

Benzol-Immissionen Schweiz

Modellierung 1990–2020

Schlussbericht

Zürich / Bern, 31. Oktober 2013

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)



INFRAS

Binzstrasse 23
CH-8045 Zürich
zuerich@infras.ch
t +41 44 205 95 95
f +41 44 205 95 99
www.infras.ch



METEOTEST

Fabrikstrasse 14
CH-3012 Bern
office@meteotest.ch
t +41 31 307 26 26
f +41 31 307 26 10
www.meteotest.ch

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. LUCHEM, Sekt. Luftqualität, CH-3003 Bern

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

Auftragnehmer: INFRAS & Meteotest

Autor/Autorin:	J. Heldstab, M. Betschart	INFRAS
	T. Künzle, S. Albrecht	Meteotest

Begleitung BAFU: R. Weber, Sektion Luftqualität

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung.....	5
1. Einleitung.....	7
1.1. Ausgangslage	7
1.2. Auftrag	7
2. Vorgehen	8
2.1. Datenfluss.....	8
2.2. Modellentwicklung.....	8
3. Benzol-Emissionen 1990–2020.....	9
3.1. Datenquellen.....	9
3.2. Emissionen des Verkehrs	9
3.3. Emissionen aus Haushaltungen und Dienstleistungsbetrieben	11
3.4. Emissionen aus der Industrie	12
3.5. Emissionen aus Land- und Forstwirtschaft.....	14
3.6. Emissionsbilanzen	14
4. Ausbreitungsrechnung.....	17
4.1. Prinzip.....	17
4.2. Umsetzung.....	22
5. Modellresultate.....	24
5.1. Hinweise zur Interpretation der Benzol-Immissionskarten	24
5.2. Benzol-Immissionen 1990–2020	25
5.3. Bevölkerungsgewichtete Mittelwerte 1990–2020.....	27
6. Datenqualität	28
6.1. Messstationen und Messwerte	28
6.2. Vergleich von Modellwerten mit Messwerten 2010.....	28
Referenzen.....	31
Glossar.....	33

Annex	35
Detaillierte Benzol-Immissionskarten 1990–2020	35
Abbildungsverzeichnis	42
Tabellenverzeichnis	43

Zusammenfassung

Die Umweltschutzgesetzgebung verpflichtet die Behörden, die Öffentlichkeit sachgerecht über den Stand der Umweltbelastung zu informieren (Art. 6 USG). Dazu gehört auch die Information über die Luftqualität. Der vorliegende Bericht stellt dazu eine Grundlage dar, in der mit Modellrechnungen aufgezeigt wird, wie sich die Immissionen des Luftschadstoffs Benzol in den Jahren 1990–2020 entwickelt haben.

Die Modellierung geschieht unter Nutzung des Immissionsmodells PolluMap, mit dem kürzlich bereits Belastungskarten für Schwefeldioxid (SO_2), Stickstoffdioxid (NO_2) und Feinstaub (PM_{10}) für die Schweiz berechnet wurden. Ausgehend von den Benzol-Emissionen nach Verursachergruppen werden in einem Vorprozess die Emissionen räumlich verteilt und anschliessend mit Hilfe von Transferfunktionen in Immissionen umgelegt. Die Transferfunktionen wurden vorgängig aus einer Gauss-Modellierung gewonnen und wurden bereits für die Modellierung der SO_2 -Immissionen verwendet.

Die Immissionsresultate werden in Form von Belastungskarten mit Gesamtimmissionen, Anteilen des Verkehr, der Haushalte/Dienstleistungs-Betriebe, der Industrie, der Land- und Forstwirtschaft dargestellt, und die bevölkerungsgewichtete, mittlere Benzol-Konzentration wird berechnet. Schliesslich werden die Modellwerte mit Messwerten verglichen, um die Qualität der Modellresultate zu beschreiben.

Die wichtigsten Resultate sind:

- Die Benzol-Emissionen sind seit 1990 bis heute rückläufig. Sie haben in dieser Zeitspanne um ca. 80% abgenommen als Folge der konsequenten und erfolgreichen Luftreinhalte-Politik des Bundes, der Kantone und der Gemeinden. Für die nächste Zukunft ist sogar noch eine weitere Verbesserung absehbar. Die Reduktion der Emissionen hat eine entsprechende Reduktion der Immissionen im ganzen Land zur Folge.
- Unter den Sektoren stellt der Strassenverkehr die Quellengruppe mit dem höchsten Emissionsanteil dar mit ca. 75% (1990) respektive 55% (2020), gefolgt von den Sektoren Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen und Industrie mit je ca. 15% im Ist-Zustand (2010). Der Anteil von Land- und Forstwirtschaft war und ist gering, 1990 ca. 4%, im Ist-Zustand und auch 2020 unter 2%.
- Während 1990 noch grosse Gebiete im Mittelland, in der Region Basel, in mehreren Alpentälern und insbesondere im Tessin mit Benzolimmissionen zwischen 2 und 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ belastet waren, so liegen heute, 20 Jahre später, die Immissionen in den grössten Städten zwischen 1 und 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und in den übrigen Gebieten unterhalb 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Bis 2020 sollten die Belastungen in der ganzen Schweiz unter 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sinken.
- Die bevölkerungsgewichtete Benzol-Konzentration ist zwischen 1990 und 2010 von 3.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ auf 0.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gesunken und wird sich bis 2020 noch weiter absenken.
- Die Modellqualität wird im Vergleich mit Messwerten charakterisiert. Für das Jahr 2010 stehen zehn Messwerte zur Verfügung, wovon neun für den Vergleich mit den Modellwerten geeignet sind. Für diese beträgt der Korrelationskoeffizient (R) mit den Modellwerten 0.86, das Bestimmtheitsmass R^2 74% und der mittlere Fehler 0.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Die Umweltschutzgesetzgebung verpflichtet die Behörden, die Öffentlichkeit sachgerecht über den Stand der Umweltbelastung zu informieren (Art. 6 USG). Dazu gehört auch die Information über die Luftqualität. Aus der Sicht der Luftreinhaltepraxis interessieren neben der aktuellen Belastung mit Schadstoffen insbesondere Fragen wie:

- Welche Quellengruppen tragen in welchem Ausmass zur Belastung bei?
- Wie gross ist die Belastung der Bevölkerung?
- Welche Entwicklung der Luftbelastung fand in den letzten Jahrzehnten statt und ist in den nächsten Jahren zu erwarten?

Zur Beantwortung dieser Fragen wird u.a. die Immissionsbelastung für die Schweiz modelliert. Das BAFU hat in den letzten Jahren Belastungskarten für Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffdioxid (NO₂), Feinstaub (PM₁₀), Ammoniak (NH₃) erstellt, jedoch wurde für Benzol seit 2004 keine aktuelle Modellierung der Belastung mehr durchgeführt (SAEFL 2004).

Benzol gehört zu den krebserzeugenden Stoffen, von der Internationalen Krebsagentur der WHO wird es als ein „humangenotoxisches Karzinogen der Klasse 1“ eingestuft. Für diese Stoffe gibt es keine Schwelle, unterhalb derer keine Gefahr für die Gesundheit besteht. Die Benzol-Immissionen sind deshalb immer als schädlich und lästig im Sinne von Artikel 11 Absatz 3 des Umweltschutzgesetzes anzusehen. Die Schweiz hat zum Schutz der Bevölkerung vor Benzol in der Luftreinhalte-Verordnung (Schweizerische Eidgenossenschaft 1985) aus diesem Grund keinen Immissionsgrenzwert wohl aber strenge vorsorgliche Emissionsgrenzwerte und Betriebsvorschriften erlassen. Der Erfolg dieser Massnahmen wird in den unten folgenden Belastungskarten sichtbar.

1.2. Auftrag

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) hat die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/Meteotest beauftragt, die folgenden Arbeiten auszuführen:

1. Die Benzol-Emissionen aus dem Emissions-Informationssystem Schweiz (EMIS) der verschiedenen Quellengruppen räumlich auf Emissionskataster zu verteilen für das Referenzjahr 2010 sowie für 1990 und 2020.
2. Eine Ausbreitungsrechnung auf Grundlage der meteorologischen Daten des Jahres 2005 durchführen, und zwar mit dem Immissionsmodell PolluMap, mit dem bereits die NO₂- und die PM₁₀-Immissionen für die Schweiz berechnet wurden.
3. Die modellierten Immissionen mit Messwerten vergleichen.
4. Die Bevölkerungsexposition für die Jahre 1990, 2010, 2020 berechnen.
5. Immissionen kartografisch darstellen.

Die Ergebnisse sind in einem Schlussbericht in deutscher Sprache zu dokumentieren.

2. Vorgehen

2.1. Datenfluss

Das folgende Schema zeigt den Ablauf der Modellierung. Im vorliegenden Bericht wird die Emissionsmodellierung im Kapitel 3 beschrieben, die Immissionsmodellierung und Methodik im Kapitel 4, sowie die Modellresultate im Kapitel 5.

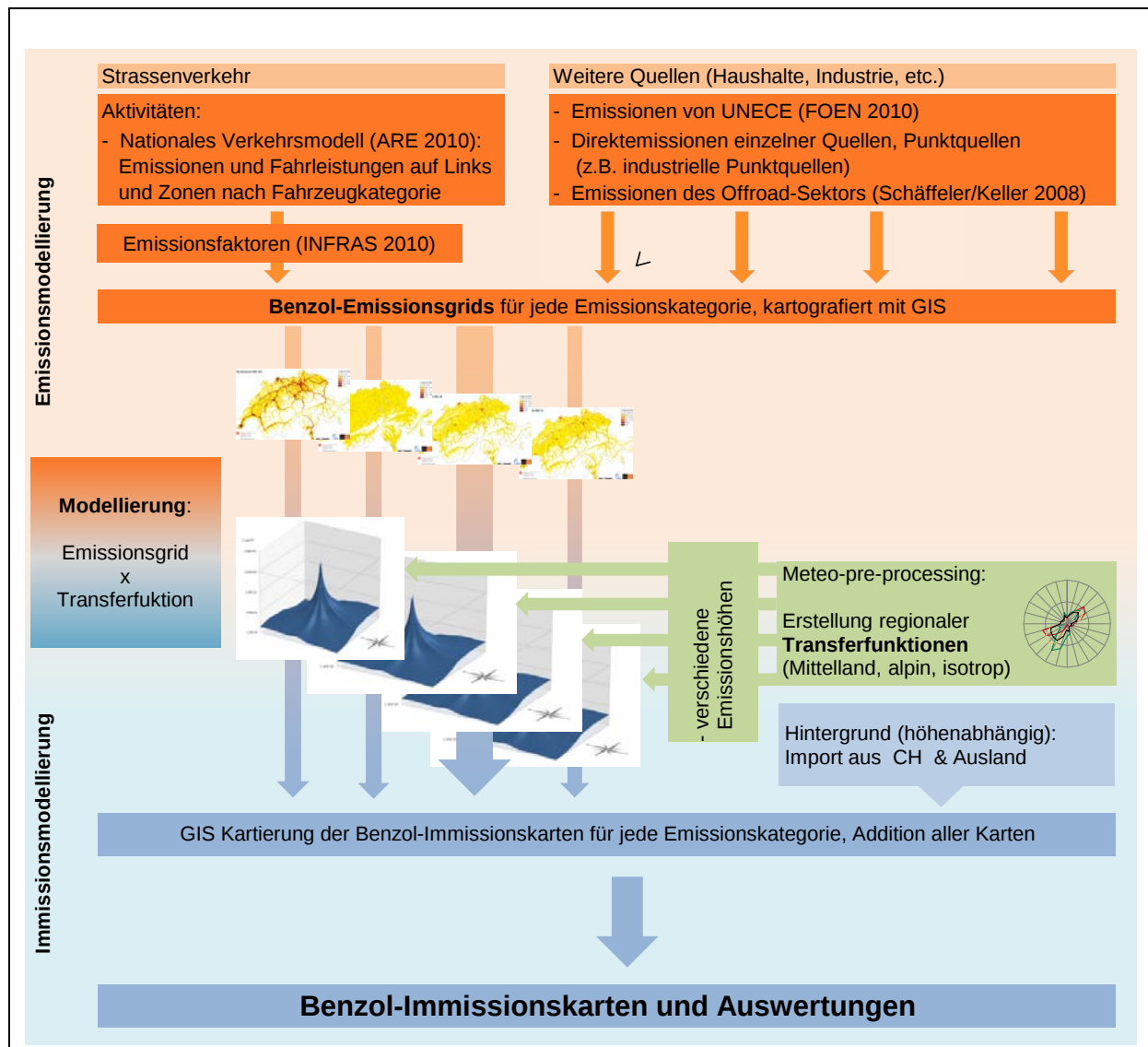


Abb. 1 Ablaufschema Immissionsmodell Schweiz.

2.2. Modellentwicklung

Die Benzol-Immissionen wurden für die Schweiz vor bisher rund zehn Jahren mit einer früheren Version des Modells PolluMap berechnet (SAEFL 2004). Inzwischen ist das Modell schrittweise aktualisiert und verbessert worden (FOEN 2011, FOEN 2013, INFRAS / Meteo-test 2013). Die dort implementierten Methoden sollen sinngemäss auch für die Modellierung von Benzol verwendet werden.

3. Benzol-Emissionen 1990–2020

3.1. Datenquellen

Als Datengrundlage der Emissionsmodellierung für die Jahre 1990, 2010 und 2020 dienen grundsätzlich die schweizerischen Emissionen aus dem „Emissions-Informationssystem der Schweiz – EMIS“. Dieses wird vom BAFU bewirtschaftet und betrieben. Emissionen des Strassenverkehr wurden basierend auf dem Verkehrsmodell des UVEK (ARE 2010) für die Immissionsmodellierung angewendet. Alle Emissionsfrachten entsprechen den in der Schweiz verursachten Emissionen (Territorialprinzip). Die Verteilung der Emissionen ins Hektarraster des Modells erfolgte mit derselben Methodik, wie sie zur schweizweiten NO₂-Immissionsmodellierung angewendet wurde (FOEN 2011).

3.2. Emissionen des Verkehrs

3.2.1. Emissionen des Strassenverkehrs

Emissionsfrachten

Die Verkehrsemissionen stammen aus BAFU (2010). Die Aktivitätsdaten basieren auf dem digitalen Verkehrsnetz und auf den Frequenzen des nationalen Verkehrsmodells (ARE 2006a, 2006b, 2010 und BfS 2009). Die Emissionsfaktoren für Benzol wurden dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA Version 3.1; INFRAS 2010) entnommen.

Umsetzung der Strassenverkehrsemissionen für die Immissionsmodellierung

Die räumliche Disaggregation der Link- und Zonenemissionen ist gleich wie für die NO_x-Emissionen in FOEN (2011) und ist dort im Detail (Kap. 2.3.1) beschrieben.

Da die Immissionsmodellierung zwischen bebauten und unbebauten Gebieten (unterschiedliche Ausbreitungseigenschaften) unterscheidet, werden die Emissionen des Strassenverkehrs mit Hilfe der ausgewiesenen Bauzonen gemäss Bundesamt für Statistik analog der Methodik in FOEN (2011) in Gebiete innerorts und ausserorts aufgeteilt. Die Emissionen aus Zonen, von denen nur die Zugehörigkeit zu einer Gemeinde oder zu einem Stadtquartier bekannt ist, erfordern zusätzliche Festlegungen. 50% dieser Emissionen wurden homogen auf die Bauzonen (BfS 2001) im bebauten Gebiet verteilt. Die restlichen 50% der Emissionen wurden proportional zur Einwohnerzahl pro Gemeinde entsprechend verteilt (pro Hektare wurden jedoch maximal 200 Einwohner berücksichtigt); in Städten (>10'000 Einwohner) wurden jedoch von den 50% nur 10% Einwohner-proportional verteilt, die übrigen 40% wurden auf die Strassen 1. und 2. Klasse der Vector25 Landeskarte verteilt. Für weitere Informationen siehe FOEN (2011). Die für die Immissionsmodellierung verwendeten Verkehrsemissionen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Die Linkemissionen werden entsprechend der geografischen Lage der Links verteilt (siehe Abb. 2).

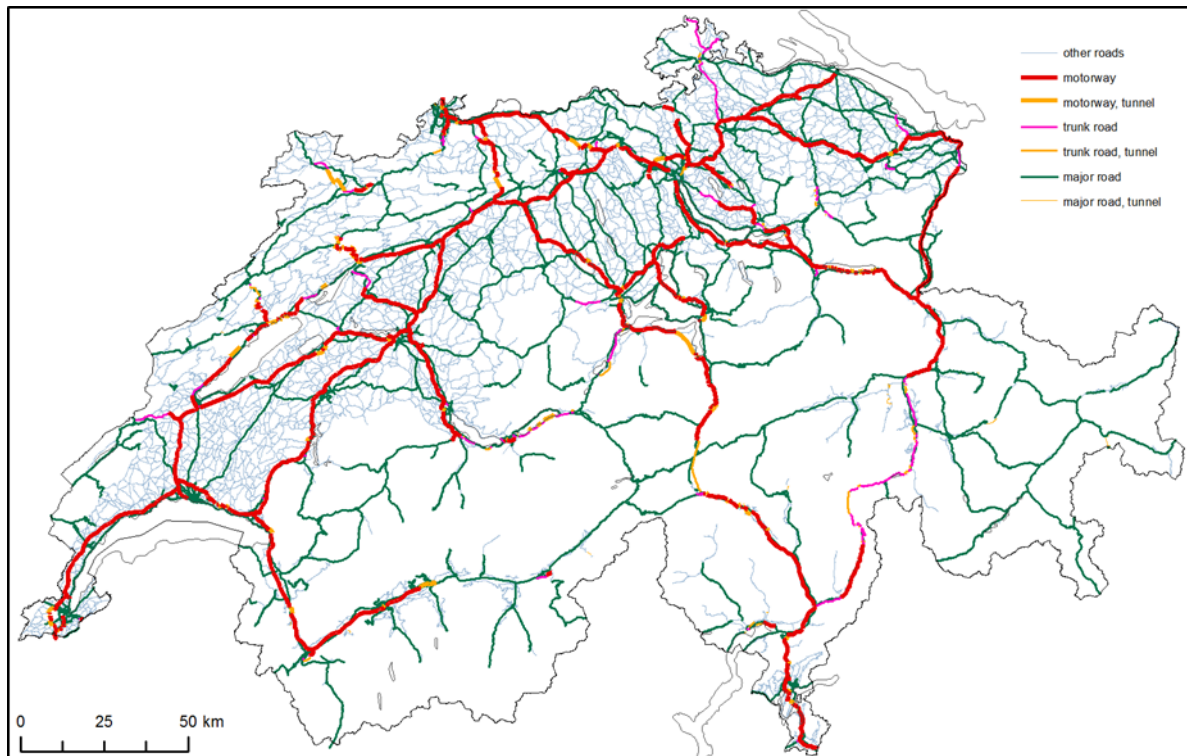


Abb. 2 Strassennetz der Schweiz 2010 zur Lokalisierung der Emissionen einzelner Links gemäss dem nationalen Verkehrsmodell. Emissionen aus Tunnels, welche für die Modellierung entfernt wurden, sind orange markiert. Quelle: FOEN 2011.

Eine Besonderheit stellt die Rückrechnung der Emissionen 1990 dar, weil damals das Strassennetz noch weniger ausgebaut war als heute. Die Emissionen 1990 wurden zunächst auf dem aktuellen Strassennetz (2005) modelliert. Anschliessend wurden Emissionen auf Autobahnabschnitten, die bis 1990 noch nicht eröffnet waren, aus dem Kataster entfernt und auf die übrigen Strassenabschnitte proportional verteilt. Die betroffenen Autobahnabschnitte sind:

- A4 nach Schaffhausen (Eröffnung 1996, nicht berücksichtigt für 1990),
- A9 im Wallis (Eröffnung 1996, nicht berücksichtigt ab Sion talaufwärts für 1990),
- A3 Zürich – Basel (Eröffnung 1996, nicht berücksichtigt für 1990),
- A16 Tavannes – Sonceboz – La Heutte (Eröffnung 1997, nicht berücksichtigt 1990),
- A1 Yverdon – Murten (Eröffnung 2001, nicht berücksichtigt 1990).

Ausserdem wurden auch die Emissionen der längsten und wichtigsten Tunnels (z.B. Gotthard, Seelisberg, Gubrist und Belchen) von den entsprechenden Links abgezogen, damit dort nicht fälschlicherweise Immissionen modelliert werden. Die Immissionen an den Tunnelportalen und Lüftungsschächten wurden in der Modellierung nicht berücksichtigt.

3.2.2. Emissionen des Schienenverkehrs

Das Schienennetz der Schweiz ist elektrifiziert. Benzol-Emissionen werden als Folge von Benzin-Transporten in geringem Ausmass freigesetzt („Tankatmung“ der Kesselwagen). Im Vergleich zu den Benzol-Gesamtemissionen spielen die Emissionen des Schienenverkehrs praktisch keine Rolle (Tabelle 3).

Die Disaggregation der relevanten Benzol-Emissionen erfolgte grundsätzlich gemäss Methodik in FOEN (2011). Es wurden jedoch keine spezifischen Benzol-Emissionsfaktoren verwendet um die Benzol-Emissionen des Schienenverkehrs explizit zu bestimmen. Die Herleitung erfolgte aufgrund des entsprechenden Anteils der Benzol-Emissionen an den NO_x-Emissionen (aus FOEN 2011).

3.2.3. Emissionen des Schiffsverkehrs

Die Emissionen der regulären Schifffahrt auf Schweizer Gewässern stammen aus dem Nationalen Inventory Report (NIR) 2010 (FOEN 2010), NFR-Code 1A3diiii. Die räumliche Disaggregation der Schiffsverkehrsemissionen erfolgte gemäss der Methodik in FOEN (2011) auf allen Seen mit gewerblicher Personenschifffahrt und auf dem Rhein zwischen dem Hafen Birsfelden und der Grenze nach Deutschland/Frankreich, wo Güterschiffsverkehr stattfindet. Die für die Immissionsmodellierung verwendeten Emissionsmengen sind in der Tabelle 3 aufgeführt.

3.2.4. Emissionen des Flugverkehrs

Es wurden keine Benzol-Emissionen aus dem Flugverkehr für die Immissionsmodellierung berücksichtigt.

3.3. *Emissionen aus Haushaltungen und Dienstleistungsbetrieben*

3.3.1. Heizöl- und Erdgasfeuerungen, Garten- und Hobby-Gerätschaften

Emissionen aus den Feuerungsanlagen der Haushalt- und Dienstleistungsbetriebe wurden zusammen in einem Emissions-Grid zusammengefasst. Es enthält die Emissionen aus Heizöl- und Erdgas-Feuerungen sowie aus Gerätschaften für Garten und Hobby-Bereich (Schäffeler/Keller 2008). Die räumliche Disaggregation erfolgte proportional zu den Einwohnerzahlen pro Hektare gemäss den Daten von BFS (2010) analog der Methodik in FOEN (2011).

3.3.2. Holzfeuerungen

Die Emissionen aus Holzfeuerungen wurden auf die Gebäude mit vorwiegend Holzheizungen je Gemeinde verteilt. Dazu wurden Daten aus der Gebäude- und Wohnungsstatistik des Bundesamtes für Statistik (BFS 2010) verwendet. Die Holzfeuerungsmissionen wurden

innerhalb der Gemeinden auf jene Hektaren mit Einwohnern zugeordnet. Siehe auch FOEN (2011).

3.4. Emissionen aus der Industrie

3.4.1. Stationäre Emissionsquellen

Emissionen aus industriellen Feuerungen wurden gemäss FOEN (2011) aus dem Informative Inventory Report 2010 (FOEN 2010) übernommen. Berücksichtigt wurden hierbei die NFR-Kategorien 1A1, 1A2, Prozesse aus der Kategorie 2A-2G und Kategorie 6 (Abwasserbehandlung). Es wurden keine Emissionen aus hohen Punktquellen modelliert.

Die Verteilung der industriellen Quellen wurde flächenhaft auf die Industrieareale verteilt. Für die vorliegende Benzol-Immissionsmodellierung wurde die Aufteilung der Industriequellen, im Unterschied zur NO₂-Studie FOEN (2011) weiter verfeinert, um der tatsächlichen räumlichen Verteilung der Emissionen besser zu entsprechen.

Die Zuteilung der industriellen Flächenquellen erfolgte gemäss Arealstatistik NOAS92 (BFS 2001) mit einer Auflösung von 100 m auf die Industriegebiete und deren Umschwung. Die Verteilung der Emissionen erfolgte im Verhältnis 80% auf Industriegebäude (Code 21) und 20% auf den industriellen Umschwung (Code 41). Es wurden keine Emissionen dem Code 25 (Ein- und Zweifamilienhäusern), dem Code 26 (Reihen- und Terrassenhäusern), dem Code 27 (Mehrfamilienhäusern) und dem Code 29 (nicht spezifizierten Gebäuden) zugeteilt.

Zusätzliche Annahmen für die sechs grössten Agglomerationen

Ein Spezialfall bilden dichtbesiedelte, urbane Gebiete (Städte und Agglomerationen). In den Zentren sind heutzutage keine grösseren Industriequellen mehr anzutreffen, diese befinden sich vielmehr ausserhalb und in den Industriezonen. Die in FOEN (2011) angewandte Methodik würde bei der Modellierung der Benzol-Immissionen zu überhöhten und unrealistischen Immissionswerten in dichtbesiedelten Gebieten führen. Aus diesem Grund wurden die flächenhaften Emissionen aus industriellen Feuerungen für die sechs grössten Städte der Schweiz (Zürich, Genf, Basel, Bern, Lausanne und Luzern) separat behandelt. Die je Stadt berücksichtigten Agglomerationsgemeinden sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Für diese sechs Städte (inklusive deren Agglomerationen) wurden die Emissionen aus industriellen und gewerblichen Feuerungen auf den Arealstatistik-Kategorien 21 (Industriegebäude) und 41 (Industrieumschwung) um 50% reduziert. Die Emissionen, welche auf diese Weise aus den Städten und Agglomerationen entfernt werden, wurden wiederum gleichmässig auf die übrigen Gebiete verteilt, damit die Gesamtemissionen erhalten bleiben.

Stadt	Berücksichtigte Agglomerationsgemeinden
Basel	Allschwil, Basel, Birsfelden, Münchenstein, Muttenz, Pratteln
Bern	Bern, Ittigen
Genf	Carouge, Genf, Lancy, Meyrin, Satigny
Lausanne	Bussigny-près-Lausanne, Chavannes-près-Rennes, Crissier, Ecublens, Lausanne, Renens
Luzern	Ebikon, Emmen, Luzern, Kriens
Zürich	Dietikon, Schlieren, Zürich

Tabelle 1 Agglomerationsgemeinden, die von den zusätzlichen Annahmen betroffen sind.

Durch diesen Mechanismus entstehen vier Klassen von Industriearealen, die sich durch ihre spezifische Emissionsstärke unterscheiden (siehe dazu Tabelle 2).

Aufteilung der flächenhaften Industrie-Emissionen Stadt/Land		
Aufteilung gemäss Arealstatistik	Basel, Bern, Genf, Lausanne, Luzern, Zürich (t/ha/a)	übrige Gebiete (t/ha/a)
Industriegebäude (Code 41)	0.046	0.092
Industrieumschwung (Code 21)	0.007	0.014

Tabelle 2 Spezifische Emissionsstärken der Industrieareale im Jahr 1990. Die Codes beziehen sich auf die Arealstatistik mit 74 Kategorien.

Weitere Spezialfälle

Die Verteilung der industriellen Emissionen gemäss den Codes 21 und 41 führt in Einzelfällen zu überhöhten Emissionen aufgrund von Zuordnungseigenschaften innerhalb der Arealstatistik. So werden etwa Militärareale dem industriellen Umschwung (Code 41) zugewiesen. In gewissen Schweizer Städten, wie zum Beispiel Thun, werden so ganze Stadtgebiete mit Emissionen belegt, die in Realität dort gar nicht ausgestossen werden. Im Fall von Thun wurden die Emissionen von den Militärarealen entfernt und auf die übrigen industriellen Flächen in der Stadt und im Umland verteilt.

3.4.2. Mobile Emissionsquellen

Zu den mobilen Industriequellen gehören Baumaschinen (Bagger, Planiermaschinen etc.) und Industriefahrzeuge (Gabelstapler, Hubarbeitsbühnen etc.). Deren Emissionen wurden in Schöffeler/Keller (2008) berechnet.

a) Baumaschinen

Die Emissionen wurden uniform auf alle Siedlungs- und Strassenflächen analog FOEN (2011) verteilt. Betroffen sind die Flächen mit den NOAS92-Codes 21, 25, 26, 27, 28, 29, 41, 45, 46, 47, 48 der Arealstatistik.

b) Industriefahrzeuge

Die Emissionen der Industriefahrzeuge wurden uniform auf bebaute Gebiete verteilt. Betroffen sind die Flächen mit den NOAS92-Codes 25, 26, 27, 29, 41 der Arealstatistik.

3.5. Emissionen aus Land- und Forstwirtschaft

Emissionen aus der Land- und Forstwirtschaft wurden in einem gemeinsamen Emissions-Grid zur Immissionsmodellierung verwendet. Die Emissionen enthalten nur die durch land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge erzeugten Benzol-Emissionen (Schäffeler/Keller 2008). Die Emissionen wurden uniform auf die land- und forstwirtschaftlichen Nutzflächen verteilt (siehe FOEN 2011).

3.6. Emissionsbilanzen

Abb. 3, Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen die aggregierten Emissionen aus den obigen Kapiteln 3.2–3.5.

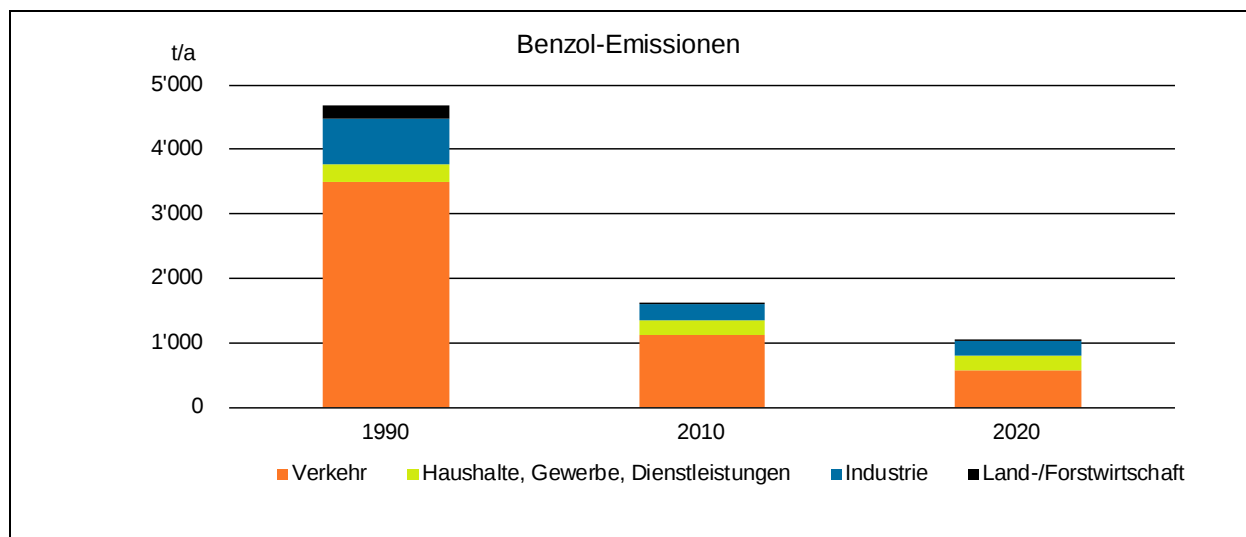


Abb. 3 Benzol-Emissionen Schweiz 1990–2020 nach Sektoren.

Sektor	Emissionsquelle	1990		2010		2020	
		t/a	in % vom Total 1980	t/a	in % vom Total 2010	t/a	in % vom Total 2020
Verkehr		3'496	74.6%	1'116	68.8%	585	55.6%
	Strassenverkehr Link	1'355	28.9%	232	14.3%	80	7.6%
	Strassenverkehr Zonen	2'049	43.7%	876	54.0%	501	47.5%
	Strassenverkehr Tunnel	31	0.7%	5.2	0.3%	1.8	0.2%
	Schienenverkehr	0.13	0.003%	0.10	0.006%	0.06	0.006%
	Flugverkehr (LTO Zürich und Genf)	--	--	--	--	--	--
	Schiffsverkehr	61	1.3%	2.3	0.14%	2.8	0.26%
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen		267	5.7%	236	14.6%	216	20.5%
	Heizöl-/Erdgasfeuerungen, Garten-/Hobby-Geräte	50	1.1%	37	2.3%	31	2.9%
	Holzfeuerungen	217	4.6%	200	12.3%	185	17.6%
Industrie		713	15.2%	243	15.0%	235	22.4%
	Baumaschinen	29	0.62%	2.2	0.14%	0.87	0.082%
	Industriefahrzeuge	3.6	0.076%	1.0	0.063%	0.55	0.052%
	Punktquellen	--	--	--	--	--	--
	Flächenquellen	681	14.5%	240	14.8%	234	22.2%
Land-/Forstwirtschaft		207	4.4%	27	1.7%	16	1.6%
	Maschinen und Geräte	202	4.3%	20	1.2%	8.9	0.8%
	Feuerungen	4.3	0.091%	7.0	0.43%	7.5	0.72%
Total Schweiz		4'684	100.0%	1'623	100.0%	1'053	100.0%

Tabelle 3 Emissionen in Tonnen Benzol der Schweiz 1990, 2010 und 2020. Die Unterkategorien entsprechen den verschiedenen Emissions-Grids zur Immissionsmodellierung. Zahlen sind auf mindestens zwei signifikante Stellen gerundet.

Sektor	Emissionsquelle	1990		2010		2020	
		t/a	in % von 1990	t/a	in % von 1990	t/a	in % von 1990
Verkehr		3'496	100.0%	1'116	31.9%	585	16.7%
	Strassenverkehr Link	1'355	100.0%	232	17.1%	80	5.9%
	Strassenverkehr Zonen	2'049	100.0%	876	42.8%	501	24.4%
	Strassenverkehr Tunnel	31	100.0%	5.2	16.8%	1.8	5.8%
	Schienenverkehr	0.13	100.0%	0.10	76.2%	0.061	47.6%
	Flugverkehr (LTO Zürich und Genf)	-	-	-	-	-	-
	Schiffsverkehr	61	100.0%	2.3	3.8%	2.8	4.5%
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen		267	100.0%	236	88.4%	216	80.7%
	Heizöl-/Erdgasfeuerungen, Garten-/Hobby-Geräte	50	100.0%	37	73.8%	31	62.0%
	Holzfeuerungen	217	100.0%	200	91.8%	185	85.0%
Industrie		713	100.0%	243	34.1%	235	33.0%
	Baumaschinen	29	100.0%	2.2	7.7%	0.87	3.0%
	Industriefahrzeuge	3.6	100.0%	1.0	28.8%	0.55	15.5%
	Punktquellen	-	-	-	-	-	-
	Flächenquellen	681	100.0%	240	35.3%	234	34.4%
Land-/Forstwirtschaft		207	100.0%	27	13.1%	16	8.0%
	Maschinen und Geräte	202	100.0%	20	9.9%	8.9	4.4%
	Feuerungen	4.3	100.0%	7.0	163.6%	7.5	176.5%
Total Schweiz		4'684	100.0%	1'623	34.6%	1'053	22.5%

Tabelle 4 Emissionen in Tonnen Benzol der Schweiz 1990, 2010 und 2020 und deren zeitliche Entwicklung als Anteile von 1990. Die Unterkategorien entsprechen den verschiedenen Emissions-Grids zur Immissionsmodellierung. Zahlen sind auf mindestens zwei signifikante Stellen gerundet.

Die Emissionsbilanz zeigt den ausserordentlichen Erfolg der Luftreinhalte-Massnahmen, die in der Zeit zwischen 1990 und 2010 realisiert wurden. Die Emissionen konnten in dieser Periode um fast 80% gesenkt werden. Im Wesentlichen ist das auf die sukzessive Einführung der EURO-Abgasnormen, der Reduktion des Benzol-Gehalts im Benzin, der VOC-Abgabe und der Umsetzung verbesserter Benzinlagerung und -umschlag (z.B. Gasrückführung an Tankstellen) zurückzuführen.

4. Ausbreitungsrechnung

4.1. Prinzip

Für die Ausbreitungsrechnung wird in einem Vorprozess ein Set von Transferfunktionen in Hektarauflösung bereitgestellt. Für mehrere Geometrien (Punkt-, Linien-, Flächenquellen; verschiedene Emissionshöhen zwischen 2 m und 40 m, Ganglinien für Verkehr, Raumwärme, Industrie) wird mit stündlichen Meteodaten für das Jahr 2005 und mit einer Einheitsemission (1 t/a) eine Gaussmodellierung durchgeführt. Zusätzlich wird das Untersuchungsgebiet in verschiedene Windregionen mit unterschiedlichen Meteodaten (v.a. Windrichtungen) unterteilt (siehe unten). Details siehe FOEN (2011) in Annex 3. Ergebnis der Ausbreitungsrechnung sind räumliche Muster mit einer Ausdehnung von 20.1 km x 20.1 km in deren zentrale Hektare die Emissionsquellen stehen (mehrere Quellen im Falle von Linien- und Flächenquellen). Von der zentralen Hektare aus werden die Benzol-Emissionen über 10 km in jede Himmelsrichtung ausgebreitet. Jede Transferfunktion enthält somit $201 \times 201 = 40'401$ Zellen. Jedem Emissions-Grid wird seine passende Transferfunktion zugeordnet und die Emission mit jedem Zellenwert multipliziert: „Feuerungen 12 m“ beispielsweise wird mit dem Emissions-Grid aller Flächenquellen mit Kaminhöhen 2–20 m multipliziert und überlagert. Auf diese Weise wird jedes Benzol-Emissions-Grid in ein Benzol-Immissions-Grid umgelegt.

4.1.1. Meteorologie

Die Transferfunktionen werden mit einem Gauss'schen Dispersionsmodell in der Version gemäss TA Luft (BMJ 1987) erzeugt. Die wichtigsten Inputvariablen für die Berechnung der Transferfunktionen sind die Meteodaten aus dem Jahr 2005, die Emissionshöhen sowie die Quellenart.

In jeder Windregion werden die passenden Transferfunktionen angewendet, basierend auf ihren charakteristischen Windrosen und weiterer Meteodaten wie Windgeschwindigkeit, Temperatur, Höhe der Mischungsschicht und TA-Luft Stabilitätsklassen. Folgende vier Gebietskategorien („Windregionen“) mit eigenen Meteorologien wurden für die Schweiz verwendet:

- Für die Flachlandmeteorologie „Mittelland“ werden die Transferfunktionen aus dem Schweizer Modell (FOEN 2011) verwendet, die aus den Messdaten der SwissMetNet-Stationen Genf (GE), Payerne (VD), Wynigen (BE), Zürich-Kloten (ZH) und Güttingen (TG) gewonnen werden.
- Basel-Stadt stellt eine eigene Windregion dar. Sie wird auf Basis der Mittelland-Meteorologie approximiert mit einer passenden Drehung der Hauptwindrichtung (ca. -115°).
- In den Alpentälern werden die Transferfunktionen mit Messdaten der alpinen SwissMetNet-Stationen Sion (VS), Magadino (TI) und Chur (GR) erzeugt und entlang der Haupttalachse ausgerichtet (Kanalisation).
- Für die restlichen Regionen – mehrheitlich hochgelegene alpine Gebiete und die voralpine Hügellzonen – werden isotrope (rotationssymmetrische) Windrichtungen ange-

nommen. Die Transferfunktion wird dabei aus der Mittelland-Transferfunktion durch Mittelung über alle Richtungen erzeugt.

Abb. 4 zeigt die Einteilung der Schweiz in verschiedene Windregionen. Die Windregion „Mittelland“ enthält das Gebiet von Genf bis zum Bodensee inklusive dem Jura (grün). Die Alpentäler mit kanalisiert Transferfunktionen sind mit blau gekennzeichnet. Ganz im Norden wird separat noch die Windregion Basel definiert (orange). In den übrigen Gebieten (weiss) werden die Windrichtungen als isotrop betrachtet. Beispiele für eine Mittelland-Transferfunktion und eine Transferfunktion für alpine Gebiete sind in Abb. 5 illustriert.

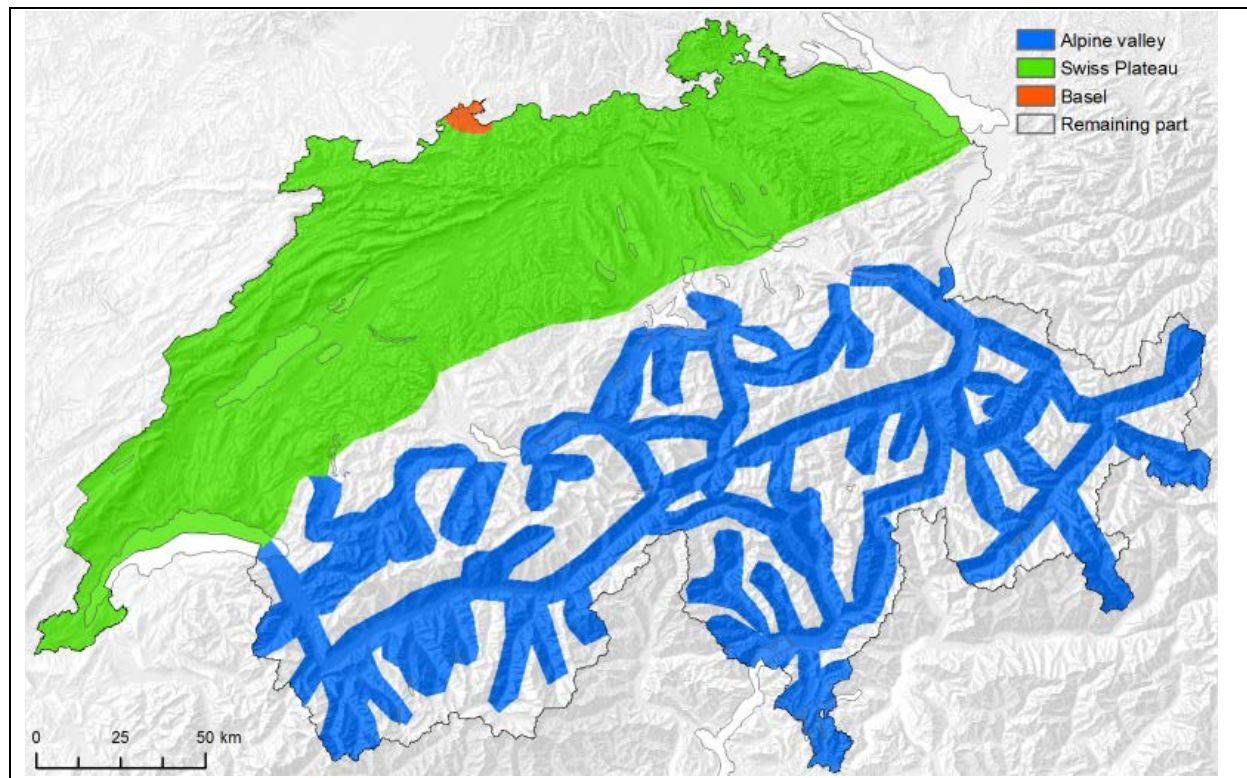


Abb. 4 Definition der Windregionen welche für die Immissionsmodellierung verwendet wurden (Quelle Hintergrundkarte: Bundesamt für Landestopografie).

4.1.2. Transferfunktionen

Transferfunktionen werden neben der Aufteilung in Windregionen auch noch nach quellspezifischen Eigenschaften unterschieden (siehe Tabelle 5). Spezifikationen:

- 2 m Emissionshöhe¹ für die mobilen Emissionsquellen des Strassenverkehrs (siehe 3.2.1), der Baumaschinen und Industriefahrzeuge (siehe Kap 3.4.2) sowie für die Emissionen landwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher Fahrzeuge (siehe Tabelle 5). Die räumliche Ausdehnung beträgt 20.1 km x 20.1 km.
- 12 m Emissionshöhe für die Benzol-Emissionen des Schienenverkehrs (siehe Kap. 3.2.2), des Schiffsverkehrs (siehe Kap. 3.2.3), der Heizöl- und Erdgasfeuerungen und

¹ Emissionshöhe = Kaminhöhe plus Fahnenüberhöhung (resp. Ausstosshöhe bei mobilen bodennahen Quellen)

der Garten- und Hobbygerätschaften (siehe Kap. 3.4.2) sowie der Holzfeuerungen (siehe Kap. 3.4.1). Die räumliche Ausdehnung beträgt 20.1 km x 20.1 km.

- 25 m Emissionshöhe für Emissionen aus Haushalten und Dienstleistungen der sechs grössten Schweizer Städte inklusive deren Agglomerationsgemeinden (siehe 3.4.1 a). Die räumliche Ausdehnung beträgt 20.1 km x 20.1 km.
- 40 m Emissionshöhe für industrielle Benzol-Emissionen aus Flächenquellen (siehe 3.4.1 a). Die räumliche Ausdehnung beträgt 20.1 km x 20.1 km.

Es wurde zwischen innerorts und ausserorts unterschieden (siehe Tabelle 5 und FOEN 2011).

Weiter werden Transferfunktionen für unterschiedliche Quellenarten verwendet: Linienquellen und Flächenquellen. Für die Ausbreitungsrechnung werden die Unterschiede mithilfe unterschiedlicher Positionen von Emissionsquellen simuliert:

- Linienquellen (Strassen in Alpentälern): Es werden vier Punktquellen in einer geraden Linie hintereinander in der Mitte der Gitterzelle aufgestellt (Linienquelle in Talhauptideutung).
- Flächenquellen (Feuerungen Haushalte, Industrie, Gewerbe, Dienstleistungen; Strassen im Mittelland; Bau- und Industriemaschinen; Land- und Forstwirtschaft): Es werden vier Punktquellen quadratisch in der Gitterzelle aufgestellt, weil es sich bei diesen Quellen im Kataster de facto um eine nicht näher definierbare Zusammenstellung von dispersen Einzelquellen ohne spezifische räumliche Ausrichtung handelt.

Quellkategorie	Emissionshöhe der Transferfunktion	Klimaregion
Verkehr Strassenverkehr Strassenverkehr Schiene Schiffsverkehr	2 m Linienquelle (inner- und ausserorts) 2 m Flächenquelle (inner- und ausserorts) 12 m (ausserorts) 12 m (ausserorts)	Alpentäler Mittelland, Isotrop und Basel Mittelland, Alpentäler, Isotrop und Basel Mittelland, Alpentäler, Isotrop und Basel
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen Heizöl-/Erdgasfeuerungen, Garten-/Hobby-Geräte Holzfeuerungen	12 m (innerorts) & 25 m (innerorts) 12 m (innerorts)	Mittelland, Alpentäler, Isotrop und Basel Mittelland, Alpentäler, Isotrop und Basel
Industrie Baumaschinen Industriefahrzeuge Flächenquellen	2 m (inner- und ausserorts) 2 m (innerorts) 25 m (innerorts) & 40 m (ausserorts)	Mittelland, Alpentäler, Isotrop und Basel Mittelland, Alpentäler, Isotrop und Basel Mittelland
Land-/Forstwirtschaft Maschinen und Geräte	2 m (ausserorts)	Mittelland, Alpentäler, Isotrop und Basel

Tabelle 5 Transferfunktionen und die entsprechenden Quellkategorien.

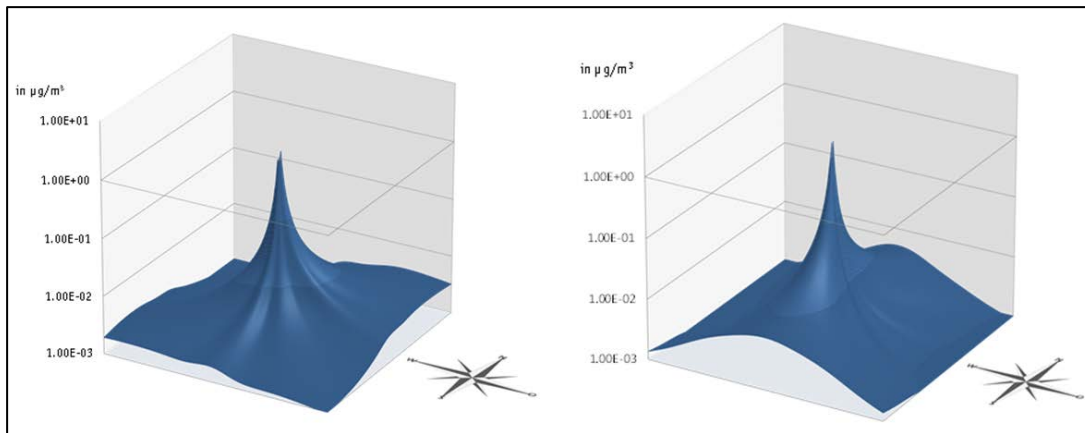


Abb. 5 Beispiel einer Mittelland- (links) und einer alpinen (rechts) Transferfunktion für eine Flächenquelle (1 t Benzol pro Jahr) die auf 12 m Emissionshöhe im Zentrum lokalisiert ist. Die horizontalen Achsen erstrecken sich über je 20.1 km (400 km²). Die räumliche Auflösung beträgt 100 m x 100 m (1 ha). Die vertikale Achse gibt die Benzol-Konzentration in µg/m³ an.

4.1.3. Modellierung der Benzol-Hintergrundimmissionen

Würden nur Immissionen aus der Ausbreitungsrechnung berechnet, würden keine Schadstoffverfrachtungen über Distanzen von mehr als 10–14 km berücksichtigt. Dies entspräche nicht der Wirklichkeit, denn die Emissionen werden über die Grenzen der Transferfunktionen hinaus verfrachtet. Deshalb wird eine Hintergrundimmission addiert, welche diesen vernachlässigten Effekt kompensieren soll und welche zusätzlich die Schadstoffimporte aus dem Ausland berücksichtigt. Ohne diese Hintergrundimmission wäre die Summe aller Benzol-Immissions-Grids im Vergleich zu den Messwerten zu klein.

Die zeitliche Entwicklung der Hintergrundimmission erfolgte durch empirische Kalibrierung aus dem Vergleich mit Messwerten. Die folgende Abb. 6 zeigt Zeitreihen der verfügbaren Messungen und die Modellfunktionen für die Höhe 400 m über Meer (die Abhängigkeit der Modellfunktion von der Höhe über Meer wird auf dieser Darstellung nicht sichtbar). Ein vertiefter Vergleich zeigt, dass die Stationen im Kt. Wallis systematisch höher liegen als in der übrigen Schweiz. Der Grund dürfte beim überdurchschnittlichen Anteil chemischer Industrie in diesem Kanton zu suchen sein in Kombination mit der besonderen topografischen und klimatischen Situation des Kantons.

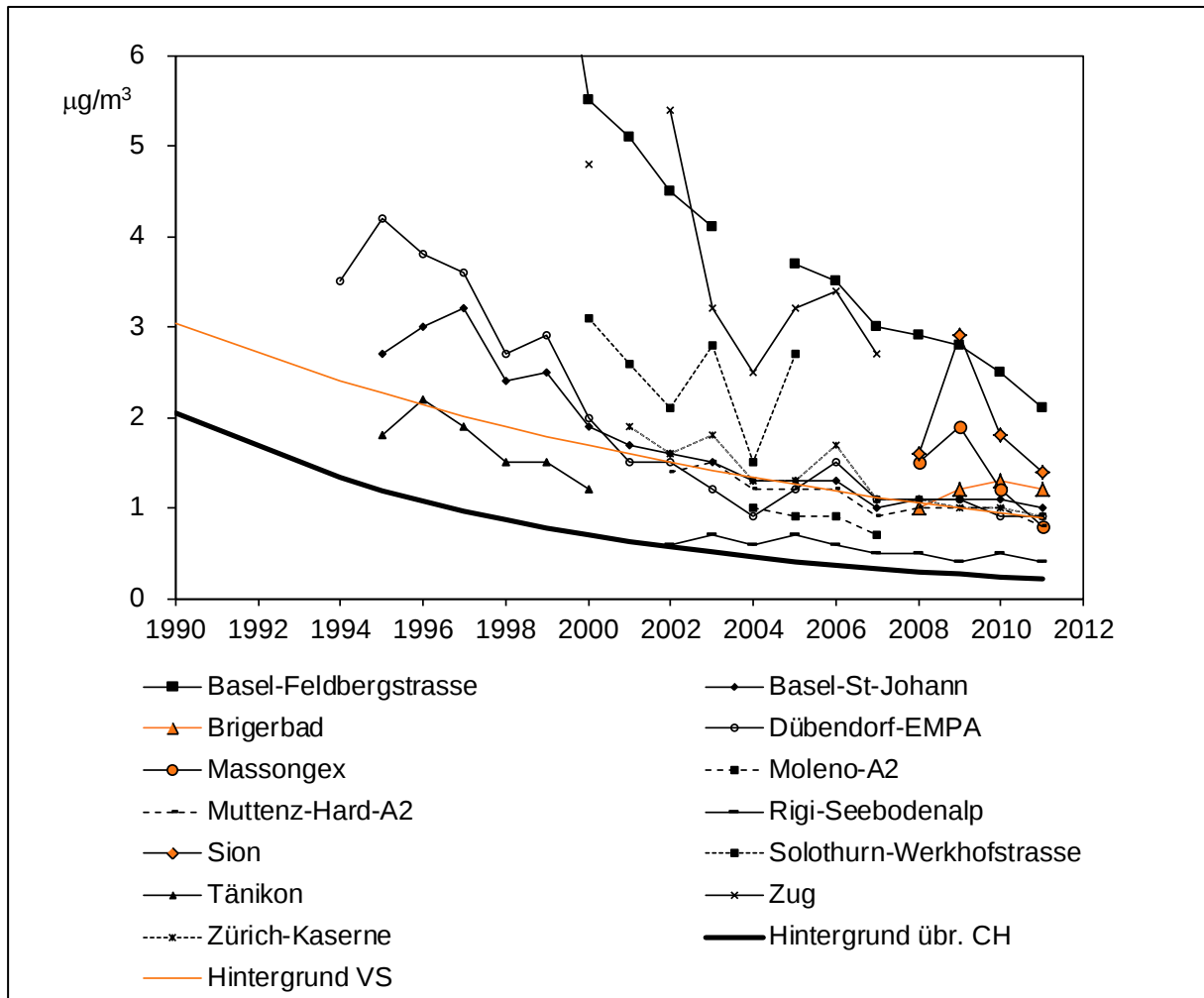


Abb. 6 Zeitreihe von Benzolmessdaten Schweiz sowie die im Modell verwendeten Hintergrund-Funktionen „Hintergrund VS“ und „Hintergrund übr. CH“. Fit anhand von Differenzen zwischen Mess- und Modellwerten.

Die Formeln für die Hintergrund-Funktionen lauten:

$$c_k(h, t) = a_k(t) * \exp[-(h - 400) / h_0] \quad k = 1 \text{ (übrige Schweiz)}, k = 2 \text{ (Wallis)}$$

$$\text{Alpennordseite: } c_1(h, t) = a_1(t) \text{ für } h < 400 \text{ m}$$

$$h_0 = 2000 \text{ m}$$

$$a_1(1990) = 2.04 \mu\text{g} / \text{m}^3; \quad \text{Wallis : } a_2(1990) = 3.04 \mu\text{g} / \text{m}^3$$

$$a_1(2010) = 0.24 \mu\text{g} / \text{m}^3; \quad \text{Wallis : } a_2(2010) = 0.94 \mu\text{g} / \text{m}^3$$

$$a_1(2020) = 0.082 \mu\text{g} / \text{m}^3; \quad \text{Wallis : } a_2(2020) = 0.182 \mu\text{g} / \text{m}^3$$

Im Übergangsgebiet Unterwallis bis Genfersee wurde zwischen den unterschiedlichen Koeffizienten (a_1 und a_2) Abstufungen eingefügt.

Abb. 7 zeigt zeigt die Benzol-Hintergrundimmission 1990.

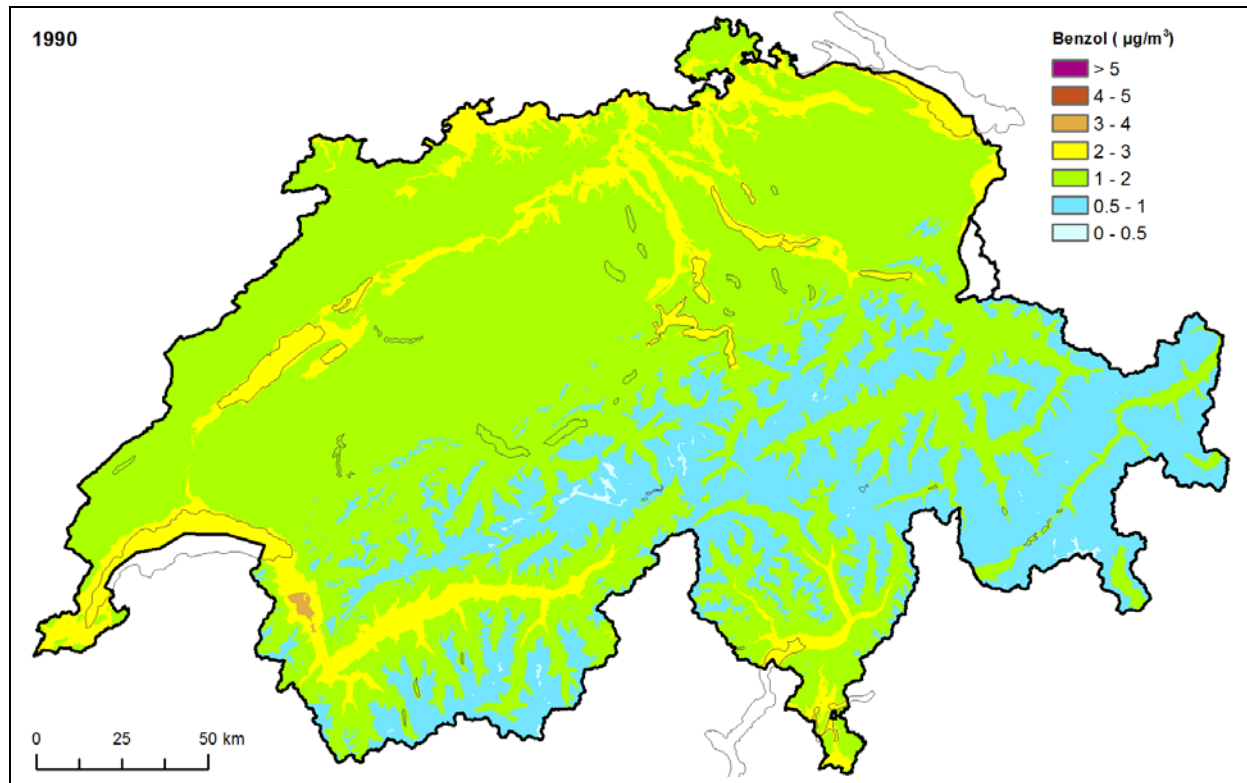


Abb. 7 Importierte Benzol-Immissionen, Immissionen aus nicht berücksichtigten Emissionen und Immissionen, die aufgrund der beschränkten Ausbreitungsdistanzen vernachlässigt sind, werden im Modell in Form einer Hintergrundimmission berücksichtigt.

4.2. Umsetzung

Die Umsetzung des Modells erfolgt in mehreren Schritten:

In einem ersten Schritt werden die Transferfunktionen in einem eigenen FORTRAN-Programm (Airplume) berechnet. In einem zweiten Schritt werden diese mit Hilfe einer GIS-Applikation PolluMap (ArcInfo, ArcGIS²) implementiert, ebenso die einzelnen Emissions-Grids in Form von Rasterdaten.

Die Umrechnung der Emissionen in Immissionen erfolgt mit PolluMap. Abb. 8 zeigt den schematischen Aufbau und den Datenfluss zwischen den beiden Teilapplikationen Airplume und PolluMap.

² ArcInfo® und ArcGIS® sind gesetzlich geschützte Marken von Esri Inc., Redlands, USA

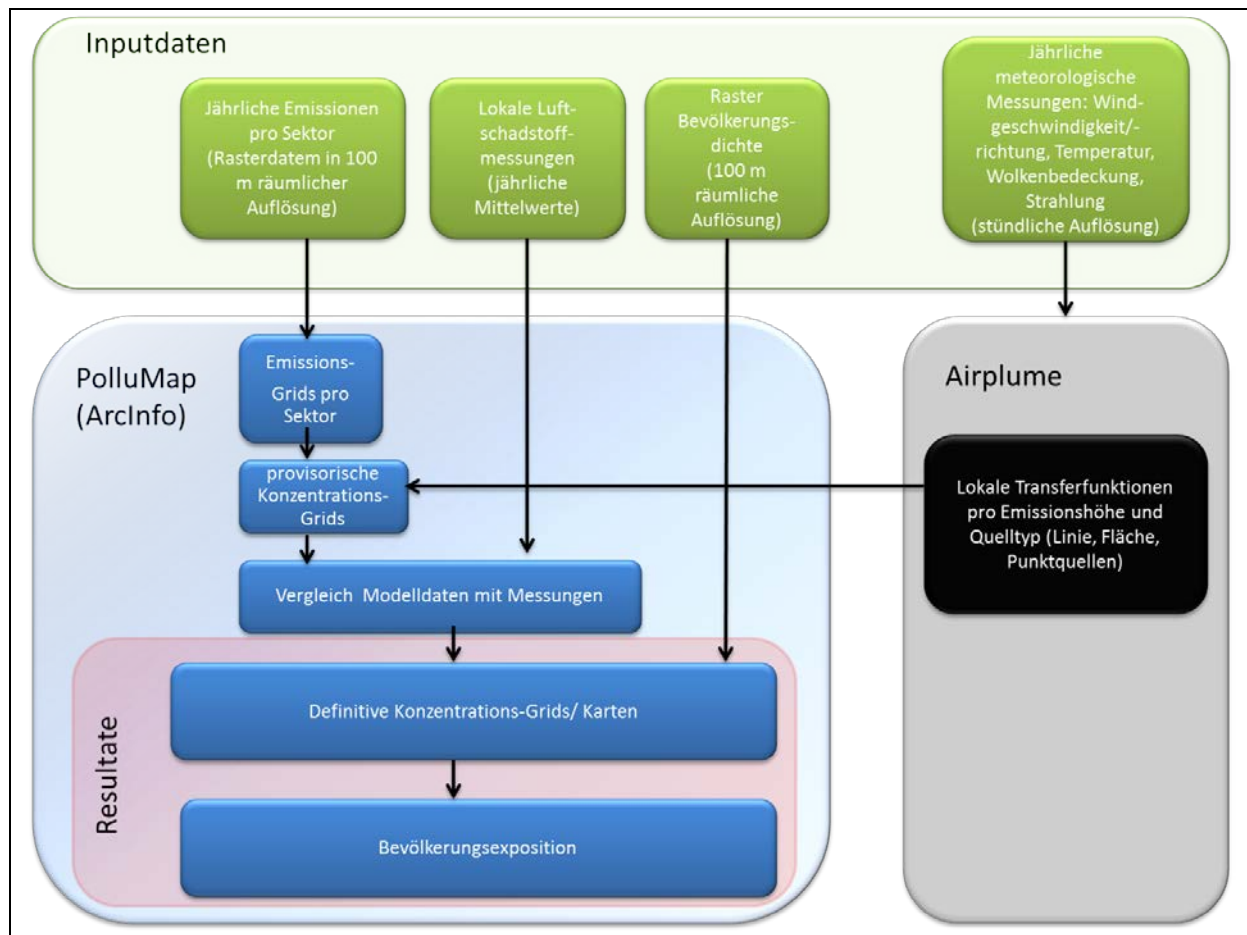


Abb. 8 Schema zum Modellablauf und zum Datenfluss.

5. Modellresultate

5.1. Hinweise zur Interpretation der Benzol-Immissionskarten

Für die Interpretation der Karten gilt es folgende Punkte zu berücksichtigen:

a) Räumliche Mittelwerte des Modells versus punktförmige Messwerte

Aufgrund der Modellauflösung von 100 m kann das Immissionsmodell keine Variationen der Immissionen <100 m darstellen. Aus Messungen ist bekannt, dass es in Siedlungsgebieten bedeutende Konzentrationsänderungen in Abhängigkeit des Strassenabstandes auf der Skala von 10–20 m gibt: Je grösser der Abstand von der Strasse umso geringer die Konzentration, die durch den Verkehr auf der Strasse verursacht wird. Entfernt man sich von der Strasse, ist die Abnahme der Konzentration auf den ersten 50 m besonders stark und flacht anschliessend ab. Das Modell berechnet aber räumliche Mittelwerte für Hektaren und kann damit Spitzenwerte im Strassenraum, wie sie in dicht bebauten Strassenschluchten auftreten, nicht darstellen. Diese Tatsache muss beim Vergleich mit Messungen berücksichtigt werden. Grundsätzlich wäre es möglich, das Modell auf Spitzenwerte zu kalibrieren, aber mit Blick auf die gesuchte Bevölkerungsexposition ist die Modellierung von räumlichen Mittelwerten realistischer als jene von Spitzenwerten, weil die Wohnorte der Bevölkerung nicht auf den Strassen, sondern zwischen den Strassen liegen, dort wo die Konzentrationen nicht mehr maximal sind.

b) Abweichungen zwischen Modell und Messwerten

Abweichungen zwischen Modell- und Messwerten können mehrere Gründe haben:

- Modellunsicherheiten wegen
 - Unzulänglichkeiten des Immissionsmodells z.B. im Ausbreitungsmechanismus,
 - Unzulänglichkeiten in den Emissionskatastern wenn z.B. im Verkehrsmodell Links fehlen, wenn auf bestehenden Links das Verkehrsmodell falsche Belastungen generiert oder das Emissionsmodell wegen falscher Zuordnung zu Verkehrssituationen die realen Emissionen unter- oder überschätzt,
 - ungeeigneter Vergleichsmöglichkeit aus dem oben genannten Grund der limitierten räumlichen Auflösung, z.B. kann der Messwert in einer stark befahrenen Strassenschlucht nicht mit dem räumlichen Mittelwert in der betroffenen Hektare verglichen werden.
- Messunsicherheiten Benzol: Nach Angaben der Messstelle (EMPA) schätzt das BAFU die Messunsicherheit (als doppelte Standardabweichung) für einen Jahresmittwert Benzol bei den von der EMPA eingesetzten Messgeräten und Analysemethoden auf max. 10% (BAFU 2013b).

5.2. Benzol-Immissionen 1990–2020

Die folgenden Karten zeigen die Benzol-Immissionen der Schweiz für die Jahre 1990, 2010 und 2020. Die Konzentrationen sind als Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und in Hektarauflösung berechnet und dargestellt.

Dank der Massnahmen zur Reduktion des Benzolgehalts im Benzin, der VOC-Abgabe und bei Lagerung und Umschlag von Benzin konnten die Benzol-Immissionen sehr stark reduziert werden. 1990 lagen die Immissionen im Mittelland noch zwischen 2 und 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2010 noch zwischen 0.5 und 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Bis 2020 kann aufgrund der Emissionsentwicklung mit einer weiteren Reduktion bis unter 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gerechnet werden. Diese Entwicklung verlief und verläuft ungefähr parallel mit dem SO_2 und gilt als Erfolgsgeschichte der schweizerischen Luftreinhalte-Politik.

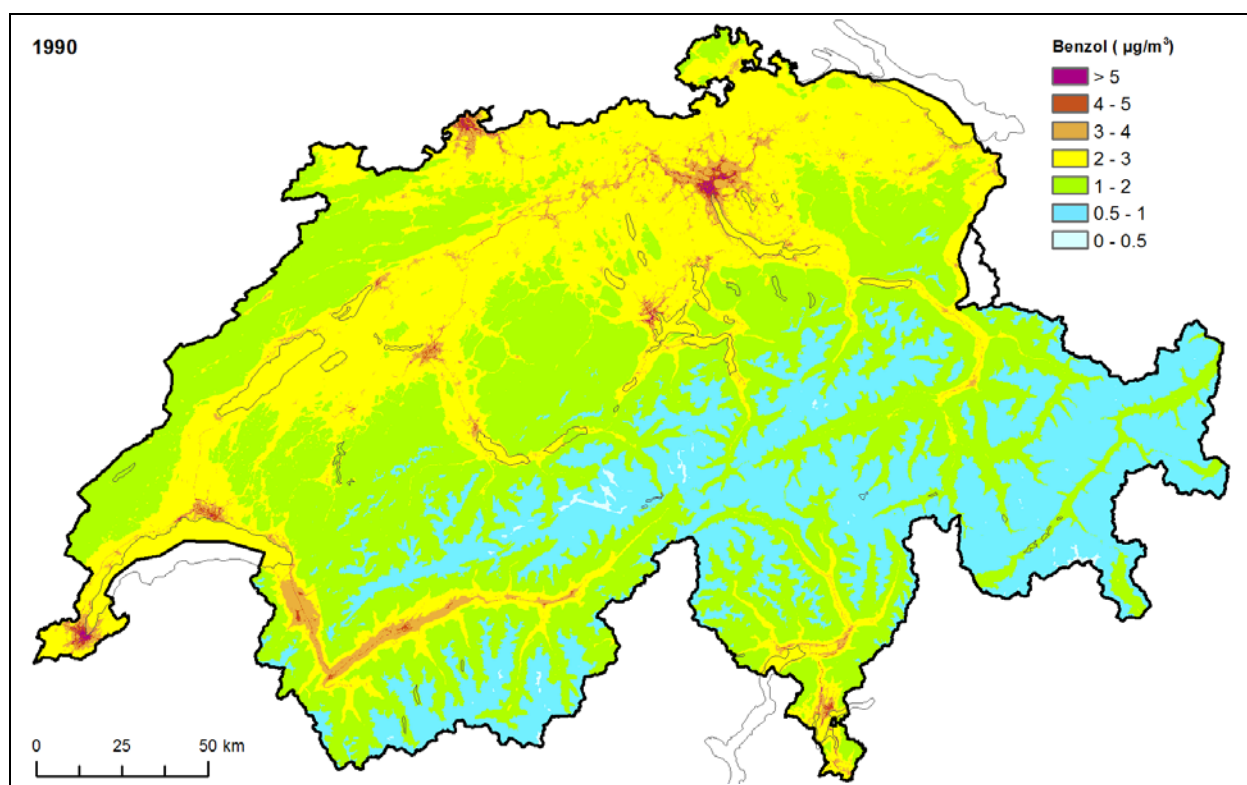


Abb. 9 Benzol -Immissionen Schweiz 1990.

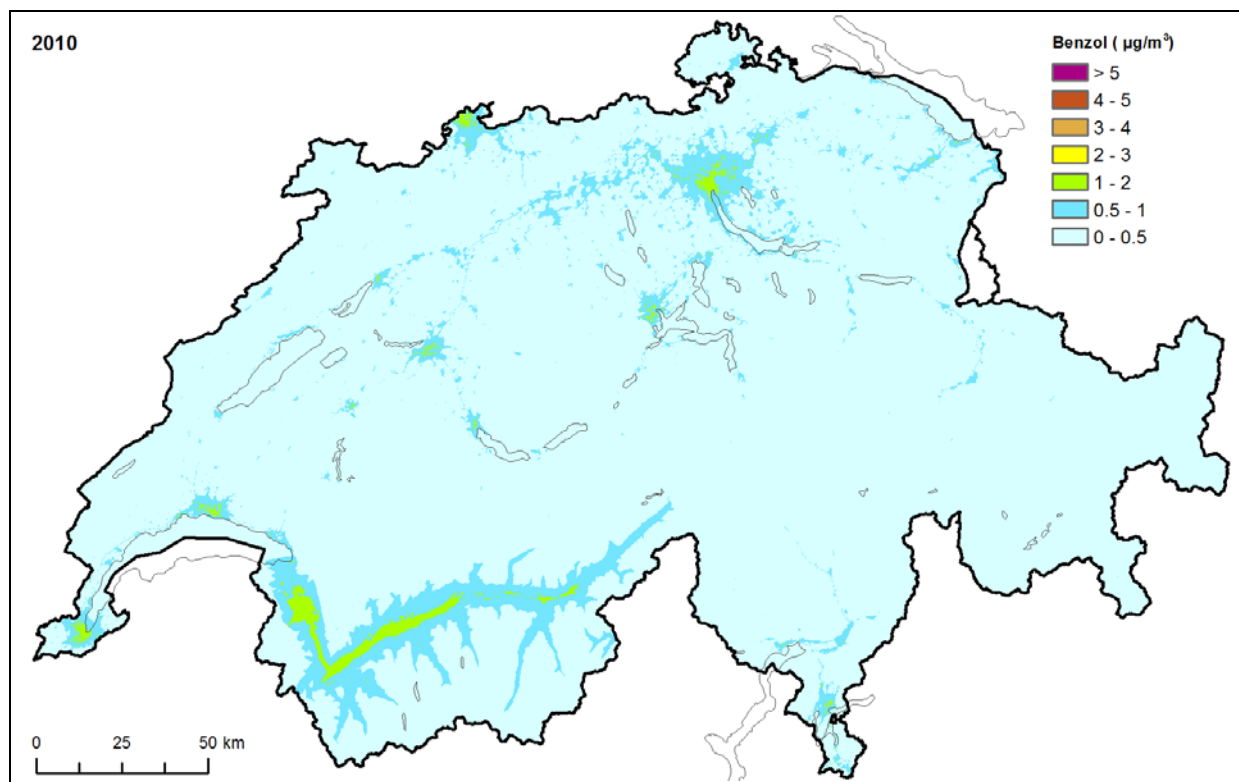


Abb. 10 Benzol -Immissionen Schweiz 2010.

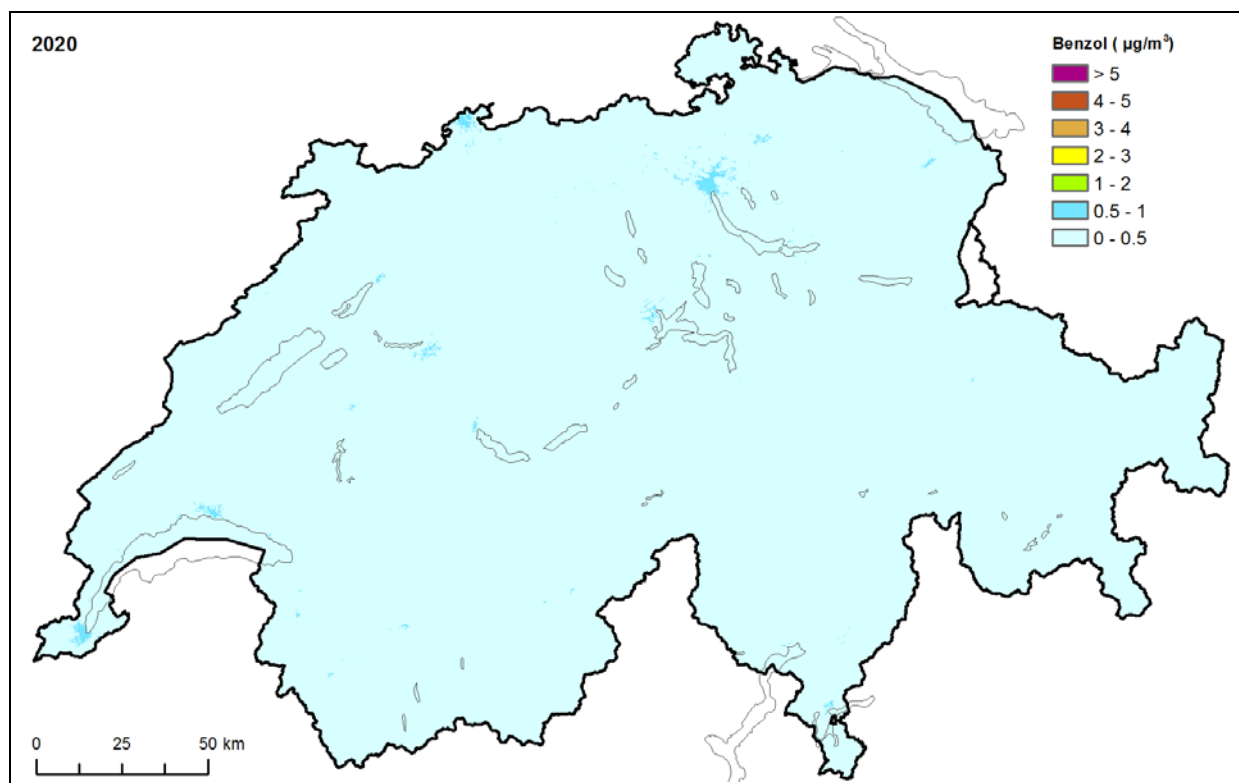


Abb. 11 Benzol -Immissionen Schweiz 2020.

5.3. Bevölkerungsgewichtete Mittelwerte 1990–2020

Der bevölkerungsgewichtete Mittelwert der Benzol-Konzentration, definiert als

$$\langle c \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N c_i \cdot EW_i}{\sum_{i=1}^N EW_i}, \quad i \text{ läuft über alle Hektaren der Schweiz}$$

$\langle c \rangle$ bevölkerungsgewichteter Mittelwert der Benzol-Konzentration

c_i Benzol-Konzentration in der Hektare i

E_i Anzahl Einwohner in der Hektare i

gibt an, welcher durchschnittlichen Benzol-Konzentration die Schweizer Bevölkerung ausgesetzt ist. Dieser Wert spielt in der Sozial- und Präventivmedizin eine wichtige Rolle. In Tabelle 6 ist er für alle Untersuchungsjahre aufgeführt und zeigt die sehr starke Abnahme zwischen 1990 und 2010 von 100% auf 22%. Für die Phase 2010 bis 2020 ist aufgrund der Emissionsreduktionen eine weitere Absenkung bis auf 11% zu erwarten. Für die Berechnung wurden die Hektardaten zur Bevölkerung des Bundesamts für Statistik benutzt (BFS 2010). Sie basieren auf den Volkszählungen 1990 und 2010.

Jahr	Bevölkerungsgewichtete Benzol-Konzentration	
1990	3.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(100%)
2010	0.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(22%)
2020	0.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(11%)

Tabelle 6 Bevölkerungsgewichtete Mittelwerte der Benzol-Immissionen.

Eine Fehlerabschätzung zeigt, dass die bevölkerungsgewichtete Benzol-Konzentration sehr robust ist. Selbst unter der pessimistischen Annahme, dass der Fehler der Konzentrationswerte in den einzelnen Hektaren 100% beträgt, bleibt der Fehler des bevölkerungsgewichteten Mittelwerts unter $0.002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (der relative Fehler ist umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Anzahl Hektaren).

6. Datenqualität

6.1. Messstationen und Messwerte

Die zum Vergleich von Modellwert und Messwert verwendeten Stationen sind in Tabelle 7 aufgeführt. Da die Datenlage insgesamt sehr dünn ist, konnten zur Überprüfung der Modellwerte lediglich auf Messwerte 9 verschiedener Messstationen zurückgegriffen werden. Die Station-ID dient zur Kennzeichnung der Station im Scatterplot und Residuenplot (Abb. 12).

Station	Stations-ID	Modellwert 2010 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Messwert 2009-2011 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Differenz Mod.-Mess. in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Basel-St-Johann	bsBSJ	1.2	1.1	0.1
Bern-Bollwerk	beBER	1.1	1.4	-0.3
Brigerbad	vsBRG	1.0	1.2	-0.2
Dübendorf-EMP	zhDUE	0.8	1.0	-0.2
Massongex	vsMAS	1.1	1.3	-0.2
MuttENZ-Hard-A2	blMUT	0.9	0.9	-0.1
Rigi-Seebodenalp	szRIG	0.2	0.4	-0.2
Sion	vsSVE	1.6	2.0	-0.4
Zürich-Kaserne	zhZUE	1.2	1.0	0.3
Basel-Feldbergstrasse	bsBFB	1.4	2.5	-1.1
Mittelwert		1.1	1.3	-0.2

Tabelle 7 Messstationen und Messwerte Benzol (2009–2011), Modellwerte (2010)

6.2. Vergleich von Modellwerten mit Messwerten 2010

Abb. 12 zeigt Mess- und Modellwerte von Benzol als Scatterplot. Zur Modellierung und zum Vergleich für das Jahr 2010 (Mittel 2009–2010) standen 10 Messwerte zur Verfügung (Jahresmittelwerte), siehe dazu auch Tabelle 7. Es gilt zu beachten, dass – wie in Kap. 5.1 erwähnt – methodisch verschiedene Werte miteinander verglichen werden, nämlich punktförmige Messungen mit flächigen (räumlich gemittelten) Modellwerten. Die Übereinstimmung zwischen Modell- und Messwerten ist sehr gut mit Ausnahme der Station Basel-Feldbergstrasse: Diese stellt einen Extremstandort dar mit sehr hoher Verkehrsbelastung und gleichzeitig dichter Bebauung. Dieser Fall trifft gut auf den oben genannten methodischen Hinweis zu, dass nämlich das Modell für eine solche Situation einen tieferen Wert berechnen muss, weil dieser ja einem räumlichen Mittelwert entspricht im Gegensatz zum Messwert, der den maximalen Wert an der Strasse repräsentiert.

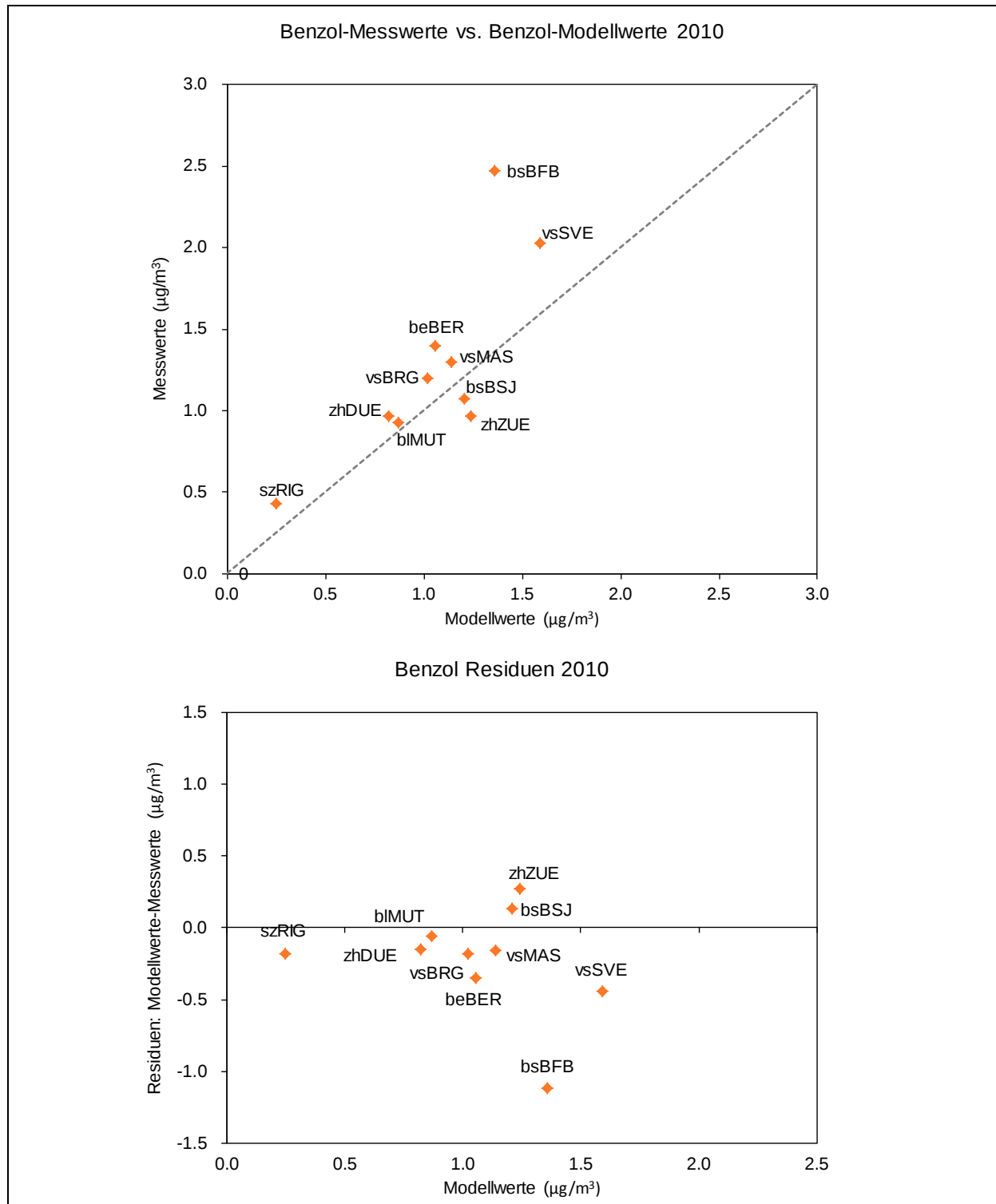


Abb. 12 Oben: Scatterplot Benzol-Messwerte (y-Achse) versus Benzol-Modellwerte (x-Achse) 2010. Messwerte: Mittel 2009–2011. Unten: Residuenplot (y-Achse: Modellwert minus Messwert).

Tabelle 8 fasst die statistischen Parameter zur Beurteilung der Modellqualität zusammen. Es sind zwei Fälle unterschieden, einmal mit der Station Feldbergstrasse, einmal ohne. Der Fall „ohne“ wird dem Modell besser gerecht, weil der Standort einer strassenschlucht-ähnlichen Situation entspricht, wie sie durch PolluMap nicht adäquat modelliert werden kann. Der Vergleich zeigt, dass die Korrelation deutlich verbessert, Bias und mittlerer Fehler nahezu hal-

biert werden Auswahl und Bezeichnung der Parameter folgen den Empfehlungen von FAIR-MODE (Forum for Air Quality Modelling, siehe z.B. EEA 2011)³.

Parameter	Einheit	2010	2010
		ohneFeldbergstr BS	mit Feldbergstr BS
Anzahl Messtationen N	—	9	10
Mittel Modellwerte (P)	µg/m ³	1.0	1.1
Mittel Messwerte (O)	µg/m ³	1.1	1.3
Bias absolut (P-O)	µg/m ³	-0.12	-0.22
Bias relativ ((P-O)/P)	—	-12%	-21%
Korrelationskoeff. R	—	0.86	0.79
Bestimmtheitsmass R ²	—	74%	62%
mittlerer Fehler absolut (RMSE)	µg/m ³	0.24	0.42
mittlerer Fehler relativ (RMSE/wurzel(P*O))	—	22%	36%

Tabelle 8 Statistische Parameter zur Modellqualität ohne und mit der Station Feldbergstrasse. Die Variante „ohne“ wird dem Modellkonzept PolluMap besser gerecht als die Varianten „mit“. Definition der Parameter siehe Spalte „Parameter“; RMSE ist die Abk. für root mean square error⁴.

³ <http://fairmode.ew.eea.europa.eu/>

⁴ $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$

Referenzen

- ARE 2006a:** Erstellung des nationalen Personenverkehrsmodells für den öffentlichen und privaten Verkehr – Modellbeschreibung. Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.
- ARE 2006b:** Perspektiven des schweizerischen Personenverkehrs bis 2030, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.
- ARE 2010:** Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK, Basismodell 2005, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.
- BAFU 2010:** Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990–2035. Aktualisierung 2010, Umweltwissen Nr. 1021, INFRAS im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Bern.
- BAFU 2013a:** E-Mail von R. Weber (BAFU) an J. Heldstab (INFRAS) vom 15. April 2013 mit Beilage Emiss-Immiss_SO2 Benzol 1980–2035 Submission2013.xlsx
- BAFU 2013b:** E-Mail von R. Weber (BAFU) an J. Heldstab (INFRAS) vom 23. August 2013 mit Beilage zur Messstation Rigi und zur Methode für die Berechnung der Messunsicherheiten.
- BFS 2001:** Arealstatistik 1992/97 – Nomenklatur NOAS92: Basiskategorien und Aggregationen, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/infothek/erhebungen_quellen/blank/blank/arealstatistik/03/03_04.Document.87951.pdf [24.06.2013]
- BFS 2009:** Leistungen des Personenverkehrs pro Strecke, aktualisierte Zeitreihe bis 2008, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- BFS 2010:** Volkszählung 2000, Bundesamt für Statistik BFS GEOSTAT, Bundesamt für Statistik, Bern. <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat.html> [24.06.2013]
- BMJ 1987:** Richtlinie zur Durchführung von Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft mit dem Programmsystem AUSTAL86. Bundesminister für Justiz (BMJ), Bundesanzeiger G 1989 A, 39, Nummer 131a (ISSN 0720-6100)
- Bundesversammlung 1983:** Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG) vom 7. Oktober 1983 (Stand am 1. August 2010), SR 814.01.
- FOEN 2010:** Switzerland's Informative Inventory Report 2010, Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Submission of March 2010 to the United Nations ECE Secretariat. Federal Office for the Environment. ...Series xxxx. Bern.
- FOEN 2011:** NO₂ ambient concentrations in Switzerland – Modelling results for 2005, 2010, 2015, Federal Office for the Environment FOEN. INFRAS/Meteotest im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Bern.

FOEN 2013: PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland – Modelling results for 2005, 2010, 2010, Federal Office for the Environment FOEN. INFRAS/Meteotest im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Bern.

INFRAS/Meteotest 2013: SO₂-Immissionen Schweiz. Modellierung 1980–2010. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Zürich/Bern.

INFRAS 2010: Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 3.1, INFRAS im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Bern.

SAEFL 2004: Modelling of NO₂ and benzene ambient concentrations in Switzerland 2000 to 2020, INFRAS/Meteotest under a contract for the Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL). Berne.

Schäffeler U., M. Keller 2008: Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors, Studie für die Jahre 1980–2020, Bundesamt für Umwelt, Bern.

Schweizerische Eidgenossenschaft 1985: Schweizerische Luftreinhalteverordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand am 15. Juli 2010), SR 814.318.142.1.

Glossar

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFS	Bundesamt für Statistik
EMIS	Emissions-Informationssystem Schweiz
FOEN	Federal Office for the Environment (engl. Name des BAFU)
ha	Hektare
HBEFA	BAFU Handbuch Emissionsfaktoren (INFRAS 2010)
IIR	Informative Inventory Report (CLRTAP)
NIR	National Inventory Report
NO ₂ , NO _x	Stickstoffdioxid, Stickoxide
PM10, PM2.5	Feinstaub (mit aerodynamischen Durchmesser kleiner 10 µm resp. 2.5 µm)
R, R ²	Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmass
SO ₂	Schwefeldioxid
USG	Bundesgesetz über den Umweltschutz (SR 814.01)

Annex

Detaillierte Benzol-Immissionskarten 1990–2020

Die Karten auf den folgenden Seiten zeigen die Immissionsbeiträge der vier Sektoren in allen untersuchten Jahren:

1990

- Verkehr
- Haushalte, Gewerbe/Dienstleistungen
- Industrie
- Land- und Forstwirtschaft

2010

- Verkehr
- Haushalte, Gewerbe/Dienstleistungen
- Industrie
- Land- und Forstwirtschaft

2020

- Verkehr
- Haushalte, Gewerbe/Dienstleistungen
- Industrie
- Land- und Forstwirtschaft

Belastungskarten 1990

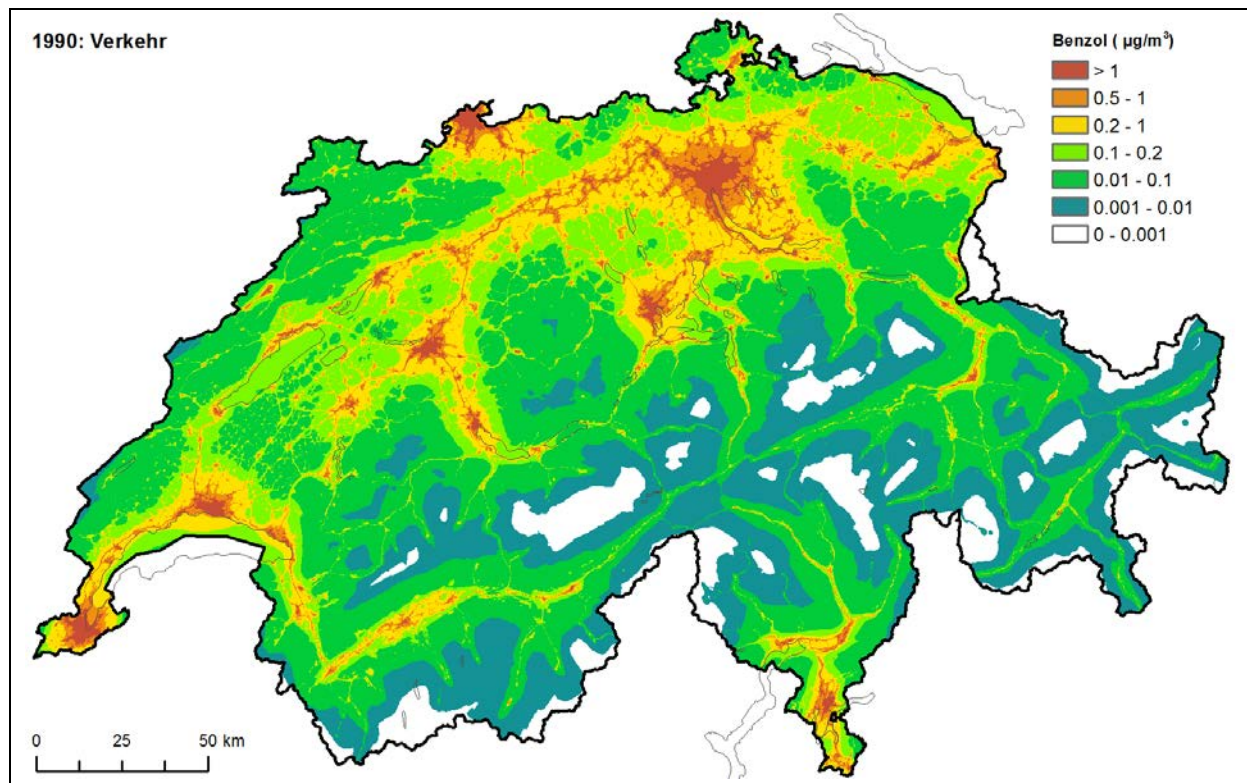


Abb. 13 Benzol-Immissionsbeitrag aus dem Verkehr (Strassen- und Offroad-Verkehr) 1990.

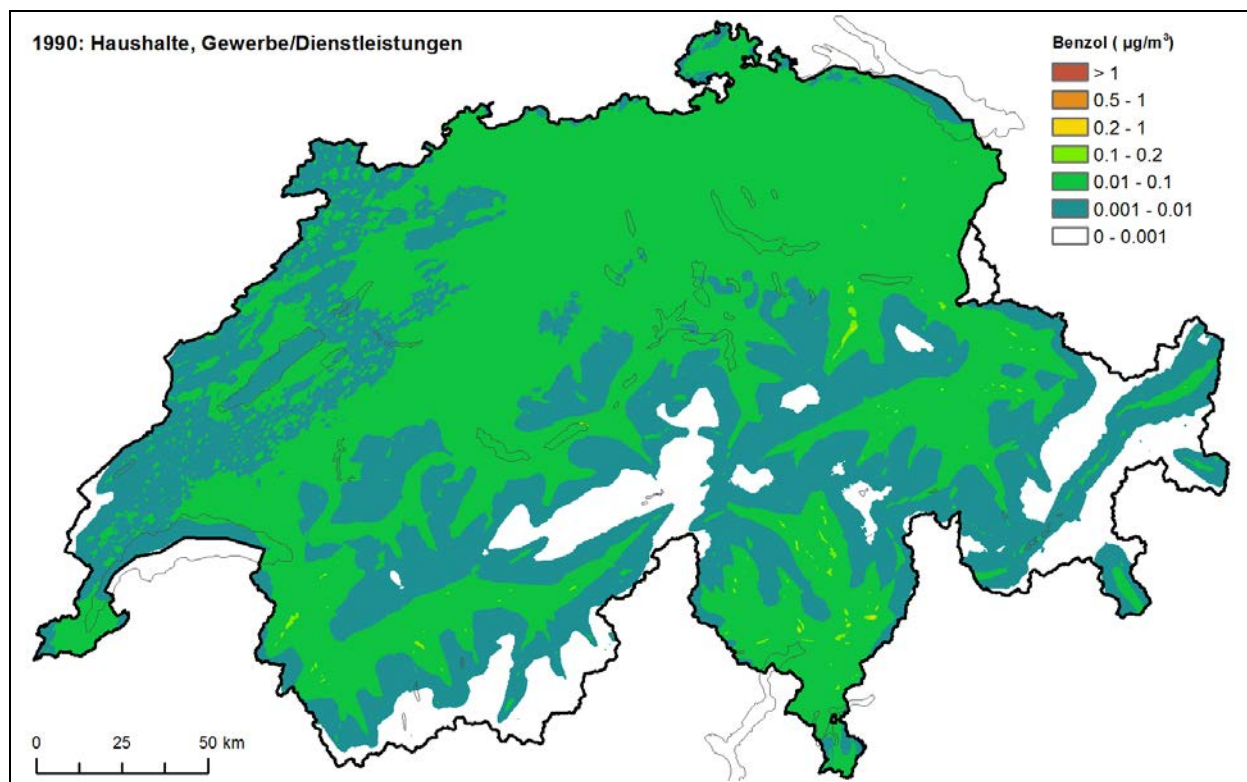


Abb. 14 Benzol-Immissionsbeitrag aus Haushalten und aus Gewerbe- und Dienstleistungsbetrieben 1990.

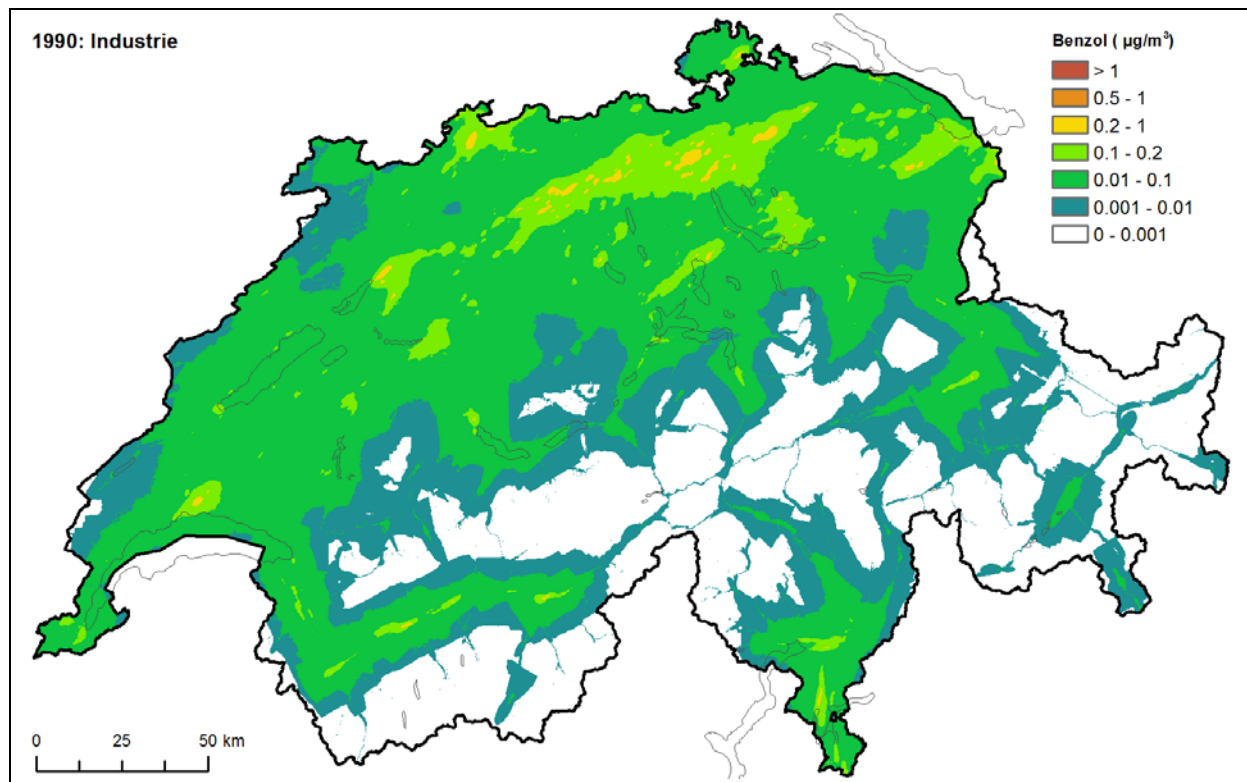


Abb. 15 Benzol-Immissionsbeitrag aus der Industrie 1990.

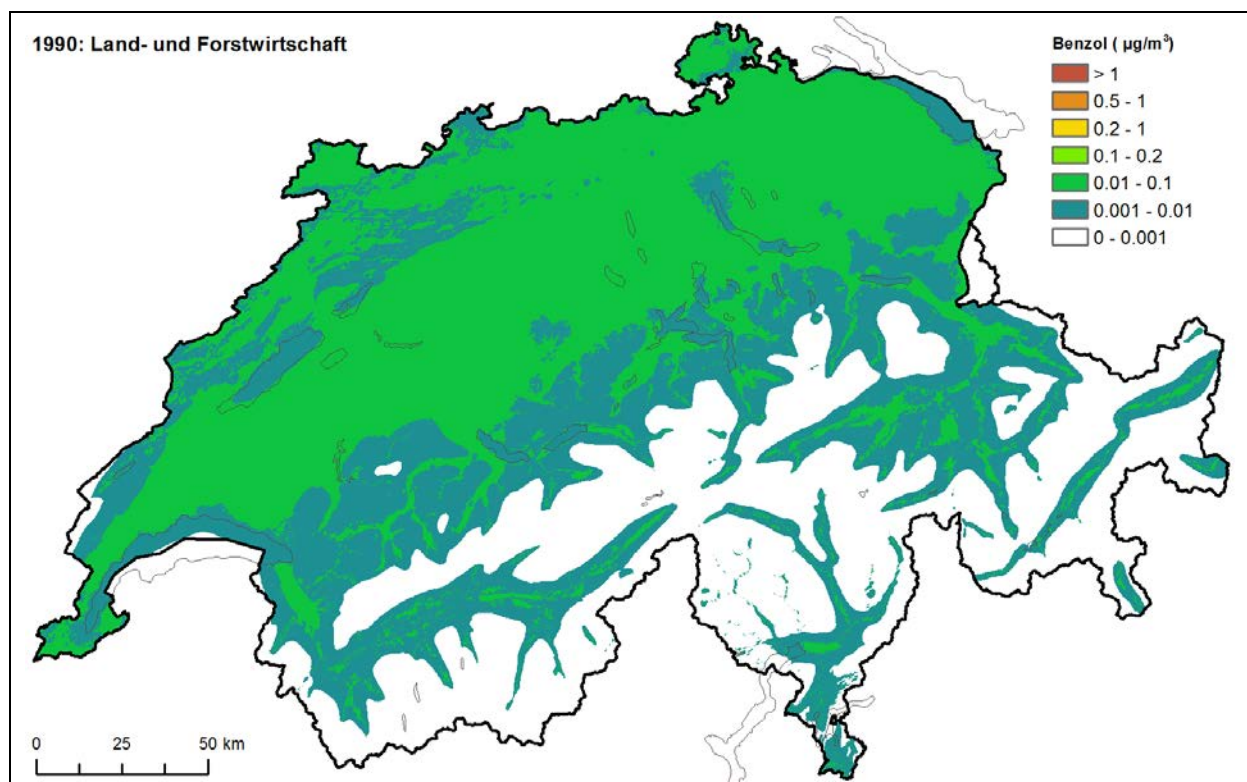


Abb. 16 Benzol-Immissionsbeitrag aus Land- und Forstwirtschaft 1990.

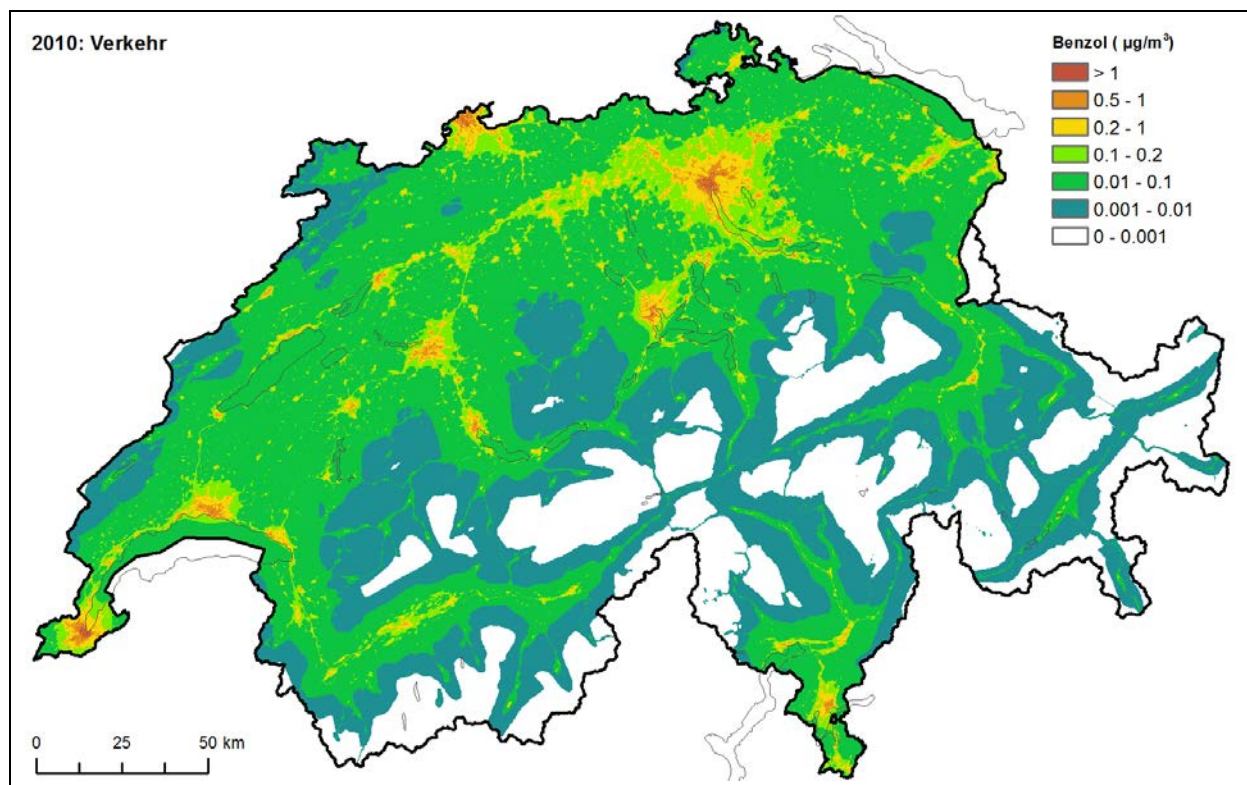
Belastungskarten 2010

Abb. 17 Benzol-Immissionsbeitrag aus dem Verkehr (Strassen- und Offroad-Verkehr) 2010.

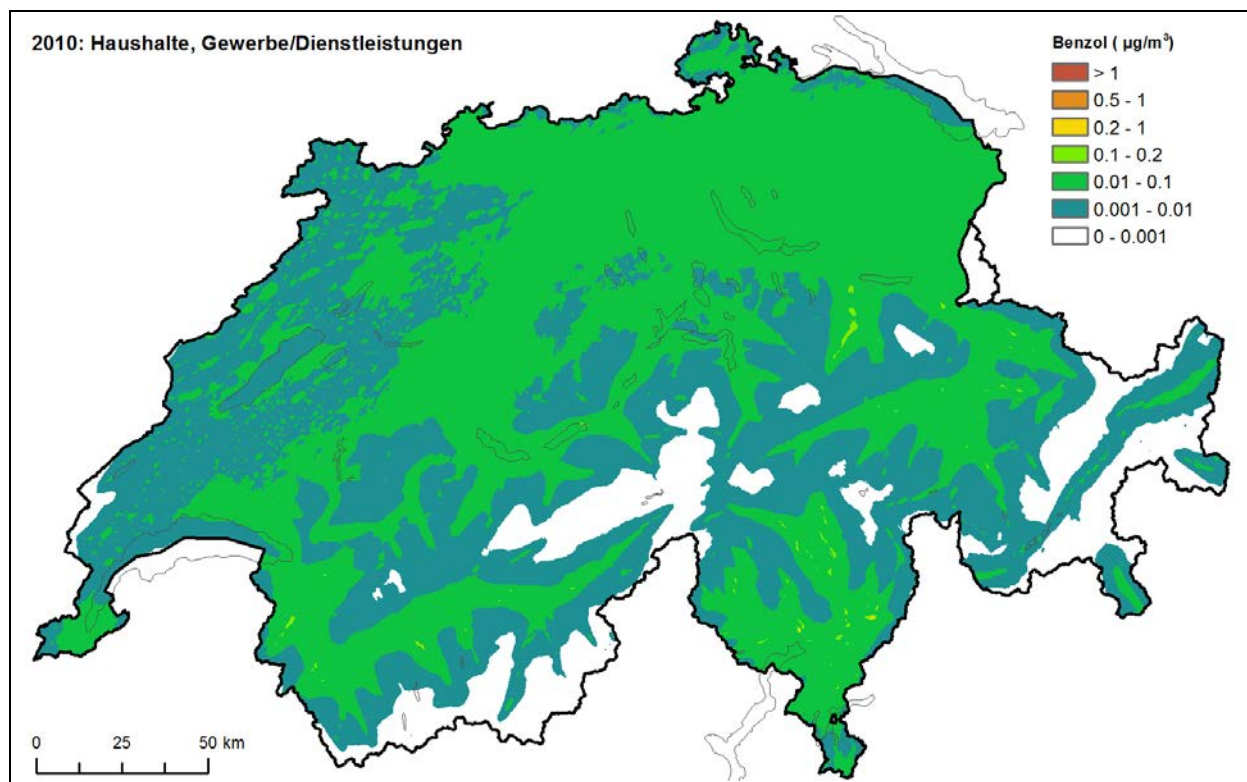


Abb. 18 Benzol-Immissionsbeitrag aus Haushalten und aus Gewerbe- und Dienstleistungsbetrieben 2010.

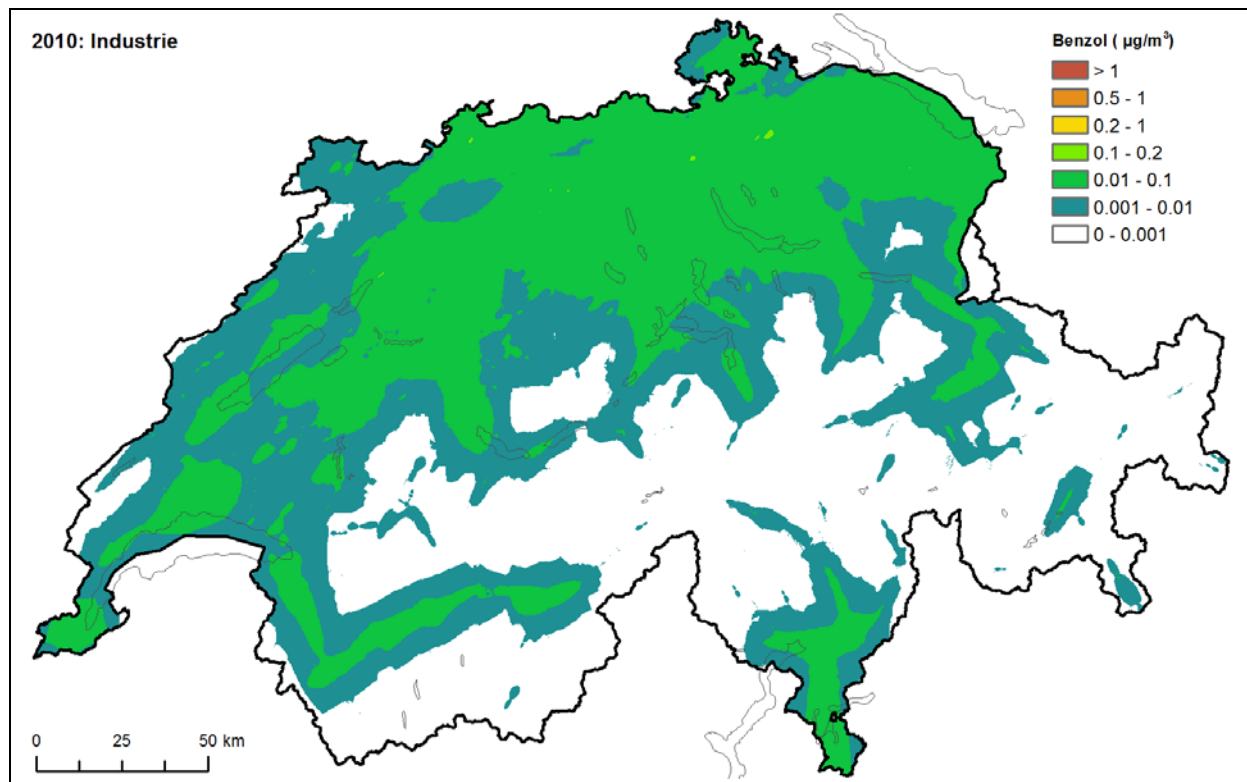


Abb. 19 Benzol-Immissionsbeitrag aus der Industrie 2010.

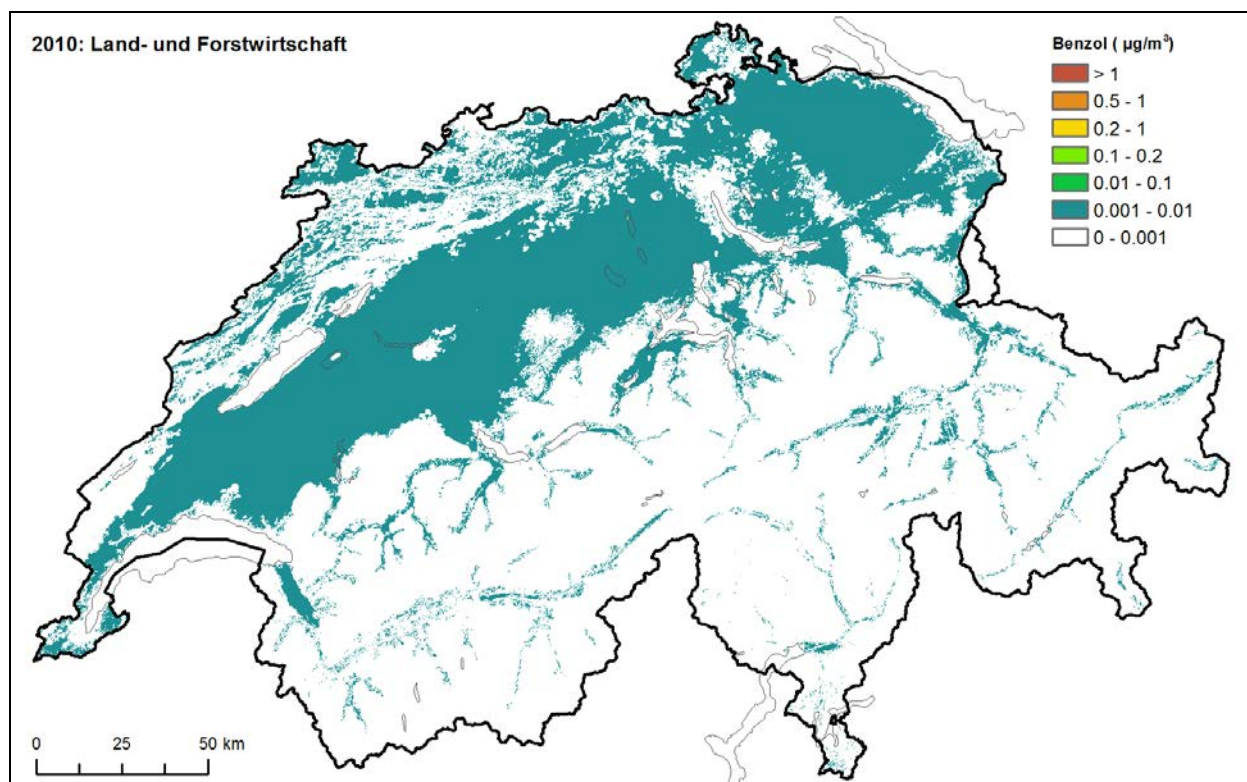
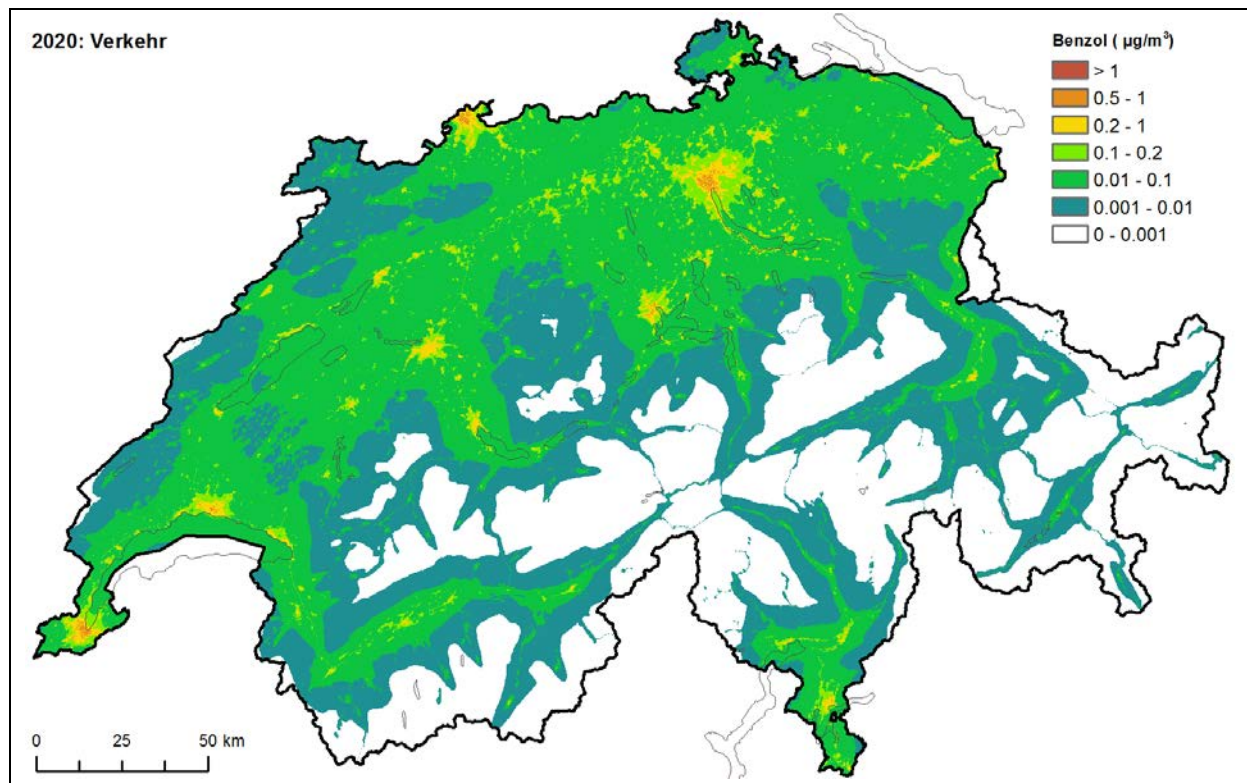
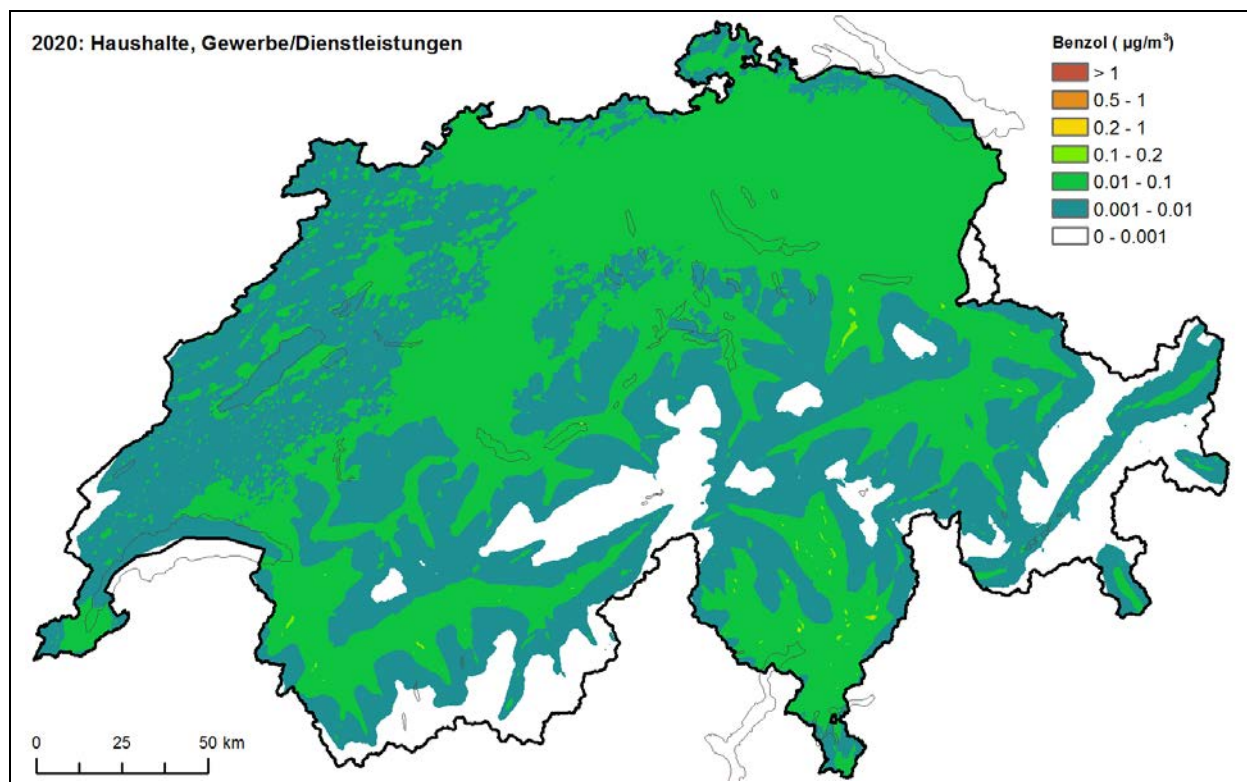


Abb. 20 Benzol-Immissionsbeitrag aus Land- und Forstwirtschaft 2010.

Belastungskarten 2020**Abb. 21** Benzol-Immissionsbeitrag aus dem Verkehr 2020.**Abb. 22** Benzol-Immissionsbeitrag aus Haushalten und aus Gewerbe- und Dienstleistungsbetrieben 2020.

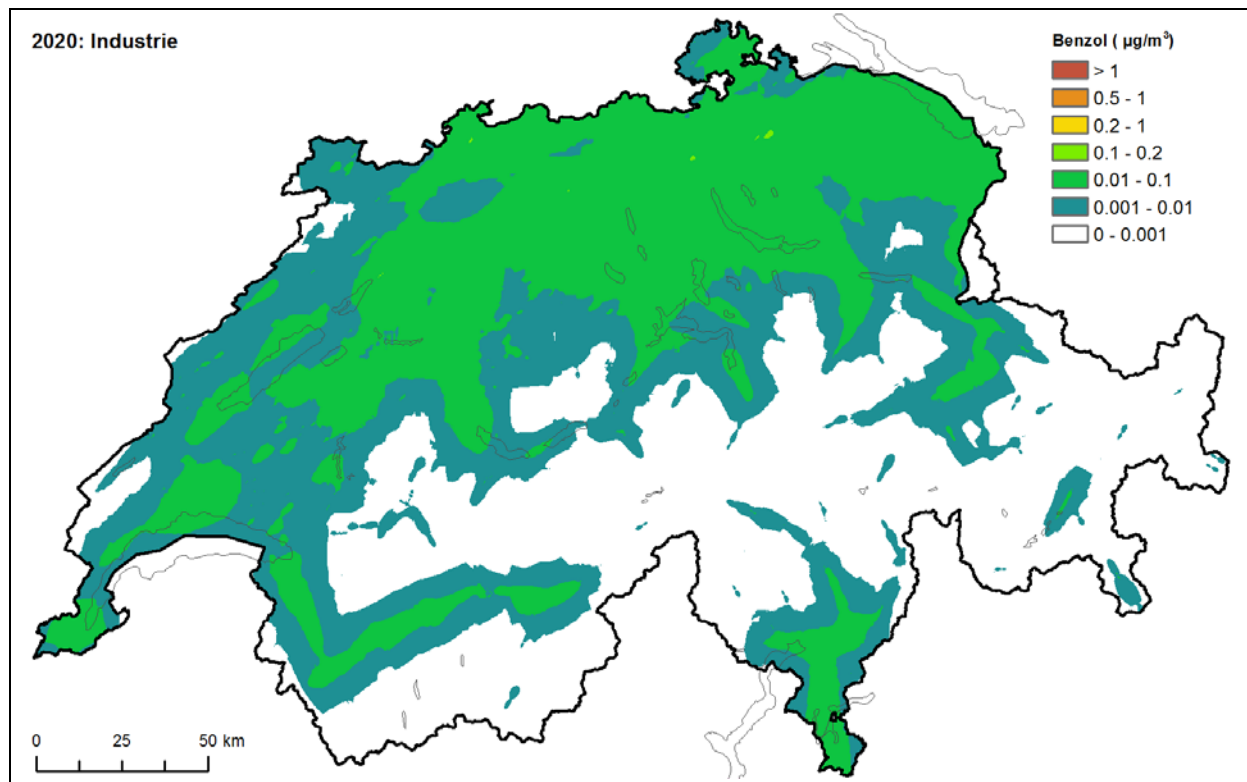


Abb. 23 Benzol-Immissionsbeitrag aus der Industrie 2020.

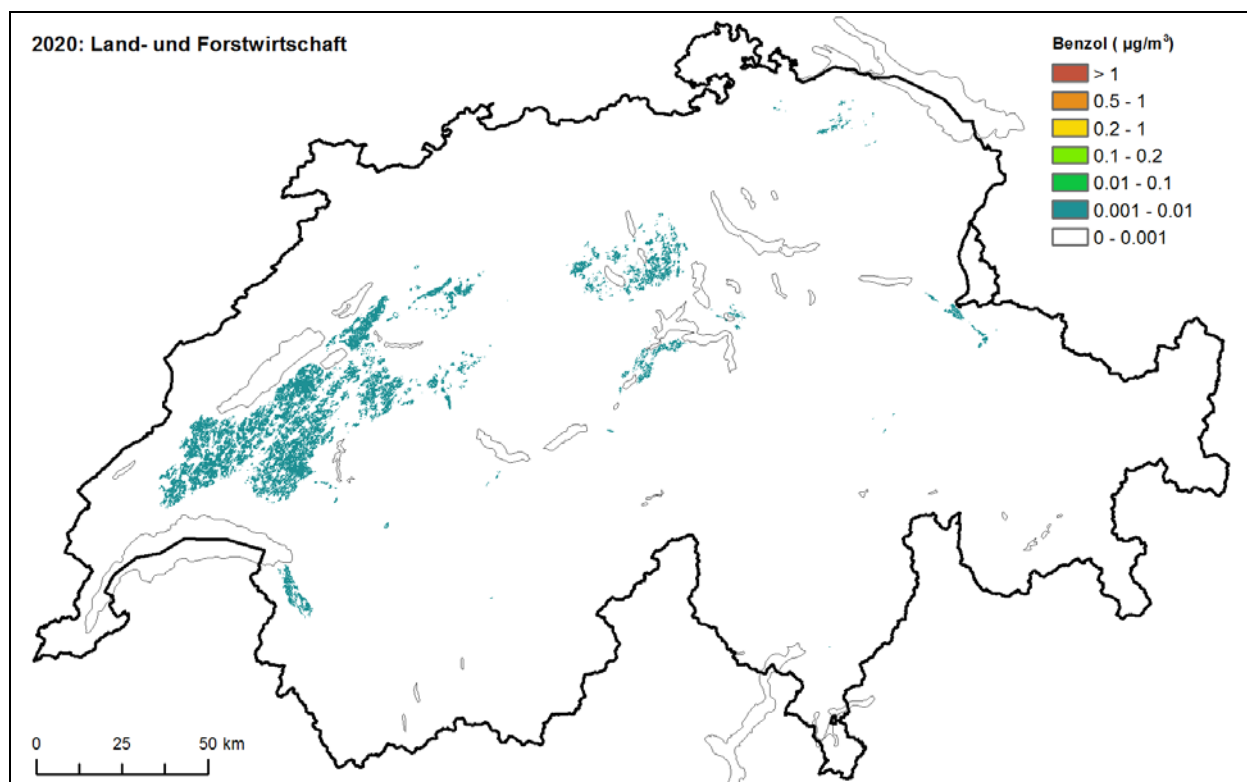


Abb. 24 Benzol-Immissionsbeitrag aus Land- und Forstwirtschaft 2020.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	<i>Ablaufschema Immissionsmodell Schweiz.</i>	8
Abb. 2	<i>Strassennetz der Schweiz 2010 zur Lokalisierung der Emissionen einzelner Links gemäss dem nationalen Verkehrsmodell. Emissionen aus Tunnels, welche für die Modellierung entfernt wurden, sind orange markiert. Quelle: FOEN 2011.</i>	10
Abb. 3	<i>Benzol-Emissionen Schweiz 1990–2020 nach Sektoren.</i>	14
Abb. 4	<i>Definition der Windregionen welche für die Immissionsmodellierung verwendet wurden (Quelle Hintergrundkarte: Bundesamt für Landestopografie).</i>	18
Abb. 5	<i>Beispiel einer Mittelland- (links) und einer alpinen (rechts) Transferfunktion für eine Flächenquelle (1 t Benzol pro Jahr) die auf 12 m Emissionshöhe im Zentrum lokalisiert ist. Die horizontalen Achsen erstrecken sich über je 20.1 km (400 km²). Die räumliche Auflösung beträgt 100 m x 100 m (1 ha). Die vertikale Achse gibt die Benzol-Konzentration in µg/m³ an.</i>	20
Abb. 6	<i>Zeitreihe von Benzolmessdaten Schweiz sowie die im Modell verwendeten Hintergrund-Funktionen „Hintergrund VS“ und „Hintergrund übr. CH“. Fit anhand von Differenzen zwischen Mess- und Messwerten.</i>	21
Abb. 7	<i>Importierte Benzol-Immissionen, Immissionen aus nicht berücksichtigten Emissionen und Immissionen, die aufgrund der beschränkten Ausbreitungsdistanzen vernachlässigt sind, werden im Modell in Form einer Hintergrundimmission berücksichtigt.</i>	22
Abb. 8	<i>Schema zum Modellablauf und zum Datenfluss.</i>	23
Abb. 9	<i>Benzol -Immissionen Schweiz 1990.</i>	25
Abb. 10	<i>Benzol -Immissionen Schweiz 2010.</i>	26
Abb. 11	<i>Benzol -Immissionen Schweiz 2020.</i>	26
Abb. 12	<i>Oben: Scatterplot Benzol-Messwerte (y-Achse) versus Benzol-Modellwerte (x-Achse) 2010. Messwerte: Mittel 2009–2011. Unten: Residuenplot (y-Achse: Modellwert minus Messwert).</i>	29
Abb. 13	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus dem Verkehr (Strassen- und Offroad-Verkehr) 1990.</i>	36
Abb. 14	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus Haushalten und aus Gewerbe- und Dienstleistungsbetrieben 1990.</i>	36
Abb. 15	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus der Industrie 1990.</i>	37
Abb. 16	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus Land- und Forstwirtschaft 1990.</i>	37
Abb. 17	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus dem Verkehr (Strassen- und Offroad-Verkehr) 2010.</i>	38
Abb. 18	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus Haushalten und aus Gewerbe- und Dienstleistungsbetrieben 2010.</i>	38
Abb. 19	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus der Industrie 2010.</i>	39
Abb. 20	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus Land- und Forstwirtschaft 2010.</i>	39
Abb. 21	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus dem Verkehr 2020.</i>	40
Abb. 22	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus Haushalten und aus Gewerbe- und Dienstleistungsbetrieben 2020.</i>	40
Abb. 23	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus der Industrie 2020.</i>	41
Abb. 24	<i>Benzol-Immissionsbeitrag aus Land- und Forstwirtschaft 2020.</i>	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	<i>Agglomerationsgemeinden, die von den zusätzlichen Annahmen betroffen sind.</i>	13
Tabelle 2	<i>Spezifische Emissionsstärken der Industrieareale im Jahr 1990. Die Codes beziehen sich auf die Arealstatistik mit 74 Kategorien.</i>	13
Tabelle 3	<i>Emissionen in Tonnen Benzol der Schweiz 1990, 2010 und 2020. Die Unterkategorien entsprechen den verschiedenen Emissions-Grids zur Immissionsmodellierung. Zahlen sind auf mindestens zwei signifikante Stellen gerundet.</i>	15
Tabelle 4	<i>Emissionen in Tonnen Benzol der Schweiz 1990, 2010 und 2020 und deren zeitliche Entwicklung als Anteile von 1990. Die Unterkategorien entsprechen den verschiedenen Emissions-Grids zur Immissionsmodellierung. Zahlen sind auf mindestens zwei signifikante Stellen gerundet.</i>	16
Tabelle 5	<i>Transferfunktionen und die entsprechenden Quellkategorien.</i>	19
Tabelle 6	<i>Bevölkerungsgewichtete Mittelwerte der Benzol-Immissionen.</i>	27
Tabelle 7	<i>Messstationen und Messwerte Benzol (2009–2011), Modellwerte (2010).</i>	28
Tabelle 8	<i>Statistische Parameter zur Modellqualität ohne und mit der Station Feldbergstrasse. Die Variante „ohne“ wird dem Modellkonzept PolluMap besser gerecht als die Varianten „mit“. Definition der Parameter siehe Spalte „Parameter“; RMSE ist die Abk. für root mean square error.</i>	30