

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Black Carbon-Immissionen Schweiz und Liechtenstein

Resultate 2015, 2020 und 2030

Bericht

Zürich / Bern, 25. Mai 2021

J. Heldstab, B. Schächli, INFRAS

T. Künzle, MeteoTest

Impressum

Black Carbon-Immissionen Schweiz und Liechtenstein

Resultate 2015, 2020 und 2030

Bericht

Zürich / Bern, 25. Mai 2021

B3593a-BC-Immissionen-v2.docx

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

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

Projektleitung

R. Weber, Bundesamt für Umwelt, Sektion Luftqualität

Autorinnen und Autoren

J. Heldstab, B. Schäppi, INFRAS

T. Künzle, Meteotest

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Meteotest, Fabrikstrasse 14, 3012 Bern

Tel. +41 31 307 26 26

office@meteotest.ch

Hinweis

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

1.	Auftrag	4
2.	Methode und Vorgehen	5
2.1.	Immissionskarten Schweiz und Liechtenstein PM2.5	5
2.2.	BC-Immissionen als Anteile an den PM2.5-Immissionen	5
2.3.	Vergleich der Modellwerte mit Messwerten	8
2.4.	Bevölkerungsexposition	8
3.	BC-Immissionen und Bevölkerungsexposition 2015, 2020, 2030	10
3.1.	BC-Immissionsresultate 2015, 2020 und 2030	10
3.2.	Vergleich der Modellwerte mit Messwerten	16
3.3.	Bevölkerungsexposition Schweiz 2015, 2020 und 2030	18
3.4.	Bevölkerungsexposition Liechtenstein 2015, 2020 und 2030	20
	Annex	22
A1.	Begriffsklärung BC, EC, Russ	22
A2.	BC-Emissionen Schweiz	23
A3.	BC-Immissionsmesswerte Schweiz	23
	Abbildungsverzeichnis	25
	Tabellenverzeichnis	26
	Glossar	26
	Literatur	27

1. Auftrag

Black Carbon (BC) ist ein Bestandteil der Feinstaubimmissionen in der Luft. Er ist krebserregend und gefährdet deshalb die Gesundheit. Ausserdem absorbiert er Licht und beeinflusst damit den Strahlungshaushalt sowie das Klima der Erde.

BC steht in der vorliegenden Arbeit auch für Russ oder Elemental Carbon (EC). Das ist zwar technisch-wissenschaftlich nicht ganz korrekt, die Unterschiede sind aber für die im vorliegenden Projekt erzeugten Ergebnisse nicht relevant (siehe Annex A1). Sofern keine Differenzierung nötig ist, sprechen wir deshalb im Folgenden von BC.

Die gemessenen BC-Immissionskonzentrationen lagen in den vergangenen Jahren (2013-2019) in der Schweiz und Liechtenstein zwischen $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Es gibt zwar keinen Immissionsgrenzwert für BC, EC oder Russ, die eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL) empfiehlt aber für die mittlere Exposition der Bevölkerung einen Wertebereich von 0.2 bis $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (EKL 2013). Fast alle Messwerte in der Schweiz liegen demnach aktuell über diesem Bereich.

Früherer BC-Immissionskarten sind nicht mehr aktuell (INFRAS/Meteotest 2014), neuere BC-Immissionskarten für die Schweiz und Liechtenstein stehen bisher nicht zur Verfügung. Immerhin gibt es neue Immissionskarten für Feinstaub (PM₁₀, PM_{2.5}), die im Auftrag des BAFU Ende 2020 kürzlich veröffentlicht wurden (INFRAS 2020a, 2020b), und darauf aufbauend gibt es inzwischen auch eine BC-Immissionskarte für das Gebiet der Ostschweiz (OSTLUFT 2021). Das Immissionsmodell PolluMap für PM_{2.5}/PM₁₀ kann auch für die Berechnung der BC-Immissionen konfiguriert werden (INFRAS/Meteotest 2013, 2014). Das BAFU hat deshalb die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/Meteotest damit beauftragt, mithilfe der Applikation von PolluMap gemäss OSTLUFT (2021) die BC-Immissionen für die ganze Schweiz und Liechtenstein zu modellieren, und zwar für die drei Bezugsjahre 2015, 2020 und 2030. Aus den Ergebnissen sollen auch noch die Bevölkerungsexpositionen bestimmt werden.

Die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/Meteotest hat die BC-Immissionen bereits im OSTLUFT-Auftrag faktisch auf die gesamte Schweiz ausgedehnt, weil das für den Vergleich von Modell- mit Messdaten vorteilhaft war: Dadurch standen wesentlich mehr Messdaten für den Vergleich der Modell- mit Messwerten zur Verfügung, was eine robustere Kalibrierung des Modells ermöglichte.

2. Methode und Vorgehen

2.1. Immissionskarten Schweiz und Liechtenstein PM2.5

Im Auftrag des BAFU hat die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/Meteotest das bisherige Immissionsmodell PolluMap kürzlich deutlich erweitert und damit aktualisierte Immissionen für NO₂, PM10 und PM2.5 für die Schweiz und Liechtenstein berechnet (INFRAS 2020a, 2020b). Vorgängig waren bereits die Emissionskataster für NO_x, PM10 und PM2.5 verfeinert und aktualisiert worden (Meteotest 2020). Für die Immissionsmodellierung wurden für mehrere Dutzend Emissionengruppen Ausbreitungsrechnungen durchgeführt, wobei Quelltypen (Punkt-, Linie-, Flächenquellen), Emissionshöhen (bodennahe bis sehr hohe Punktquellen) und Klimaregionen (Mittelland, Alpentäler, Übergang Mittelland/Alpentäler, symmetrisch¹) unterschieden wurden. Als Ergebnis lag für jeden PM2.5-Emissionskataster ein zugehöriger PM2.5-Immissionskataster vor.

2.2. BC-Immissionen als Anteile an den PM2.5-Immissionen

Um die BC-Immissionen zu modellieren, wird für jeden PM2.5-Immissionskataster der Anteil BC an den PM2.5-Immissionen bestimmt. Grundlage zur Bestimmung dieser Anteile sind die PM2.5- und BC-Emissionen in der EMIS-Datenbank, für den Strassenverkehr die spezifischen Modellrechnungen mit der neuesten Version des Handbuchs Emissionsfaktoren für Strassenfahrzeuge (INFRAS 2019a, 2019b). Für jeden PM2.5-Immissionskataster werden die zugrunde liegenden PM2.5- und BC-Emissionen Schweiz und Liechtenstein für alle drei Bezugsjahre herausgelesen und das Verhältnis BC zu PM2.5 berechnet. Zusätzlich wird die Annahme getroffen: Bei der Ausbreitung einer PM2.5-Emission bleibt das Verhältnis BC zu PM2.5 an der Quelle über die gesamte Ausbreitungsstrecke (10 km respektive 20 km für hohe Punktquellen) konstant.

Unter dieser Annahme braucht es zur Modellierung der BC-Immissionen keine zusätzliche Ausbreitungsrechnung, sondern jeder einzelne Immissionskataster für primäres PM2.5 kann mit seinem spezifischen BC- zu PM2.5-Verhältnis skaliert werden. Die Summe aller modellierten BC-Immissionskataster entspricht den messbaren BC-Immissionen, was den Vergleich mit den Messdaten ermöglicht und damit Hinweise auf die Modellqualität gibt. Diese Methode wurde erfolgreich auch schon bei den früheren BC-Modellierungen angewandt (INFRAS/Meteotest 2013, 2014).

BC-Emissionen entstehen zum grössten Teil in Verbrennungsprozessen, zu einem geringen Teil auch durch mechanische Prozesse (Reifenabrieb im Verkehr). In der EMIS-Datenbank des

¹ Erläuterungen siehe Kap. 3.2 im Bericht INFRAS (2020b)

BAFU sind die BC-Anteile an den PM2.5-Emissionen implementiert und stehen zur Verfügung. Für Liechtenstein stellt OSTLUFT die PM2.5-Emissionen zur Verfügung (OSTLUFT 2020).

Für die Modellierung wird angenommen, dass die gesamten BC-Emissionen als Anteil an den PM2.5-Emissionen ausgedrückt werden können, da im EMIS die BC-Emissionen im Unterschied zu den PM-Emissionen nicht nach Grösse differenziert werden. Daher wird näherungsweise angenommen, dass der Anteil der BC-Emissionen mit aerodynamischem Durchmesser $> 2.5 \mu\text{m}$ sich ebenfalls proportional zu den PM2.5 verhält. Die PM-Emissionen aus Kondensationsprozessen werden bei den PM2.5 Emissionen der betroffenen Sektoren² mitberücksichtigt.

In Tabelle 1 sind die BC-Anteile an den PM2.5-Emissionen dargestellt, die in der Immissionsmodellierung angewendet wurden. Die Anteile schwanken zwischen 0 und 68 %. Hohe Anteile kommen bei den Industriefahrzeugen/-maschinen, der Schifffahrt sowie bei den land- und forstwirtschaftlichen Maschinen vor; bei diesen Sektoren ist bis 2030 eine starke Reduktion zu erwarten (Ausnahme: landwirtschaftliche Maschinen). Beim Strassenverkehr liegt der BC-Anteil im Jahr 2015 bei 29% und im Jahr 2020 bei 20%. Im Jahr 2030 reduziert er sich auf 12%. Bei den industriellen Prozessen (Sektor 2 und 3) und bei den Feuerungen Öl und Gas liegt er in allen Jahren bei rund 4% mit marginalen Veränderungen bis 2030, bei den Feuerungen Holz und Kohle im Jahr 2015 bei 30%. Für importierte Beiträge und solche, die aufgrund der beschränkten Ausbreitungsdistanz im Immissionsmodell PolluMap zur Kompensation eingefügt werden, wird der Anteil der BC- an den PM2.5-Immissionen entsprechend den Emissionsanteilen (Emissionstotale Schweiz) angenommen³.

Die Modellierung der BC-Immissionen basiert teilweise auf aggregierten Rastern, d.h. die BC-Anteile wurden jeweils für eine Gruppe von Emissionsquellen bestimmt, die sich bezüglich der räumlichen Verteilung ähnlich sind.

² Emissionen kondensierbarer Kohlenwasserstoffe werden bei den folgenden Emissionsquellen angerechnet: Industrielle Prozesse Sektor 2, Feuerungen Holz und Kohle, Feuerungen Land- und Forstwirtschaft Holz

³ siehe auch Erläuterungen im Kap. 3.4 des Berichts INFRAS (2020b).

Tabelle 1: BC-Anteile der verschiedenen Emissionsquellen

Emissionsquelle	BC-Anteil an PM2.5-Emissionen		
	2015	2020	2030
Verkehr			
Strassenverkehr	29%	20%	12%
Rangierbahnhöfe	36%	32%	15%
Schifffahrt	53%	55%	50%
Rheinfläche	54%	57%	46%
Fährlinien	49%	48%	46%
Luftverkehr	49%	34%	34%
Haushalte			
Feuerungen Holz und Kohle	30%	27%	22%
Feuerungen Öl und Gas	4%	4%	4%
Haushalte andere (Private etc.)	7%	7%	7%
Haushalte andere (Brände etc.)	7%	7%	7%
Haushalte andere (Feuerwerk etc.)	0%	0%	0%
Industrie			
Industrielle Prozesse: Feuerungen Industrie (Wirtschaftssektor 2)	3%	3%	3%
Industrielle Prozesse: Feuerungen Dienstleistungen (Wirtschaftssektor 3) ⁴	24%	22%	20%
Baugewerbe	5%	5%	1%
Industriefahrzeuge und -maschinen	58%	54%	15%
Pistenfahrzeuge	68%	64%	15%
Land- und Forstwirtschaft			
Landwirtschaftliche Maschinen	63%	63%	56%
Forstwirtschaftliche Maschinen	60%	42%	2%)
Feuerungen Land- und Forstwirtschaft Holz	12%	10%	11%
Abfallverbrennung Land- und Forstwirtschaft	9%	9%	9%
Übrige Immissionen			
Hintergrundimmissionen und Beiträge zur Kompensation der beschränkten Ausbreitungsdistanz *)	21%	17%	11%

BC-Anteile an den PM2.5-Emissionen in den Jahren 2015, 2020 und 2030 für die unterschiedlichen Emissionsquellen gemäss EMIS Datenbank (BAFU 2019). BC-Anteile Strassenverkehr aus INFRAS (2019b)

*) Die Anteile repräsentieren die Verhältnisse von BC- zu PM2.5- Emissionen (Schweiz total). Erläuterungen siehe Kap. 3.4 im Bericht INFRAS (2020b)

⁴ Im «Territorialbaum» von EMIS gibt es lediglich vier Hauptgruppen Verkehr, Haushalte, Industrie, Land-/Forstwirtschaft. Die Aktivitäten von Dienstleistungsbetrieben sind in dieser Festlegung unter «Industrie» aufgeführt.

2.3. Vergleich der Modellwerte mit Messwerten

Immissionsresultate 2015

Die modellierten BC-Immissionen werden mit den gemessenen jahresmittleren BC-Immissionen für das Jahr 2015 verglichen (BAFU 2021). Aus den Differenzen zwischen den Modell- und den Messdaten kann die Qualität der Ergebnisse geprüft und die Kalibration des Modells gegebenenfalls optimiert werden.

Immissionsresultate 2020 und 2030

Die neuen PM_{2.5}-Immissionskarten Schweiz und Liechtenstein des BAFU (INFRAS 2020) basieren auf Emissionsdaten für die Jahre 2015, 2020 und 2030 wie sie im Frühling 2019 in der EMIS-Datenbank implementiert waren. Die Emissionen für die Jahre 2020 und 2030 basieren auf Prognosen der Bevölkerung, des Energieverbrauchs, des Verkehrs und der Landwirtschaft, die mehrheitlich von wachsenden Aktivitätsdaten geprägt waren. Der Ausbruch der Corona-Pandemie hat im Frühling 2020 zu einem harten Lockdown geführt. Dessen gesellschaftliche und volkswirtschaftliche Auswirkungen haben Änderungen (sowohl Reduktionen als auch Zunahmen) einzelner Quellen zur Folge, die sich auch auf die jahresmittleren Immissionen 2020 niederschlagen haben. Die Immissionsergebnisse 2020 für PM_{2.5} müssen deshalb als eher zu hoch betrachtet werden, was sich unmittelbar auch auf die BC-Immissionskarte 2020 auswirkt.

2.4. Bevölkerungsexposition

Die Bevölkerungsexposition gibt Auskunft darüber, wie stark die Bevölkerung der Schadstoffbelastung ausgesetzt ist. Mit der Überlagerung der Immissionskarten mit dem Hektarraster der Einwohner (Wohnorte) werden folgende Grössen und Kennziffern berechnet:

- Histogramme mit der Angabe, welcher Anteil der Bevölkerung welchen Schadstoffkonzentrationen ausgesetzt ist,
- bevölkerungsgewichtete Mittel-, Minimal- und Maximalwerte der Exposition,
- Anteil der Bevölkerung mit einer Schadstoffbelastung über dem Richtwert der EKL.

Dabei wird angenommen, dass die Exposition mit der jahresmittleren Konzentration in der Außenluft am Wohnort der Einwohner im Jahr 2015 hinreichend gut charakterisiert wird. Es gibt auch andere Ansätze zur Bestimmung der Exposition, die versuchen, die Bewegungen und Aufenthaltsorte der Einwohner (Arbeitsplatz, Freizeit, Wohnen etc., Unterscheidung von Aufenthalt draussen und in Gebäuden) einzubeziehen. Weil PolluMap aber zeitlich mit der Jahresauflösung arbeitet, kommen solche Ansätze nicht in Betracht. In der epidemiologischen Lang-

zeitstudie SAPALDIA wird übrigens der Ansatz via Wohnorte der Einwohner seit 1991 verwendet (BAFU 2020).

In den bisherigen PolluMap-Anwendungen war die räumliche Auflösung von 1 ha kongruent mit dem Hektarraster zur Bevölkerung. Mit der feineren Auflösung von 20 m x 20 m, wie sie im aktualisierten PolluMap-Modell realisiert wurde, gibt es zusätzliche Auswertemöglichkeiten. Innerhalb von jeder Hektare gibt es neu 25 Immissionswerte (je Zelle à 20 m x 20 m). Für die folgende Auswertung werden drei Häufigkeitsverteilungen berechnet: Aus den 25 Immissionswerten von jeder Hektare wird mit der Zahl der Einwohner 2015 (Daten der Volkszählung, BFS 2019) je einmal

- das Minimum,
- der Mittelwert,
- das Maximum

benutzt, um damit die Häufigkeitsverteilung zu berechnen. Die BC-Konzentration wird dazu in Klassen von $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aufgeteilt.

Aus den Histogrammen werden anschliessend die bevölkerungsgewichteten mittleren BC-Konzentrationen und die Anteile der Bevölkerung bestimmt, deren Wohnorte BC-Immissionen über dem EKL-Richtwert ausgesetzt sind.

Alle Expositionsberechnungen werden mit dem Einwohner-Hektarraster Schweiz zum Jahr 2019 (BFS 2019) und dem analogen Hektarraster Liechtenstein (FL 2019) ausgeführt. Die beiden Hektarraster werden für alle drei Bezugsjahre verwendet, es sind keine Hektardaten vorhanden, die die räumlichen Verschiebungen der Einwohner für zukünftige Jahre bis 2030 aufzeigen respektive prognostizieren.

3. BC-Immissionen und Bevölkerungsexposition 2015, 2020, 2030

3.1. BC-Immissionsresultate 2015, 2020 und 2030

Abbildung 1 bis Abbildung 3 zeigen die modellierten BC-Immissionen 2015, 2020 und 2030. Erläuterungen zu den Ergebnissen:

2015

Die BC-Immissionen 2015 liegen in den besiedelten Gebieten bei mindestens $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und steigen bis auf über $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an exponierten Stellen stark befahrener Strassen, was auf die Bedeutung des Strassenverkehrs deutet. Im südlichen Teil des Tessins treten die höchsten Immissionen auf, dort ist ein bedeutender Eintrag aus der Po-Ebene wirksam (Details zur Modellierung siehe Kap. 3.4 im Bericht INFRAS 2020b). Auch die Kantone Genf und Basel-Stadt sind von Importen betroffen. Ein Hotspot von BC-Immissionen ist der Landesflughafen Zürich. Schliesslich sind die Immissionen auch im Wallis hoch, was mit der Kombination von relativ hohen Emissionen, Klimatologie und Topografie zu tun hat.

2020

Zwischen 2015 und 2020 sinken die BC-Emissionen und damit auch die BC-Immissionen. Das ist besonders in den grössten Städten deutlich zu erkennen und erklärt sich grösstenteils aus dem Rückgang der BC-Emissionen aus dem Strassenverkehr um ca. 43 % (Tabelle 5). Hingegen sind die Reduktionen in den Alpentälern bescheidener, weil die BC-Emissionen aus Holzfeuerungen und Landwirtschaft dort einen höheren Anteil ausmachen und dieser sich lediglich um 18 % reduziert.

Der Hotspot Flughafen Zürich ist auch 2020 noch sichtbar. Dazu ist aber zu bemerken, dass die Prognosen für Flugbewegungen und Emissionen aus der Zeit vor der Corona-Pandemie stammen. Die Statistik⁵ zeigt, dass 2020 die Flugbewegungen um 62% im Vergleich zu 2019 eingebrochen sind. Das hat zu einer bedeutenden Reduktion der BC-Emissionen und damit auch der BC-Immissionen geführt. Um wie viel, ist aber noch nicht quantifiziert und in den Modelldaten nicht umgesetzt.

2030

Zwischen 2020 und 2030 gehen die BC-Immissionen weiter zurück. Die räumlichen Unterschiede erklären sich wie bereits in der Entwicklung 2015 bis 2020 durch eine sehr deutliche

⁵ [Bewegungsstatistik - Flughafen Zürich \(flughafen-zuerich.ch\)](https://www.flughafen-zuerich.ch/bewegungsstatistik) [13.05.2021]

Abnahme der BC-Emissionen aus dem Strassenverkehr (Mittelland) und eine – relativ gesehen – schwächere Abnahme bei den Holzfeuerungen (Alpentäler). Die Entwicklung über die gesamte Periode 2015 bis 2030 kann anhand der Emissionsentwicklung verstanden werden. Siehe dazu Tabelle 5 im Annex A2. Die Emissionen des Strassenverkehrs reduzieren sich in der Periode 2015 bis 2030 gemäss INFRAS (2019a, 2019b) besonders stark von 100 % auf 33 %. Auch die Summe der Emissionen aus Holzfeuerungen (Haushalte, DL, Industrie, Landwirtschaft) und Landwirtschaft (Fahrzeuge, Maschinen, Verbrennung landwirtschaftlicher Abfälle) gehen zurück, aber weniger stark von 100 % auf 52 %. Gleichzeitig ist ihr Anteil grösser als jener des Strassenverkehrs, 2015 mehr als doppelt so hoch, 2030 sogar drei- bis viermal so hoch. Diese Entwicklungen haben räumlich unterschiedliche Konsequenzen:

- 2015 sind die vom Strassenverkehr verursachten Immissionen im Mittelland noch deutlich sichtbar und prägen die Struktur des Kartenbilds. Der Strassenverkehr emittiert zwar weniger als Landwirtschaft und Holzfeuerungen, aber er emittiert bodennah, was sich in der Immissionsmodellierung stärker auswirkt als die Holzfeuerungen, welche in grösserer Höhe emittieren. Bis 2030 können gut 300 t/a BC auf den Strassen reduziert werden. Dieser Effekt ist im Mittelland besonders stark spürbar, weil dort auch der grösste Teil der Fahrleistungen stattfindet. Der Anteil des Strassenverkehrs geht auf 20 % zurück, gemessen an den gesamten BC-Emissionen der Schweiz. Zusammen mit den Reduktionen in den übrigen Emissionsquellen führt die Entwicklung dazu, dass die BC-Immissionen im Mittelland grossflächig nur noch 30 % bis 50 % von den Werten im Jahr 2015 ausmachen.
- In den Alpentälern sind Holzfeuerungen, Landwirtschaft und nur teilweise der Strassenverkehr die wichtigsten Verursacher von BC-Emissionen. Das starke Absinken beim Verkehr und das schwächere Absinken bei Holzfeuerungen und Landwirtschaft führen zu einer weitgehenden Auflösung der linearen Strukturen in den Alpentälern und hin zu einer Betonung flächiger Strukturen. In den Alpentälern verbleiben 2030 noch 50 % bis 70 % der Immissionen aus dem Jahr 2015, der Rückgang ist dort also deutlich schwächer als im Mittelland.
- Im südlichen Tessin bleibt ein relevanter Import von BC-Immissionen bestehen, in den Kantonen Genf und Basel-Stadt zwar auch, aber in geringerem Masse.

Diese Effekte führen dazu, dass 2030 in den Alpentälern mit hohen Aktivitäten (Verkehr, Einwohner, Landwirtschaft, Industrie) die Belastungen höher sein werden als im Mittelland. Dieses Ergebnis zeigt sich in der Ost- und Zentralschweiz, im Wallis, im Berner Oberland und im Tessin. Diese Entwicklung wird auch durch die neuen PM10- und die PM2.5-Karten nahegelegt (INFRAS 2020a): Im Jahr 2030 sind die Immissionen in den grossen Bergtälern ähnlich hoch wie im Mittelland.

Hinweis zu den Immissionen 2030: Die Ausbreitungsrechnung im PolluMap-Modell unterscheidet die meteorologischen und topografischen Bedingungen zwischen Mittelland und Alpentälern (siehe INFRAS 2020b). Wo diese beiden Regionstypen aneinandertreffen wird eine Mischrechnung ausgeführt, die für möglichst stetige Übergänge sorgt. Dies wird im Fall der PM10- und der PM2.5-Immissionen effektiv auch erreicht. Im Fall der BC-Immissionen, die nur einen Bruchteil der PM10-/PM2.5-Immissionen ausmachen, werden verbleibende Unstetigkeiten relativ verstärkt, was im Fall der BC-Immissionen 2030 (Abbildung 3) in der Umgebung Näfels/Niederurnen (GL), Walenstadt (SG), Arth-Goldau (SZ), Alpnach/Stansstad (NW/OW), Villeneuve/Vouvry (VS) sichtbar ist. Es gilt aber zu beachten, dass die Immissionsklassen auf der Karte mit $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ schmal sind und selbst auffällige Farbunterschiede keine grossen Immissionssprünge bedeuten müssen.

Abbildung 1: BC-Immissionen 2015 Schweiz und Liechtenstein

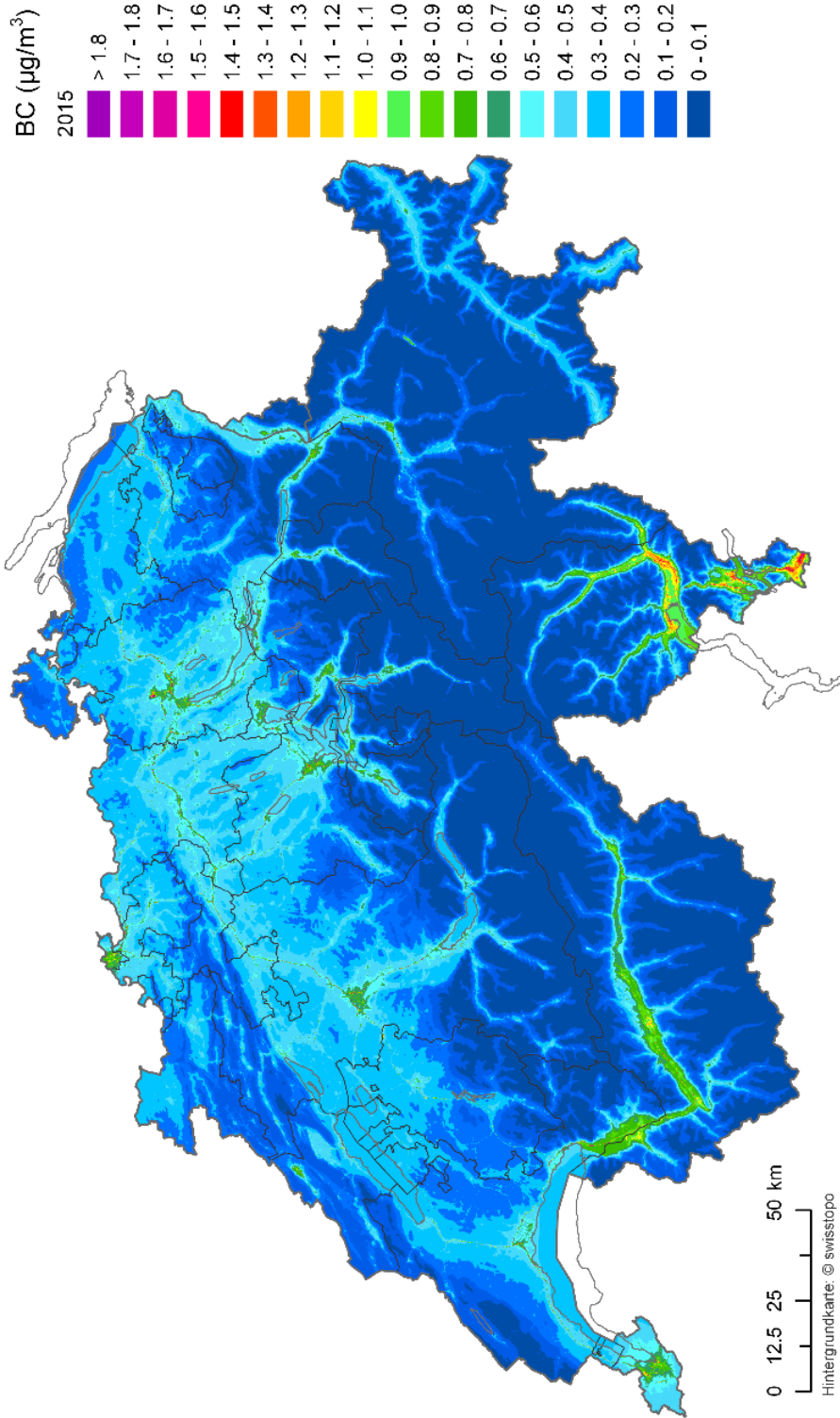


Abbildung 2: BC-Immissionen 2020 Schweiz und Liechtenstein

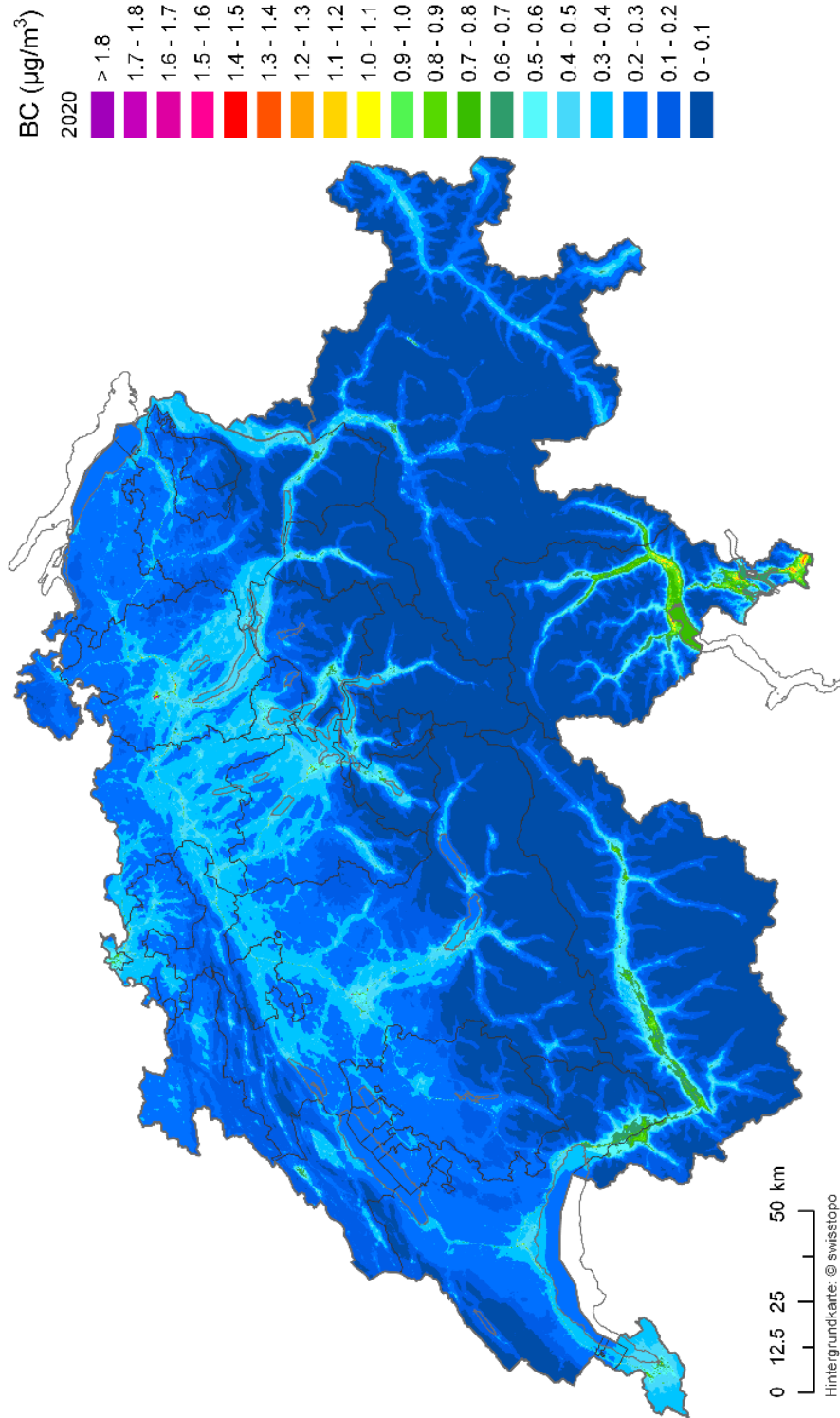
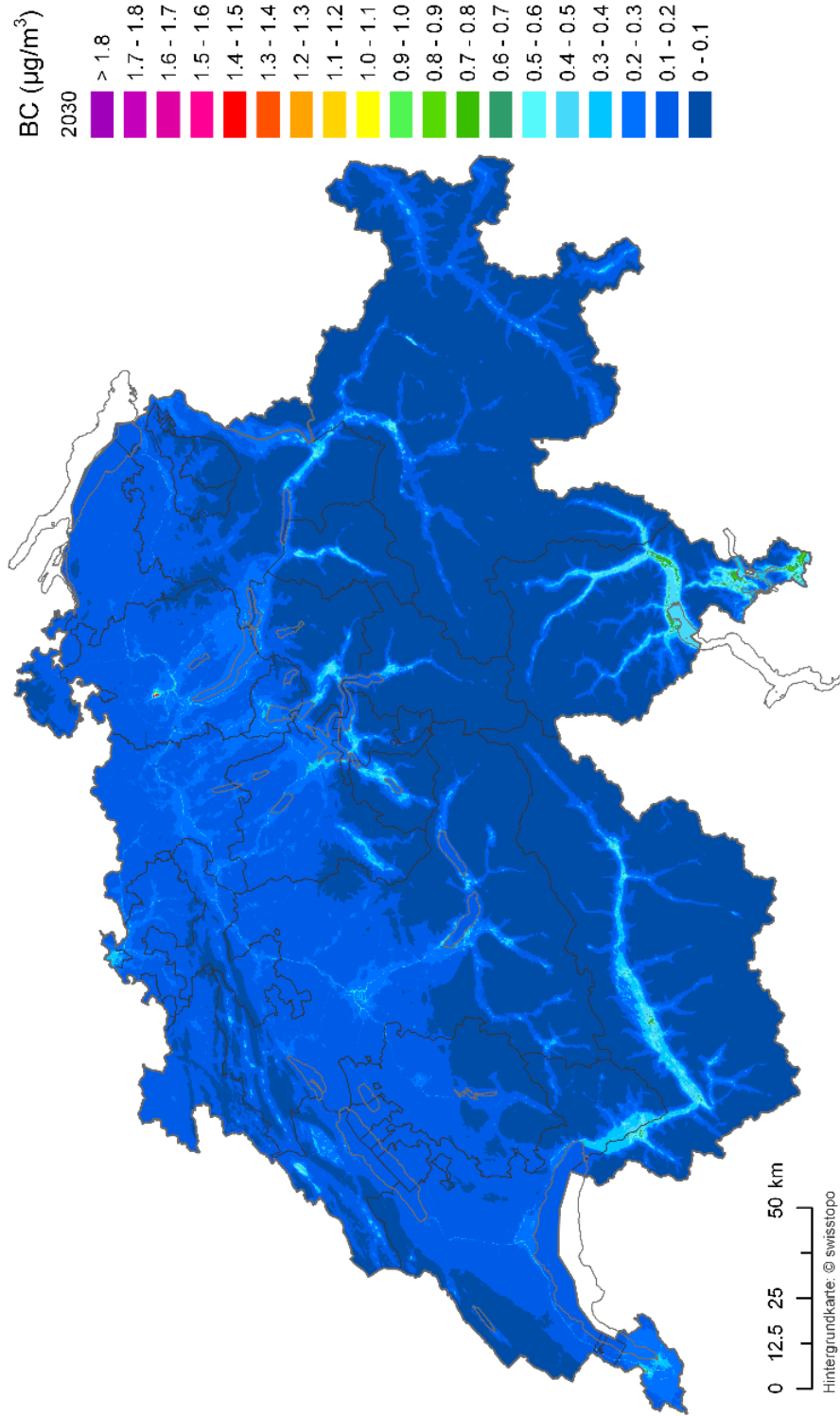
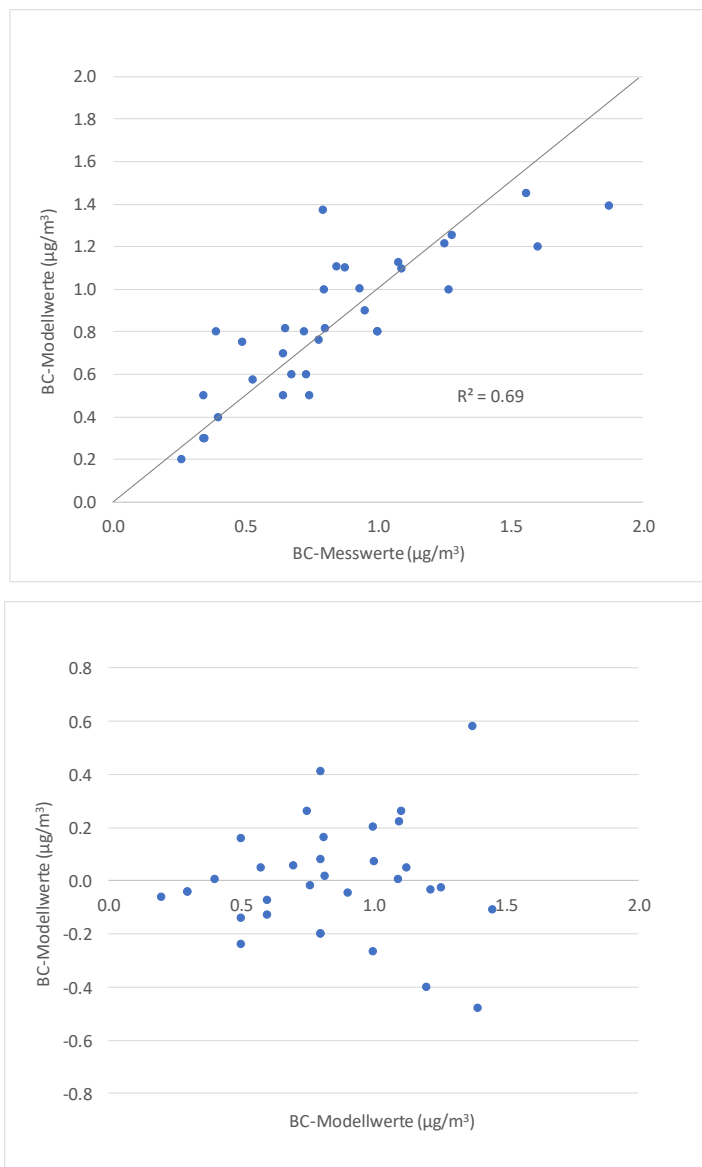


Abbildung 3: BC-Immissionen 2030 Schweiz und Liechtenstein



3.2. Vergleich der Modellwerte mit Messwerten

Abbildung 4: Oben Scatterplot für BC 2015, unten der zugehörige Residuen-Plot (Residuen vs. Modellwerte).



Für den Vergleich der BC-Modellwerte 2015 werden Messdaten von 33 Stationen in der ganzen Schweiz verwendet (BAFU 2021)

Die statistische Auswertung des Vergleichs mit Messwerten zeigt (Tabelle 2), dass das Niveau der Modellwerte im Durchschnitt mit dem Niveau der Messwerte praktisch übereinstimmt. Die Standardabweichung der Modellwerte ($0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ist etwas geringer als jene der Messwerte ($0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$), und der mittlere quadratische Fehler (Root mean square error, RMSE) liegt bei

0.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Wird der RMSE durch das Mittel der Messwerte dividiert, ergibt sich ein Mass, welches zeigt, wie weit eine Vorhersage durchschnittlich vom tatsächlichen Wert entfernt ist. Im vorliegenden Fall beträgt dieses Mass $0.21/0.84 * 100 \% = 25 \%$.

Tabelle 2: Statistische Parameter für BC-Modellwerte 2015.

Parameter	Abk.	BC-Messwerte 2013-2017	BC-Modellwerte 2015	Einheit
Median	Med	0.79	0.80	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mittelwert	M	0.84	0.84	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Standarabweichung	S	0.39	0.33	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Anzahl	N	33	33	
Korrelationskoeffizient	R		0.83	
Bestimmtheitsmass	R ²		0.69	
Root mean square error	RMSE		0.21	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Bias	B		0.003	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Normalised mean bias	NMB		0.3%	
Norm. mean std. deviation	NMSD		14%	

Definitionen für die statistischen Parameter gemäss FAIRMODE⁶ (EEA 2017)

Korrelationskoeffizient $R = \frac{\sigma_{M,O}}{\sigma_{M,M} \cdot \sigma_{O,O}}$ mit σ Standardabweichung (siehe unten)

Mittel Modellwerte $\langle M \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i$, N = Anzahl Messwerte

Mittel Messwerte $\langle O \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i$

Medianwerte: $M_{50\%}$, $O_{50\%}$

Root Mean Square Error (mittlerer quadratischer Fehler)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad M_i \text{ Modellwerte, } O_i \text{ Messwerte}$$

Mean Bias und Normalized mean bias (mittlere Verzerrung)

$$BIAS = \langle M \rangle - \langle O \rangle, \quad NMB = \frac{BIAS}{\langle O \rangle}$$

Normalized mean standard deviation (mittlere Verzerrung der Standardabweichungen)

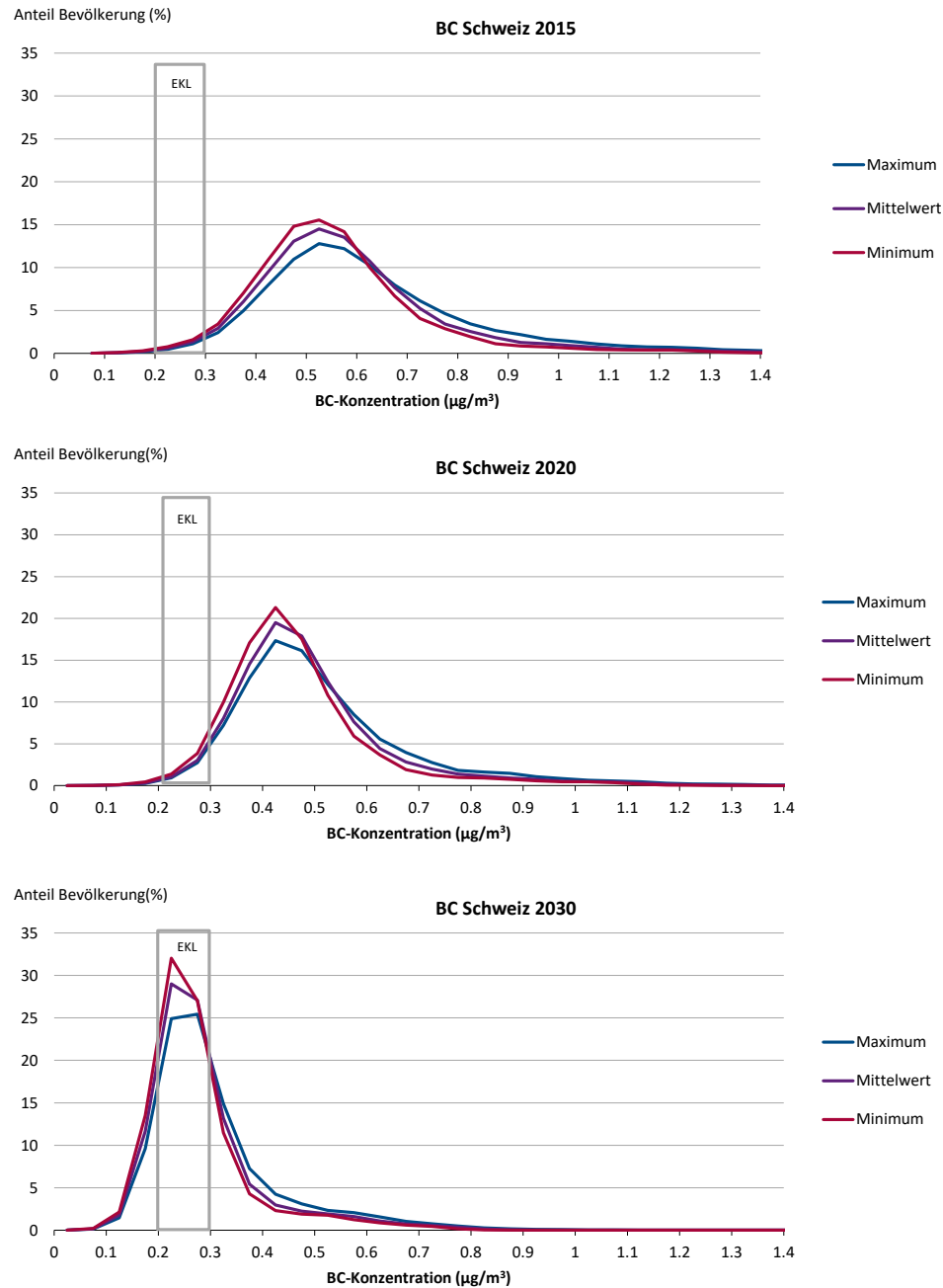
$NMSD = \frac{\sigma_M - \sigma_O}{\sigma_O}$, mit den Standardabweichungen

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - \langle M \rangle)^2} \quad \text{und} \quad \sigma_O = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \langle O \rangle)^2}$$

⁶ FAIRMODE: Forum for Air Quality Modelling, <https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/> [13.05.2021]

3.3. Bevölkerungsexposition Schweiz 2015, 2020 und 2030

Abbildung 5: Histogramme zur Bevölkerungsexposition BC-Immissionen Schweiz. Oben 2015, Mitte 2020 und unten 2030 jeweils für Minimum, Mittelwert und Maximum gerechnet. Die graue Markierung bezeichnet den von der EKL empfohlenen Bereich (medizinisch begründeter «Richtwert») für BC-Immissionen.



Minimum, Mittelwert und Maximum beziehen sich auf die Berechnungen mit dem minimalen, mittleren und maximalen Immissionswert innerhalb einer Hektare (in jeder Hektare gibt es 25 Zellen à 20 m x 20 m)

Tabelle 3: Kennwerte zur Bevölkerungsexposition Schweiz mit BC- Immissionen..

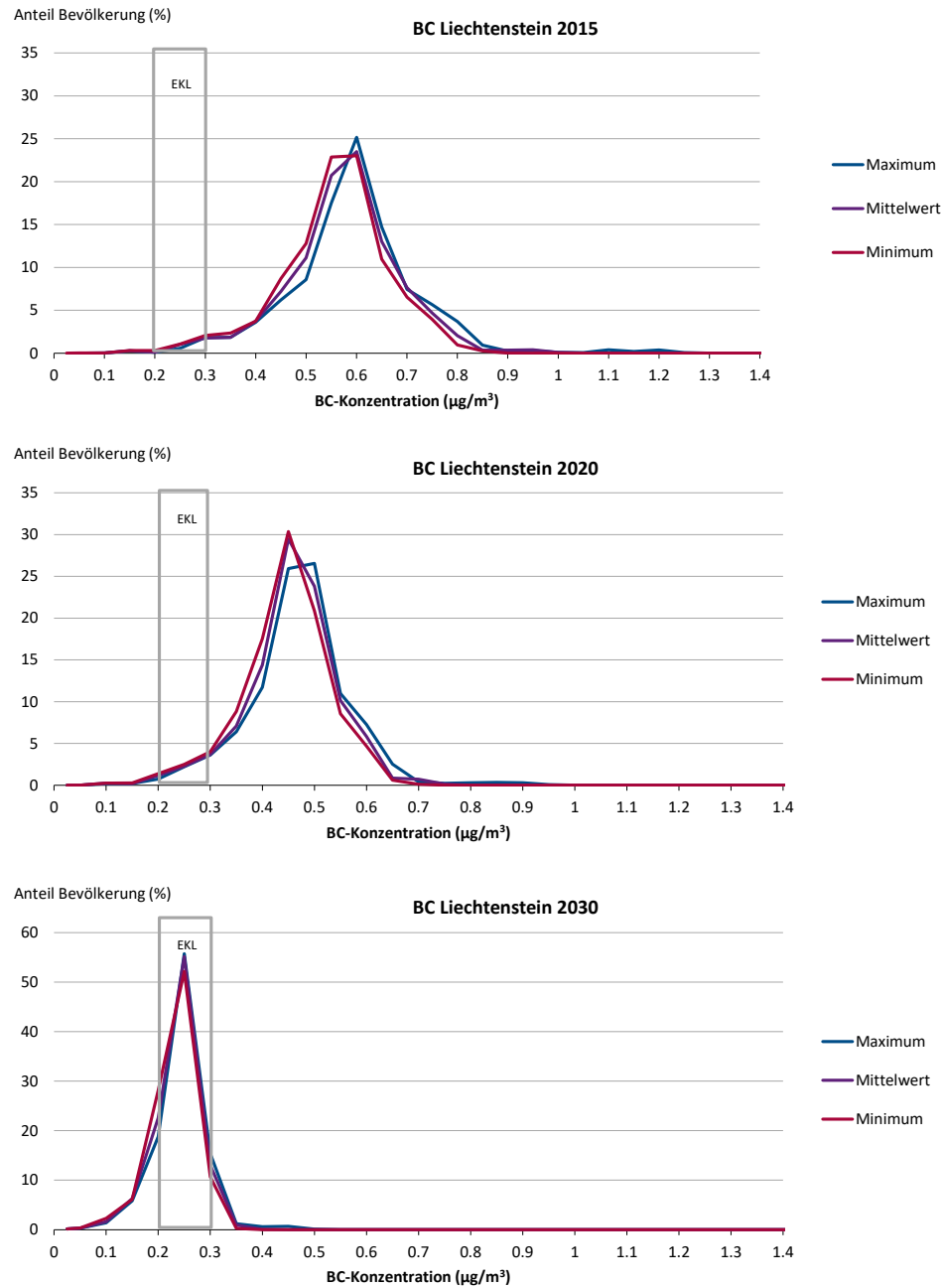
Parameter	Einheit	BC-Immission		
		2015	2020	2030
Bevölkerungsgewichtete Konzentration				
Mittelwert	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.562	0.438	0.263
Minimum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.531	0.416	0.248
Maximum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.612	0.469	0.282
Anteil der Bevölkerung > 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
Mittelwert	--	96.5%	87.5%	21.9%
Minimum	--	95.4%	84.3%	16.6%
Maximum	--	96.9%	88.8%	28.4%
Anteil der Bevölkerung > 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
Mittelwert	--	99.4%	98.6%	73.2%
Minimum	--	99.2%	98.1%	66.5%
Maximum	--	99.5%	98.7%	75.5%

Minimum, Mittelwert und Maximum beziehen sich auf die Berechnungen mit dem minimalen, mittleren und maximalen Immissionswert innerhalb einer Hektare (in jeder Hektare gibt es 25 Zellen à 20 m x 20 m)

Die bevölkerungsgewichtete BC-Immissionskonzentration sinkt in der Schweiz von 0.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahr 2015 bis auf 0.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahr 2030. Die EKL empfiehlt als Richtwert den Bereich von 0.2 bis 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die bevölkerungsgewichtete Konzentration sollte 2030 zwar den Bereich des empfohlenen Richtwerts erreichen, aber das gilt nur im Mittelwert. Aus den Histogrammen lässt sich berechnen, dass im Jahr 2030 noch 21.9 % der Einwohner einer Immission über 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ausgesetzt sind und sogar 73.2 % der Einwohner einer Immission über 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Der grosse Unterschied zwischen den beiden Schwellen 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erklärt sich aus dem Umstand, dass das Maximum der Verteilung 2030 gerade im Bereich zwischen den beiden Schwellen liegt und die Verteilung auch so schmal wird, dass mehr als die Hälfte der Modellwerte in diesem Bereich liegt. Unabhängig davon, welche Schwelle benutzt wird, sind die Immissionen 2030 so oder so noch über dem von der EKL empfohlenen Richtwert.

3.4. Bevölkerungsexposition Liechtenstein 2015, 2020 und 2030

Abbildung 6: Histogramme zur Bevölkerungsexposition Liechtenstein BC-Immissionen. Oben 2015, Mitte 2020 und unten 2030 jeweils für Minimum, Mittelwert und Maximum gerechnet. Die graue Markierung bezeichnet den von der EKL empfohlenen Bereich (medizinisch begründeter «Richtwert») für BC-Immissionen.



Minimum, Mittelwert und Maximum beziehen sich auf die Berechnungen mit dem minimalen, mittleren und maximalen Immissionswert innerhalb einer Hektare (in jeder Hektare gibt es 25 Zellen à 20 m x 20 m)

Tabelle 4: Kennwerte zur Bevölkerungsexposition Liechtenstein mit BC-Immissionen.

Parameter	Einheit	BC		
		2015	2020	2030
Bevölkerungsgewichtete Konzentration				
Mittelwert	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.574	0.456	0.236
Minimum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.555	0.442	0.228
Maximum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.591	0.468	0.241
Anteil der Bevölkerung > 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
Mittelwert	--	97.7%	94.9%	4.6%
Minimum	--	97.0%	93.4%	1.9%
Maximum	--	98.1%	95.1%	7.0%
Anteil der Bevölkerung > 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
Mittelwert	--	99.6%	99.2%	85.7%
Minimum	--	99.6%	98.9%	82.7%
Maximum	--	99.6%	99.3%	85.9%

Minimum, Mittelwert und Maximum beziehen sich auf die Berechnungen mit dem minimalen, mittleren und maximalen Immissionswert innerhalb einer Hektare (in jeder Hektare gibt es 25 Zellen à 20 m x 20 m)

Die bevölkerungsgewichtete BC-Immissionskonzentration sinkt in Liechtenstein von 0.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahr 2015 bis auf 0.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahr 2030 und liegt damit ähnlich hoch wie in der Schweiz, 2015/2020 leicht höher, 2030 leicht tiefer. Der Anteil der Einwohner, die einer Immission über 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ausgesetzt sind, sinkt von 2015 mit fast 98 % auf knapp 5 % im Jahr 2030, ist allerdings noch fast 86 % über der Schwelle 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Der grosse Unterschied zwischen den beiden Schwellen 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erklärt sich wie in der Schweiz damit, dass das Maximum der Verteilung 2030 gerade im Bereich zwischen den beiden Schwellen liegt und die Verteilung auch so schmal wird, dass sogar 80 % der Modellwerte in diesem Bereich liegt. Unabhängig davon, welche Schwelle benutzt wird, sind die Immissionen 2030 so oder so noch über dem von der EKL empfohlenen Richtwert.

Annex

A1. Begriffsklärung BC, EC, Russ

Unter dem englischen Begriff „black carbon“ (BC) versteht man einen Bestandteil des Feinstaubes, und zwar der lichtabsorbierende (und deshalb schwarze) Kohlenstoff. Gelegentlich wird auch vom „elementaren“ (hitzebeständigen und graphitähnlichen) Kohlenstoff (EC) oder von Russ gesprochen. Alle drei Begriffe bezeichnen keine eindeutig definierten Messgrössen, Messwerte von EC und BC hängen vielmehr von der angewendeten Messmethode ab. Im Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) werden seit 2007 robuste und auf eine europaweit akzeptierte Referenz bezogene Messungen zur Russbelastung an acht ausgewählten Standorten durchgeführt. Bei den Messungen wird Russ grösstenteils mit kontinuierlichen optischen Methoden als BC gemessen. Durch regelmässige Vergleichsmessungen (jeden zwölften Tag) mit thermisch-optischen EC-Messungen (gemäss EUSAAR-2 Protokoll) wird der Zusammenhang zwischen den beiden Messmethoden an allen Standorten bestimmt. Basierend auf diesen Vergleichsmessungen werden die kontinuierlich gemessenen BC-Werte umgerechnet, so dass die ausgewiesenen Messwerte konsistent mit thermisch-optisch gemessenem EC sind. Gemäss Empa (2014) werden die im NABEL bestimmten BC-Werte als "equivalent BC" (EBC), angelehnt an die international vorgeschlagene Terminologie, bzw. äquivalenter schwarzer Kohlenstoff bezeichnet, siehe auch Petzold et al. (2013). Weitere Ausführungen zu den Messverfahren finden sich im Bericht Empa (2014).

Für die hier vorliegende Studie zur Modellierung der BC-Immissionen wird grundsätzlich lediglich von BC gesprochen. Gemeint ist damit die aufgrund der Messverfahren definierten Begriffe von BC und EC und dem daraus abgeleiteten EBC.

A2. BC-Emissionen Schweiz

Für die Modellierung der BC-Immissionen braucht es nur die PM2.5-Immissionen und die Emissionsanteile der BC- an den PM2.5-Emissionen, die BC-Emissionen selbst aber nicht. Für die Interpretation der Immissionsentwicklung 2015 – 2030 ist es aber wichtig, die BC-Emissionen zu kennen. In Tabelle 5 sind die BC-Emissionen für die Schweiz dargestellt. Die Zahlen entsprechen dem Stand der EMIS-Datenbank Mai 2019 (BAFU 2019) mit Ausnahme des Strassenverkehrs, für die aktualisierte Zahlen auf der Basis des Handbuchs Emissionsfaktoren Version 4.1 (INFRAS 2019a) verwendet werden konnten (INFRAS 2019b). Diese Datenbasis entspricht genau jener wie sie für die Immissionsmodellierung PM10 und PM2.5 verwendet wurde (INFRAS 2020a, 2020b).

Tabelle 5: BC-Emissionen Schweiz

Hauptgruppe	Spezifikation	BC-Emissionen Schweiz		
		2015 t/a	2020 t/a	2030 t/a
Verkehr	Flugverkehr	34.0	22.1	22.4
	Strassenverkehr	451.2	255.3	147.3
	Schieneverkehr	1.3	0.9	0.2
	Schiffsverkehr	20.6	14.6	6.8
Haushalte	Holzfeuerungen	588.5	484.7	293.0
	Öl- und Gasfeuerungen	0.9	0.8	0.5
	andere	49.5	45.3	42.4
Industrie	Feuerungen und Prozesse Industrie Holz/Kohle	28.2	26.3	22.4
	Feuerungen und Prozesse Industrie übr. Energieträger	7.5	7.1	8.4
	Feuerungen DL Holz/Kohle	120.7	91.0	37.2
	Feuerungen DL übr. Energieträger	0.5	0.5	0.5
	Baumaschinen, Industriefahrzeuge	45.9	29.4	3.6
Land-/Forstwirtschaft	Feuerungen	4.6	4.7	1.9
	Fahrzeuge, Maschinen	211.9	236.8	138.7
	Verbrennung land-/forstw. Abfälle	7.6	7.2	7.2
Summe (ohne Militär)		1573.1	1226.7	732.7
		100%	78%	47%
<i>Militär</i>		3.8	3.4	3.3

Die Emissionen des Militärs wurden wegen fehlender Kenntnis für die Lokalisierung in der Immissionsmodellierung weder in der vorliegenden Untersuchung noch in der PM10-/PM2.5-Modellierung Schweiz (INFRAS 2020a, 2020b) berücksichtigt.

Datenquelle: Strassenverkehr INFRAS (2019b), übrige Emittenten BAFU (2019)

A3. BC-Immissionsmesswerte Schweiz

Für den Vergleich der Modellwerte 2015 mit Messwerten wurden die Messdaten von nationalen, kantonalen und kommunalen Messstationen für Luftschadstoffe verwendet, zusammengestellt durch die Schweizerische Gesellschaft der Lufthygiene-Fachleute (Cerc'l'Air) und das BAFU (2021).

Tabelle 6: Mess- und Modellwerte der BC-Immissionen.

Stationsname	Kt.	BC-Messwerte					Mittel	Modell	Diff.	
		2013	2014	2015	2016	2017				2015
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$				$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Bern-Bollwerk	BE	2.03	1.76	1.59	1.4	1.23	1.60	1.20	-0.40	
Basel-Binningen	BL	0.57	0.54	0.54	0.51	0.48	0.53	0.58	0.05	
Muttenz-Hard-A2	BL	1.6	1.6	1.5	1.5	1.6	1.56	1.45	-0.11	
Basel-St-Johann	BS			0.8			0.80	0.82	0.02	
Chur-A13	GR	1.07	0.91	0.89	0.7	0.65	0.84	1.11	0.26	
Chur-RhB	GR	0.49	0.38	0.43	0.37	0.28	0.39	0.80	0.41	
Rothenbrunnen-A13	GR	0.84	0.77		0.69	0.77	0.73	0.60	-0.13	
San-Vittore	GR	1.26	1.2	1.44	1.39	1.04	1.27	1.00	-0.27	
Ebikon-Sedel	LU		0.5	0.5	0.46	0.5	0.49	0.75	0.26	
Luzern-Moosstrasse	LU	1.8	1.3	1.2	1.05	0.9	1.25	1.22	-0.03	
Reiden-A2	LU		1.1	1.1	0.8	0.8	1.00	0.80	-0.20	
Rapperswil-Tüchelweier	SG	0.74		0.65		0.62	0.65	0.82	0.17	
St-Gallen-Blumenbergplatz	SG		1.04	0.86	0.95	0.69	0.95	0.90	-0.05	
St-Gallen-Stuelegg	SG		0.36	0.34	0.33	0.27	0.34	0.30	-0.04	
Neuhausen-Schaffhauserstrasse	SH			0.93		0.95	0.93	1.00	0.07	
Härkingen-A1	SO	1.29	1.13	1.08	0.95	0.93	1.08	1.13	0.05	
Rigi-Seebodenalp	SZ		0.22	0.28	0.28	0.24	0.26	0.20	-0.06	
Schwyz	SZ				0.72		0.72	0.80	0.08	
Frauenfeld-Bahnhofstrasse	TG	0.82	0.84	0.7	0.76	0.58	0.74	0.50	-0.24	
Lugano-Università	TI	0.87	0.82	0.9	0.72	0.66	0.79	1.38	0.58	
Magadino-Cadenazzo	TI	0.82	0.79	1.08	0.91	0.78	0.88	1.10	0.22	
Erstfeld-A2	UR		1	1.1	0.9	0.8	1.00	0.80	-0.20	
Payerne	VD	0.42	0.41	0.4	0.38	0.37	0.40	0.40	0.00	
Massongex	VS	1.43	0.98	0.59	0.45	0.54	0.80	1.00	0.20	
Dübendorf-EMPA	ZH	0.74	0.72	0.7	0.63	0.58	0.67	0.60	-0.07	
Opfikon-Balsberg	ZH	1.07	1.23	0.95			1.09	1.10	0.00	
Wald-Höhenklinik	ZH	0.39		0.34		0.32	0.34	0.30	-0.04	
Winterthur-Veltheim	ZH				0.64	0.44	0.64	0.50	-0.14	
Zürich-Heubeeribüel	ZH			0.34			0.34	0.50	0.16	
Zürich-Kaserne	ZH	0.75	0.67	0.66	0.58	0.55	0.64	0.70	0.06	
Zürich-Rosengartenstrasse	ZH		2.11	1.82	1.69		1.87	1.40	-0.48	
Zürich-Schimmelstrasse	ZH	1.67	1.48	1.24	1.12		1.28	1.26	-0.03	
Zürich-Stampfenbachstrasse	ZH	0.97	0.85	0.76	0.72		0.78	0.76	-0.02	
<i>Mittelwert</i>							<i>0.84</i>	<i>0.84</i>	<i>0.00</i>	

Regel für die Berechnung des Mittels: siehe Text unten

Quelle: BAFU (2021)

Messdaten: Mittelwerte 2013 bis 2017

Die Messreihen von BC in den Jahren 2013 bis 2017 weisen Schwankungen auf, die sich nicht auf besondere Emissionsentwicklungen zurückführen lassen, sondern die durch veränderliche

Meteo-Bedingungen verursacht wurden. Es empfiehlt sich deshalb, die Modellwerte 2015, die auf mittleren Meteo-Bedingungen (Meteojahr 2005) beruhen, nicht ausschliesslich mit den Messwerten 2015 zu vergleichen, sondern Mittelwerte über einige wenige Jahre zu verwenden.

An Messstationen, die 2013 bis 2017 durchgehend gemessen und gültige Jahresmittelwerte generiert haben, wird der (arithmetische) Mittelwert aus den fünf Jahresmittelwerten berechnet und dieser Werte wird mit dem Modellwert 2015 verglichen. Dadurch wird der Vergleich statistisch robuster. Bei Messstationen, die zwischen 2013 und 2017 zwar Messwerte generierten, aber nicht für alle fünf Jahre, wird der Mittelwert über die verfügbaren Messwerte aus den drei Jahren 2014, 2015 und 2016 gebildet («Mittel») und für den Vergleich mit den Modellwerten 2015 benutzt. Beispiele:

- Messwerte liegen vor für 2013, 2014, 2015 => «Mittel» = Mittelwert von 2014 und 2015,
- Messwerte liegen vor für 2013, 2014 => «Mittel» = Messwert 2014,
- Messwerte liegen vor für 2014, 2016, 2017 => «Mittel» = Mittelwert von 2014 und 2016,
- Messwerte liegen vor für 2014, 2015, 2016, 2017 => «Mittel» = Mittelwert von 2014, 2015, 2016.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: BC-Immissionen 2015 Schweiz und Liechtenstein _____	13
Abbildung 2: BC-Immissionen 2020 Schweiz und Liechtenstein _____	14
Abbildung 3: BC-Immissionen 2030 Schweiz und Liechtenstein _____	15
Abbildung 4: Oben Scatterplot für BC 2015, unten der zugehörige Residuen-Plot (Residuen vs. Modellwerte). _____	16
Abbildung 5: Histogramme zur Bevölkerungsexposition BC-Immissionen Schweiz. Oben 2015, Mitte 2020 und unten 2030 jeweils für Minimum, Mittelwert und Maximum gerechnet. Die graue Markierung bezeichnet den von der EKL empfohlenen Bereich (medizinisch begründeter «Richtwert») für BC-Immissionen. _____	18
Abbildung 6: Histogramme zur Bevölkerungsexposition Liechtenstein BC-Immissionen. Oben 2015, Mitte 2020 und unten 2030 jeweils für Minimum, Mittelwert und Maximum gerechnet. Die graue Markierung bezeichnet den von der EKL empfohlenen Bereich (medizinisch begründeter «Richtwert») für BC-Immissionen. _____	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: BC-Anteile der verschiedenen Emissionsquellen	7
Tabelle 2: Statistische Parameter für BC-Modellwerte 2015.	17
Tabelle 3: Kennwerte zur Bevölkerungsexposition Schweiz mit BC-Immissionen.	19
Tabelle 4: Kennwerte zur Bevölkerungsexposition Liechtenstein mit BC-Immissionen.	21
Tabelle 5: BC-Emissionen Schweiz	23
Tabelle 6: Mess- und Modellwerte der BC-Immissionen.	24

Glossar

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BC	Black Carbon
BFS	Bundesamt für Statistik
Bias	Differenz zwischen dem Mittel der Mess- und dem Mittel der Modellwerte
EC	Elemental Carbon
EKL	Eidgenössische Kommission für Lufthygiene
EMIS	Emissionsinformationssystem Schweiz (BAFU)
LRV	Luftreinhalte-Verordnung des Bundesrats, SR 814.318.142.1
μm	Mikrometer (1 Millionstel Meter)
$\mu\text{m}/\text{m}^3$	Mikrogramm pro Kubikmeter
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
PM2.5, PM10	Feinstaub mit aerodynamischem Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$ resp. $< 2.5 \mu\text{m}$)
R, R^2	Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmass
RMSE	Root mean square error, mittlerer quadratischer Fehler
Russ	unerwünschte, feste Nebenprodukte von Verbrennungsprozessen (wird hier identisch mit BC und EC verwendet)

Literatur

- BAFU 2019:** Luftschatstoff- und THG-Emissionsinventar, Daten Submission 2019 (Auszug EMIS-Datenbank). E-Mail von S. Schenker (BAFU) an alle Luftreinhaltefachstellen der Schweiz inkl. INFRAS und Meteotest. 06.05.2019.
- BAFU 2020:** SAPALDIA – Swiss Cohort Study on Air Pollution and Lung and Heart Diseases in Adults. Hrg. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Faktenblatt April 2020.
https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/sapaldia_faktenblatt.pdf.download.pdf/sapaldia_faktenblatt.pdf [17.05.2021]
- BAFU 2021:** Jahreswerte aller Stationen der Schweiz. Messdaten von nationalen, kantonalen und kommunalen Messstationen für Luftschatstoffe, zusammengestellt durch die Schweizerische Gesellschaft der Lufthygiene-Fachleute (CercI'Air) und das BAFU.
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/luftbelastung--historische-daten/jahreswerte-aller-stationen-der-schweiz.html> [13.05.2021]
- BFS 2019:** Bevölkerung und Haushalte ab 2010 (System der neuen Volkszählung)
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/dienstleistungen/geostat/geodaten-bundesstatistik/gebaeude-wohnungen-haushalte-personen/bevoelkerung-haushalte-ab-2010.html> [25.11.2020]
- EEA 2017:** Guidance Document on Modelling Quality Objectives and Benchmarking. S. Janssen, C. Guerreiro, P. Viaene, E. Georgieva, Ph. Thunis. FAIRMODE, Feb. 2017.
https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/document/fairmode/WG1/Guidance_MQO_Bench_vs2.1.pdf [25.05.2021]
- EKL 2013:** Feinstaub in der Schweiz 2013. Statusbericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene.
<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/34121.pdf> [11.12.2020]
- Empa 2014:** Russbelastung in der Schweiz. Messungen im Rahmen des NABEL. Messbericht 2013. Abteilung Luftfremdstoffe/Umwelttechnik, Empa, Dübendorf, 2014.
- FL 2019:** Fürstentum Liechtenstein, Amt für Statistik: Vertrag über die Nutzung von Einzeldaten aus der Zentralen Personenverwaltung. Vaduz 26. Sept. 2019
- INFRAS 2019a:** Handbuch Emissionsfaktoren für Strassenfahrzeuge, Version 4.1. INFRAS im Auftrag von BAFU/Schweiz; Umweltbundesamt Dessau/Germany; Umweltbundesamt Wien/Austria; Swedish Road Administration, ADEME/France; SFT/Norway. Bern.
<http://www.hbefa.net/e/index.html> [25.11.2020]
- INFRAS 2019b:** Emissionen des Strassenverkehrs Schweiz. E-Mail von B. Notter, INFRAS an T. Künzle, Meteotest vom 28.11.2019.

- INFRAS 2020a:** Immissionen Schweiz und Liechtenstein. Modellresultate NO₂, PM10, PM2.5 für 2015, 2020, 2030. Schlussbericht zu den Resultaten. INFRAS/Meteotest im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU. Zürich/Bern, Dezember 2020.
- INFRAS 2020b:** NO₂-, PM10- und PM2.5-Immissionen Schweiz / Liechtenstein. Aktualisierung des PolluMap-Modells für 2015, 2020 und 2030. Technischer Bericht. INFRAS/Meteotest im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU. Zürich/Bern, Dezember 2020.
- INFRAS/Meteotest 2013:** Feinstaubimmissionen Ostschweiz/Liechtenstein. Modell und Resultate 2005-2020. INFRAS/Meteotest im Auftrag OSTLUFT. Zürich/Bern, 15. Feb. 2013.
- INFRAS/Meteotest 2014:** BC-Immissionen Schweiz. Modellierung 2010 und 2020. INFRAS/Meteotest im Auftrag des BAFU. Zürich/Bern, 8. Sept. 2014.
- Meteotest 2020:** Emissionen Schweiz. Aufbereitung von Emissionskatastern für die Luftschadstoffe NO_x, PM10 und PM2.5 der Jahre 2015, 2020 und 2030. Meteotest/INFRAS im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU. Bern/Zürich, Dezember 2020.
- OSTLUFT 2020:** E-Mail von G.-M. Alt (AWEL) an T. Künzle (Meteotest), J Heldstab (INFRAS), B. Schäppi (INFRAS), 9. Juli 2020.
- OSTLUFT 2021:** Immissionsmodell für Black Carbon. Resultate 2015, 2020 und 2030. Technischer Bericht. J. Heldstab, B. Schäppi, INFRAS T. Künzle, Meteotest. INFRAS/Meteotest im Auftrag von OSTLUFT. Zürich/Bern, 13. Januar 2021.
- Petzold et al. 2013:** Petzold, A., J.A. Ogren, M. Fiebig, P. Laj, S.-M. Li, U. Baltensperger, T. Holzner-Popp, S. Kinne, G. Pappalardo, N. Sugimoto, C. Wehrli, A. Wiedensohler, and X.-Y. Zhang. Recommendations for the interpretation of "black carbon" measurements. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 13:9485-9517, 2013.