

OSTLUFT

Immissionsmodell für Black Carbon Resultate 2015, 2020 und 2030

Technischer Bericht
Zürich/Bern, 16. September 2021

J. Heldstab, B. Schächli, INFRAS
T. Künzle, Meteoest

Impressum

Immissionsmodell für Black Carbon

Resultate 2015, 2020 und 2030

Technischer Bericht

Zürich/Bern, 16. September 2021

B3321a-BC-Immissionen-OSTLUFT

Auftraggeber

OSTLUFT

OSTLUFT Geschäftsleitung, c/o Amt für Umwelt Kt. SG, Lämmli brunnenstr. 54, 9001 St. Gallen

Projektleitung

G.-M. Alt, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Kanton Zürich

Autorinnen und Autoren

J. Heldstab, B. Schächli, INFRAS

T. Künzle, Meteotest

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Meteotest, Fabrikstrasse 14, 3012 Bern

Tel. +41 307 26 26

office@meteotest.ch

Inhalt

1.	Auftrag	4
2.	Methode und Vorgehen	4
2.1.	Immissionskarten Schweiz PM2.5	4
2.2.	BC-Immissionen als Anteile an den PM2.5-Immissionen	5
2.3.	Vergleich der Modellwerte mit Messwerten	7
2.4.	Bevölkerungsexposition	8
3.	BC-Immissionen im OSTLUFT-Gebiet 2015, 2020, 2030	9
3.1.	BC-Immissionsresultate 2015, 2020 und 2030	9
3.2.	Vergleich der Modellwerte mit Messwerten	14
3.3.	Bevölkerungsexposition 2015, 2020 und 2030	16
	Annex	18
A1.	Begriffsklärung BC, EC, Russ	18
A2.	BC-Emissionen Schweiz	19
	Abbildungsverzeichnis	20
	Tabellenverzeichnis	20
	Glossar	20
	Literatur	21

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 im OSTLUFT-Gebiet lagen in den vergangenen Jahren (2013-2018) zwischen $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Es gibt in der Schweiz 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 $0.2\text{-}0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (EKL 2013). Fast alle Messwerte im OSTLUFT Gebiet liegen demnach aktuell über diesem Bereich.

Aktuelle BC-Immissionskarten stehen zurzeit nicht zur Verfügung. Immerhin gibt es neue Immissionskarten für Feinstaub (PM₁₀, PM_{2.5}) für die ganze Schweiz, die im Auftrag des BAFU Ende 2020 veröffentlicht worden sind (INFRAS 2020a, 2020b). Das dafür benutzte Modell PolluMap wurde schon früher dazu eingesetzt, auch BC-Immissionen zu berechnen (INFRAS/Meteotest 2013, 2014). Die damaligen Ergebnisse sind inzwischen nicht mehr aktuell, weil die verwendeten Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten mehrfach aktualisiert und die räumliche Auflösung verfeinert wurden. OSTLUFT hat deshalb die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/Meteotest damit beauftragt, mithilfe der neuen PolluMap-Version für Feinstaub die BC-Immissionen für das OSTLUFT-Gebiet zu modellieren, und zwar für die drei Bezugsjahre 2015, 2020 und 2030 und die Bevölkerungsexposition im OSTLUFT-Gebiet zu bestimmen. Die Arbeitsgemeinschaft hat dazu bemerkt, dass sie die BC-Immissionen mit PolluMap für die gesamte Schweiz modellieren werde, was für den Vergleich von Modell- mit Messdaten vorteilhaft sei, weil dadurch mehr Messdaten für den Vergleich zur Verfügung stünden.

2. Methode und Vorgehen

2.1. Immissionskarten Schweiz PM_{2.5}

Im Auftrag des BAFU hat die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/Meteotest das bisherige Immissionsmodell PolluMap deutlich erweitert und damit aktualisierte Immissionen für NO₂, PM₁₀ und PM_{2.5} 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 Emittentengruppen 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 jeden PM2.5-Immissionskataster werden die zugrunde liegenden PM2.5- und BC-Emissionen Schweiz für alle drei Bezugsjahre herausgelesen und das Verhältnis BC zu PM2.5 berechnet. Es wird nun folgende 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 PM2.5-Immissionskataster kann mit seinem spezifischen BC- zu PM2.5-Verhältnis skaliert werden. Die Summe aller modellierten BC-Immissionskataster entspricht den messbaren BC-Immissionen. 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 BAFU sind die BC-Anteile an den PM2.5-Emissionen implementiert und stehen zur Verfügung.

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 > 2.5 µm sich ebenfalls proportional zu den PM2.5 verhält. Die PM-Emissionen aus Kondensationsprozessen (PMkond) 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 höchsten Anteile werden bei den Pistenfahrzeugen

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

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

beobachtet (68% im Jahr 2015). Hohe Anteile sind auch bei den Industriefahrzeugen/-maschinen, der Schifffahrt sowie bei den land- und forstwirtschaftlichen Maschinen zu verzeichnen (rund 60% im Jahr 2015). Bei diesen Sektoren ist bis 2030 eine starke Reduktion zu erwarten, mit Ausnahme der landwirtschaftlichen Maschinen liegen die Anteile im Jahr 2030 unter 15%.

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%. Bei den Feuerungen Holz und Kohle liegt der BC-Anteil im Jahr 2015 bei 30% und er reduziert sich auf 27% im Jahr 2030.

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) ³	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%

³ 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.

Emissionsquelle	BC-Anteil an PM2.5-Emissionen		
	2015	2020	2030
Feuerungen Land- und Forstwirtschaft Holz	12%	10%	11%
Abfallverbrennung Land- und Forstwirtschaft	9%	9%	9%

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 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 verhalten.

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 2020a). Aus den Differenzen zwischen den Modell- und den Messdaten kann die Qualität der Ergebnisse geprüft werden. Weil PolluMap die PM2.5-Immissionen für die gesamte Schweiz modelliert hat, wurde die BC-Modellierung ebenfalls für die ganze Schweiz durchgeführt. Damit stehen für den Vergleich mit den Messwerten zahlreiche weitere Messorte ausserhalb des OSTLUFT-Gebiets zur Verfügung, was für die Kalibrierung des Modells und für die Beurteilung der Modellqualität vorteilhaft ist.

Immissionsresultate 2020 und 2030

Die neuen PM2.5-Immissionskarten Schweiz 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, also vor dem Ausbruch der Corona-Pandemie. 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 zu einem Lockdown geführt. Dessen gesellschaftliche und volkswirtschaftliche Auswirkungen haben Emissionsreduktionen einzelner Quellen zur Folge, die sich vermutlich auch auf die **jahresmittleren** Immissionen 2020 niederschlagen werden. Die Immissionsergebnisse 2020 für PM2.5 dürften deshalb als eher zu hoch betrachtet werden, was sich unmittelbar auch auf die BC-Immissionskarte OSTLUFT 2020 auswirkt. Quantitativ kann derzeit allerdings noch verlässliche Angabe gemacht werden. Ob und in welcher Art auch die Ergebnisse 2030 betroffen sind, lässt sich momentan nicht abschätzen.

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 Langzeitstudie 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 gibt es zusätzliche Auswertungsmöglichkeiten. 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 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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.

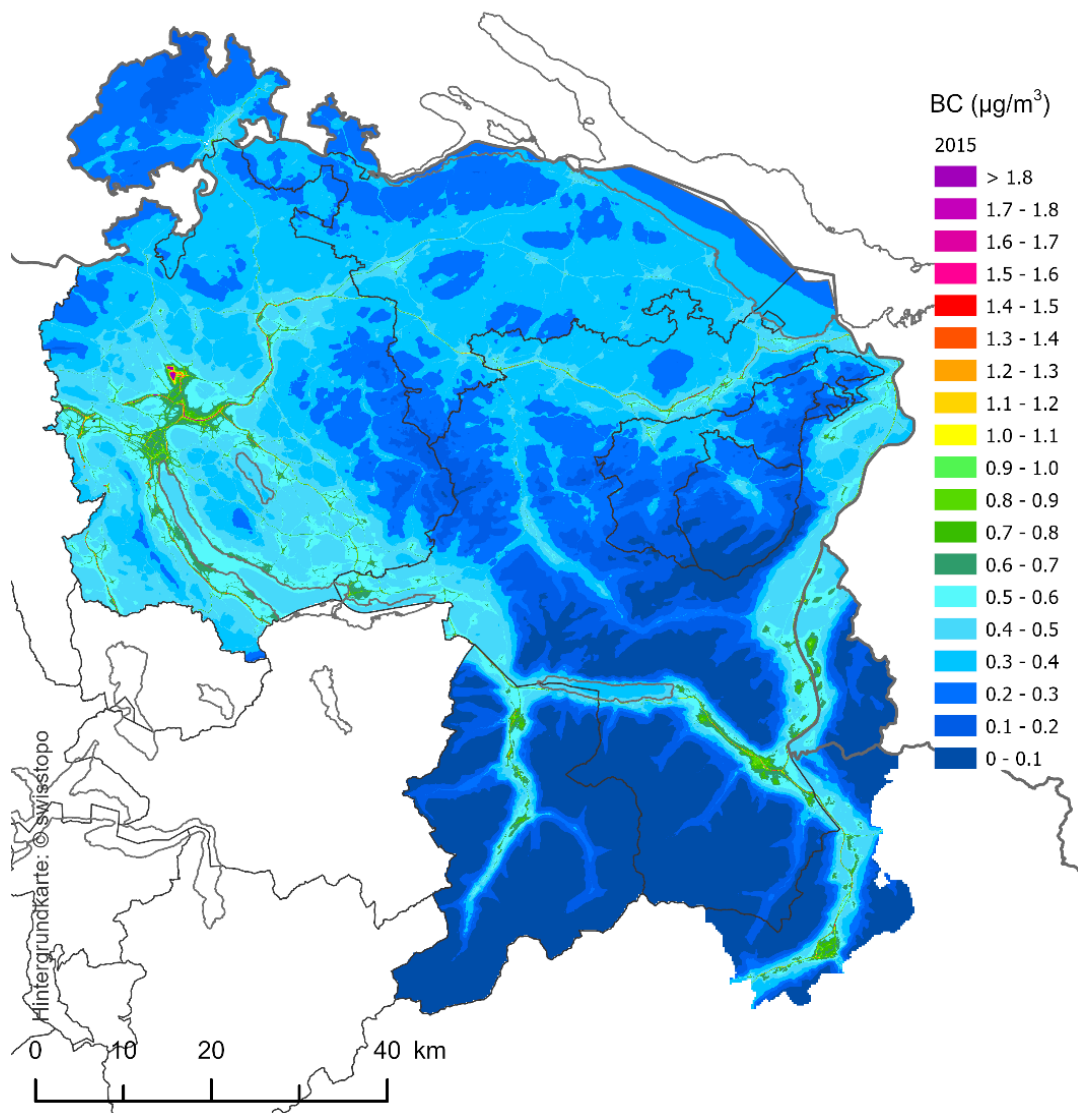
Alle Expositionsberechnungen werden mit demselben Einwohner-Hektarraster Schweiz (Ostschweizer Kantone) respektive Liechtenstein ausgeführt. Für 2020 und 2030 sind keine Hektardaten vorhanden, die die räumlichen Verschiebungen der Einwohner prognostizieren.

3. BC-Immissionen im OSTLUFT-Gebiet 2015, 2020, 2030

3.1. BC-Immissionsresultate 2015, 2020 und 2030

Abbildung 1 bis Abbildung 3 zeigen die modellierten BC-Immissionen im OSTLUFT-Gebiet für die Jahre 2015 bis 2030.

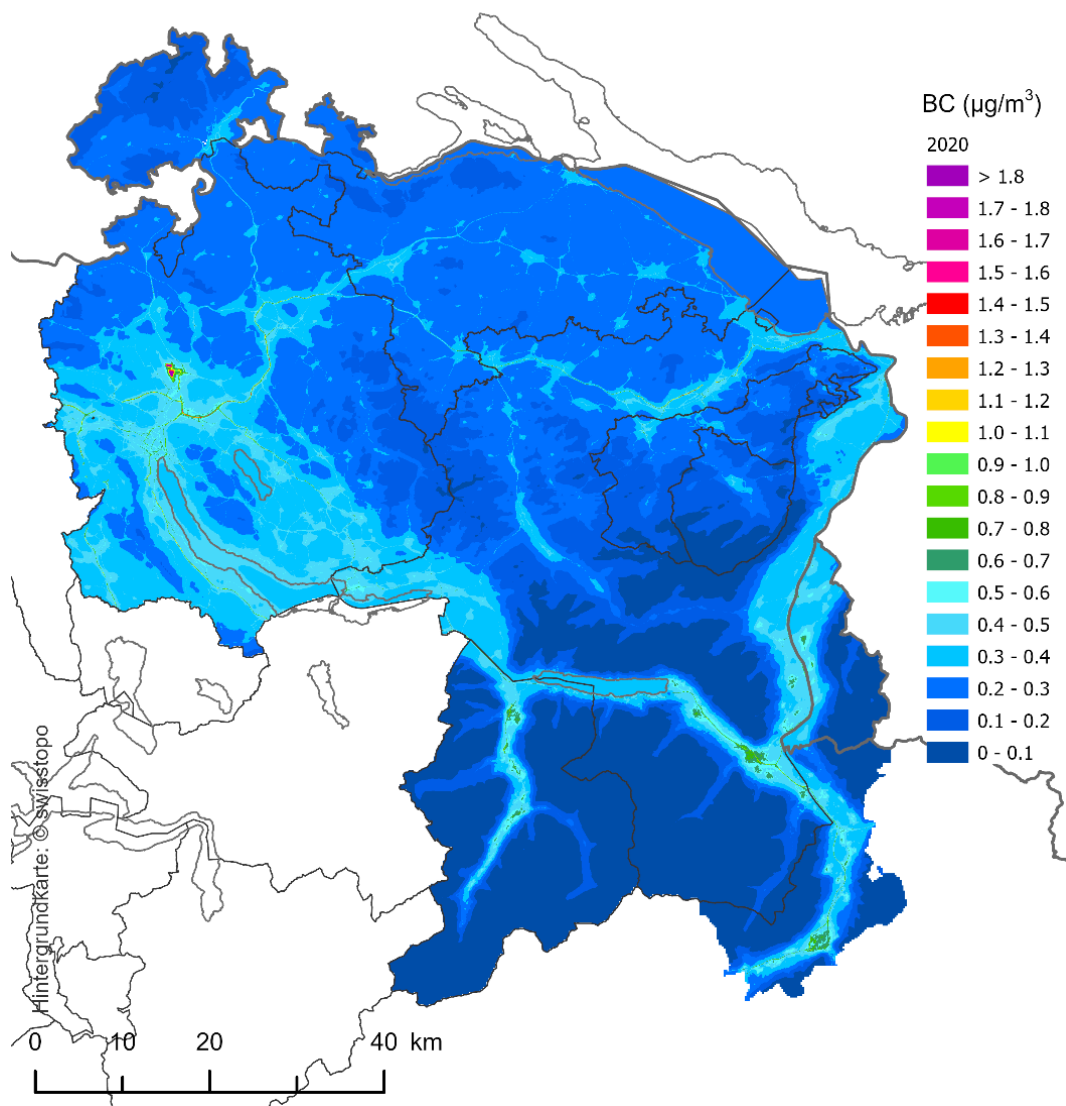
Abbildung 1: BC-Immissionen 2015 im OSTLUFT-Gebiet



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 Be-

deutung des Strassenverkehrs deutet. Aber auch im Rheintal, im Seeztal und im Glanerland treten hohe Immissionen auf, welche vor allem durch Holzfeuerungen von Wohngebäuden verursacht werden. Ein Hotspot von BC-Immissionen ist der Landesflughafen Zürich. Dazu ist zu bemerken, dass die Prognosen für Flugbewegungen und Emissionen aus der Zeit vor der Corona-Pandemie stammen und nach heutigen Erkenntnissen für 2020 und vermutlich auch 2030 zu hoch sind.

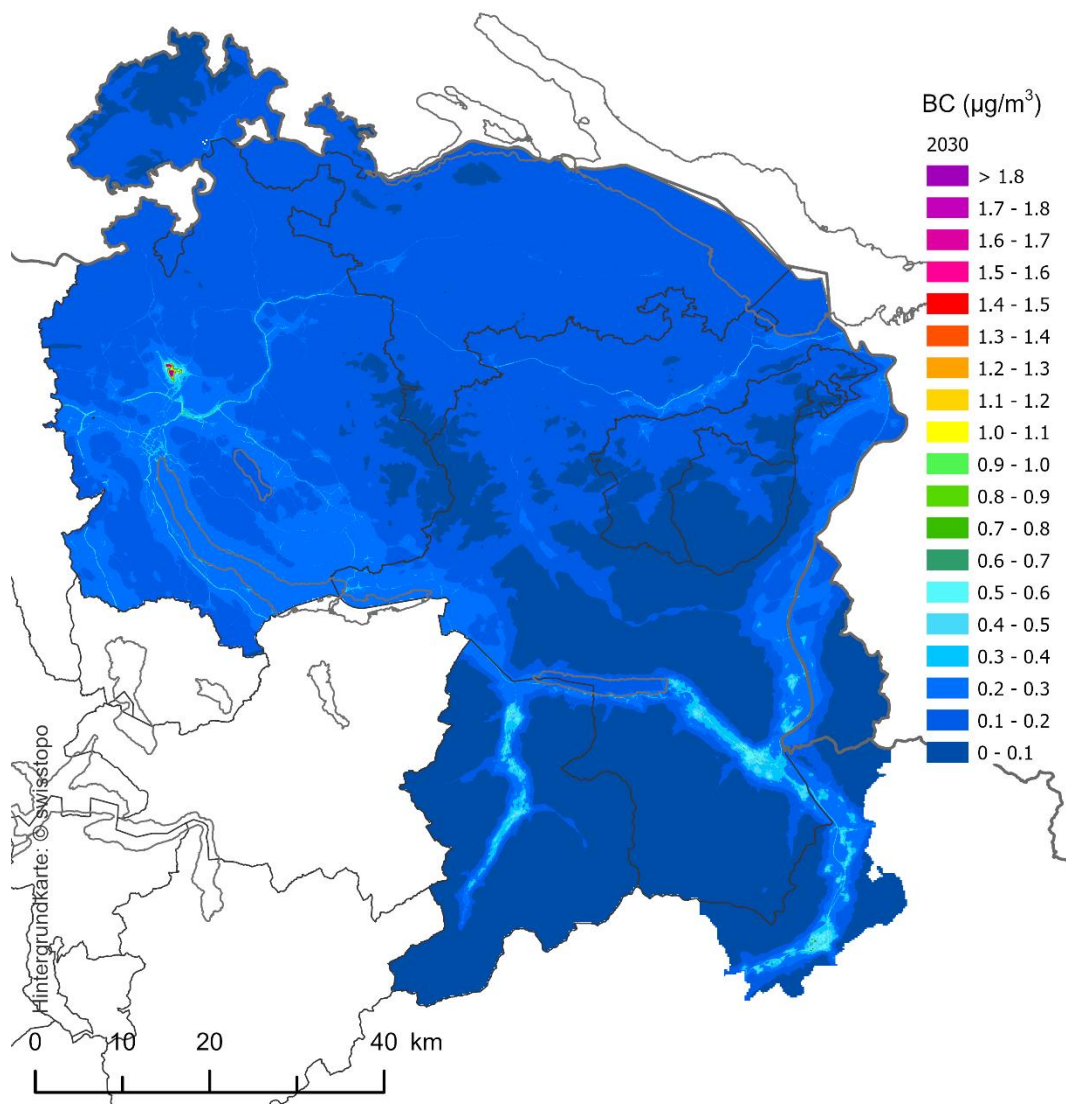
Abbildung 2: BC-Immissionen 2020 im OSTLUFT-Gebiet



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 aus dem Rückgang der

BC-Emissionen aus dem Strassenverkehr um ca. 43 % (Tabelle 4). Hingegen sind die Reduktionen in den Alpentälern bescheidener, weil die BC-Emissionen aus Holzfeuerungen (aus Haushalten, Landwirtschaft, DL, Industrie) lediglich um 18 % abnehmen.

Abbildung 3: BC-Immissionen 2030 im OSTLUFT-Gebiet



Zwischen 2020 und 2030 gehen die BC-Immissionen weiter zurück. Die räumlichen Unterschiede erklären sich wie bereits in der Entwicklung 2015-2020 durch eine sehr deutliche 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 – 2030 soll an dieser Stelle anhand der Emissionsentwicklung näher betrachtet

werden. Zwar stehen die BC-Emissionen im OSTLUFT-Gebiet noch nicht zur Verfügung, stattdessen werden die BC-Emissionen für die ganze Schweiz zur Interpretation beigezogen. Sie sind für die BC-Emissionen im OSTLUFT-Gebiet hinreichend repräsentativ. Siehe dazu Tabelle 4 im Annex A2.

Die Emissionen des Strassenverkehrs reduzieren sich in der Periode 2015-2030 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 landw. 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. 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 als 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.

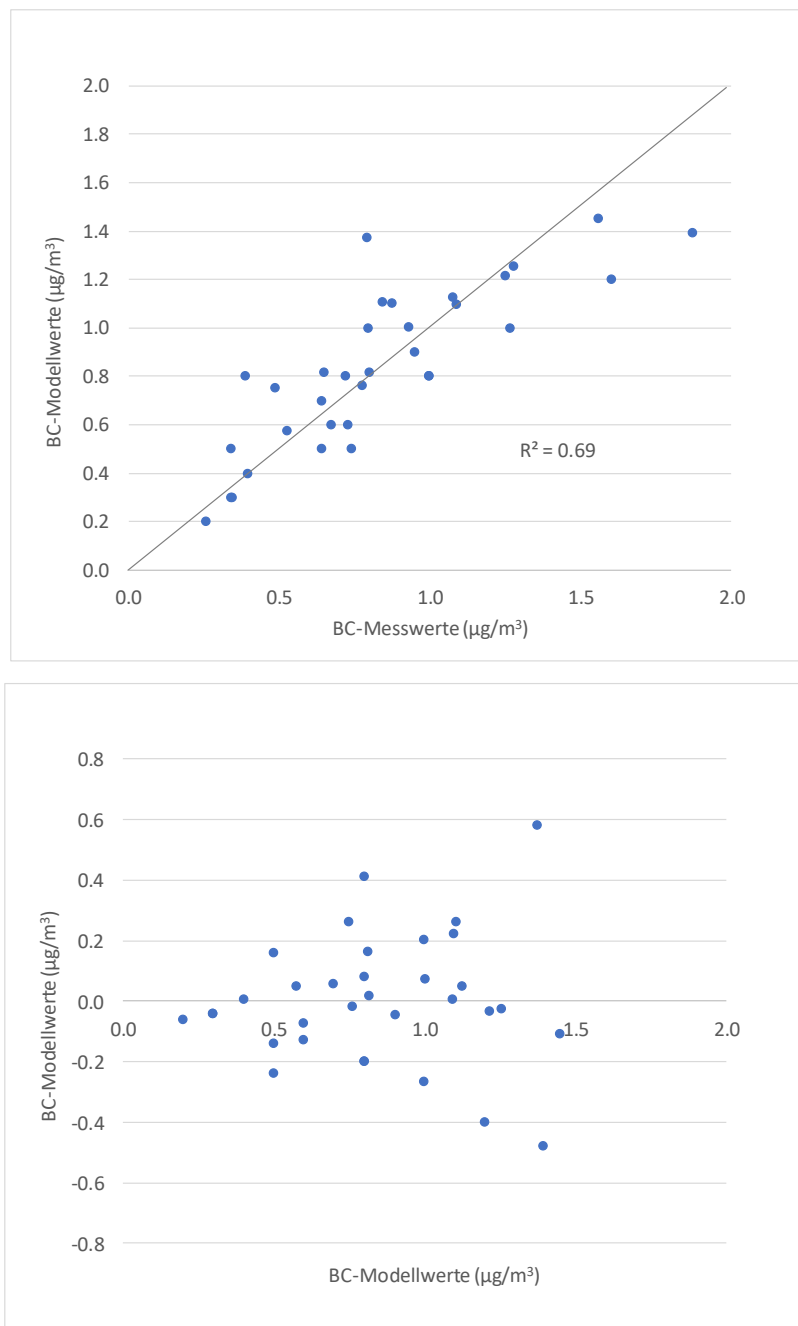
Die beiden Effekte führen dazu, dass 2030 in den Alpentälern mit hohen Aktivitäten (Verkehr, Einwohner, Landwirtschaft, Industrie) die Belastungen überraschenderweise höher sein werden als im Mittelland. Dieses Ergebnis zeigt sich nicht nur im OSTLUFT-Gebiet, sondern ist auch im Wallis, Berner Oberland, Zentralschweiz und Tessin zu sehen. Übrigens wird diese Entwicklung auch durch die neuen PM10- und die PM2.5-Karten nahegelegt (INFRAS 2020a): Dort sehen wir 2030 im Wallis, Tessin und Rheintal Immissionen, die ähnlich hoch liegen 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 aneinanderstossen 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 «vergrössert», was im Fall der BC-Immissionen 2030 (Abbildung 3) in der Umgebung Näfels/Niederurnen (Kt. GL) und Walenstadt (Kt. SG) sichtbar ist. Es gilt 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 Immissions sprünge bedeuten müssen.

3.2. Vergleich der Modellwerte mit Messwerten

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



Für den Vergleich der BC-Modellwerte 2015 werden Messdaten von 33 Stationen in der ganzen Schweiz verwendet (BAFU 2020)

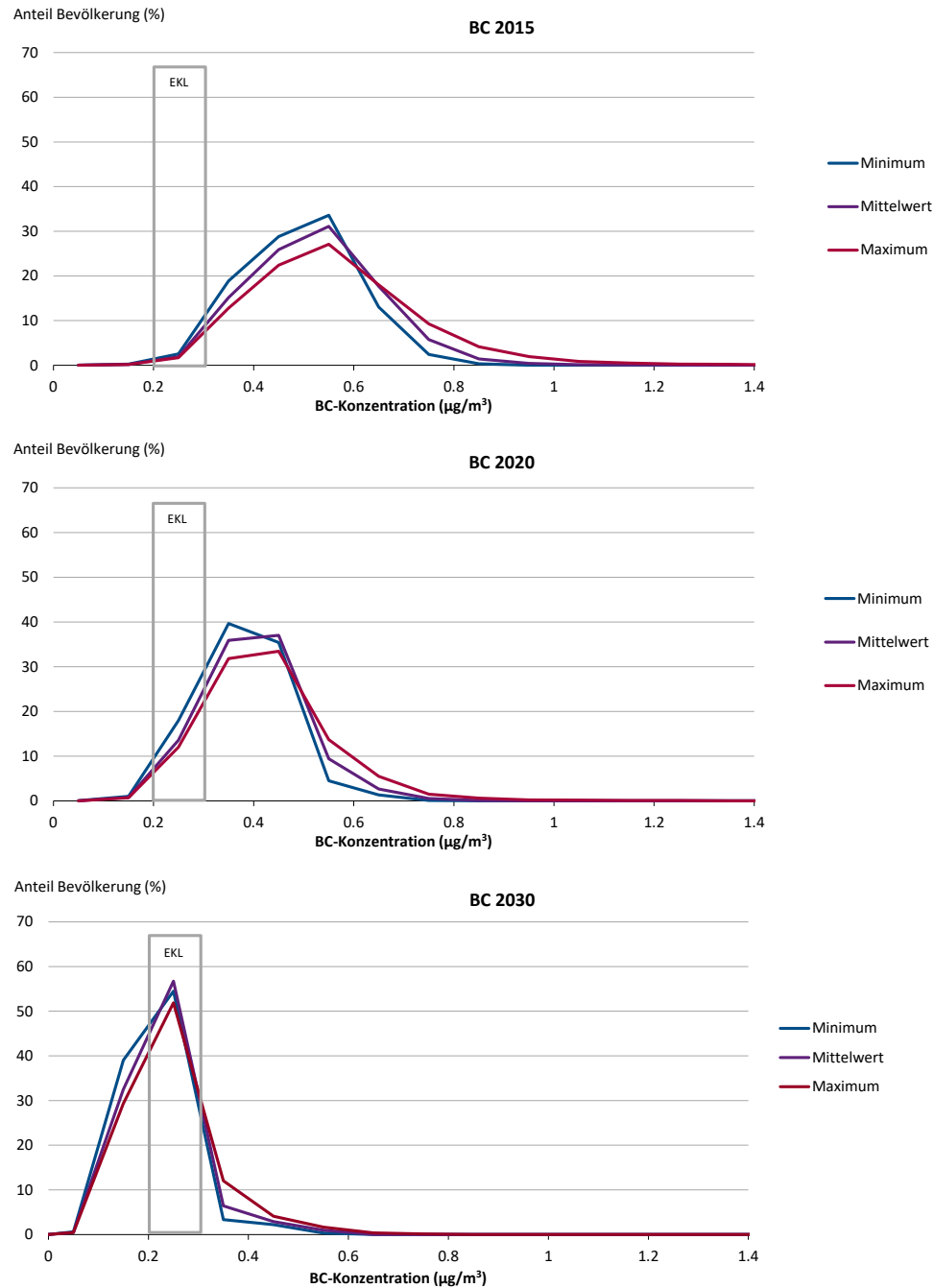
Die statistische Auswertung des Vergleichs mit Messwerten zeigt, dass das Niveau der Modellwerte im Durchschnitt mit dem Niveau der Messwerte praktisch übereinstimmt. Die Standardabweichung der Modellwerte ($0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ist etwas geringer als jene der Messwerte ($0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 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	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Standardabweichung	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%	

3.3. Bevölkerungsexposition 2015, 2020 und 2030

Abbildung 5: Histogramme zur Bevölkerungsexposition. 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 mit BC.

Parameter	Einheit	BC		
		2015	2020	2030
Bevölkerungsgewichtete Konzentration				
Mittelwert	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.525	0.401	0.232
Minimum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.494	0.379	0.219
Maximum	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.570	0.427	0.247
Anteil der Bevölkerung > 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
Mittelwert	--	97.9%	85.6%	10.4%
Minimum	--	97.2%	81.0%	5.9%
Maximum	--	98.1%	87.2%	18.3%
Anteil der Bevölkerung > 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
Mittelwert	--	99.8%	99.2%	67.1%
Minimum	--	99.7%	98.9%	60.3%
Maximum	--	99.8%	99.3%	70.2%

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 von 0.525 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahr 2015 bis auf 0.232 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahr 2030. Die EKL empfiehlt als Richtwert den Bereich von 0.2 – 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die bevölkerungsgewichtete Konzentration sollte 2030 zwar den Bereich des empfohlenen Richtwerts erreichen, aber das gilt eben nur im Mittelwert. Aus den Histogrammen lässt sich berechnen, dass im Jahr 2030 noch 10.4 % der Einwohner einer Immission über 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ausgesetzt sind und sogar 67.1 % der Einwohner einer Immission über 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Immissionen sind also auch im Jahr 2030 noch nicht auf dem von der EKL empfohlenen Richtwert.

Wird die bevölkerungsgewichtete BC-Immission 2015 und 2020 mit den früheren Modellrechnungen verglichen (INFRAS/Meteotest 2013), so ergibt sich in der vorliegenden, aktualisierten Version ein deutlich günstigeres Ergebnis. Für 2015 lag sie bei 0.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, für 2020 bei 0.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die neuen Werte liegen damit um gut einen Drittel unter den früheren Werten.

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 selber aber nicht (sie stehen momentan für das OSTLUFT-Gebiet allein noch nicht zur Verfügung). Für die Interpretation der Immissionsentwicklung 2015 – 2030 ist es aber wichtig, die BC-Emissionen zu kennen. In Tabelle 4 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 4: 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
	Schienenverkehr	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)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: BC-Immissionen 2015 im OSTLUFT-Gebiet	9
Abbildung 2: BC-Immissionen 2020 im OSTLUFT-Gebiet	10
Abbildung 3: BC-Immissionen 2030 im OSTLUFT-Gebiet	11
Abbildung 4: Oben Scatterplot für BC 2015, unten der zugehörige Residuen-Plot.	14
Abbildung 5: Histogramme zur Bevölkerungsexposition. 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.	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: BC-Anteile der verschiedenen Emissionsquellen	6
Tabelle 2: Statistische Parameter für BC-Modellwerte 2015.	15
Tabelle 3: Kennwerte zur Bevölkerungsexposition mit BC.	17
Tabelle 4: BC-Emissionen Schweiz	19

Glossar

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BC	Black Carbon
BFS	Bundesamt für Statistik
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)
µm/m ³	Mikrogramm pro Kubikmeter
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
PM2.5, PM10	Feinstaub mit aerodynamischem Durchmesser < 10 µm resp. < 2.5 µm)
R, R ²	Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmass
RMSE	Root mean square error, mittlerer quadratischer Fehler

Literatur

- BAFU 2019:** Luftschatstoff- und THG-Emissionsinventar, Daten Submission 2019 (Auszug EMIS-Datenbank). E-Mail 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. Faktenblatt. Hrg. BAFU. Bern April 2020
- BAFU 2020a:** Jahreswerte aller Stationen der Schweiz. Messdaten von nationalen, kantonalen und kommunalen Messstationen für Luftschatstoffe, zusammengestellt durch die Schweizerische Gesellschaft der Lufthygiene-Fachleute (Cercl'Air) und das BAFU. Access-Datenbank. Bern 2020
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/luftbelastung--historische-daten/jahreswerte-aller-stationen-der-schweiz.html> [14.12.2020]
- 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]
- 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.
- 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, PM_{2.5} 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 PM_{2.5}-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.

OSTLUFT 2019: Immissionsdaten der Jahre 2013-2018 der Messstationen von OSTLUFT. E-Mail von F. Ludwig, OSTLUFT an B. Schäppi, INFRAS vom 9.5.2019

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.