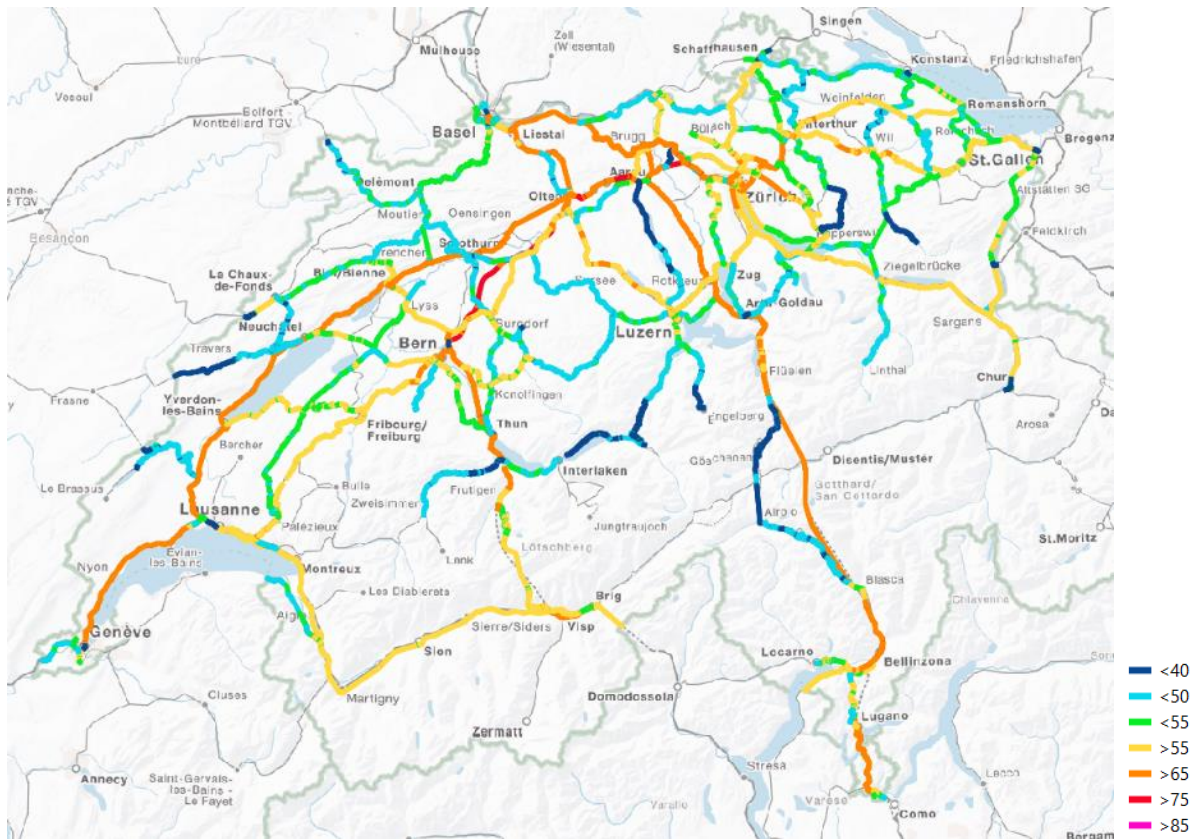


Abbildung 10: Visualisierung der sonRAIL Emissionen 2021 in der Nacht.

6. Visualisierung von Emissionsvergleichen

Im Folgenden werden Übersichtskarten mit Emissionsvergleichen zwischen unterschiedlichen Modellannahmen und unterschiedlichen Emissionshorizonten dargestellt. Einerseits werden absolute Emissionsdifferenzen visualisiert und andererseits auch die Wahrscheinlichkeiten, dass eine Differenz wesentlich ist ($>1\text{dB}$). Die Differenz $>1\text{dB}$ wird vorliegend so interpretiert, wie dies gemäss der Richtlinie zum Lärmschutz bei Eisenbahnanlagen [7] vorzunehmen ist. D.h. die Differenz wird auf 0.5dB gerundet. Somit ist erst eine Differenz ab 1.25dB als $>1\text{dB}$ ausgewiesen. Bei den anderen Emissionsklassen wurde im Sinne der Verständlichkeit auf diese Spezialität verzichtet. Dies bedeutet, dass eine Differenz von bspw. 2.1dB als $>2\text{dB}$ und eine Differenz von 1.1dB als $\pm 1\text{dB}$ dargestellt wird.

Die grossen Differenzen zwischen dem sonRAIL und dem SEMIBEL Modell für die Zentralbahn (Meterspur) sind nicht validiert (vgl. Kap. 3.5) und nur der Vollständigkeit halber abgebildet.

Alleine auf Basis der Differenzen von netzweiten Emissionsberechnungen kann nicht in allen Fällen auf die tatsächlichen Immissionsdifferenzen geschlossen werden. Für einige der in Projekten verfügbaren zulässigen Immissionen wurden weitere Emissionsquellen berücksichtigt. Beispielsweise wurden im Einflussbereich der Rangierbahnhöfe Zuschläge vorgenommen, welche in einigen Fällen den Fahrlärm dominieren. Auch gibt es einige Abschnitte im Nahbereich von Streckenverzweigungen, wo die K1-Pegelkorrektur auf den Gesamtverkehr angepasst werden musste. Und drittens gibt es Projekte, wo störender Zusatzlärm von Kurvenkreischen und Weichenüberfahrten mit Zuschlägen berücksichtigt wurden. In all diesen Fällen muss eine wesentliche Änderung bei den Emissionen nicht zwingend zu einer wesentlichen Änderung bei den Immissionen führen. Über das ganze untersuchte Streckennetz betrifft dies jedoch nur wenige Abschnitte. Auch führt die Nichtberücksichtigung dieser Zusatzemissionen bei einem Vergleich dazu, dass zu häufig eine wesentliche Änderung vermutet wird, welche sich mit einer detaillierten Immissionsberechnung dann wieder relativiert. Ein Übersehen von möglichen wesentlichen Überschreitungen der zulässigen Immissionen ist hingegen nicht zu erwarten.

6.1. Modellvergleich sonRAIL 2021 vs. SEMIBEL 2021

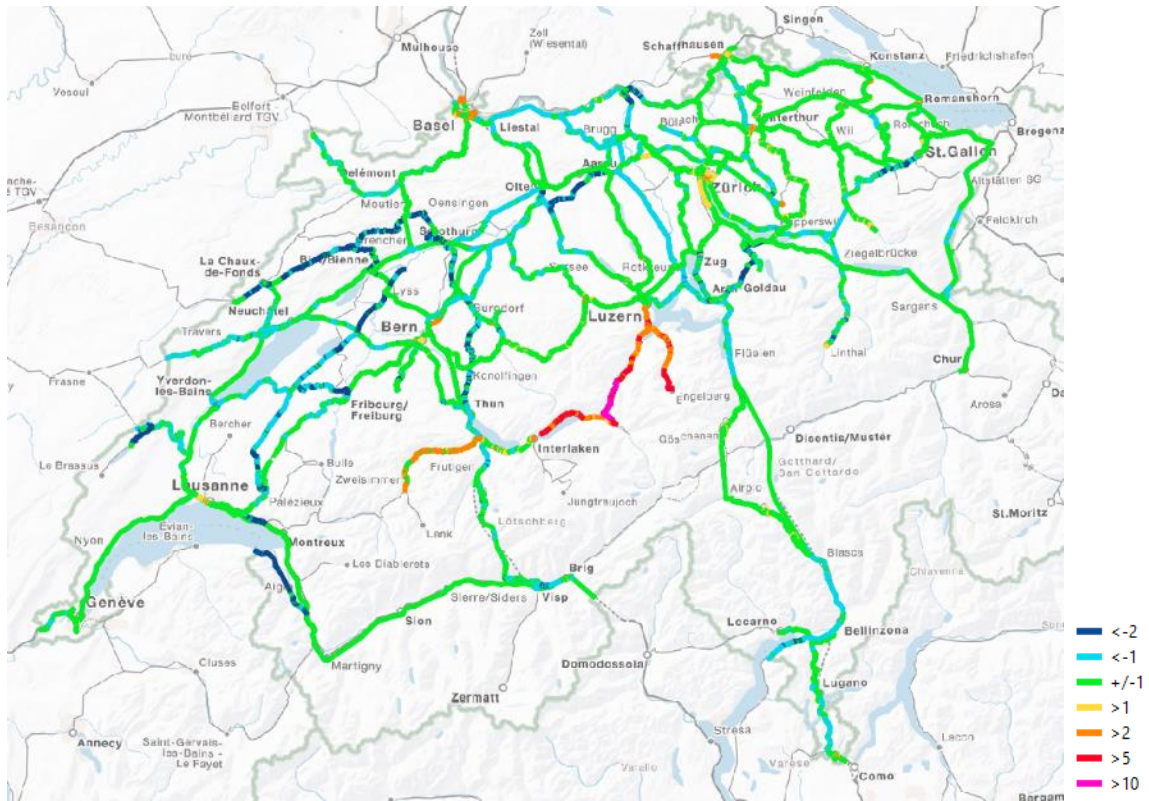


Abbildung 11: Visualisierung der Emissionsdifferenzen zwischen sonRAIL und SEMIBEL für den Tagzeitraum. Positive Werte bedeuten einen höheren Emissionswert für sonRAIL.

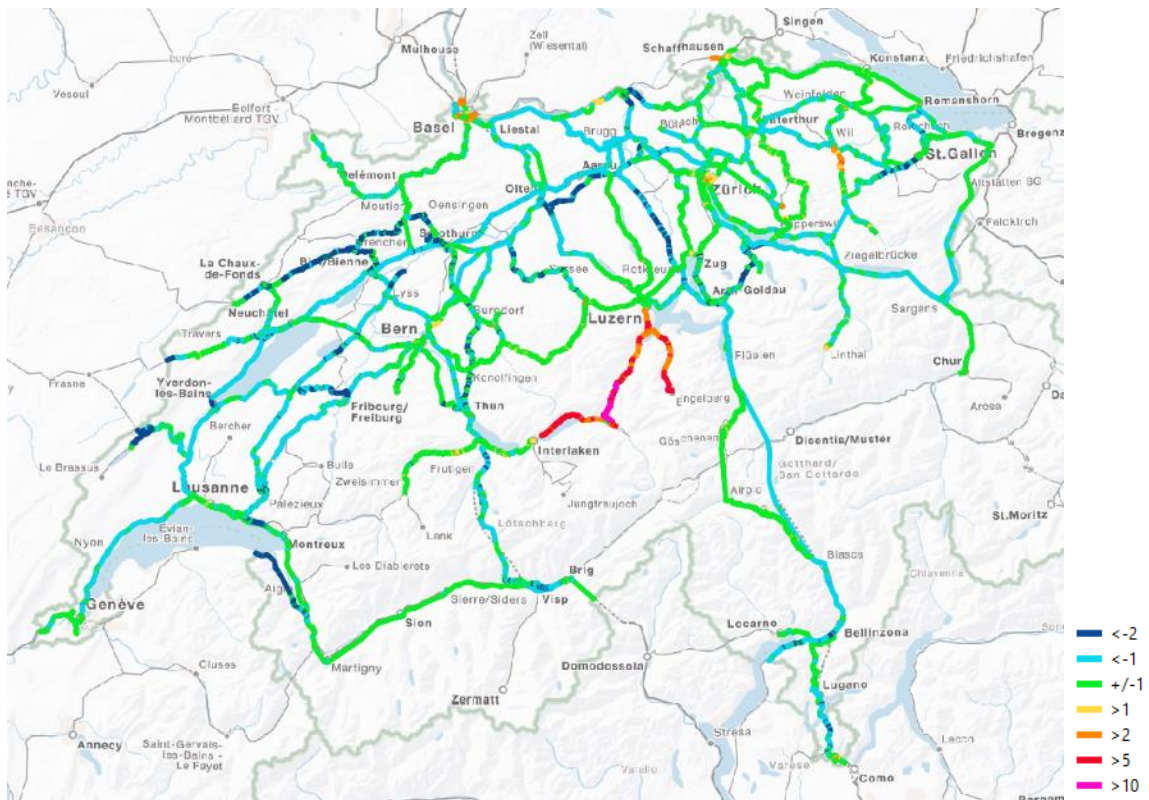


Abbildung 12: Visualisierung der Emissionsdifferenzen zwischen sonRAIL und SEMIBEL für den Nachtzeitraum. Positive Werte bedeuten einen höheren Emissionswert für sonRAIL.

6.2. SonRAIL EK2021 vs. SEMIBEL EK2015

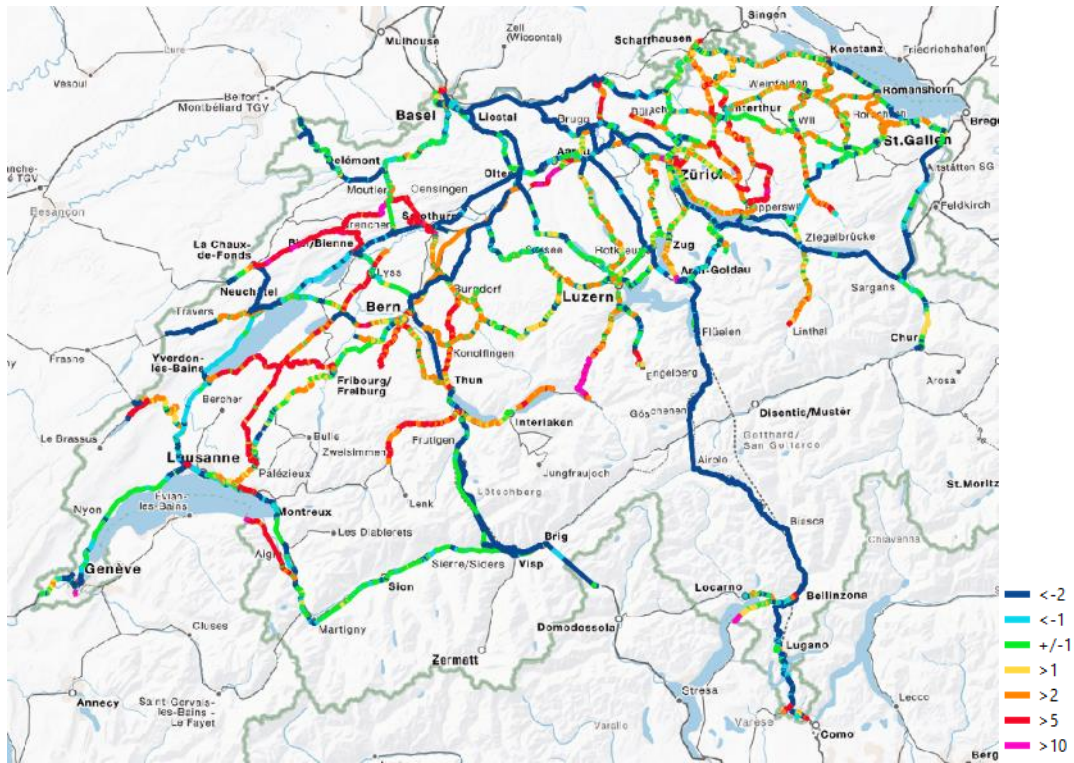


Abbildung 13: Visualisierung der sonRAIL Emissionsdifferenzen EK2021 vs. SEMIBEL EK2015 am Tag.

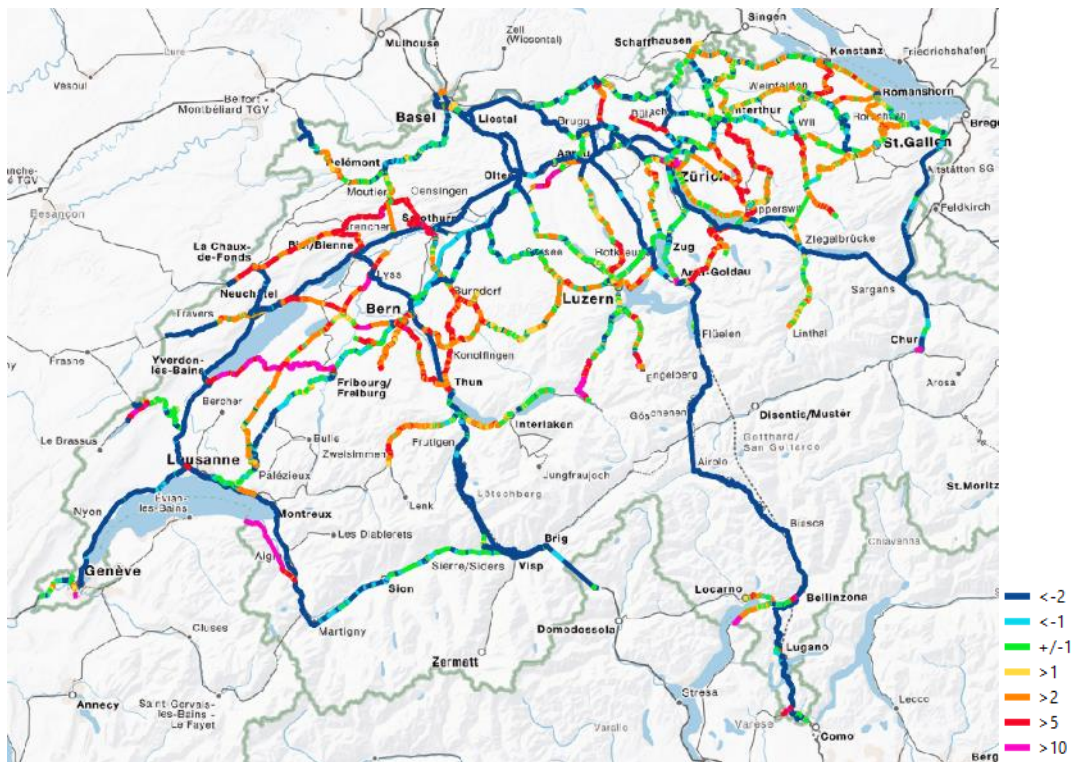


Abbildung 14: Visualisierung der sonRAIL Emissionsdifferenzen EK2021 vs. SEMIBEL EK2015 in der Nacht.

6.3. EK2021 vs. festgelegte Emissionen (EK_fix)

6.3.1. Absolute Emissionsdifferenzen

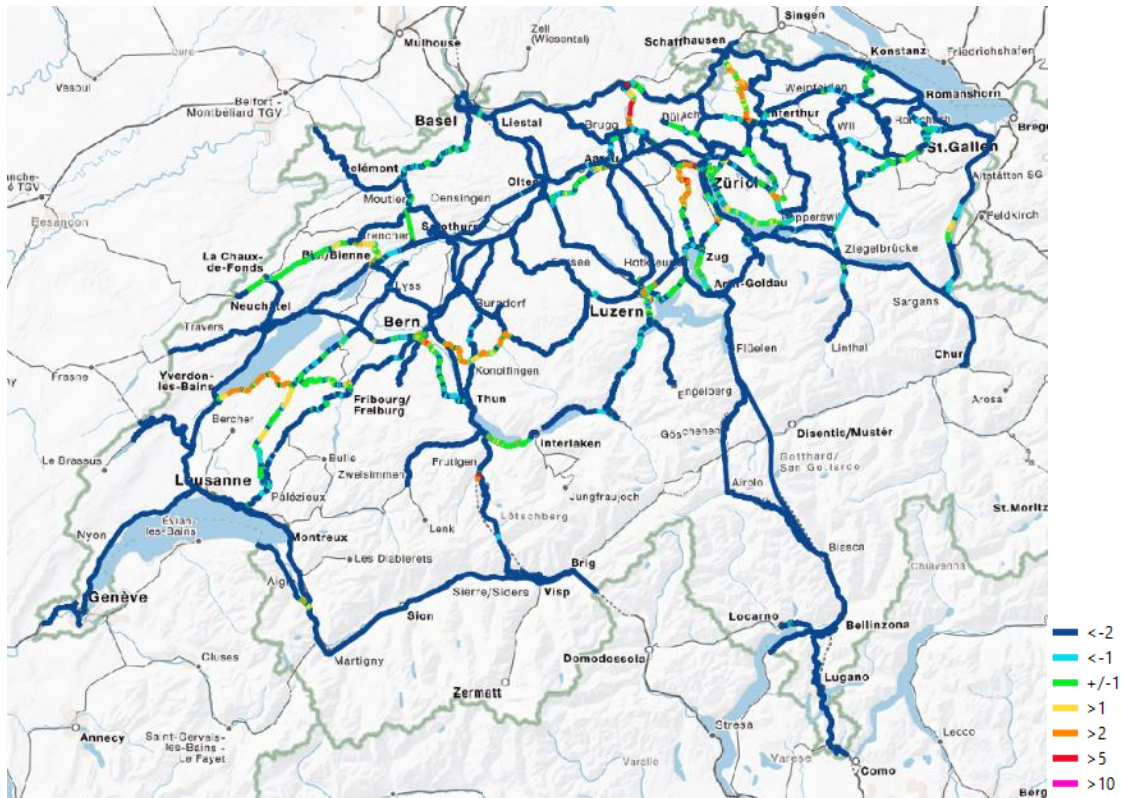


Abbildung 15: Visualisierung der sonRAIL Emissionsdifferenzen EK2021 vs. festgelegte Emissionen am Tag.

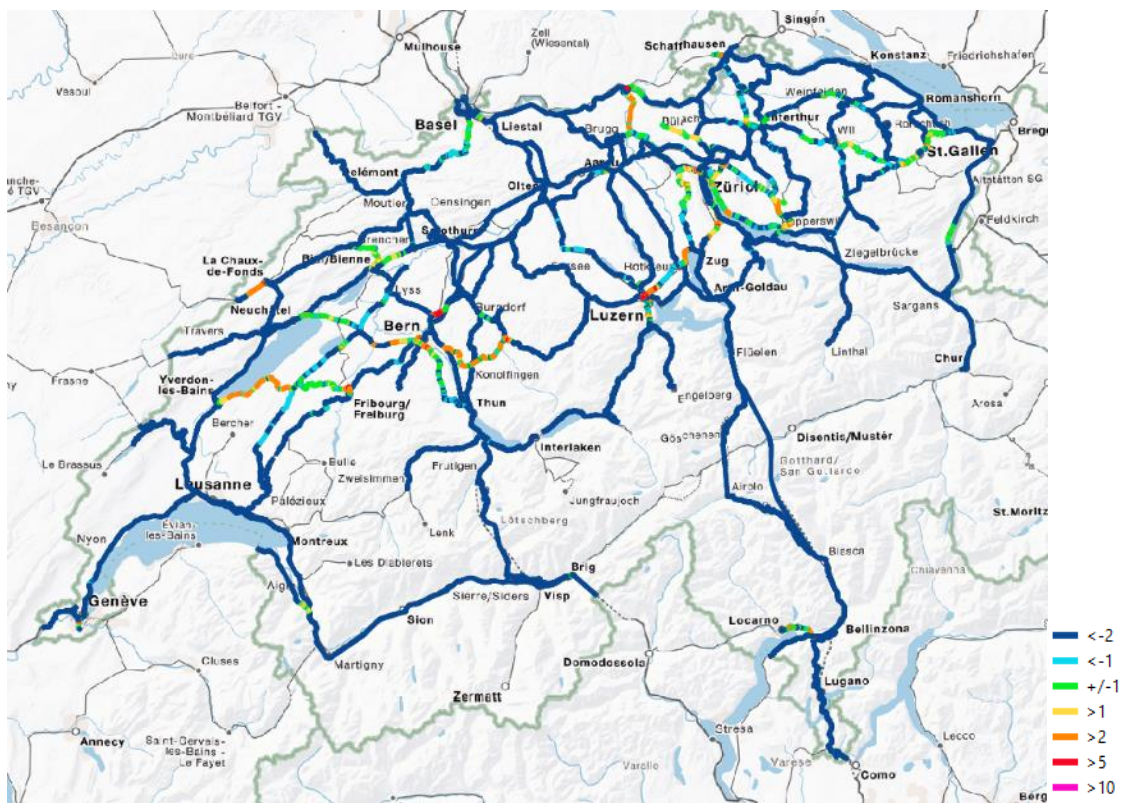


Abbildung 16: Visualisierung der sonRAIL Emissionsdifferenzen EK2021 vs. festgelegte Emissionen in der Nacht.

6.3.2. Wahrscheinlichkeit einer wesentlichen Emissionsüberschreitung

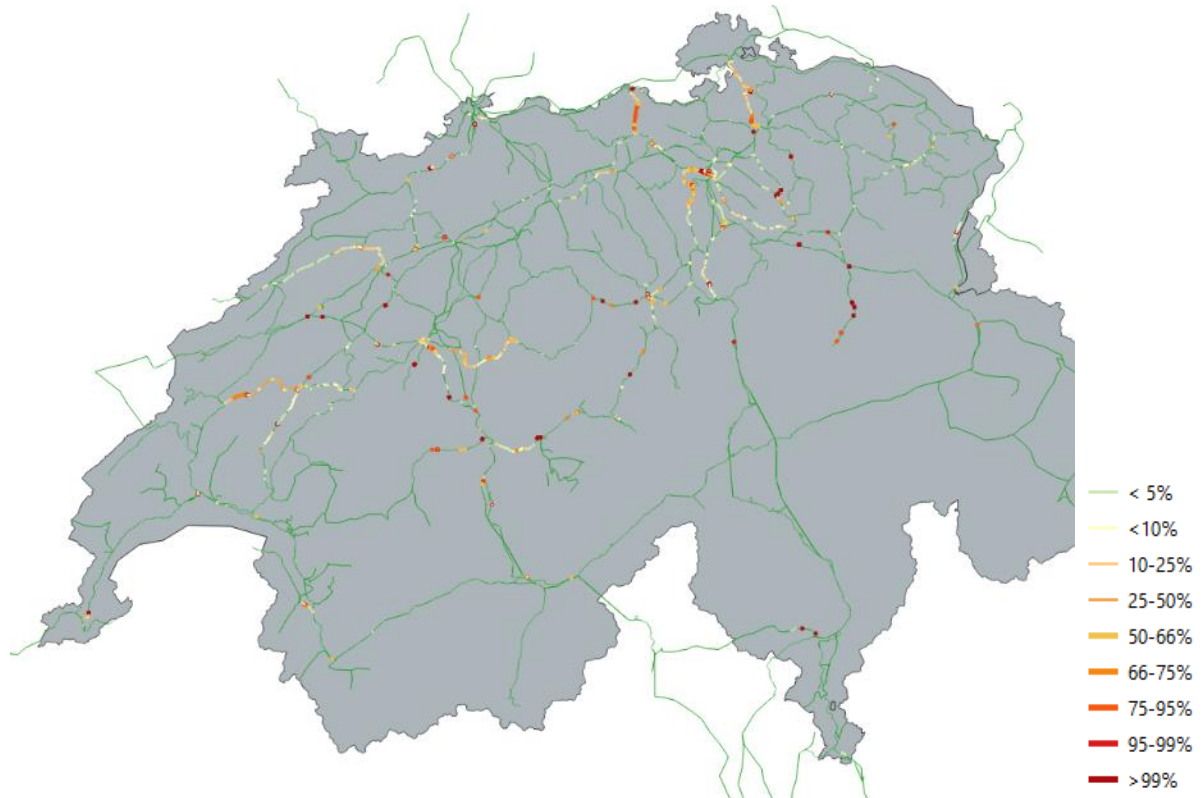


Abbildung 17: Wahrscheinlichkeit einer wesentlichen Überschreitung (EK2021) der festgelegten Emissionen am Tag ($L_r > 65\text{dB}$).

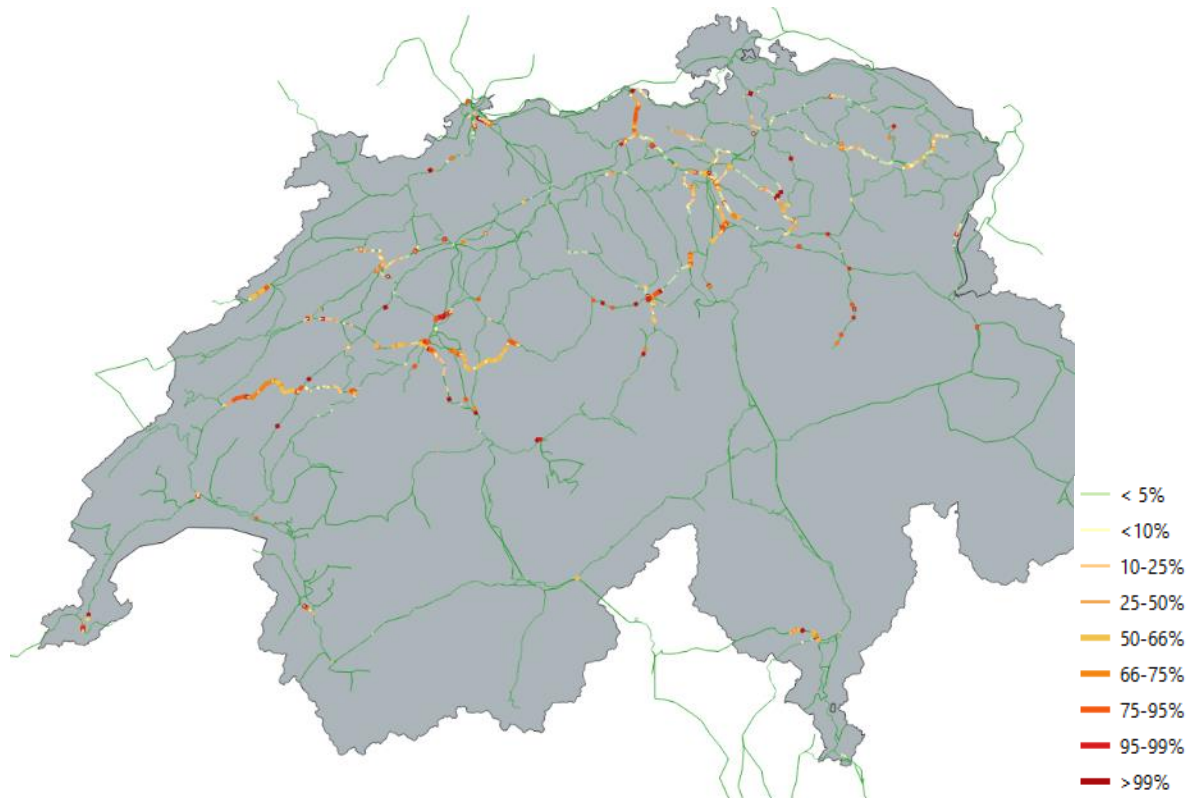


Abbildung 18: Wahrscheinlichkeit einer wesentlichen Überschreitung (EK2021) der festgelegten Emissionen in der Nacht ($L_r > 55\text{dB}$).

6.3.3. Wahrscheinlichkeit >95% einer wesentlichen Emissionsüberschreitung (exkl. Brücken)

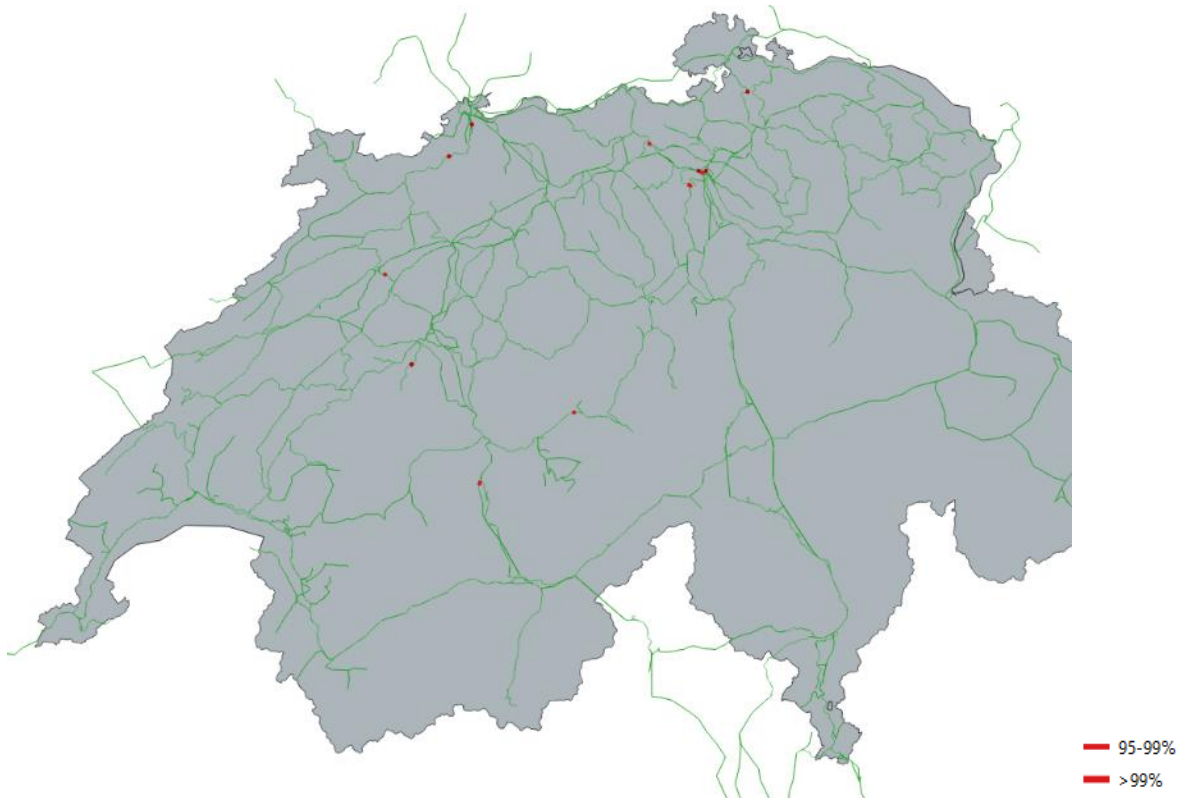


Abbildung 19: Wahrscheinlichkeit >95% (hohe Signifikanz) einer wesentlichen Überschreitung (EK2021) der festgelegten Emissionen am Tag (Lr >65dB) exkl. Brückenabschnitte.

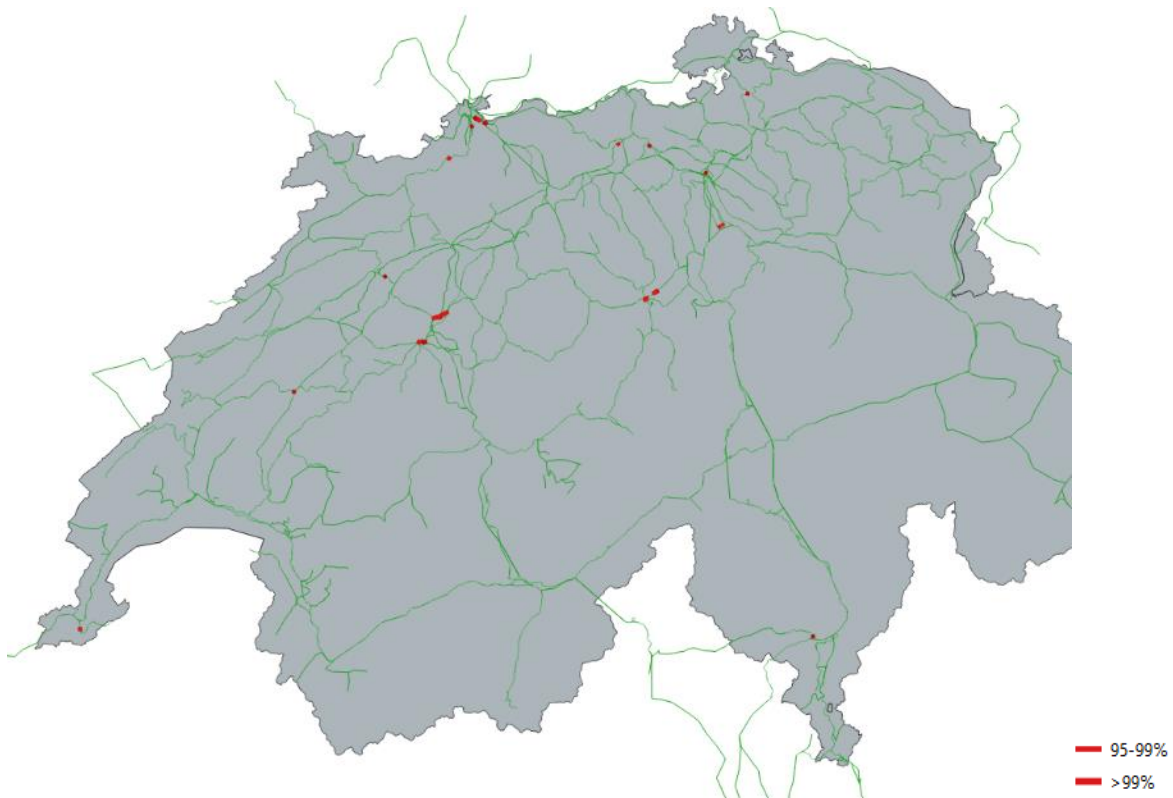


Abbildung 20: Wahrscheinlichkeit >95% (hohe Signifikanz) einer wesentlichen Überschreitung (EK2021) der festgelegten Emissionen in der Nacht (Lr >55dB) exkl. Brückenabschnitte.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit den modellierten Emissionen des EK2021 werden die tatsächlich gemessenen Jahresemissionen offenbar eher überschätzt (4.3.3). Da trotz der aufwändigeren Modellierung wichtige Emissionsparameter nach wie vor nicht im Modell abgebildet werden können, bleibt eine grössere Unsicherheit bestehen (4.3.4). Beide Aspekte führen dazu, dass die Beurteilung der Einhaltung der festgelegten Emissionen über eine reine Differenzbildung nicht sachgerecht ist. Die Differenzen müssen im Kontext der Modellunsicherheit (und eigentlich auch der Messunsicherheit) betrachtet werden.

Im Rahmen der EK2021 Erstellung wurde ein Versuch zur Bezifferung der Wahrscheinlichkeit von wesentlichen Überschreitungen der festgelegten Emissionen vorgenommen (4.3.4). Diese Berechnung basiert auf vereinfachten Annahmen und weist Unsicherheiten auf. Es wäre wünschenswert, wenn eine detailliertere statistische Untersuchung parallel zur weiteren Verbesserung der Emissionsmodellierung erfolgen könnte. Dies würde die Aussagekraft und Glaubhaftigkeit der berechneten Emissionswerte erhöhen und insbesondere für die Beurteilung lärmrechtlicher Fragen eine wichtige Basis liefern.⁴

Eine zuverlässigere Beurteilung wird erst möglich, wenn die Modellunsicherheit weiter reduziert wird (4.3.5). Es laufen aktuelle Projekte, welche dazu beitragen können. Einerseits ist dies die statistische Modellierung der tatsächlichen Schienenrauheit [5] und andererseits die detaillierte Untersuchung der BAV-Monitoring Messwerte [9]. Für die beiden Themenbereiche «Bogenemissionen» und «Emissionsdifferenzen von identischen Oberbautypen» sind im Rahmen der Arbeitsgruppe sonRAIL Projektideen formuliert worden [8].

Insbesondere das aktuell noch fehlende Verständnis für die Ursachen der hohen Emissionsdifferenzen von vergleichbaren Oberbaukonfigurationen (4.3.2) verunmöglicht eine präzise Emissionsmodellierung, welche nicht nur im statistischen Mittel über das ganze Schienennetz, sondern auch für den konkreten und situativen Streckenabschnitt valide ist. Das letzte ist eine zwingende Voraussetzung für die zuverlässige lärmrechtliche Beurteilung an einem konkreten Gebäude.

Das Beispiel der guten Übereinstimmung der Emissionen eines durchschnittlichen Güterzuges zeigt, dass sich Modellmängel auch gegenseitig kompensieren können (4.3.1). Würden die tatsächlichen Bremsbauarten mit K- und LL-Sohlen im Modell unterschieden, würde dies nicht zwingend zu einer genaueren Gesamtbeurteilung führen. Gleichzeitig kann es sein, dass in Zukunft durch einen veränderten der LL-Sohlen Anteil die Emissionsberechnung eine grössere Abweichung zum durchschnittlichen Messwert aufweisen wird. Diese Überlegungen machen klar, warum eine permanente Überprüfung und Pflege des Emissionsmodells notwendig ist. Nur so können Veränderungen des Lärmpotentials von Fahrzeugen, Oberbauten und Unterhaltsstrategien erkannt und im Modell korrekt berücksichtigt werden.

Die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Lärmveränderungen kann mit der Berücksichtigung von Verkehrsprognosen verbessert werden. Auf einigen Strecken ist bis 2035 mit Emissionsabnahmen, auf anderen mit Emissionszunahmen (insbesondere im Nachtzeitraum) zu rechnen (Abbildung 21). Da die zugrundeliegenden Verkehrskonzepte Planungsänderungen (bspw. durch veränderte

⁴ Eine vergleichbare Analyse wurde im Rahmen einer Dissertation für Fluglärmrechnungen durchgeführt. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/150149>

Mobilitätskonzepte und wirtschaftliche Entwicklungen) unterworfen sein können, sollten bei Bedarf die Emissionsprognosen aktualisiert werden.



Abbildung 21: Ein Vergleich der Emissionsprognose 2035 mit dem EK2021 im Nachtzeitraum zeigt, dass auf einigen Strecken mit Emissionsabnahmen und auf anderen mit Emissionszunahmen gerechnet werden muss. Die aktuelle Emissions- und Immissionsbelastung wird sich also in den nächsten Jahren lokal verändern.

Neben den möglichen Modellverbesserungen und dem Antizipieren voraussichtlicher Verkehrszunahmen sind Veränderungen in der lärmrechtlichen Beurteilung aufgrund der langfristigen Konsequenzen von Lärmschutzmassnahmen mit zu berücksichtigen. Ein möglicher Wegfall der K1-Pegelkorrektur würde bspw. dazu führen, dass für den grössten Teil des Streckennetzes eine erneute Sanierungspflicht entsteht (Abbildung 22).

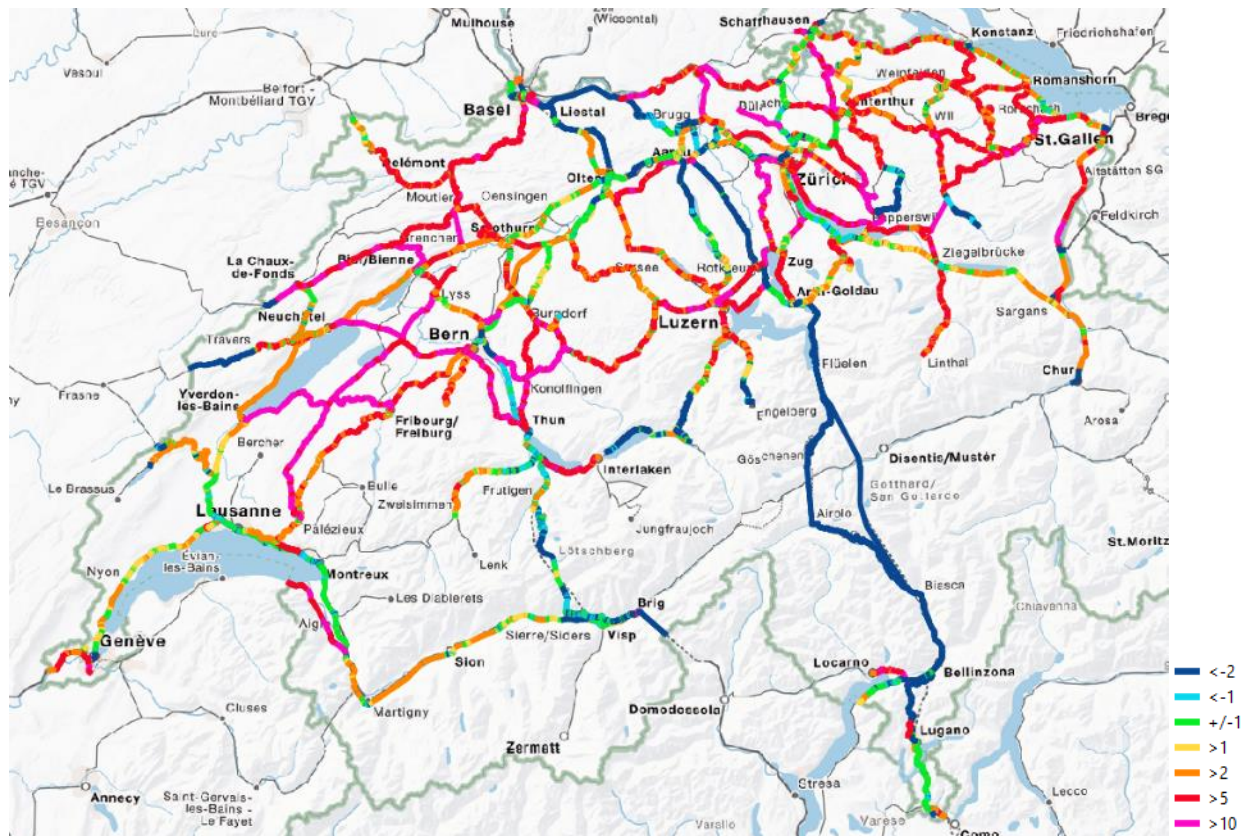


Abbildung 22: Mit einem Wegfall der K1-Pegelkorrektur würde ein sehr grosser Teil des Streckennetzes im EK2021 eine wesentliche Überschreitung der festgelegten Emissionen in der Nacht aufweisen, was fast zu einer flächendeckenden erneuten Sanierungspflicht führen würde.

8. Referenzen

- [1] Vollständige Beschreibung des sonRAIL-Emissionsmodells, Empa 5214.024934-1, 8. Februar 2022
- [2] Übersicht Oberbaueinfluss auf Lärmemissionen (Wissensstand Mai 2022), SBB Infrastruktur – System Fahrbahn
- [3] Bundesamt für Verkehr BAV Verordnung des BAV über den Eisenbahn-Netzzugang (NZV-BAV)
- [4] Scossa-Romano Enzo, Hafner Michael 2013: Angleichung der SEMIBEL Emissionsparameter an die sonRAIL Emissionsmessungen durch "curve fitting"
- [5] Forschungsprojekt IODA, Entwicklung eines statistisches Schienenrauheitsmodell, (FABI 2021.39: Schienenrauheit SBB-Netz Modellverfeinerung)
- [6] Benutzerhandbuch sonRAIL: sonRAIL Emission: Webtool des BAFU und der Empa Version 1.1.4, 01.10.2018
https://www.n-sphere.ch/sonRAIL_Webtool/sonRAIL_Benutzerhandbuch.pdf
- [7] Richtlinie: Lärmschutz bei Eisenbahnanlagen, Bundesamt für Verkehr (BAV), 20. Mai 2019
- [8] Verbesserungsliste sonRAIL langfristiger Massnahmen für den Emissionskataster 2025, SBB und Empa, 14. April 2022
- [9] MineTrack (Data Mining on Railway Track Noise Measurements), Empa im Auftrag des BAFU, 2022, (FABI 2020.36: MineTrack, Data Mining Lärmmonitoring)