

OSTLUFT – DIE LUFTQUALITÄTSÜBERWACHUNG DER OSTSCHWEIZER KANTONE UND DES FÜRSTENTUMS LIECHTENSTEIN

# FEINSTAUBIMMISSIONEN OSTSCHWEIZ/LIECHTENSTEIN MODELL UND RESULTATE 2005-2020

Schlussbericht

Zürich, 15. Februar 2013

J. Heldstab, M. Betschart, F. Leippert, INFRAS  
T. Künzle, METEOTEST

PARTIKELIMMISSIONEN-OSTLUFT.DOCX

INFRAS



METEOTEST

FABRIKSTRASSE 14  
CH-3012 BERN

[OFFICE@METEOTEST.CH](mailto:OFFICE@METEOTEST.CH)

t +41 31 307 26 26  
f +41 31 307 26 10

[WWW.METEOTEST.CH](http://WWW.METEOTEST.CH)

INFRAS

BINZSTRASSE 23  
POSTFACH  
CH-8045 ZÜRICH  
t +41 44 205 95 95  
f +41 44 205 95 99  
[ZUERICH@INFRAS.CH](mailto:ZUERICH@INFRAS.CH)

MÜHLEMATTSTRASSE 45  
CH-3007 BERN

[WWW.INFRAS.CH](http://WWW.INFRAS.CH)

## ÜBERSICHT

<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1. Ausgangslage	6
1.2. Auftrag	6
<b>2. Vorgehen</b>	<b>7</b>
2.1. Modellkonzept	7
2.2. Modellentwicklung	8
<b>3. PM10-, PM2.5- und EC-Emissionen 2005–2020</b>	<b>10</b>
3.1. Emissionsquellen und Emittentengruppen	10
3.2. Verkehr	11
3.2.1. Strassenverkehr	11
3.2.2. Schienenverkehr	14
3.2.3. Schiffsverkehr	14
3.2.4. Flugverkehr	15
3.3. Industrie	16
3.3.1. Stationäre Quellen	16
3.3.2. Mobile Quellen	17
3.4. Haushalte und Dienstleistungen	17
3.4.1. Stationäre Quellen	17
3.4.2. Mobile Quellen	18
3.5. Land- und Forstwirtschaft	18
3.5.1. Landwirtschaft	18
3.5.2. Forstwirtschaft	18
3.6. Weitere relevante Emissionen	18
3.6.1. Emissionen aus übriger Schweiz und Ausland	18
3.6.2. Emissionen aus gasförmigen Vorläufersubstanzen	19
3.6.3. Emissionen aus natürlichen Quellen	20
3.7. Emissionsbilanzen und Emissionskarten	20
3.7.1. Emissionsbilanzen	20
3.7.2. Emissionskarten	27
<b>4. Immissionsmodellierung</b>	<b>29</b>
4.1. Ausbreitungsrechnung für primäre Partikel	29

4.1.1.	Generelles	29
4.1.2.	Meteorologie	29
4.1.3.	Transferfunktionen	31
4.1.4.	Modellierung von Alpentälern	32
4.1.5.	Importierte primäre Partikel	33
4.1.6.	Primäre Partikel aus natürlichen Quellen	34
4.2.	Sekundäre Aerosole	34
4.2.1.	Messungen	34
4.2.2.	Sekundäre anorganische Aerosole	35
4.2.3.	Sekundäre organische Aerosole	37
4.3.	Umsetzung	38
<b>5.</b>	<b>Modellresultate</b>	<b>39</b>
5.1.	Belastungskarten für primäres PM10	40
5.2.	Belastungskarten für sekundäres PM10	47
5.3.	Gesamtbelastungen PM10, PM2.5 und EC	50
5.3.1.	Generelle Merkmale 2005–2020	50
5.3.2.	PM10-Belastungskarten 2005–2020	51
5.3.3.	PM2.5-Belastungskarten 2005–2020	55
5.3.4.	EC-Belastungskarten 2005–2020	63
5.4.	Bevölkerungsexposition 2005–2020	67
<b>6.</b>	<b>Datenqualität</b>	<b>71</b>
6.1.	Methodik	71
6.1.1.	Kalibration und Validierung	71
6.1.2.	Messstationen	71
6.2.	Messdaten und Modelldaten	72
6.2.1.	PM10	72
6.2.2.	PM2.5	76
6.2.3.	EC	77
<b>Annex</b>		<b>80</b>
<b>A1.</b>	<b>Anteil der PM2.5- und der EC-Emissionen</b>	<b>80</b>
<b>A2.</b>	<b>Emissionskarten</b>	<b>82</b>
	<b>Verzeichnis der Figuren</b>	<b>98</b>
	<b>Verzeichnis der Tabellen</b>	<b>100</b>
	<b>Literatur</b>	<b>102</b>

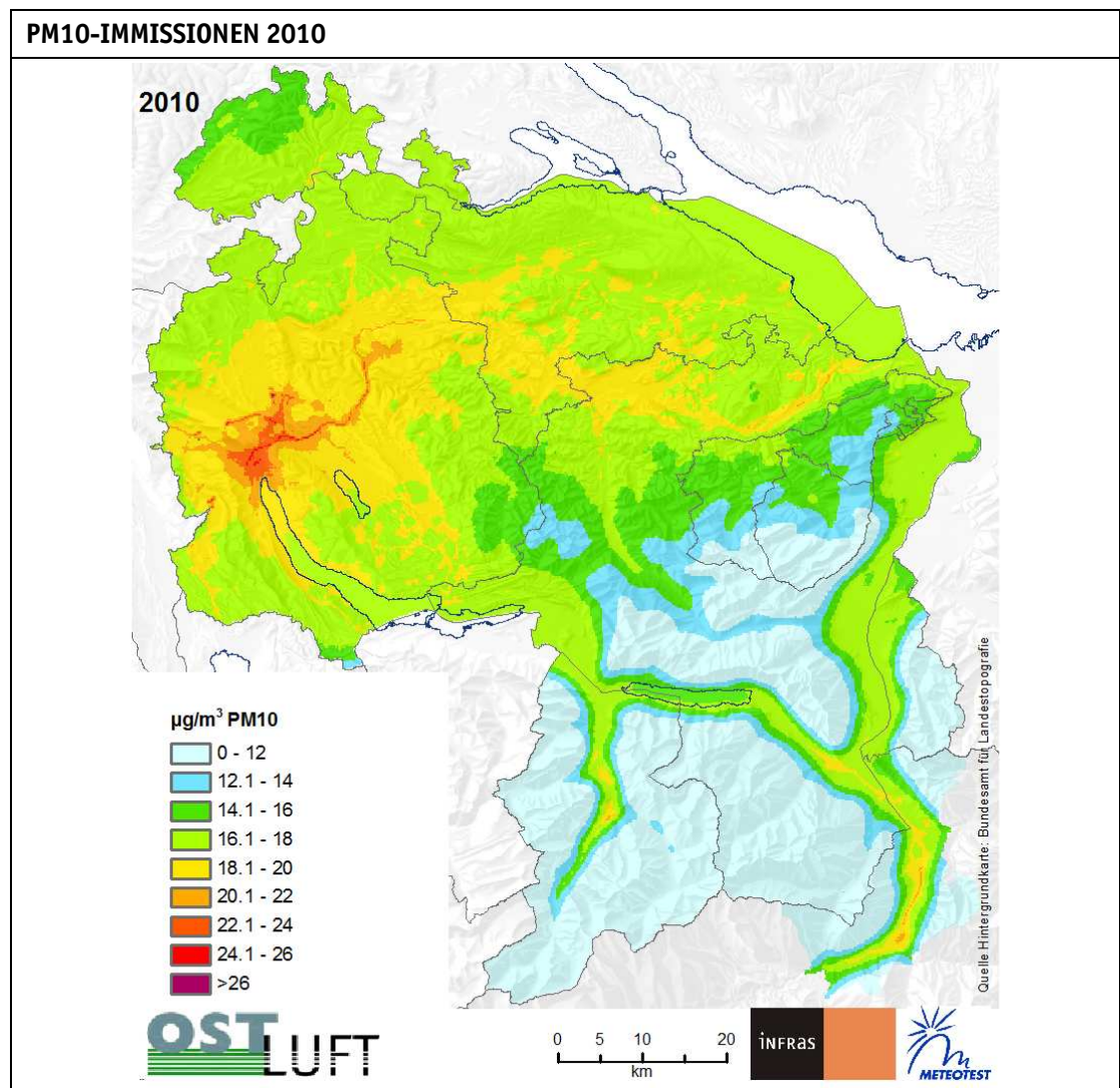
## ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht beschreibt die Resultate der neusten Modellierung von Feinstaub-Immissionen 2005–2020 für das OSTLUFT Gebiet sowie die Methoden und Spezifikationen des Immissionsmodells. Das Modell liefert Resultate für zwei Fraktion des Feinstaubs, nämlich PM10 und PM2.5. Ausserdem wird auch der Anteil des elementaren Kohlenstoffs (EC) am PM10 modelliert. Gegenüber der früheren Modellversion (OSTLUFT 2007) wurden alle Inputdaten aktualisiert, insbesondere der OSTLUFT Emissionskataster, das Verkehrsmodell inkl. Verkehrs-Emissionsfaktoren. Weiter wurde die Ausbreitungsrechnung weiterentwickelt und ein neuer Ansatz für die sekundären Aerosole umgesetzt. Die Modellierung folgt im Wesentlichen der Methodik des neusten nationalen Feinstaub-Immissionsmodells (FOEN 2013).

Figur 1 auf der folgenden Seite zeigt die PM10-Belastungskarte für die Ostschweiz 2010 (Jahresmittelwerte in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Die PM10-Belastungskarte ist von besonderem Interesse, weil die Schweizer Gesetzgebung einen PM10-Immissionsgrenzwert von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  vorschreibt. Waren 2005 noch die meisten Agglomerationsgebiete übermässig belastet, traten im Jahr 2010 Überschreitungen des Grenzwerts zwar seltener auf, aber immer noch grossflächig in der Stadt Zürich und ihrer nahen Umgebung, in geringem Masse auch in den Städten Winterthur, St.Gallen sowie punktuell entlang der Autobahnen, im Glarnerland und im Churer Rheintal. Dabei ist zu beachten, dass die Belastungskarte räumliche Mittelwerte in einem Gitternetz mit einer Maschenweite von 200 m repräsentiert. Auf einer Skala unterhalb 200 m ist deshalb auch in anderen Gebieten mit Grenzwertüberschreitungen zu rechnen - vor allem entlang von vielbefahrenen Strassen und Ortschaften in Alpentälern mit ungünstiger Durchlüftung und hohem Anteil von Holzfeuerungen. Wie aufgrund künftiger Emissionsreduktionen zu erwarten ist, nehmen die Immissionen bis 2020 weiter ab, sodass Gebiete mit übermässiger Belastung dannzumal nur noch in der Stadt Zürich, ihrer nahen Umgebung und an besonders exponierten Standorten, vornehmlich an stark befahrenen Teilstrecken der Nationalstrasse A1 vorkommen werden. Die bevölkerungsgewichtete PM10-Immissionskonzentration nimmt von  $20.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2005) um  $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf  $18.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ab, für PM2.5 von  $15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf  $12.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und für EC von  $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf  $0.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der Anteil der Bevölkerung, welcher über dem PM10-Immissionsgrenzwert von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  lebt, nimmt in dieser Periode von 60% (2005) auf 14% (2020) ab.

Bei den Aussagen zur Immissionssituation 2020 ist zu berücksichtigen, dass sie besonders stark von dem erwarteten Emissionsrückgang des Verkehrs dank neuer Abgasnormen abhängig ist. Sollte sich in den nächsten Jahren zeigen, dass die neuen EURO Normen in der Realität nicht

zu den erwarteten Emissionsreduktionen führen, würde sich die Immissionssituation 2020 weniger optimistisch präsentieren.



**Figur 1** Jahresmittelwert PM10-Immissionen 2010. Räumliche Auflösung: 200 m x 200 m.

Die neue Modellversion wurde anhand von PM10-Messdaten für den Zeitstand 2005 kalibriert und anschliessend mit den Messdaten 2010 validiert. Für den Zeitstand 2010 findet man eine hohe Korrelation:  $R = 0.85$  ( $R^2 = 0.72$ ) und einen Standardfehler von  $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die für den Vergleich benutzten Messdaten (22 Messstationen) haben einen PM10-Mittelwert von  $19.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , die entsprechenden Modellwerte  $19.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die Residuen zeigen keine systematischen Abweichungen, sodass man insgesamt von einer guten Übereinstimmung von Modell und Messungen sprechen darf. Die Modellunsicherheit beträgt ca. 10%.

## 1. EINLEITUNG

### 1.1. AUSGANGSLAGE

OSTLUFT betreibt seit mehreren Jahren ein Immissionsmodell für die Berechnung der Jahresmittelwerte von Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Feinstaub (PM10, PM2.5 und EC). Das Modell wurde seinerzeit von der Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST im Auftrag des BAFU und des ATAL aufgebaut (ATAL/BUWAL 1994). Seither wurde das Feinstaub-Immissionsmodell in mehreren Etappen erweitert sowie verfeinert und für den Bund und mehrere Kantone angewendet (BUWAL 1999, SAEFL 2003, LHA/AFU 2005, OSTLUFT 2007, FOEN 2013).

### 1.2. AUFTRAG

OSTLUFT hat die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST beauftragt, das Feinstaub-Immissionsmodell (OSTLUFT 2007) zu aktualisieren. Basis für die Aktualisierung bilden erstens der neue Emissionskataster OSTLUFT und zweitens die neueste Version des Feinstaub-Immissionsmodells, wie es im Auftrag des BAFU soeben für die Schweiz angewendet worden ist (FOEN 2013).

Der vorliegende Bericht fasst die Feinstaub-Emissionen im OSTLUFT-Gebiet zusammen, die die wichtigsten Inputdaten für das Immissionsmodell sind, umreißt die zentralen Eigenschaften des neuen Modelles sowie die Besonderheiten der OSTLUFT-Anwendung und dokumentiert die Ergebnisse der Modellrechnungen: PM10-, PM2.5- und EC-Belastungskarten 2005–2020 für das OSTLUFT Gebiet und die Bevölkerungsexpositionen.

Nach Abschluss der Modellentwicklung und nach Vorliegen der definitiven Resultate hat die Arbeitsgemeinschaft den Quellencode (AML, ArcINFO) für die neue Modellapplikation zur Weiterverwendung an das Leistungszentrum Modellierung von OSTLUFT übergeben.

Im Zusammenhang mit diesem Auftrag hat OSTLUFT auch das von INFRAS/METEOTEST entwickelte **NO<sub>2</sub>-Immissionsmodell-Modell** von der Arbeitsgemeinschaft aktualisieren und für dieselben Jahre 2005–2020 anwenden lassen. Diese Arbeiten sind inzwischen abgeschlossen, die Resultate sind in einem Schlussbericht ebenfalls dokumentiert (OSTLUFT 2012).

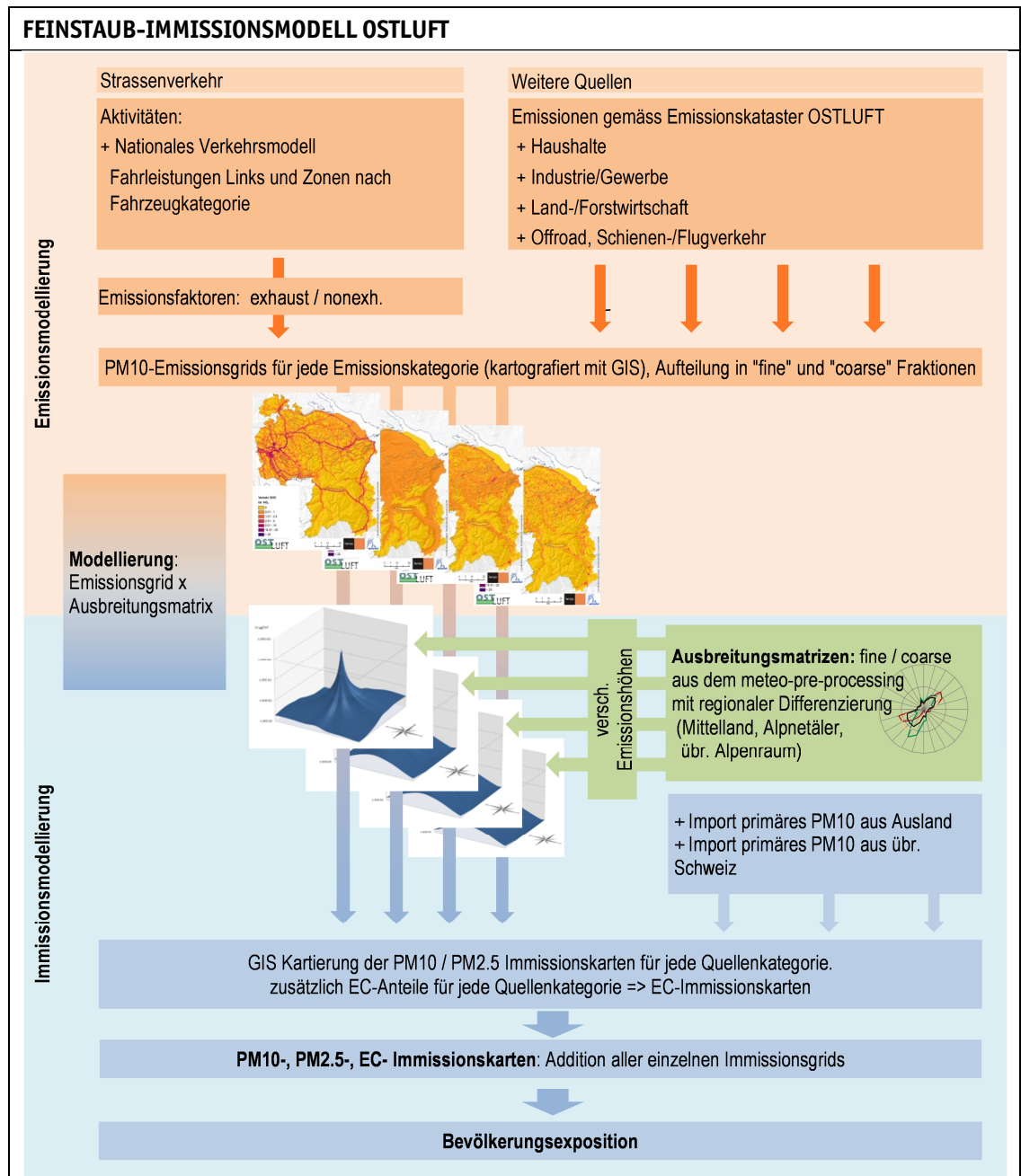
## 2. VORGEHEN

### 2.1. MODELLKONZEPT

Das Modell berechnet primäre PM10- und PM2.5-Immissionen aus Emissionen und unter Verwendung eines analytischen Ausbreitungsmodells und sekundäre Aerosol-Immissionen, die mit einem empirischen Modell auf der Basis von Messwerten bestimmt werden. Die Summe der primären und sekundären Immissionen ergeben zusammen die gesamten PM10- und PM2.5-Immissionen.

Die Modellierung wird mit folgenden Schritten ausgeführt (siehe dazu Figur 2):

- › In einem Vorprozess werden mit Hilfe eines Gauss-Modells verschiedene quellspezifische und jahresmittlere "Ausbreitungsmatrizen" für Mittelland, Alpentäler und übriger Alpenraum berechnet. Dabei werden u.a. Einflüsse wie die Windrichtung/-geschwindigkeiten, Stabilität der Luftschichten und Bewölkung berücksichtigt. Der Vorprozess wird einmalig durchgeführt, die resultierenden Ausbreitungsmatrizen werden für alle Bezugsjahre (2005–2020) benutzt. Im vorliegenden Fall wurden bereits vorhandene Ausbreitungsmatrizen (FOEN 2013) verwendet.
- › Die PM10-Emissionen wurden für (fast) alle Emittenten vom AWEL übernommen.
- › Die PM10-Emissionen werden in zwei Fraktionen „fine“ (PM2.5) und „coarse“ (PM10-PM2.5) aufgeteilt und mittels Ausbreitungsrechnung in lokale PM10- und PM2.5-Immissionen verwandelt.
- › Feinstaubimporte aus der übrigen Schweiz und aus dem Ausland in das OSTLUFT-Gebiet werden ebenfalls mit Hilfe von Ausbreitungsrechnungen bestimmt.
- › Sekundäre Feinstaub-Immissionen werden als anorganische (Nitrat, Sulfat, Ammonium) und als organische Anteile bestimmt unter Verwendung von Messdaten und einer Reihe von Modellannahmen.
- › Primäre und sekundäre Feinstaubimmissionen werden addiert und ergeben zusammen die gesamten Feinstaub-Immissionen.
- › Aus EC-Anteilen an den PM2.5-Immissionen werden EC-Immissionskarten berechnet.
- › Für die Immissionskarten werden mit Hilfe von Einwohnerdaten verschiedene Resultate zur Bevölkerungsexposition berechnet.



Figur 2 Ablaufschema Feinstaub-Immissionsmodell OSTLUFT.

## 2.2. MODELLENTWICKLUNG

Das Modell basiert auf demselben Konzept wie die neueste Applikation für die Schweiz (FOEN 2013). Es basiert teils auf dem früheren Modell zur Modellierung der NO<sub>2</sub>-Immissionen (AWEL 1996 und BUWAL 1997), berücksichtigt aber die Unterschiede zwischen der Ausbreitung von Partikeln und Gasen und enthält Methoden zu Berechnung von sekundären Aerosolen. Seit der



ersten Version im Jahr 1999 (BUWAL 1999) wurde es schrittweise verbessert und ausgebaut (SAEFL 2003, LHA/AFU 2005, OSTLUFT 2007, OSTLUFT 2012, FOEN 2013).

Die folgende Liste bezeichnet die wichtigsten Neuerungen in der vorliegenden Version gegenüber der früheren Modellierung für OSTLUFT (2007):

- › Alle Emissionsdaten wurden aktualisiert.
- › Die Emissionen werden auf einem Hektar-Grid aufbereitet. Für die Ausbreitungsrechnung im Umkreis von ca. 3 km um die Quellen herum, werden sie auf ein Gitter mit räumlicher Auflösung von 200 m x 200 m aggregiert. Für Ausbreitung in grösseren Distanzen (bis max. 200 km) werden die Emissionen zusätzlich auf ein Gitter mit 2 km Auflösung aggregiert. Neu ist, dass in der Distanz, in welcher sich der Übergang vom feinen zum groben Gitter befindet, das grobe Gitter einem „Resampling“ unterzogen wird, um die Konzentrationsverläufe kontinuierlicher zu gestalten.
- › Das Set von Ausbreitungsmatrizen („Transferfunktionen“) wurde neu auf das Jahr 2005 aktualisiert. Dieses Jahr repräsentiert mittlere Meteo-Bedingungen (z.B. bzgl. Windstärke und Temperatur).
- › Im Unterschied zum nationalen Feinstaub-Immissionsmodell werden im OSTLUFT-Gebiet hohe industrielle Punktquellen, Tunnelportale und Tunnelabluftkamine mit eigenen Transferfunktionen berücksichtigt.
- › Für das St.Galler Rheintal wurde neu ein spezielles Verfahren beim Übergang von der Mittel- land- zur Alpental-Situation festgelegt und angewendet.
- › Anstelle einer Hintergrund-Immission wurde neu eine Ausbreitungsrechnung auf europäischer Skala durchgeführt und damit importierte Immissionen simuliert.
- › Anstelle der bisherigen Bestimmung von Nitrat und Sulfat aus schweizerischen NO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>- Immissionskarten in Kombination mit Messdaten, wurde neu ein empirischer Ansatz benutzt, der nur noch von Messdaten abhängig ist.
- › Auch für die Abschätzung der sekundären organischen Partikel wurde neu ein empirischer Ansatz auf Basis von Messdaten benutzt anstelle der bisherigen Ausbreitungsrechnung von NMVOC-Emissionen.
- › Wie bisher wird aus den Immissions-Grids für PM<sub>10</sub> und PM<sub>2.5</sub> die Bevölkerungsexposition berechnet. Neu wird dies auch für die EC-Immissionen durchgeführt.
- › Die Modellqualität wird wie bisher durch einen Vergleich mit Messdaten bestimmt. Neu ist, dass der Vergleich für das Jahr 2005 zur *Kalibrierung* des Modells benutzt wird und dass der Vergleich 2010 zur *Validierung* benutzt wird (dies ist statistisch gesehen ein „härteres“ Verfahren als bisher).

### 3. PM10-, PM2.5- UND EC-EMISSIONEN 2005–2020

#### 3.1. EMISSIONSQUELLEN UND EMITTENTENGRUPPEN

Das Leistungszentrum Modellierung von OSTLUFT hat kürzlich einen Emissionskataster aufgebaut, der unter anderen Schadstoffen auch Feinstaub PM10 enthält (OSTLUFT 2011). Zu allen Quellen hat das Leistungszentrum PM10-Emissionskataster – je separat für exhaust und non-exhaust<sup>1</sup> – generiert und diese der Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST zur Verfügung gestellt. Diese hat zusätzlich einen Kataster Zonenverkehr (Strassenverkehr, der nicht auf dem Liniennetz des GVM enthalten ist) und einen weiteren Kataster Schienenverkehr erstellt. Im Weiteren hat die Arbeitsgemeinschaft alle PM10-Emissionskataster nach „fine“ (PM2.5) und coarse (PM10-PM2.5) aufgeteilt und hat für alle PM2.5-Kataster einen EC-Anteil bestimmt. Schliesslich hat sie sämtliche fine und coarse Kataster, die vom Leistungszentrum in Hektarauflösung bereitgestellt wurden, auch noch in 200 m- und 2 km-Auflösung aufbereitet, wie sie für die Ausbreitungsrechnung benötigt werden.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Hauptgruppen (Sektoren) und Untergruppen der Emissionsquellen, deren Berechnungsgrundlage sowie über die Indikatoren zur Abschätzung der zeitlichen Entwicklung und die räumliche Zuordnung („Lokalisierung“). Soweit Berechnungen und Lokalisierungen der Emissionen in OSTLUFT (2011) dokumentiert sind, wird in diesem Dokument nur darauf verwiesen. Wo andere Datenquellen oder Zuordnungen verwendet wurden, sind diese in den nachfolgenden Kapiteln kurz beschrieben.

<sup>1</sup> exhaust: Emissionen aus Verbrennungsprozessen; non-exhaust: mechanisch erzeugte Emissionen (Abriebe, Aufwirbelung)

Hauptgruppe	Untergruppe	Frachtberechnung	Indikatoren	Lokalisierung
Verkehr	Strassen-Linkemissionen warm Strassenverkehr Tunnel Strassen-Zonenemissionen warm Strassen-Zonenemissionen kalt (Kaltstart)	VM-UVEK/AWEL		Strassennetz, Zonen
	Schiennenverkehr	EMIS	INFRAS/METEOTEST	Streckennetz und Belastungen
	Flugverkehr	Flughafen Zürich AG	Starts/Landungen/Idle	Areal des Flughafens ZH
	Schiffsverkehr	EMIS	INFRAS/METEOTEST	Seen
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	Brand-/Feuerschäden	EMIS	Bodenfläche	GZ 2000, Geb total (A00TOT)
	Feuerungen	NA	AWEL-Methode	HH: GZ 2000; DL: BZ Sektor 3, 2005, Arbeitsplatzzahlen total
	Garten/Hobby	EMIS	Keine Angabe	GZ 2000, Einwohnerproportional
Industrie	Baumaschinen	EMIS	Investitionen	Arealstatistik (NOAS92)
	Industrie - Einzelquellen	kant. Angaben	Kantonsangaben	Landeskoord.
	Industrielle Fahrzeuge	EMIS	Beschäftigtenzahlen	BZ Sektor 2, 2005
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	EMIS	Beschäftigtenzahlen oder Kantonsangaben	BZ Sektor 2, 2005, Arbeitsplatzzahlen total
	Verwendung von Lösemittel	EMIS	Beschäftigtenzahlen oder Punktquellen	BZ Sektor 2, 2005, Arbeitsplatzzahlen total; xy- Koordinaten
Land-/ Forstwirtschaft	Feuerungen	EMIS	Beschäftigtenzahlen	BZ Sektor 1, 2005, Arbeitsplatzzahlen total
	Forstwirtschaftliche Fahrzeuge	EMIS	Beschäftigtenzahlen	Arealstatistik (NOAS92)
	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	EMIS	Bestandeszahlen	Arealstatistik (NOAS92)
	Nutzflächen	EMIS	Bodenflächen	Arealstatistik (NOAS92)
	Öffene Verbrennung	EMIS	Beschäftigtenzahlen	Arealstatistik (NOAS92)
	Vieh	EMIS	Bestandeszahlen	Arealstatistik (NOAS92)

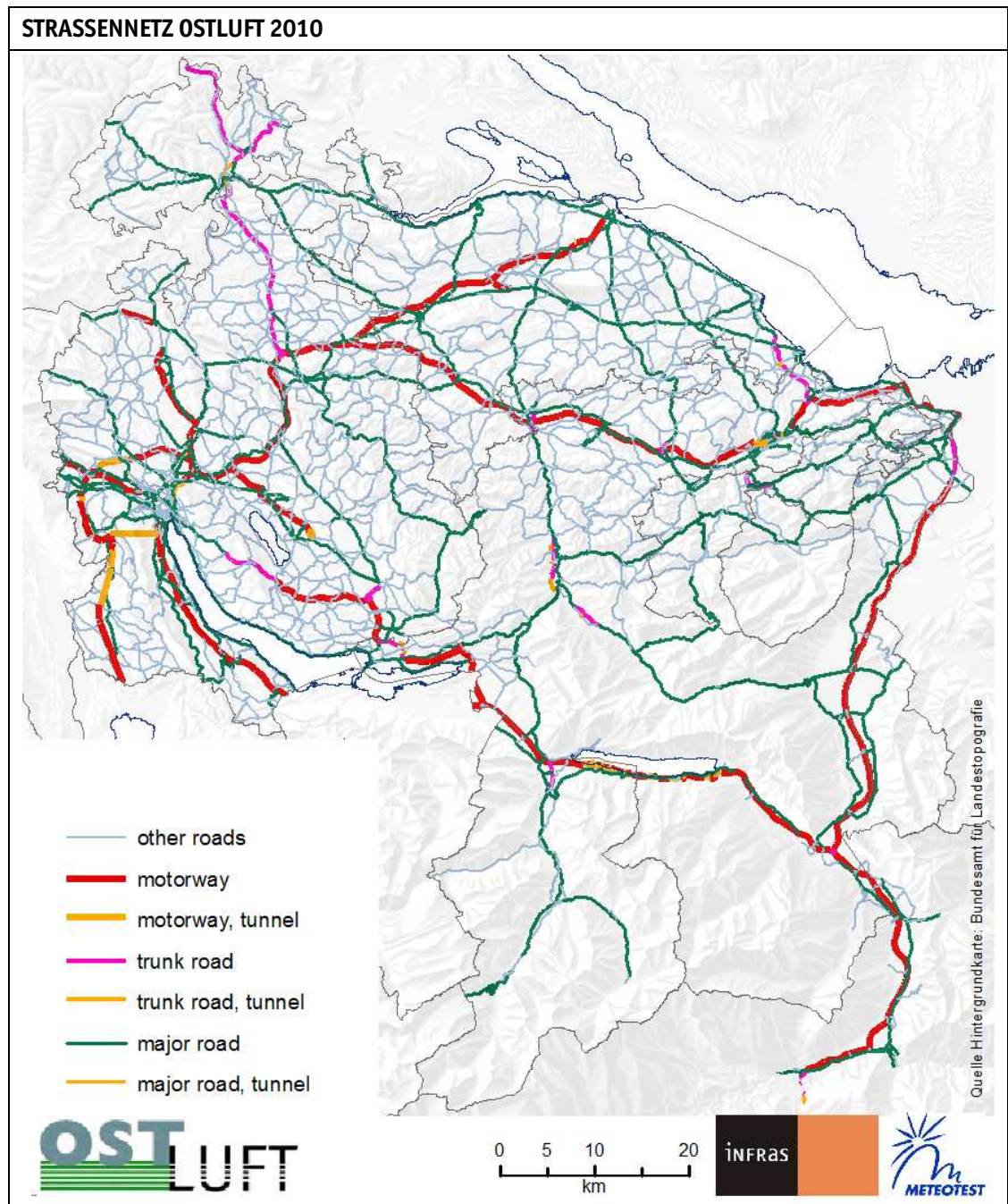
**Tabelle 1** Emissionsgrundlagen: Emissionsquellen, Berechnungsgrundlage der Emissionen. Abk. VM-UVEK Verkehrsmodell des UVEK, EMIS = Emissionsinformations-System Schweiz / Emissionsdatenbank des BAFU, GZ: Gebäudezählung der Schweiz, HH: Haushalte, DL: Dienstleistungen, BZ: Betriebszählung Schweiz.

## 3.2. VERKEHR

### 3.2.1. STRASSENVERKEHR

#### Aktivitätsdaten

Aus dem nationalen Strassenverkehrsmodell des VM-UVEK (ARE 2010) hat OSTLUFT zwei Zustände für die Jahre 2005 und 2030 als Ausschnitte Ostschweiz erhalten und hat daraus weitere Zustände für 2010, 2015 und 2020 generiert. Sie enthalten die georeferenzierte Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorien je Strassenabschnitt (Link) und je Zone (Gemeinde oder Stadtquartier), ausserdem Link-Attribute. Die folgende Figur zeigt den Ostschweizer Ausschnitt des VM-UVEK Strassennetzes.



**Figur 3** Das für die OSTLUFT-Verkehrsmodellierung berücksichtigte Strassennetz 2010.

Fahrzeugbestände, Anteile nach Treibstoffart, Anzahl Starts/Stopps wurden nationalen Daten entnommen (BAFU 2010). Für die Zeitentwicklung 2005–2020 der Aktivitätsdaten wurden folgende Faktoren aus dem nationalen Modell verwendet (INFRAS 2010).

AKTIVITÄTSDATEN STRASSENVERKEHR								
Aktivitätsdaten	Fahrzeugkat.	Treibstoff	Einheit	Änderungsfaktoren (2005 = 1)				
				2010	2015	2020	2025	2030
Fahrleistungen	PW	Benzin	Fzkm	0.942	0.868	0.811	0.780	0.776
	PW	Diesel	Fzkm	1.700	2.343	2.880	3.189	3.368
	LI	Benzin	Fzkm	0.724	0.573	0.465	0.406	0.372
	LI	Diesel	Fzkm	1.288	1.429	1.532	1.615	1.693
	SNF	Diesel	Fzkm	1.083	1.168	1.218	1.252	1.277
	Car	Diesel	Fzkm	1.125	1.104	1.087	1.079	1.076
	Stadtbus	Diesel	Fzkm	1.053	1.092	1.140	1.191	1.249
	Motorrad	Benzin	Fzkm	1.093	1.143	1.195	1.250	1.307
Anzahl Starts	PW	Benzin	Starts	0.910	0.841	0.781	0.760	0.753
	PW	Diesel	Starts	1.635	2.227	2.685	2.982	3.119
	LI	Benzin	Starts	0.742	0.595	0.492	0.437	0.408
	LI	Diesel	Starts	1.331	1.489	1.603	1.693	1.775

**Tabelle 2** Zeitliche Entwicklung der Aktivitätsdaten Strassenverkehr bezogen auf den Basiszeitstand 2005 (INFRAS 2010). Folgende Aktivitäten wurden verwendet: Fahrleistungen (relevant für die Emissionen aus dem Fahrbetrieb), Anzahl Starts (relevant für Kaltstartemissionen). Fahrzeugkategorien: PW= Personenwagen, LI= Lieferwagen, SNF = schweres Nutzfahrzeuge.

### Emissionsfaktoren, Emissionen

Aus den Aktivitätsdaten und unter Verwendung von Emissionsfaktoren für PM10 exhaust und non-exhaust (INFRAS 2010) hat OSTLUFT die Emissionen des Strassenverkehrs berechnet. Die von OSTLUFT errechneten Strassenverkehrsemissionen wurden mit dem nationalen Modell aus FOEN (2013) verglichen und plausibilisiert. Während die exhaust-Emissionsfaktoren zwischen 2005-2020 aufgrund von technischen Verbesserungen signifikant abnehmen, bleiben die non-exhaust-Emissionsfaktoren zeitlich konstant.

### Strassentunnels

Die Emissionen, welche in Strassentunneln entstehen und über Portale oder Abluftschächte entweichen, werden speziell vom Leistungszentrum OSTLUFT modelliert: Dazu gehören Gubrist-, Uetliberg-, Kerenzerberg-Tunnel etc. (siehe orange-farbene Teilstrecken in Figur 3). Die entsprechenden Grids konnten vom Leistungszentrum übernommen werden.

### Lokalisierungsvorschriften

Die exhaust-Emissionen aus Links werden ihren georeferenzierten Links zugeordnet. Die Zonenemissionen, von denen nur die Zugehörigkeit zu einer Gemeinde oder zu einem Stadtquartier bekannt ist, erfordern aber zusätzliche Festlegungen. Diese sogenannten Zonenemissionen, welche im Linknetz des VMUVEK nicht enthalten, aber lokal trotzdem von Bedeutung sind, wur-

den in gleicher Weise wie die NO<sub>x</sub>-Zonenemissionen für OSTLUFT räumlich verteilt (OSTLUFT 2012). OSTLUFT hat Excel-Tabellen mit den Gemeinde-Emissionen geliefert. Die Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST hat die Emissions-Grids für die Modellierungen analog OSTLUFT (2012) und FOEN (2013) aufbereitet: Grundsätzlich werden die nicht-lokalisierbaren Zonenemissionen dabei einwohnerproportional, auf dem Siedlungsgebiet und einem höher aufgelösten Strassennetz verteilt (Swisstopo 2007). Für weitere Details zu der Modellierung des Strassenverkehrs wird auf Bericht zum NO<sub>2</sub>-Modell Schweiz verwiesen (FOEN 2011).

### 3.2.2. SCHIENENVERKEHR

Die Emissionen des Schienenverkehrs wurden für das Feinstaub-Immissionsmodell Schweiz von der Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST berechnet; eine Beschreibung findet sich in OSTLUFT (2011). Die wesentlichen Elemente sind:

- › Die exhaust Emissionen 2005 aus Dieselloks auf den Rangierbahnhöfen werden aus Angaben der SBB (2010) zum Dieserverbrauch der Rangierbahnhöfe abgeleitet. Für das Ostschweizer Gebiet betrifft dies die Rangierbahnhöfe Limmattal und Buchs.
- › Die übrigen exhaust Emissionen aus Dieselloks (Dienst- und Bauzüge) werden homogen auf dem gesamten Schienennetz verteilt.
- › Die non-exhaust Emissionen wurden für das gesamte schweizerische Schienennetz getrennt nach Personen- und Güterverkehr modelliert (FOEN 2013).
- › Die zeitliche Entwicklung der Emissionen wird den gesamtschweizerischen Emissionen des Schienenverkehrs proportional nachgefahren (FOEN 2011a).
- › Emissionen auf den Liechtensteiner Bahnstrecken werden analog den Belastungen auf der Schweizer Seite abgeschätzt.
- › Folgende Tunnels wurden in den Emissions-Grids berücksichtigt: Stadt St.Gallen, Wasserfluh, Ricken, Kerenzerberg, Horgenberg, Sihlbrugg, Thalwil-Wollishofen, Zürich-Oerlikon, Zürich-Dübendorf, Kloten, Bülach, Stadt Schaffhausen.

### 3.2.3. SCHIFFSVERKEHR

Für den Schiffsverkehr wurden keine Emissions-Kataster erstellt. Das heisst nicht, dass dessen Emissionen vernachlässigt werden. Für die gesamtschweizerische PM<sub>10</sub>-Modellierung wurde eine eigene Modellierung der Immissionen vorgenommen, die durch die Emissionen des Schiffsverkehrs verursacht werden. Für das OSTLUFT-Modell konnten diese Immissionsresultate direkt benutzt werden.

### 3.2.4. FLUGVERKEHR

Die PM10-Emissionen und die PM10-Immissionen des Flugverkehrs werden von der Flughafen Zürich AG selber berechnet, die Ergebnisse 2010 wurden für die Applikation OSTLUFT zur Verfügung gestellt (Flughafen Zürich AG 2012). Die Emissionen, die dem Flugverkehr zugeordnet und eigens in Immissionen umgerechnet werden, enthalten die Beiträge aus den LTO-Zyklen (Landing-Takeoff Cycle), aus den Auxiliary Power Units APU, aus dem Pneuabtrieb der Flugzeuge beim Landen und aus allen „airside“-Aktivitäten (Fahrzeuge, Maschinen und Geräte zur Abfertigung auf dem Fluggelände, Ground Power Units GPU, Notstromaggregate). Die Emissionsfrachten 2010 sind in Tabelle 3 angegeben. Weitere Emissionen des Flughafens sind in anderen Emissionskatastern bereits enthalten und werden für die Immissionsmodellierung berücksichtigt. Es handelt sich um Kunden- und Anlieferungsverkehr, die im „Strassenverkehr“ integriert sind, und um Emissionen aus der Heizzentrale, die unter „Feuerungen Haushalte und Dienstleistungen“ berücksichtigt werden.

Bei der Modellierung zeigt sich, dass praktisch nur die „airside“-Emissionen für die bodennahen Immissionen relevant sind. Insbesondere finden die Emissionen aus den LTO-Zyklen zum grössten Teil in solchen Flughöhen statt, dass sie auf der Immissionskarte zwar über ein grosses Gebiet auch ausserhalb des Flughafenareals auftreten, aber nur noch sehr stark verdünnt sind (Konzentrationen unter  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Für die Bestimmung der PM2.5- und der EC-Immissionen braucht es noch weitere Informationen:

- › Die Anteile der PM10-Emissionen nach Quellengruppen; diese wurden von der Flughafen Zürich AG zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 3, Spalte PM10-Emissionen)
- › Die PM2.5- und die EC-Anteile nach Quellengruppen; diese wurden von der Arbeitsgemeinschaft INFRAS/METEOTEST erhoben (Tabelle 3)

Emissionsquelle	PM10-Em 2010 t/a	Anteil PM2.5 (PM2.5/PM10)	Anteile EC (EC/PM2.5)
LTO-Zyklen, APU	13.5	100%	56%
Pneuabtrieb Flugzeuge	3.4	15%	29%
airside (Fahrzeuge, Abfertigung, GPU, Notstromaggr.)	5.1	100%	56%
Heizzentrale	(Feuerungen)	---	---
landside (Kunden, Anlieferung)	(Verkehr)	---	---

**Tabelle 3** Quellenangaben: Die PM10-Emissionen stammen von der Flughafen Zürich AG (2012), für PM2.5- Anteile siehe Tabelle 24 und für EC-Anteile siehe Tabelle 25. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Um die Immissionsresultate des Flughafens für die übrigen Bezugsjahre 2005, 2015 und 2020 bestimmen zu können, wurden folgende Annahmen getroffen:

- › Die PM10-Emissionen aus LTO-Zyklen, APU und Pneuabtrieb entwickeln sich in der Periode 2005–2020 wie die gesamtschweizerischen PM10-Emissionen aus dem Flugverkehr/LTO gemäss BAFU UNECE-Submission (FOEN 2011a).
- › Die PM10-Emissionen aus airside-Aktivitäten stammen aus Personen-, Lieferwagen, schweren Nutzfahrzeugen und Dieselmotoren und unterstehen den Emissionsvorschriften Strassenverkehr und Arbeitsmaschinen. Für die Periode 2005–2020 wird deshalb die Emissionsentwicklung dem Strassenverkehr nachgefahren (BAFU 2010).
- › Die Anteile des PM2.5 am PM10 sind für jede einzelne Quellengruppen konstant, weil die Emissionsbeiträge sich aber im Laufe der Jahre unterschiedlich entwickeln, ändert sich der PM2.5-Anteil an der Summe der PM10 non-exhaust Emissionen (siehe Tabelle 24).
- › Die Anteile des EC am PM2.5 ändern sich wie beim Strassenverkehr, bei dem die neuen Emissionskonzepte (Euro-Klassen) zu geringeren EC-Anteilen führen werden (siehe Tabelle 4 und Tabelle 25)

Die relevanten, zeitlichen Änderungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Parameter	2005	2010	2015	2020
Emissionen LTO, APU, Pneuabtrieb	93%	100%	105%	98%
Anteil EC (am PM2.5) LTO, APU, airside	54%	56%	47%	28%
Anteil EC (am PM2.5) Pneuabtrieb	29%	29%	29%	29%

**Tabelle 4** Zeitentwicklung der Parameter, die für die Immissionsmodellierung relevant sind. Quellen: Emissionen LTO, APU, Pneuabtrieb stammen aus FOEN (2011a), EC-Anteile siehe Tabelle 25 im Annex.

### 3.3. INDUSTRIE

#### 3.3.1. STATIONÄRE QUELLEN

Die grossen industriellen Einzelquellen und deren Emissionen sind den Kantonen bekannt und werden punktgenau mit ihren Landeskoordinaten erfasst. Die übrigen Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen wurden von OSTLUFT aus den schweizerischen Emissionen mit Hilfe der Beschäftigtenzahlen Sektor 2 auf das OSTLUFT-Gebiet heruntergerechnet und lokalisiert. Die Emissionsentwicklung 2005–2020 ist proportional zur Entwicklung der gesamten Schweizer Emissionen aus den stationären, industriellen Emissionen FOEN (2011a) abgeschätzt. Die Grids wurden vom Leistungszentrum Modellierung von OSTLUFT übernommen.

Für die Ausbreitungsrechnung (Kap. 4.1) werden in den Gemeinden Zürich, Winterthur, St.Gallen und Schaffhausen die Emissionen analog FOEN (2013) aufgeteilt: Ein Drittel der Emissionen wird mit einer Emissionshöhe 35 m ausgebreitet, zwei Drittel mit einer Emissionshöhe 20 m. In allen übrigen Gebieten wird mit einer Emissionshöhe von 20 m gerechnet.



### 3.3.2. MOBILE QUELLEN

Die Emissionen der Baumaschinen stammen aus Schöffeler/Keller (2008) für die gesamte Schweiz. Diese werden zunächst mit den kommunalen Bauinvestitionen (Mittelwerte 2000–2008) auf die Ostschweizer Gemeinden heruntergerechnet, anschliessend mit der Arealstatistik (NOAS92, BFS 2001) gemäss der Baustatistik auf Siedlungsflächen (innerorts) und Strassenareale ausserorts verteilt.

Die Emissionen der industriellen Geräte, Maschinen und Fahrzeuge wurde mit den Beschäftigtenzahlen Sektor 2 von den schweizerischen Summen auf die Ostschweiz heruntergerechnet und verteilt.

## 3.4. HAUSHALTE UND DIENSTLEISTUNGEN

### 3.4.1. STATIONÄRE QUELLEN

Die Feuerungen für Haushalte und Gewerbe, Dienstleistungen wurden von OSTLUFT in einem eigenen Modell „Wärmeverbrauch und Feuerungen pro Gemeinde“ (OSTLUFT 2011) berechnet. Das Modell berechnet die PM10-Emissionen für alle Gemeinden der Schweiz und wird auf den Energieverbrauch der Schweiz gemäss Gesamtenergiestatistik des Bundesamts für Energie kalibriert.

Im Modell werden die kondensierbaren Kohlenwasserstoffe (COC)<sup>2</sup> berücksichtigt, die bei Holzfeuerungen einen gewichtigen Beitrag zu den Emissionen liefern. Sie werden anteilmässig aus den NMVOC-Emissionen abgeleitet. Grundlage bildet eine Publikation von Nussbaumer (2010), in der die COC geschätzt und betragen massenmässig zwischen 35% und 50% der NMVOC-Emissionen. Die PM10-Emissionen werden deshalb um 35% vergrössert (für die Schweiz betragen die PM10-Emissionen aus Holzfeuerungen im Jahr 2010 2'270 t, die COC 1'350 t, siehe FOEN 2013). Die COC werden nur bei Holzfeuerungen von Haushalten und Dienstleistungsbetrieben berücksichtigt. Für industrielle Holzfeuerungen ist ihr Beitrag sehr klein (ca. 3% der PM10-Emissionen). Auch bei den Öl- und Gasfeuerungen werden keine COC in Betracht gezogen.

Die Emissionen aus den Feuerungen von Haushalten und Dienstleistungsbetrieben werden mit einer Emissionshöhe von 20 m und 50 m ausgebreitet. Die Emissions-Grids wurden vom Leistungszentrum Modellierung von OSTLUFT übernommen. Die Aufteilung geschieht für den ganzen OSTLUFT-Perimeter auf dieselbe Art auf der Grundlage des Hektar-Grids aus der Gebäudezählung

<sup>2</sup> Die kondensierbaren Kohlenwasserstoffe („COC“: condensable organic compounds) liegen im heissen Abgas – im Kamin – als Gase vor, kondensieren aber rasch nach dem Austritt in die freie, kühle Atmosphäre zu Aerosolen und sind damit Bestandteil des PM10.

2000. Für jede relevante Hektare wird ein Faktor zwischen 0 und 1 berechnet, der den Anteil der Gebäude mit vier oder weniger Stockwerken berechnet. Der betreffende Anteil wird mit der Transferfunktion 20 m ausgebreitet, der Rest mit der Transferfunktion 50 m.

### 3.4.2. MOBILE QUELLEN

Die Emissionen der mobilen Quellen (Garten, Hobby) stammen aus Schöffeler/Keller (2008) für die ganze Schweiz 2005–2020 und werden mit Hilfe der kommunalen Einwohnerzahlen („Wohnbevölkerung“) auf die Ostschweiz umgelegt.

## 3.5. LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT

### 3.5.1. LANDWIRTSCHAFT

Die Emissionen wurden von OSTLUFT nach Quellen unterteilt: Feuerungen, Fahrzeuge/-Maschinen, landwirtschaftliche Nutzflächen, offene Verbrennung, Böden und Nutztiere. Die schweizerischen Totale (FOEN 2011a, Schöffeler/Keller 2008) werden mit kommunalen Arbeitsplatzzahlen, Fahrzeugbeständen, Flächen, Tierbeständen und mit der Arealstatistik (NOAS92, BFS 2001) auf die Ostschweiz umgelegt.

### 3.5.2. FORSTWIRTSCHAFT

Die Emissionen aus forstwirtschaftlichen Geräten und Maschinen wurden von OSTLUFT mit kommunalen Beschäftigtenzahlen Sektor 1 auf die Gemeinden der Ostschweiz aufgeschlüsselt und mit der Arealstatistik auf den Waldflächen verteilt.

## 3.6. WEITERE RELEVANTE EMISSIONEN

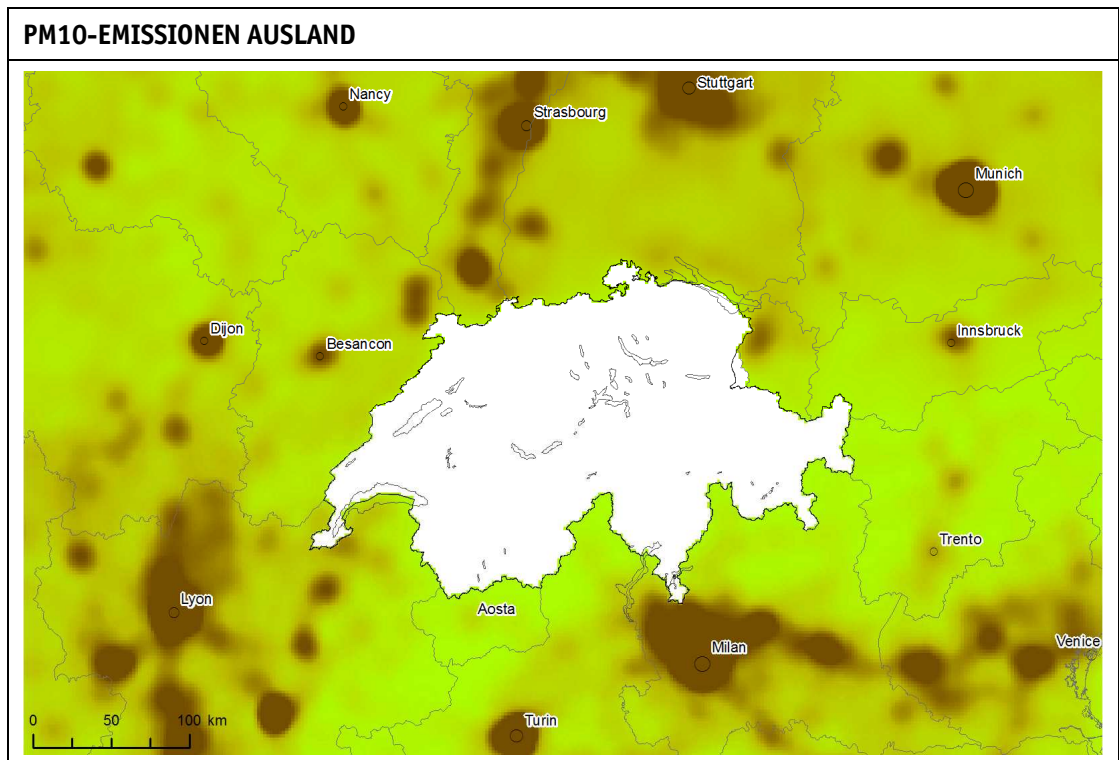
### 3.6.1. EMISSIONEN AUS ÜBRIGER SCHWEIZ UND AUSLAND

#### **a) Import aus den übrigen Gebieten der Schweiz**

Die Feinstaubemissionen aus den übrigen, d.h. den nicht-OSTLUFT-Gebieten werden je nach meteorologischen Verhältnissen ins OSTLUFT-Gebiet verfrachtet und führen da zu Immissionen. Wie diese importierten Immissionen modelliert werden, ist im Kap. 4.1.5 beschrieben. Die Emissionen stammen aus der EMIS Datenbank und wurden zu Emissions-Grids aufbereitet. Siehe dazu Emissionskarten im Bericht FOEN (2013).

### b) Import aus dem Ausland

Auch aus dem Ausland erreichen primäre Partikel das OSTLUFT-Gebiet. Um diese zu bestimmen, wurde für europäische PM10- und ein PM2.5-Emissionskataster (TNO 2010) eine Ausbreitungsrechnung durchgeführt. Die PM10-Emissionen sind qualitativ in der Karte (Figur 4) analog FOEN (2013) dargestellt.



Figur 4 Europäische PM10-Emissionen (Quelle TNO 2010).

### 3.6.2. EMISSIONEN AUS GASFÖRMIGEN VORLÄUFERSUBSTANZEN

Die Emissionen der gasförmigen Luftschadstoffe  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  im OSTLUFT-Gebiet und ebenso in der übrigen Schweiz und im Ausland führen über komplizierte Reaktionsketten in der Atmosphäre zu sekundären Aerosolen in Form von Ammoniumnitrat und Ammoniumsulfat. Sie werden unter der Bezeichnung sekundäre anorganische Aerosole, engl. secondary inorganic aerosols „SIA“, zusammengefasst. In ähnlicher Weise werden Teile der NMVOC-Emissionen in sekundäre organische Aerosole, engl. secondary organic aerosols „SOA“ umgewandelt. Um die Konzentrationen der SIA und SOA abschätzen zu können, wurde ein einfaches empirisches Modell bereits für das schweizerische Feinstaub-Immissionsmodell entwickelt. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in FOEN (2013). Für OSTLUFT können die Resultate direkt übernommen werden, siehe dazu Kap. 5.2.

### 3.6.3. EMISSIONEN AUS NATÜRLICHEN QUELLEN

Durch Erosion entstehen PM10-Partikel aus geologischem und biologischem Material. Bei bestimmten Wetterlagen werden zusätzlich PM10-Partikel aus Sandsturm-Ereignissen in der Sahara in die Schweiz verfrachtet. Die resultierenden PM10-Immissionen werden im Modell in einfacher Weise berücksichtigt. Siehe dazu Kap. 4.1.6 sowie FOEN (2013).

## 3.7. EMISSIONSBILANZEN UND EMISSIONSKARTEN

### 3.7.1. EMISSIONSBILANZEN

#### a) PM10-Emissionen

<b>PM10-EMISSIONEN EXHAUST</b>					
Hauptgruppe	Untergruppe	2005 t/a	2010 t/a	2015 t/a	2020 t/a
<b>Verkehr</b>		<b>428</b>	<b>339</b>	<b>227</b>	<b>135</b>
	Strassenverkehr Link	333	251	161	91
	Strassenverkehr Tunnel	8	11	7	4
	Zonenverkehr Kaltstart	24	27	20	11
	Zonenverkehr warmer Betriebszustand	40	30	19	11
	Schienenverkehr	5	2	1	1
	Flugverkehr (LTO, APU, airside)	18	19	19	17
<b>Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen</b>		<b>1'822</b>	<b>1'890</b>	<b>1'928</b>	<b>1'943</b>
	HH, Gew., DL (nicht Holz)	29	15	16	14
	HH, Gew., DL (Holz) inkl. COC	1'505	1'557	1'590	1'605
	Garten, Hobby	288	318	321	324
<b>Industrie</b>		<b>647</b>	<b>630</b>	<b>583</b>	<b>549</b>
	Baumaschinen	81	29	12	7
	Industrielle Fahrzeuge	33	16	8	5
	Industrie, Flächenquellen	230	285	263	236
	Industrie, Punktquellen bis 80m	191	188	188	188
	Industrie, Punktquellen >= 80m	112	112	112	112
<b>Land-/Forstwirtschaft</b>		<b>412</b>	<b>354</b>	<b>302</b>	<b>281</b>
	Landwirtschaftl. Fahrzeuge	157	104	54	34
	Forstwirtschaftl. Fahrzeuge	6	3	2	1
	Landwirtschaft: Feuerungen	15	12	12	11
	Landwirtschaft: Tiere, Kulturen, Böden	-	-	-	-
	Landwirtschaft: offene Verbrennung	117	117	117	117
	Forstwirtschaft: offene Verbrennung	117	117	117	117
<b>Total OSTLUFT</b>		<b>3'309</b>	<b>3'213</b>	<b>3'040</b>	<b>2'908</b>
<b>Total OSTLUFT in Prozent (2005 = 100%)</b>		<b>100%</b>	<b>97%</b>	<b>92%</b>	<b>88%</b>

**Tabelle 5** Bilanz der PM10 Emissionen exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Unter den Holzfeuerungen (HH, Gew. DL) sind COC (condensable org. carbon) eingeschlossen. Die Unterscheidung nach Emissionshöhen bei „Industrie, Punktquellen“ dient der Immissionsmodellierung. Emissionen aus offener Verbrennung werden je hälftig der Land- und der Forstwirtschaft zugewiesen. Verwendete Datengrundlagen siehe Tabelle 1.

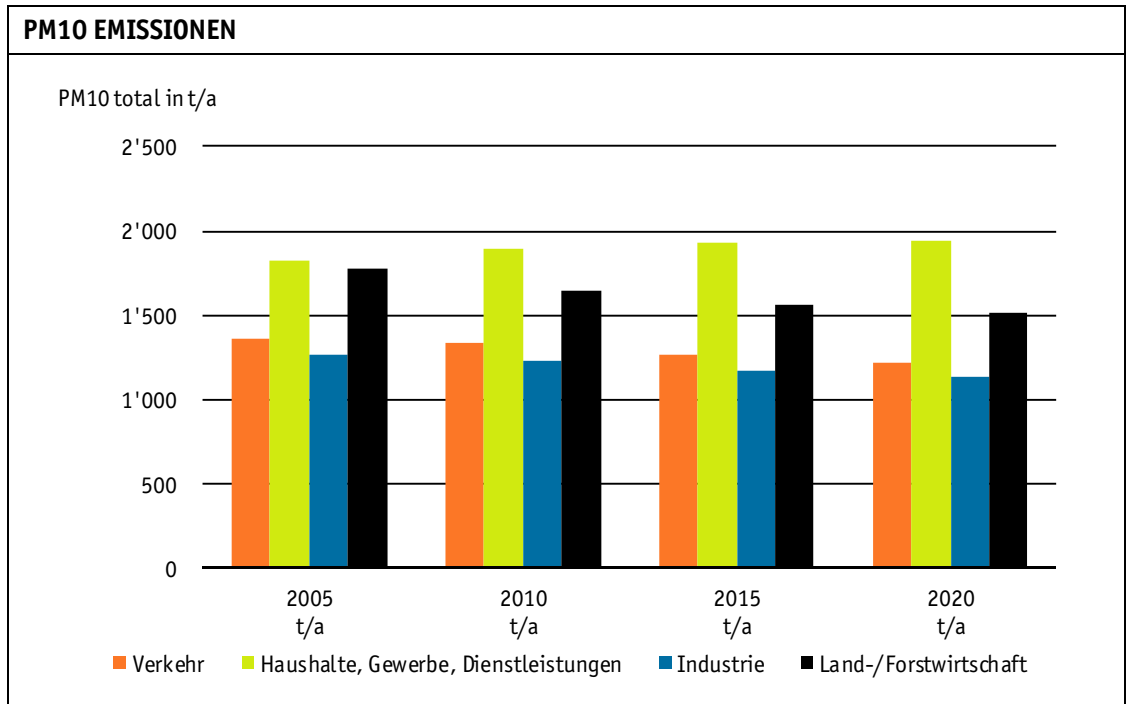
<b>PM10-EMISSIONEN NON-EXHAUST</b>					
Hauptgruppe	Untergruppe	2005 t/a	2010 t/a	2015 t/a	2020 t/a
<b>Verkehr</b>		<b>927</b>	<b>1'003</b>	<b>1'045</b>	<b>1'086</b>
	Strassenverkehr Link	572	606	627	648
	Strassenverkehr Tunnel	15	29	31	32
	Zonenverkehr Kaltstart	-	-	-	-
	Zonenverkehr warmer Betriebszustand	106	107	108	110
	Schienenverkehr	232	257	275	294
	Flugverkehr (Pneubetrieb)	3	3	4	3
<b>Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen</b>		<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
	HH, Gew., DL (nicht Holz)	-	-	-	-
	HH, Gew., DL (Holz) inkl. COC	-	-	-	-
	Garten, Hobby	-	-	-	-
<b>Industrie</b>		<b>613</b>	<b>603</b>	<b>594</b>	<b>581</b>
	Baumaschinen	505	491	480	466
	Industrielle Fahrzeuge	-	-	-	-
	Industrie, Flächenquellen	103	107	109	110
	Industrie, Punktquellen bis 80m	5	5	5	5
	Industrie, Punktquellen >= 80m	-	-	-	-
<b>Land-/Forstwirtschaft</b>		<b>1'368</b>	<b>1'292</b>	<b>1'263</b>	<b>1'229</b>
	Landwirtschaftl. Fahrzeuge	713	687	660	629
	Forstwirtschaftl. Fahrzeuge	5	4	4	4
	Landwirtschaft: Feuerungen	-	-	-	-
	Landwirtschaft: Tiere, Kulturen, Böden	650	601	599	596
	Landwirtschaft: offene Verbrennung	-	-	-	-
	Forstwirtschaft: offene Verbrennung	-	-	-	-
<b>Total OSTLUFT</b>		<b>2'908</b>	<b>2'898</b>	<b>2'901</b>	<b>2'897</b>
<b>Total OSTLUFT in Prozent (2005 = 100%)</b>		<b>100.0%</b>	<b>99.6%</b>	<b>99.7%</b>	<b>99.6%</b>

**Tabelle 6** Bilanz der PM10 Emissionen non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen.

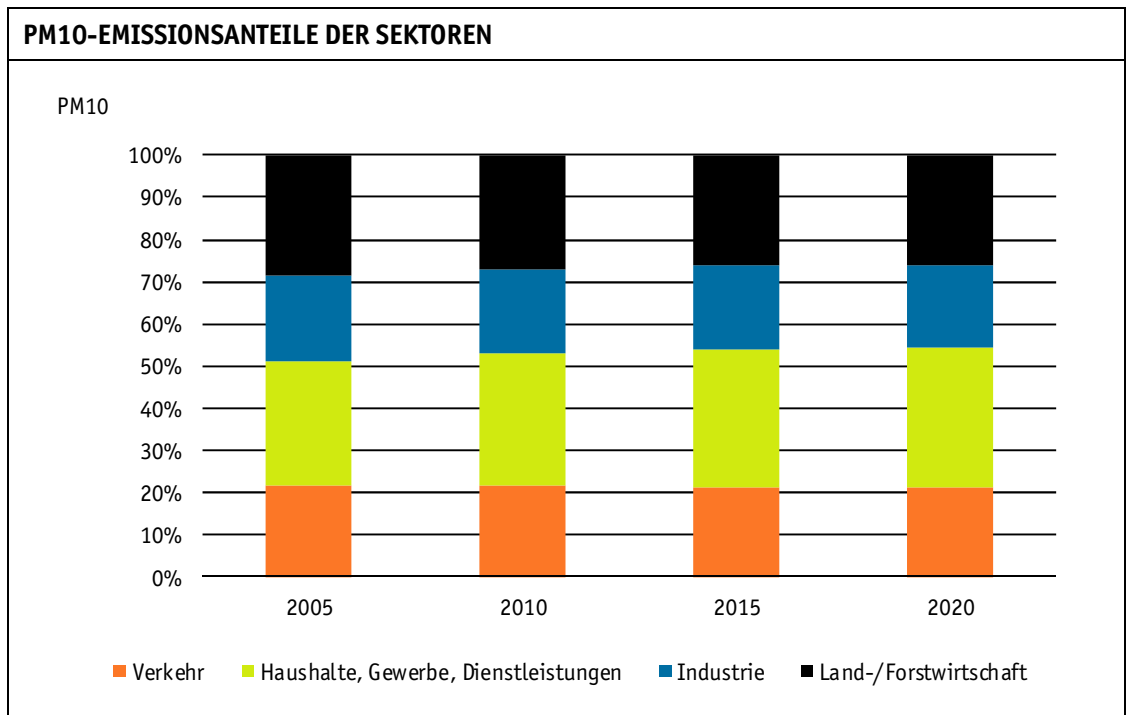
<b>PM10-EMISSIONEN EXHAUST + NON-EXHAUST</b>					
Hauptgruppe	Untergruppe	2005 t/a	2010 t/a	2015 t/a	2020 t/a
Verkehr		1'355	1'342	1'272	1'222
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen		1'822	1'890	1'928	1'943
Industrie		1'260	1'233	1'177	1'130
Land-/Forstwirtschaft		1'780	1'647	1'564	1'510
<b>Total OSTLUFT</b>		<b>6'217</b>	<b>6'112</b>	<b>5'941</b>	<b>5'805</b>
<b>Total OSTLUFT in Prozent (2005 = 100%)</b>		<b>100%</b>	<b>98%</b>	<b>96%</b>	<b>93%</b>

**Tabelle 7** Bilanz der PM10 Emissionen exhaust plus non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020.

Die Werte in den Tabellen zeigen, dass bei den exhaust PM10-Emissionen (Partikel aus der Verbrennung) mit Reduktionen von 12% im Zeitraum 2005–2020 gerechnet werden kann, während bei den non-exhaust PM10-Emissionen praktisch keine Verbesserung erwartet wird.



**Figur 5** Entwicklung der PM10-Emissionen (exhaust plus non-exhaust) im OSTLUFT-Gebiet 2005–2020 nach den Sektoren.



**Figur 6** PM10-Emissionen (exhaust plus non-exhaust) OSTLUFT: Anteile der Sektoren 2005–2020.

## b) PM2.5-Emissionen

Für die Modellierung der PM2.5-Immissionen braucht es die PM2.5-Emissionen. Diese werden als Anteile an den PM10-Emissionen berechnet. Tabelle 8 bis Tabelle 10 zeigen die aus den PM10-Emissionen berechneten PM2.5-Emissionen. Die PM2.5-Anteile je Quellengruppe sind in Tabelle 24 im Annex A1 aufgeführt; dort sind auch die Quellenhinweise angegeben.

<b>PM2.5-EMISSIONEN EXHAUST</b>					
Hauptgruppe	Untergruppe	2005 t/a	2010 t/a	2015 t/a	2020 t/a
<b>Verkehr</b>		<b>428</b>	<b>339</b>	<b>227</b>	<b>135</b>
	Strassenverkehr Link	333	251	161	91
	Strassenverkehr Tunnel	8	11	7	4
	Zonenverkehr Kaltstart	24	27	20	11
	Zonenverkehr warmer Betriebszustand	40	30	19	11
	Schienenverkehr	5	2	1	1
	Flugverkehr (LTO, APU, airside)	18	19	19	17
<b>Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen</b>		<b>1'626</b>	<b>1'688</b>	<b>1'721</b>	<b>1'735</b>
	HH, Gew., DL (nicht Holz)	29	15	16	14
	HH, Gew., DL (Holz) inkl. COC	1'310	1'355	1'384	1'396
	Garten, Hobby	288	318	321	324
<b>Industrie</b>		<b>647</b>	<b>630</b>	<b>583</b>	<b>549</b>
	Baumaschinen	81	29	12	7
	Industrielle Fahrzeuge	33	16	8	5
	Industrie, Flächenquellen	230	285	263	236
	Industrie, Punktquellen bis 80m	191	188	188	188
	Industrie, Punktquellen >= 80m	112	112	112	112
<b>Land-/Forstwirtschaft</b>		<b>412</b>	<b>354</b>	<b>302</b>	<b>281</b>
	Landwirtschaftl. Fahrzeuge	157	104	54	34
	Forstwirtschaftl. Fahrzeuge	6	3	2	1
	Landwirtschaft: Feuerungen	15	12	12	11
	Landwirtschaft: Tiere, Kulturen, Böden	-	-	-	-
	Landwirtschaft: offene Verbrennung	117	117	117	117
	Forstwirtschaft: offene Verbrennung	117	117	117	117
<b>Total OSTLUFT</b>		<b>3'113</b>	<b>3'011</b>	<b>2'833</b>	<b>2'699</b>
<b>Total OSTLUFT in Prozent (2005 = 100%)</b>		<b>100%</b>	<b>97%</b>	<b>91%</b>	<b>87%</b>

**Tabelle 8** Bilanz der PM2.5 Emissionen exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Unter den Holzfeuerungen (HH, Gew. DL) sind COC (condensable org. carbon) eingeschlossen. Die Unterscheidung nach Emissionshöhen bei „Industrie, Punktquellen“ dient der Immissionsmodellierung.

<b>PM2.5-EMISSIONEN NON-EXHAUST</b>					
Hauptgruppe	Untergruppe	2005 t/a	2010 t/a	2015 t/a	2020 t/a
<b>Verkehr</b>		<b>146</b>	<b>155</b>	<b>161</b>	<b>167</b>
	Strassenverkehr Link	86	91	94	97
	Strassenverkehr Tunnel	2	4	5	5
	Zonenverkehr Kaltstart	-	-	-	-
	Zonenverkehr warmer Betriebszustand	16	16	16	16
	Schienenverkehr	39	41	43	45
	Flugverkehr (Pneubtrieb)	3	3	3	3
<b>Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen</b>		<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
	HH, Gew., DL (nicht Holz)	-	-	-	-
	HH, Gew., DL (Holz) inkl. COC	-	-	-	-
	Garten, Hobby	-	-	-	-
<b>Industrie</b>		<b>178</b>	<b>153</b>	<b>138</b>	<b>132</b>
	Baumaschinen	128	104	88	80
	Industrielle Fahrzeuge	-	-	-	-
	Industrie, Flächenquellen	47	47	48	49
	Industrie, Punktquellen bis 80m	2	2	2	2
	Industrie, Punktquellen >= 80m	-	-	-	-
<b>Land-/Forstwirtschaft</b>		<b>266</b>	<b>243</b>	<b>222</b>	<b>205</b>
	Landwirtschaftl. Fahrzeuge	167	151	131	115
	Forstwirtschaftl. Fahrzeuge	1	1	1	1
	Landwirtschaft: Feuerungen	-	-	-	-
	Landwirtschaft: Tiere, Kulturen, Böden	98	91	90	90
	Landwirtschaft: offene Verbrennung	-	-	-	-
	Forstwirtschaft: offene Verbrennung	-	-	-	-
<b>Total OSTLUFT</b>		<b>589</b>	<b>551</b>	<b>520</b>	<b>503</b>
<b>Total OSTLUFT in Prozent (2005 = 100%)</b>		<b>100.0%</b>	<b>93.5%</b>	<b>88.3%</b>	<b>85.5%</b>

**Tabelle 9** Bilanz der PM2.5 Emissionen non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen.

<b>PM2.5-EMISSIONEN EXHAUST + NON-EXHAUST</b>					
Hauptgruppe	Untergruppe	2005 t/a	2010 t/a	2015 t/a	2020 t/a
Verkehr		573	494	388	302
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen		1'626	1'688	1'721	1'735
Industrie		825	783	721	680
Land-/Forstwirtschaft		678	597	523	486
<b>Total OSTLUFT</b>		<b>3'702</b>	<b>3'562</b>	<b>3'353</b>	<b>3'203</b>
<b>Total OSTLUFT in Prozent (2005 = 100%)</b>		<b>100%</b>	<b>96%</b>	<b>91%</b>	<b>87%</b>

**Tabelle 10** Bilanz der PM2.5 Emissionen exhaust plus non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020.

Bei den exhaust Emissionen sind PM2.5 und PM10 fast gleich, der Anteil PM2.5 am PM10 beträgt im Jahr 2005 94% und bleibt bis 2020 nahezu stabil (93%). Bei den non-exhaust Emissionen ist



der Anteil der PM2.5-Emissionen dagegen sehr gering und liegt bei 20% (2005) resp. 17% (2020). Die detaillierten Anteile des PM2.5 am PM10 sind für jede Quellengruppe im Annex A1 angegeben.

### c) EC-Emissionen und Emissionsanteile

Für die Modellierung der EC-Immissionen braucht es die EC-Emissionen. Diese werden als Anteile an den PM2.5-Emissionen berechnet auf der Basis von Literaturwerten (IIASA 2010, Reff 2009). Tabelle 11 bis Tabelle 13 zeigen die aus den PM2.5-Emissionen berechneten EC-Emissionen. Sie sollten im Zeitraum 2005–2020 von 752 t/a auf 481 t/a abnehmen. Die EC-Anteile je Quellengruppe sind in Tabelle 25 im Annex A1 aufgeführt. Das Total der EC betrug im Jahr 2005 ca. 12% am Total der PM10-Emissionen. Bis 2020 sollte dieser Anteil auf 8% absinken.

<b>EC-EMISSIONEN EXHAUST</b>					
Hauptgruppe	Untergruppe	2005 t/a	2010 t/a	2015 t/a	2020 t/a
<b>Verkehr</b>		<b>232</b>	<b>190</b>	<b>109</b>	<b>42</b>
	Strassenverkehr Link	181	141	76	25
	Strassenverkehr Tunnel	4	6	3	1
	Zonenverkehr Kaltstart	13	15	9	3
	Zonenverkehr warmer Betriebszustand	22	17	9	3
	Schienenverkehr	2	1	0	0
	Flugverkehr (LTO, APU, airside)	10	10	10	9
<b>Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen</b>		<b>315</b>	<b>328</b>	<b>334</b>	<b>337</b>
	HH, Gew., DL (nicht Holz)	2	1	1	1
	HH, Gew., DL (Holz) inkl. COC	270	279	285	288
	Garten, Hobby	43	48	48	49
<b>Industrie</b>		<b>57</b>	<b>29</b>	<b>18</b>	<b>14</b>
	Baumaschinen	34	12	5	3
	Industrielle Fahrzeuge	14	7	3	2
	Industrie, Flächenquellen	4	5	5	4
	Industrie, Punktquellen bis 80m	3	3	3	3
	Industrie, Punktquellen >= 80m	2	2	2	2
<b>Land-/Forstwirtschaft</b>		<b>120</b>	<b>96</b>	<b>74</b>	<b>65</b>
	Landwirtschaftl. Fahrzeuge	66	44	23	14
	Forstwirtschaftl. Fahrzeuge	2	1	1	0
	Landwirtschaft: Feuerungen	3	3	2	2
	Landwirtschaft: Tiere, Kulturen, Böden	-	-	-	-
	Landwirtschaft: offene Verbrennung	24	24	24	24
	Forstwirtschaft: offene Verbrennung	24	24	24	24
<b>Total OSTLUFT</b>		<b>724</b>	<b>643</b>	<b>535</b>	<b>459</b>
<b>Total OSTLUFT in Prozent (2005 = 100%)</b>		<b>100%</b>	<b>89%</b>	<b>74%</b>	<b>63%</b>

**Tabelle 11** Bilanz der EC- Emissionen exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Unter den Holzfeuerungen (HH, Gew. DL) sind COC (condensable org. carbon) eingeschlossen. Die Unterscheidung nach Emissionshöhen bei „Industrie, Punktquellen“ dient der Immissionsmodellierung.

<b>EC-EMISSIONEN NON-EXHAUST</b>					
Hauptgruppe	Untergruppe	2005 t/a	2010 t/a	2015 t/a	2020 t/a
<b>Verkehr</b>		<b>8.5</b>	<b>9.1</b>	<b>9.4</b>	<b>9.6</b>
	Strassenverkehr Link	6.4	6.8	7.0	7.3
	Strassenverkehr Tunnel	0.2	0.3	0.3	0.4
	Zonenverkehr warmer Betriebszustand	1.2	1.2	1.2	1.2
	Flugverkehr (Pneubetrieb)	0.8	0.8	0.8	0.8
<b>Industrie</b>		<b>8.2</b>	<b>6.7</b>	<b>5.6</b>	<b>5.2</b>
	Baumaschinen	8.2	6.7	5.6	5.2
<b>Land-/Forstwirtschaft</b>		<b>10.8</b>	<b>9.8</b>	<b>8.5</b>	<b>7.4</b>
	Landwirtschaftl. Fahrzeuge	10.7	9.7	8.4	7.4
	Forstwirtschaftl. Fahrzeuge	0.1	0.1	0.1	0.0
<b>Total OSTLUFT</b>		<b>27.5</b>	<b>25.6</b>	<b>23.5</b>	<b>22.2</b>
<b>Total OSTLUFT in Prozent (2005 = 100%)</b>		<b>100%</b>	<b>93%</b>	<b>85%</b>	<b>81%</b>

Tabelle 12 Bilanz der EC-Emissionen non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020.

<b>EC-EMISSIONEN EXHAUST + NON-EXHAUST</b>					
Hauptgruppe	Untergruppe	2005 t/a	2010 t/a	2015 t/a	2020 t/a
Verkehr		241	199	118	52
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen		315	328	334	337
Industrie		65	36	24	20
Land-/Forstwirtschaft		131	106	82	73
<b>Total OSTLUFT</b>		<b>752</b>	<b>668</b>	<b>559</b>	<b>481</b>
<b>Total OSTLUFT in Prozent (2005 = 100%)</b>		<b>100%</b>	<b>89%</b>	<b>74%</b>	<b>64%</b>

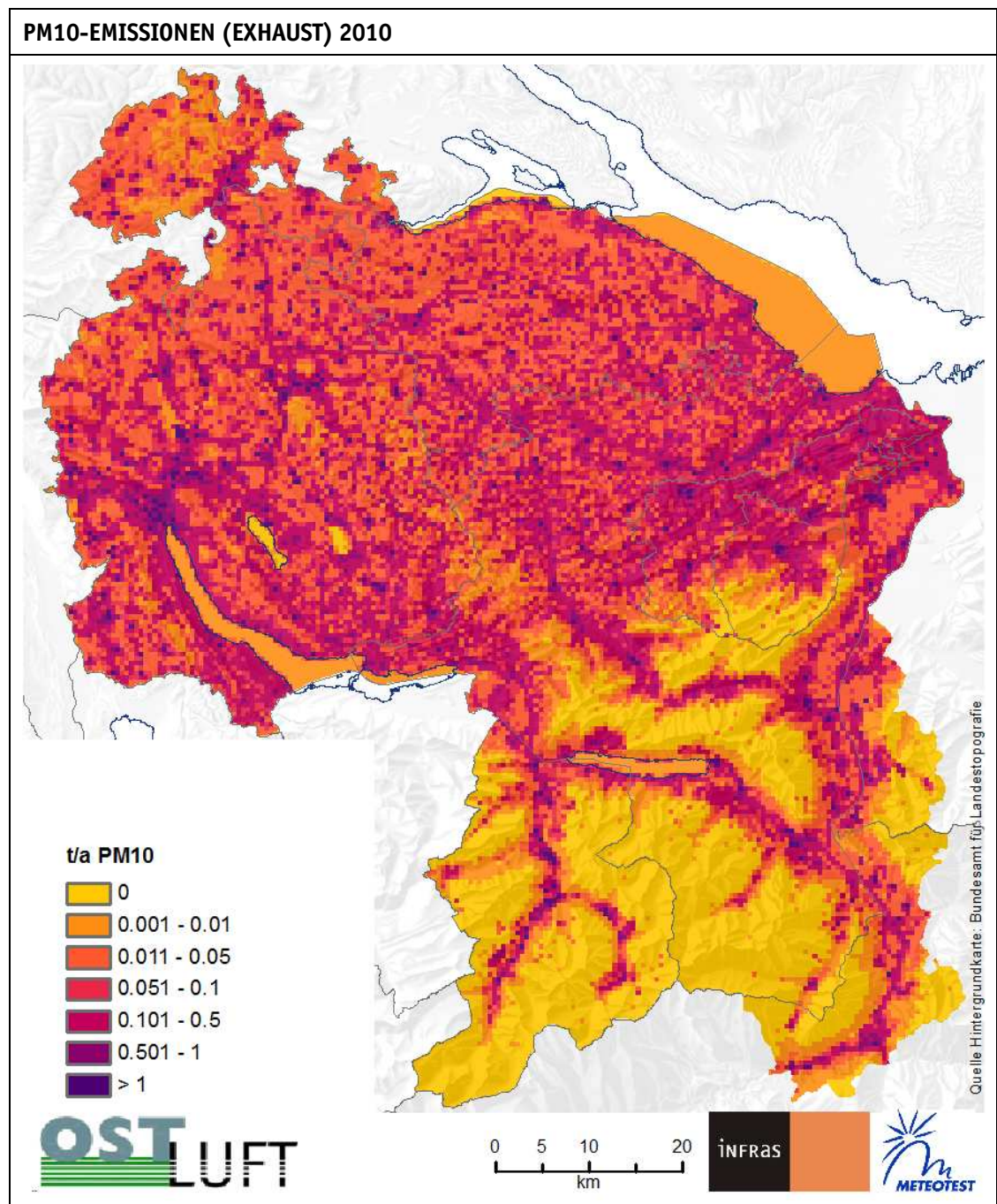
Tabelle 13 Bilanz der EC-Emissionen exhaust plus non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020.

<b>EMISSIONEN UND EMISSIONSANTEILE</b>						
Komponente	exhaust/non-ex.	Einheit	2005	2010	2015	2020
<b>Emissionen</b>						
PM10	exhaust	t/a	3'309	3'213	3'040	2'908
	non-exhaust	t/a	2'908	2'898	2'901	2'897
	total	t/a	6'217	6'112	5'941	5'805
PM2.5	exhaust	t/a	3'113	3'011	2'833	2'699
	non-exhaust	t/a	589	551	520	503
	total	t/a	3'702	3'562	3'353	3'203
EC	exhaust	t/a	724	643	535	459
	non-exhaust	t/a	28	26	24	22
	total	t/a	752	668	559	481
<b>Anteile</b>						
PM2.5/PM10	exhaust	%	94%	94%	93%	93%
	non-exhaust	%	20%	19%	18%	17%
	total	%	60%	58%	56%	55%
EC/PM2.5	exhaust	%	23%	21%	19%	17%
	non-exhaust	%	5%	5%	5%	4%
	total	%	20%	19%	17%	15%
EC/PM10	exhaust	%	22%	20%	18%	16%
	non-exhaust	%	1%	1%	1%	1%
	total	%	12%	11%	9%	8%

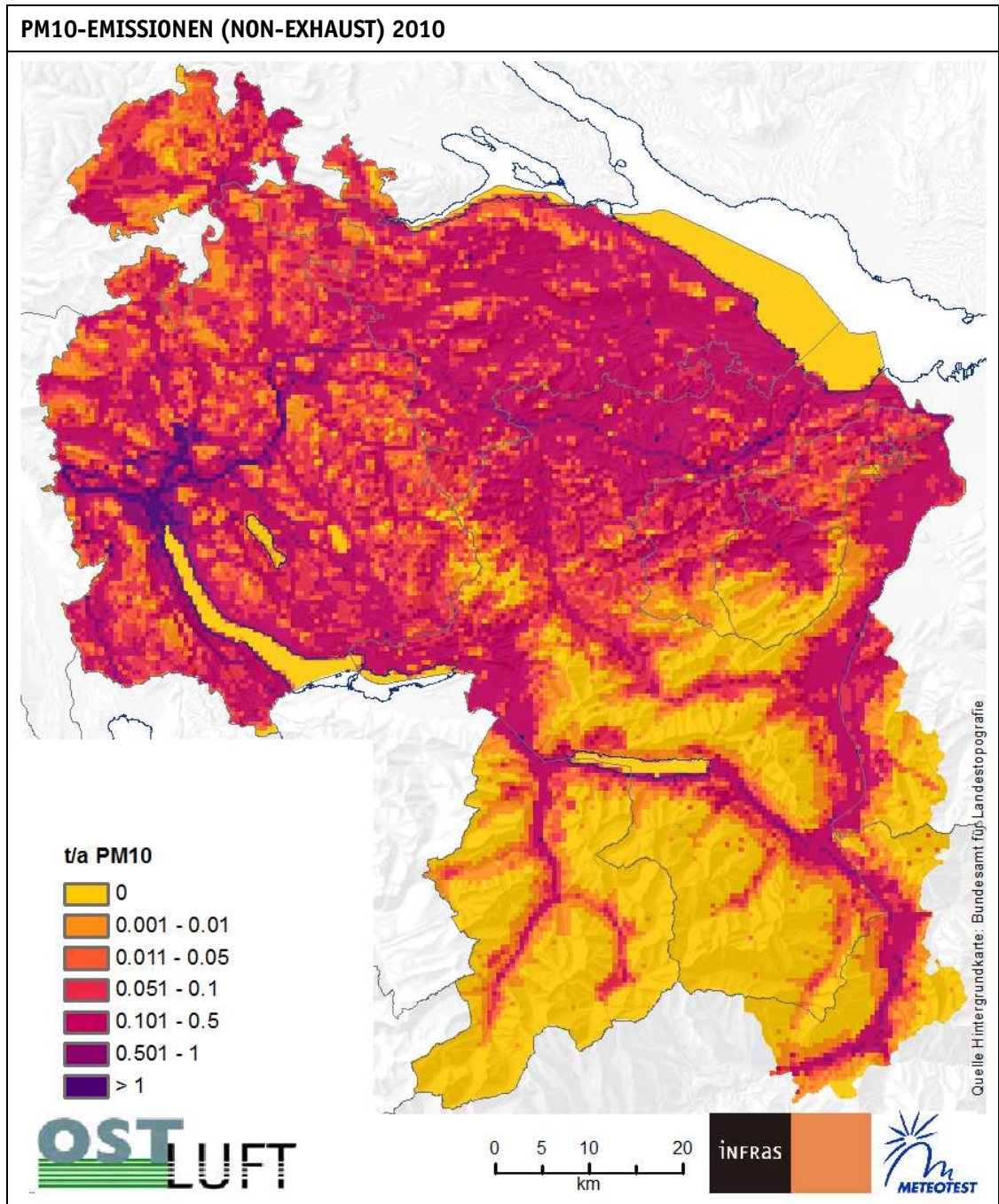
Tabelle 14 Übersicht über PM10-, PM2.5- und EC-Emissionen und Emissionsanteile.

### 3.7.2. EMISSIONSKARTEN

Die folgenden Karten zeigen exemplarisch die PM10-Emissionen 2010 getrennt nach exhaust und non-exhaust Anteilen. Die Emissionen sind in Tonnen pro Jahr und pro 0.5 km x 0.5 km angegeben. Die Zeitreihe 2005–2020 der Emissionskarten ist im Annex A2 aufgeführt.



**Figur 7** Summe der PM10-Emissionen exhaust 2010. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



**Figur 8** Summe der PM10-Emissionen non-exhaust 2010. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.

## 4. IMMISSIONSMODELLIERUNG

### 4.1. AUSBREITUNGSRECHNUNG FÜR PRIMÄRE PARTIKEL

#### 4.1.1. GENERELLES

Für die Ausbreitungsrechnung wird in einem Vorprozess ein Set von Transferfunktionen bereitgestellt. Für mehrere Geometrien (Punkt-, Linien, Flächenquellen; verschiedene Emissionshöhen zwischen 0 m und 100 m, Ganglinien für Verkehr, Raumwärme, Industrie) wird mit stündlichen Meteodaten für das Jahr 2005 und mit einer Einheitsemission (1 t/a) eine Gaussmodellierung durchgeführt (VDI 1988). Dabei werden stündliche Meteodaten verwendet, um ein ganzes Jahr zu simulieren. Die Emission erfolgt nicht konstant, sondern nach Ganglinien. Bodennahe Quellen (Verkehr) folgen im Wesentlichen den Tagesganglinien des Verkehrs, erhöhte Quellen (Heizungen) folgen Tagesganglinien, die saisonal verschieden sind. Details siehe FOEN (2011) im Annex 3. Jedem Emissions-Grid wird sein passendes Muster zugeordnet: Das Muster „Punktquellen >100 m“ wird mit dem Emissions-Grid aller Punktquellen mit Kaminhöhen >100 m (z.B. KVA) multipliziert etc. Auf diese Weise wird jedes Emissions-Grid in ein Immissions-Grid verwandelt. Ausserdem wird das OSTLUFT-Gebiet in mehrere Windregionen zerlegt, in denen je eigene Ausbreitungsfunktionen angewendet werden. Die räumliche Auflösung der Ausbreitungsfunktionen ist 200 m x 200 m im Nahbereich (bis 3 km) und 2 km x 2 km im Fernbereich der Quelle (ab 3 km bis 100 km von der Quelle weg).

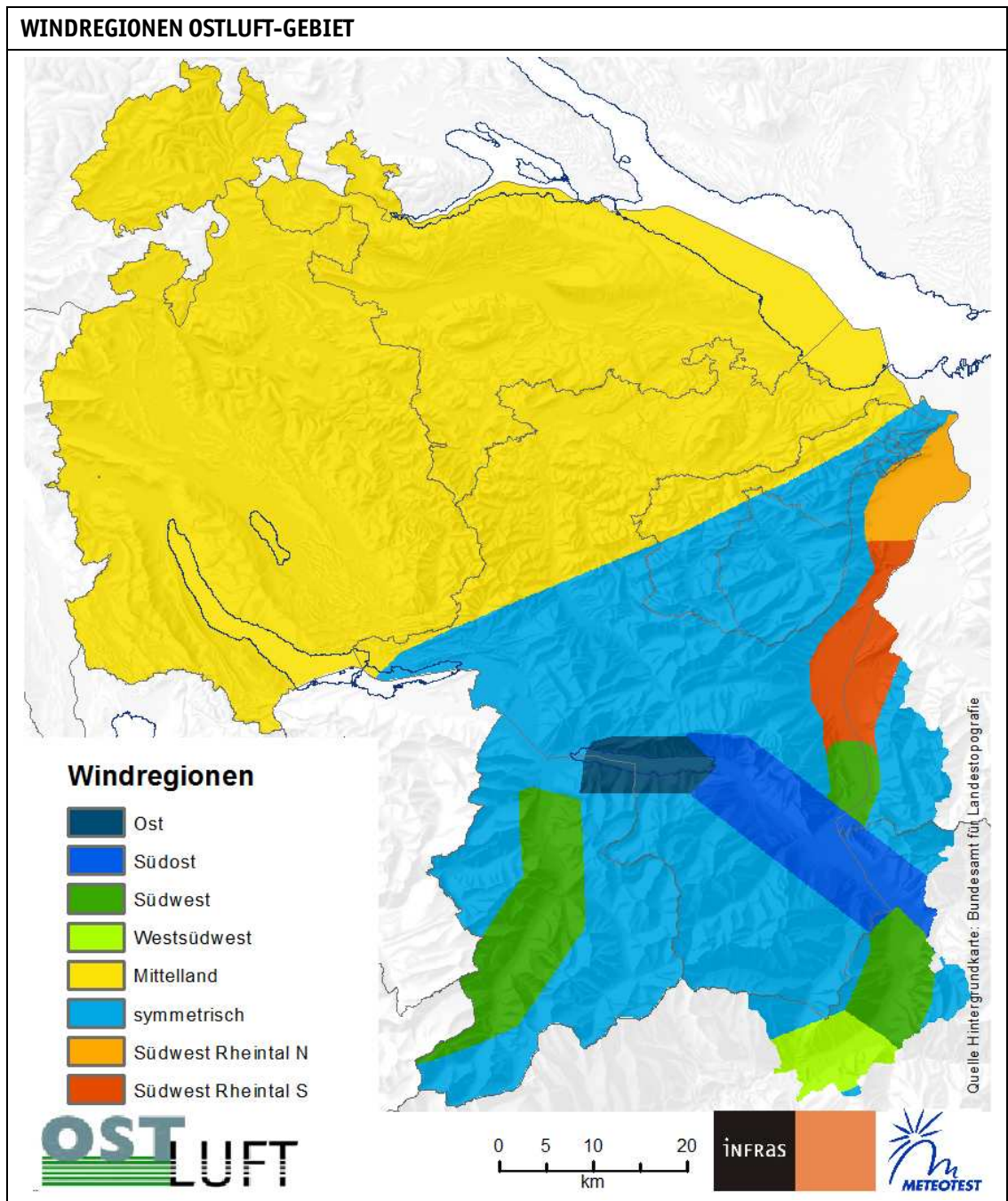
Die PM<sub>10</sub>-Emissionen werden mithilfe der PM<sub>2.5</sub>-Anteile (siehe in Tabelle 24) in die feine (PM<sub>2.5</sub>) und grobe Fraktion (PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>) zerlegt und mit je eigenen Transferfunktionen verarbeitet (die feine Fraktion hat eine geringere Depositionsgeschwindigkeit und wird deshalb über längere Distanzen transportiert).

#### 4.1.2. METEOROLOGIE

Die Transferfunktionen werden mit einem Gauss'schen Dispersionsmodell 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. Die folgenden drei „Windregionen“ wurden verwendet:

- › Für die Flachlandmeteorologie „Mittelland“ werden die Transferfunktionen aus dem Schweizer Modell (FOEN 2013) verwendet, die aus den Messdaten der SwissMetNet -Stationen Genf (GE), Payerne (FR), Wynigen (BE), Zürich-Kloten (ZH) und Güttingen (TG) gewonnen werden.
- › In den Alpentälern werden die Transferfunktionen mit Messdaten alpiner SwissMetNet -Stationen erzeugt, Sion (VS), Magadino (TI) und Chur (GR) und entlang der Haupttalachse ausgerichtet (Kanalisation).
- › Für die restlichen Regionen – mehrheitlich hochgelegene alpine Gebiete – werden isotrope (rotationssymmetrische) Windrichtungen angenommen. Die entsprechende Transferfunktion wird aus der Mittelland-Transferfunktion gewonnen, indem diese über alle Himmelsrichtungen gemittelt wird.

Die folgende Karte zeigt die Einteilung des OSTLUFT-Gebiets in die verschiedenen Windregionen. Der nördliche Teil der Ostschweiz mit den Kantonen SH, ZH, TG, teilweise SG und AR ist der Windregion „Mittelland“ zugeordnet und ist in der Karte gelb markiert. Die Tallagen im Linthtal, Glarus, im Rheintal und im Seetal werden als Alpentäler behandelt, wobei die Windrichtungen jeweils der Lage der Talrichtung angepasst werden. Zudem wurden aufgrund der speziellen Situation des unteren, breiten Rheintales zwei neue zusätzliche „Misch“-Transferfunktionen angewendet. Diese bestehen aus einer Mischung von Alpental und symmetrischer Ausbreitung: Rheintal N: 50% alpin / 50% symmetrisch, Rheintal S: 70% alpin / 30% symmetrisch. Alle übrigen Flächen werden der Kategorie „restliche Gebiete“ mit symmetrisierter Ausbreitung zugeordnet und sind in der Figur hellblau markiert.



**Figur 9** Definition der Windregionen des OSTLUFT Gebiets. Wo die Windregion „Alpental“ in „Mittelland“ übergeht, wird eine abgestufte Ausbreitung angewendet (siehe Text)

#### 4.1.3. TRANSFERFUNKTIONEN

Transferfunktionen werden neben der Unterscheidung in Windregionen auch noch nach quellen-spezifischen Unterschieden erstellt. Es werden folgende Emissionshöhen (Kaminhöhe plus Fahnenüberhöhung) unterschieden:

- › 2 m für den Offroad-Verkehr und der Land-/Forstwirtschaft (Fahrzeuge, offene Verbrennung, Tiere, Böden),
- › 4 m für den Strassenverkehr.
- › 10 m für Tunnelportale (dabei kommt nur die Meteorologie „Mittelland“ zum Einsatz)
- › 13 m für Holzfeuerungen. Ausnahme: Holzfeuerungen in den vier Gemeinden (den vier grössten Städten) Zürich, Winterthur, St.Gallen, Schaffhausen: 20 m.
- › 20 m, 35 m für Feuerungen Haushalte, Industrie, Gewerbe, Dienstleistungen, Abluftkamine von Strassentunnels. Die Details zur Aufteilung der Industriefeuerungen auf 20 m und 35 m siehe Kap. 3.3.1. Für die Emissionshöhe 20 m kommen alle möglichen Meteorologien zum Einsatz (Mittelland, Alpental, symmetrisch). Für die Emissionshöhe 35 m wird nur die Meteorologie „Mittelland“ benutzt.
- › 60 m für Punktquellen mit bedeutenden Emissionsfrachten aus Industrie und Gewerbe und mit Kaminhöhen zwischen 50 m und 80 m. Für die Emissionshöhe 60 m kommen nur Meteorologie „Mittelland“ oder „symmetrisch“ zum Einsatz.
- › >80 m für Punktquellen mit bedeutenden Emissionsfrachten aus Industrie und Gewerbe und mit einer Kaminhöhe grösser als 80 m. Für die Emissionshöhe >80 m kommen nur die Meteorologien „Mittelland“ oder „symmetrisch“ zum Einsatz.
- › Für innerorts und ausserorts werden dieselben Transferfunktionen benutzt.

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

- › Punktquellen: Die Quelle wird in der Mitte der zentralen Gitterzelle platziert.
- › Linienquellen (Strassen in Alpentälern): Es werden vier Punktquellen in einer geraden Linie hintereinander in der Mitte Gitterzelle aufgestellt (Linienquelle in Talhauptrichtung).
- › Flächenquellen (Feuerungen Haushalte, Industrie, Gewerbe, Dienstleistungen; Strassen im Mittelland; Offroad-Verkehr; 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.

#### 4.1.4. MODELLIERUNG VON ALPENTÄLERN

Aufgrund der speziellen Ausbreitung in Alpentälern und der häufigen Inversionslagen, in denen sich der Feinstaub in den Kaltluftseen ansammelt, werden die Immissionen in Alpenschlächten



pauschal mit dem Alpentalfaktor von 1.75 erhöht. Dieser Faktor wurde empirisch aus den Messdaten erhoben, um der gehinderten Durchlüftung Rechnung zu tragen (für eine ausführlichere Begründung des Faktors sei auf FOEN (2013, siehe dort Kap. 3.2.4) verwiesen. Wo die Windregion „Alpental“ endet und in „Mittelland“ übergeht, wird der Faktor schrittweise von 1.75 auf 1.0 reduziert.

#### 4.1.5. IMPORTIERTE PRIMÄRE PARTIKEL

##### a) Import aus den übrigen Gebieten der Schweiz

PM10-Emissionen aus den übrigen Gebieten der Schweiz werden in das OSTLUFT-Gebiet importiert und machen entlang der Grenzen einen gewissen Beitrag aus, der nicht vernachlässigt werden darf. Um diesen zu bestimmen, wird das Feinstaub-Immissionsmodell für die Schweiz benutzt. Dabei werden sämtliche Emissionsquellen im OSTLUFT-Gebiet auf Null gesetzt, die Emissionen in den übrigen Landesteilen bleiben unverändert auf ihren ursprünglichen Werten. Anschliessend wird das Modell für jedes Bezugsjahr 2005–2020 angewendet. Die Immissionen, die dabei im OSTLUFT-Gebiet auftreten entsprechen den gesuchten Import-Beiträgen aus der übrigen Schweiz. Das Ergebnis für diese Simulation (die räumliche Auflösung ist dieselbe wie für die übrigen Immissionsmodellierungen: 200 m x 200 m) ist für das Jahr 2005 in Figur 15 dargestellt. Im Westen des OSTLUFT-Gebiets treten mit max. 2 µg/m<sup>3</sup> die höchsten Importe auf, im Osten sinken sie auf weniger als 0.5 µg/m<sup>3</sup> ab. Bis 2020 reduziert sich dieser Anteil um 15%, was dem Rückgang der PM10-Emissionen in der Schweiz entspricht (siehe Kap. 2.2 im Bericht FOEN 2013).

Die Modellierung liefert nicht nur ein Ergebnis für PM10, sondern auch die Aufteilung nach PM2.5 und PM10-PM2.5. Für die Bestimmung des EC-Anteils wird vereinfachend angenommen, dass bei den importierten Immissionen der EC-Anteil gleich hoch sei wie er im Mittel bei den OSTLUFT-Emissionen auftritt. Zu diesem Zweck wurden die EC-Anteile der PM2.5-Emissionen OSTLUFT bestimmt (siehe dazu Tabelle 25). Sie betragen 21% im Jahr 2005 und sinken kontinuierlich ab auf ca. 15% im Jahr 2020.

##### b) Import aus dem Ausland

In Kap. 3.6.1 ist beschrieben, dass der Ausgangspunkt für die Bestimmung der aus dem Ausland importierten Immissionskonzentration ein europäischer Emissionskataster für PM10 und PM2.5 ist. Die Emissionen werden mit den Transferfunktionen für den Fernbereich (3 km bis 100 km von der Quelle weg, siehe Kap. 4.1.3) ausgebreitet. Das Ergebnis der Ausbreitungsmodellierung folgt in Figur 16. Das Konzentrationsniveau 2005 beträgt 0.5-1.0 µg/m<sup>3</sup> im zentralen und südli-

chen Teil des OSTLUFT-Gebiets. Gegen die nördliche Grenze des Kantons Schaffhausen steigt das Niveau noch leicht über  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Bis 2020 sinken diese Werte ab, die „coarse fraction“ PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub> um 10% und die „fine fraction“ PM<sub>2.5</sub> um 28%. Beachte, dass das Niveau der importierten Konzentration im nationalen Immissionsmodell um den Faktor 3 höher ist. Grund dafür ist der Umstand, dass die OSTLUFT-Emissionen (Kap. 3.7.1) generell höher sind als die Emissionen im nationalen Modell und damit auch die Immissionen in der OSTLUFT-Ausbreitungsrechnung. Um die Messwerte nicht zu überschätzen, wurden deshalb die importierten Immissionen reduziert (Kalibrierung).

Die Modellierung liefert wie beim Import aus der übrigen Schweiz nicht nur ein Ergebnis für PM<sub>10</sub>, sondern auch die Aufteilung nach PM<sub>2.5</sub> und PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>. Für die Bestimmung des EC-Anteils wird vereinfachend ebenfalls angenommen, dass bei den importierten Immissionen der EC-Anteil gleich hoch sei, wie er im Mittel bei den OSTLUFT-Emissionen auftritt (siehe dazu Tabelle 14).

#### 4.1.6. PRIMÄRE PARTIKEL AUS NATÜRLICHEN QUELLEN

Bruchstücke von mineralischem Material (Erosion), von Pollen und anderes biologisches Material sowie weiträumig transportierter Staub aus der Sahara erzeugen eine fluktuierende Konzentration von natürlichem Feinstaub in der Atmosphäre. Im Jahresmittel beträgt diese Konzentration ungefähr  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dieser Wert wurde auf Grundlage von Messdaten auf dem Jungfrauoch abgeleitet (Collaud et al. 2004). Der Anteil PM<sub>2.5</sub> ist zwar daraus nicht ableitbar, weil aber der grösste Anteil aus Sahara-Staub besteht, die Aufenthaltsdauer in der Atmosphäre dementsprechend hoch ist, kann davon ausgegangen werden, dass die meisten groben Partikel sedimentiert sind und der PM<sub>2.5</sub>-Anteil deshalb sehr hoch ist. Der Einfachheit halber wurde er mit 1.0 angenommen.

### 4.2. SEKUNDÄRE AEROSOLE

Die sekundären Aerosole wurden für das nationale Feinstaub-Immissionsmodell mit einer neuen Methode auf der Basis von Messdaten und Modelldaten des PSI berechnet und ist dort im Detail beschrieben (FOEN 2013). In diesem Kapitel folgt eine verkürzte Darstellung.

#### 4.2.1. MESSUNGEN

Basis der Modellierung bilden die Messwerte aus zwei Jahres-Messkampagnen (April 1989-März 1999 und Aug 2008-Juli 2009). Siehe Tabelle 15.

MESSWERTE SEKUNDÄRE AEROSOLE					
Messperiode	Ort	Nitrat $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sulfat $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ammonium $\mu\text{g}/\text{m}^3$	OM $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Apr 1998 - Mrz 1999	Basel	3.1	3.9	1.9	6.1
	Bern	3.3	3.3	1.4	9.2
	Zürich	3.3	3.7	1.9	6.2
Aug 2008 - Jul 2009	Basel	3.3	2.4	1.5	5.8
	Bern	3.8	2.2	1.5	7.8
	Chaumont	1.1	1.4	0.5	---
	Magadino	2.1	1.9	1.2	8.8
	Payerne	3.8	1.9	1.6	5.6
	Tänikon	3.3	2.1	1.2	---
	Zürich	3.8	2.4	1.6	5.9

**Tabelle 15** Messwerte Nitrat, Sulfat, Ammonium und OM (OM wurde aus OC-Messdaten bestimmt durch Multiplikation mit dem Faktor 1.6). Quelle: Gianini (2012).

Aus den Messdaten kann abgelesen werden, zumindest im Mittelland auf der Alpennordseite inklusive Basel die Konzentrationen nur sehr wenig variieren, dass aber bei allen Komponenten eine deutliche Abnahme der Konzentrationen mit der Höhe gemessen wird, wie der Vergleich mit der auf einer Jurahöhe gelegenen Station Chaumont (1136 m ü.M.) zeigt. Weiter ist in der vergangenen Dekade bei Sulfat und weniger ausgeprägt beim Ammonium ein Rückgang ersichtlich. Dies im Unterschied zum Nitrat.

#### 4.2.2. SEKUNDÄRE ANORGANISCHE AEROSOLE

Aus den oben genannten Messdaten wurde folgendes Modell für Nitrat, Sulfat und Ammonium (unten auch unter „SIA“ secondary inorganic aerosols bezeichnet) konstruiert.

Nitrat- und Sulfatimmissionen in Funktion von Zeit ( $t$ , Jahr) und Höhe über Meer ( $h$ ):

$$c(t, h) = c_{SP}(t), \quad \text{für } h < 600 \text{ m („Mittelland“)}$$

$$c(t, h) = c_{SP}(t) \cdot e^{-(h-600)/h_{dec}} \quad \text{für } h \geq 600 \text{ m}$$

mit folgenden Parametern:

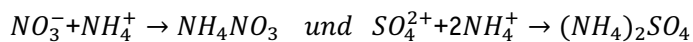
Zerfallshöhen  $h_{dec}$ : Nitrat 1100 m, Sulfat 1700 m.

Konzentrationsniveau auf der Höhe Mittelland  $c_{SP}(t)$ :

Konzentrationsniveaus im Mittelland				
Komponente	2005	2010	2015	2020
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
Nitrat	3.5	3.3	3.1	3.0
Sulfat	2.9	2.1	2.1	2.1
OM	5.9	5.7	5.7	5.7

**Tabelle 16** Modellwerte für das Konzentrationsniveau Nitrat, Sulfat und OM im Mittelland (alle Lagen tiefer 600 m).

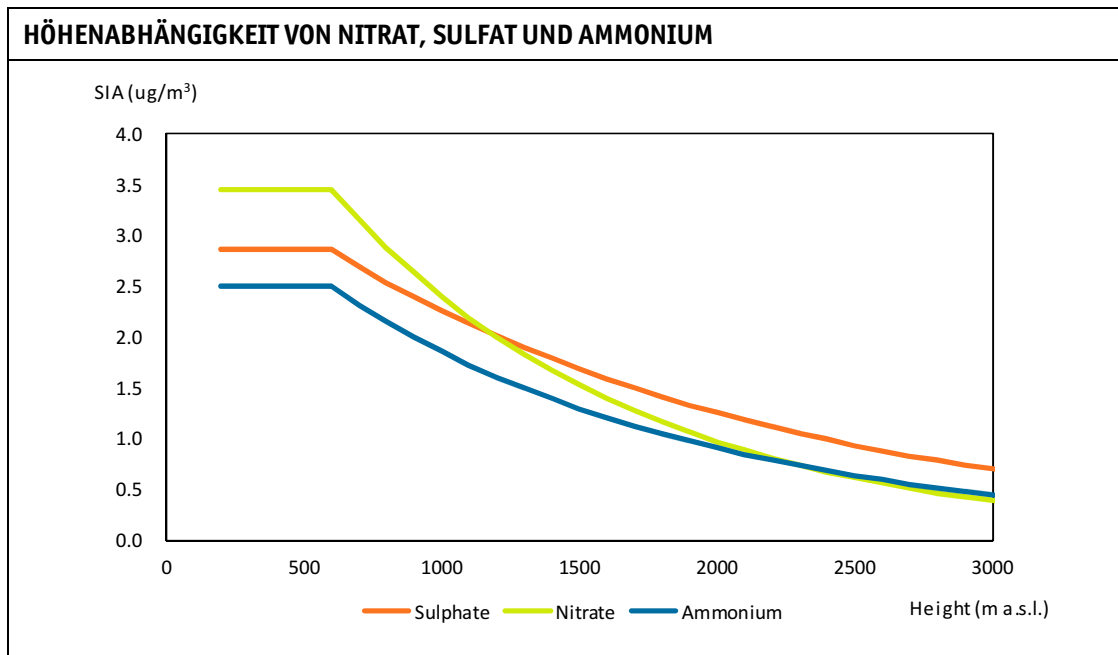
Ammonium wird aus Nitrat und Sulfat berechnet unter der Annahme, dass in der Schweiz genügend Ammoniak in der Atmosphäre vorhanden ist, um Nitrat und Sulfat vollständig zu Ammoniumnitrat und Ammoniumsulfat zu neutralisieren:



Unter dieser Annahme kann aus der Stöchiometrie die folgende Berechnungsvorschrift für Ammonium (in Funktion der Zeit  $t$  und der Höhe  $h$ ) hergeleitet werden

$$\text{NH}_4(t, h) = 0.291 \cdot \text{NO}_3(t, h) + 0.376 \cdot \text{SO}_4(t, h)$$

Die Höhenabhängigkeit für alle drei Komponenten ist in Figur 10 dargestellt. Die zugehörigen Immissionskarten sind in Figur 17 dargestellt. Sie sind für alle Bezugsjahre identisch mit den Karten im nationalen Feinstaub-Immissionsmodell.



**Figur 10** Nitrat-, Sulfat- und Ammoniumkonzentration in Funktion der Höhe über Meer für das Jahr 2005.

Für alle drei Komponenten des SIA sind ungefähre Anteile PM<sub>2.5</sub> am PM<sub>10</sub> bekannt. Nitrat 0.70, Sulfat 0.85, Ammonium 0.90.

#### 4.2.3. SEKUNDÄRE ORGANISCHE AEROSOLE

Auch die sekundären organischen Aerosole werden vom nationalen Feinstaub-Immissionsmodell übernommen. Das Modell basiert auf der Beobachtung, dass das Konzentrationsniveau des gesamten organischen Materials (OM) im Mittelland wiederum nur wenig variiert, wie Tabelle 15 zeigt (Ausnahme bildet die NABEL Station Bern mit erhöhten Konzentrationen, die übrigen Stationen auf der Alpennordseite variieren weniger als 10%).

OM setzt sich aus primärem („POA“) und sekundärem OM („SOA“) zusammen. Das primäre OM ist bereits in der Ausbreitungsrechnung für PM<sub>10</sub> und PM<sub>2.5</sub> enthalten. Das sekundäre OM zu modellieren ist äusserst kompliziert. Statt dies zu versuchen wird der Ansatz gewählt, dass die Summe OM aus Messdaten verwendet wird und dass das POA aus der Ausbreitungsrechnung bestimmt werden kann. Sind diese beiden Anteile bekannt, ergibt sich das gesuchte SOA als Differenz zwischen dem gesamten OM und dem primären POA:

$$SOA(t, x, y, h) = OM(t, h) - POA(t, x, y, h)$$

Für OM wird ein analoger Ansatz benutzt wie für Nitrat und Sulfat:

$$OM(t, h) = c_{OM}(t) \quad h < 600 \text{ m („Mittelland“)}$$

$$OM(t, h) = c_{OM}(t) \cdot e^{-(h-600)/h_{OM}} \quad h \geq 600 \text{ m}$$

mit folgenden Parametern:

Zerfallshöhe  $h_{OM} = 1700 \text{ m}$

Konzentrationsniveau OM  $c_{OM}(t)$  auf der Höhe Mittelland in Funktion der Zeit:

siehe Figur 10

Es gilt noch zu beachten, dass SOA sowohl anthropogenes wie auch biogenes Aerosol enthält. Der biogene Anteil ist gering und beträgt maximal ein Zehntel (FOEN 2013).

Für die Berechnung des POA braucht es Angaben zum Anteil des OC an den PM10-Emissionen. Diese sind ungefähr bekannt. Siehe dazu Tabelle 17. Ausserdem muss für die Immissionsmodellierung beim SOA der Anteil festgelegt werden, der sich in der PM2.5-Fraktion befindet. Dazu wird der bereits in SAEFL (2003) und auch in FOEN (2013) benutzte Wert 0.90 verwendet.

<b>OC-ANTEILE AM PM10</b>			
<b>Emittentengruppe</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>
	PM10 = 100%		
Strassenverkehr exhaust	34%	31%	36%
Strassenverkehr non-exhaust	23%	23%	23%
Schienenverkehr	1%	1%	1%
Schiffsverkehr	26%	26%	26%
Flugverkehr	9%	9%	9%
Baumaschinen, Industriefahrzeuge	26%	26%	26%
HH, Gew., DL (nicht Holz)	25%	25%	25%
HH, Gew., DL (Holz) exkl. COC	29%	29%	29%
Industrie	15%	15%	15%
Landwirtschaft	45%	45%	45%
Forstwirtschaft	30%	30%	30%
<i>OC-Anteil der aus übr. Schweiz importierten PM10-Immissionen</i>	<i>26%</i>	<i>25%</i>	<i>24%</i>
<i>OC-Anteil der aus dem Ausland importierten PM10-Immissionen</i>	<i>27%</i>	<i>27%</i>	<i>26%</i>

**Tabelle 17** OC-Anteile an den PM10-Emissionen (FOEN 2013).

### 4.3. UMSETZUNG

Die Umsetzung des Modells erfolgt in mehreren Schritten:

- › Primäre Partikel: Jeder Emissionskataster (grobe und feine Fraktionen separat) werden mit der zugehörigen Transferfunktion in einen Immissionskataster umgerechnet:

- › Alle Immissionskataster der feinen Fraktionen werden zum gesamten primären PM2.5 addiert.
- › Alle Immissionskataster der groben Fraktionen werden zum gesamten primären PM10-PM2.5 addiert.
- › Die Summen der feinen und der groben Fraktionen werden addiert und ergeben das gesamte primäre PM10.
- › Zusätzlich werden die sekundären Aerosole (SIA und SOA) sowie die natürlichen Partikel und die importierten Immissionen aus dem Ausland sowie den übrigen Kantonen ausserhalb der OSTLUFT addiert. Das ergibt als eines der Hauptresultat die gesamten PM10 und PM2.5-Immissionen.
- › Die gesamten PM10-Immissionen werden mit den Messresultaten verglichen. Dabei werden Tools aus der Statistik angewendet: Prüfung der Korrelation und des Bestimmtheitsmasses, Scatterplot, Regressions- und Residuenanalyse. Treten grosse und systematische Abweichungen zwischen Modell- und Messwerten auf, wird nach den Gründen gesucht und das Modell entsprechend und iterativ verbessert.
- › Nach der Optimierung werden für alle Immissions-Grids mit primärem PM2.5 die EC-Anteile berechnet und summiert. Damit erhält man die EC-Belastungskarten.
- › Für PM10, PM2.5 und EC werden die Bevölkerungsexpositionen für alle Bezugsjahre berechnet.

Die Transferfunktionen werden in einem eigenen FORTRAN-Programm berechnet. Sie werden als Ausbreitungsmatrizen in die GIS-Applikation implementiert, ebenso die Emissionskataster, die als Rasterdaten vorliegen. Die Umrechnung von Emissions- in Immissionskataster ist in einer GIS-Applikation (ArcInfo, ArcGIS) programmiert.

Für die weitere Verwendung des Modells werden die GIS-Programme (ArcInfo<sup>3</sup> aml) im OSTLUFT Modellierzentrum im AWEL (Zürich) implementiert.

## 5. MODELLRESULTATE

In diesem Kapitel folgen zahlreiche Karten mit Immissionsresultaten. Die Konzentrationen sind als **Jahresmittel in Mikrogramm pro Kubikmeter ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und einer räumlichen Auflösung von 200 m x 200 m** dargestellt.

<sup>3</sup> ArcInfo® ist eine gesetzlich geschützte Marke von Esri Inc., Redlands, USA

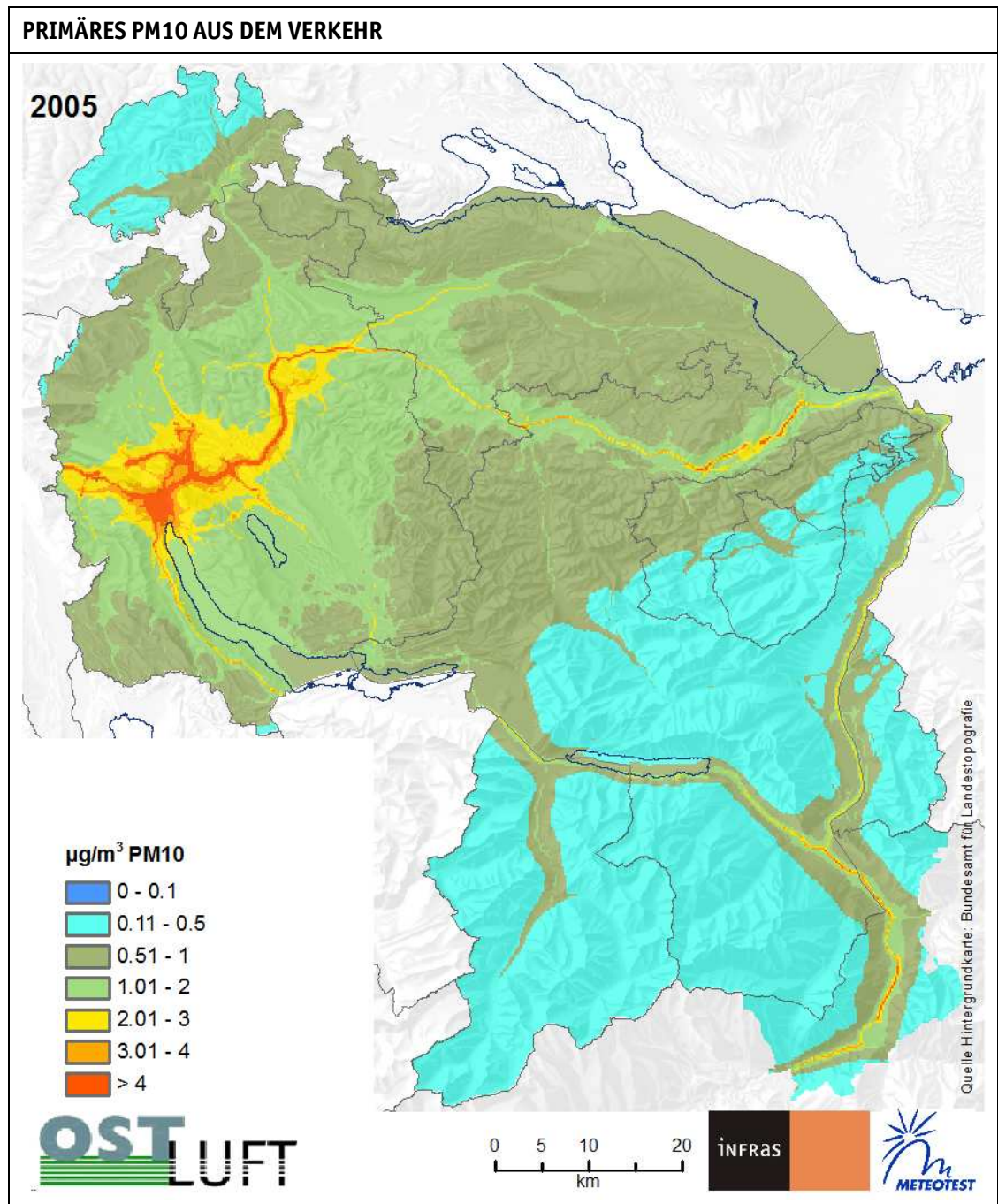
## 5.1. BELASTUNGSKARTEN FÜR PRIMÄRES PM10

Die Karten auf den folgenden Seiten zeigen die Immissionsbeiträge an primärem PM10, die durch Emissionsquellen im OSTLUFT-Gebiet verursacht werden. Sie sind nach den vier Hauptgruppen Verkehr, Haushalte/Dienstleistungen, Industrie und Land-/Forstwirtschaft aufgeschlüsselt. Ausserdem sind auch noch die importierten Immissionsbeiträge aus der übrigen Schweiz und aus dem Ausland in separaten Karten dargestellt. Diese importierten Beiträge sind durch alle Quellen in der übrigen Schweiz respektive im Ausland verursacht. Das bedeutet, dass z.B. die Karte in Figur 11 nur solche, primäre Beiträge aus dem Verkehr enthält, der sich auf dem OSTLUFT-Territorium abspielt. Weitere primäre Beiträge aus dem Verkehr, der ausserhalb des OSTLUFT-Territorium stattfindet, sind in der Karten Figur 15 (übrigen Schweiz) und Figur 16 (Ausland) enthalten, dort aber nicht mehr aufgeschlüsselt nach Verkehr etc. In der Karte Figur 11 ebenfalls nicht enthalten, sind sekundäre Beiträge des Verkehrs (sowohl OSTLUFT-Gebiet wie auch übrige Regionen), die in Form von sekundären Aerosolen ihren Ursprung in gasförmigen Emissionen des Verkehrs haben.

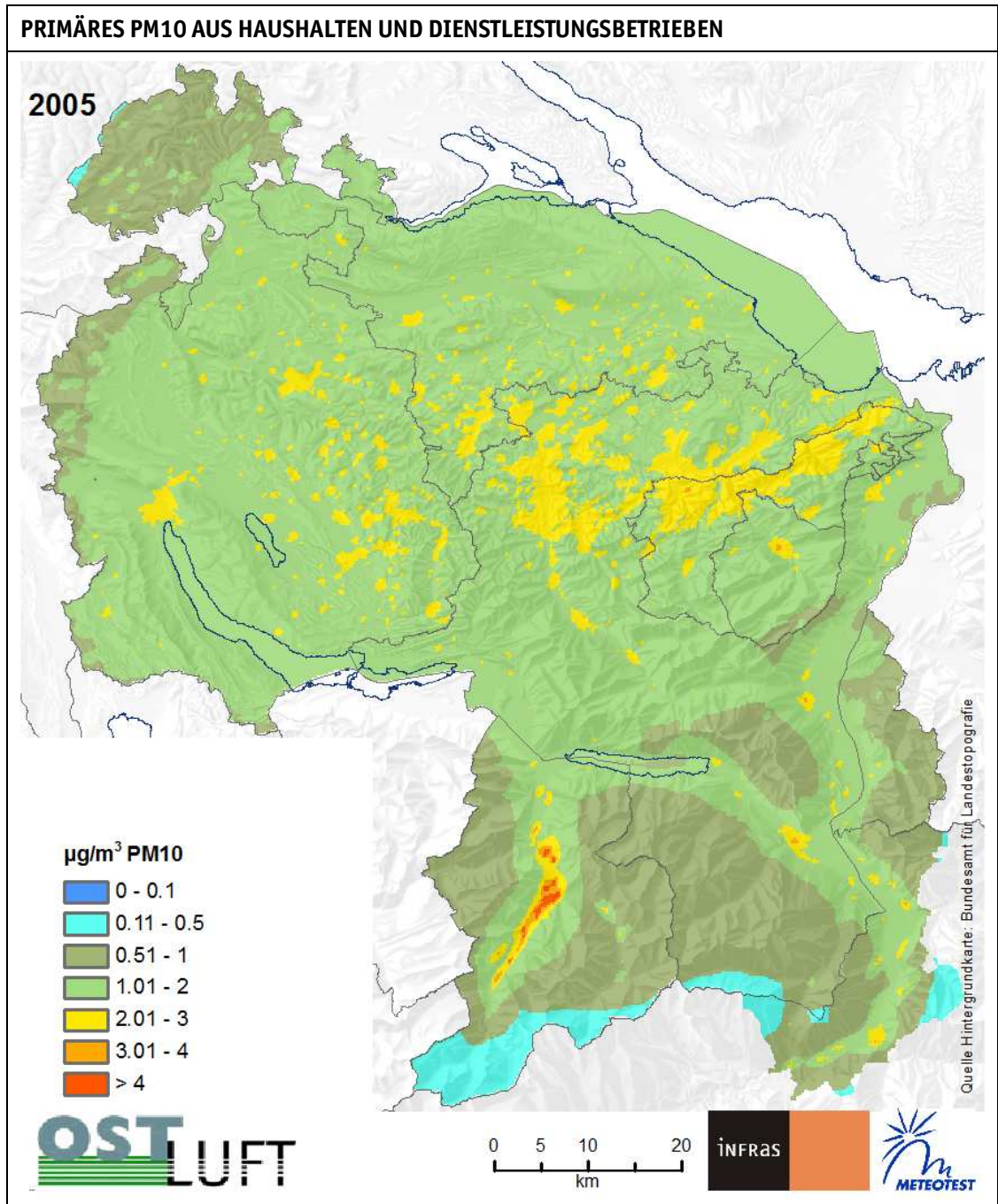
Die maximalen Konzentrationen treten je nach Emissionsquellen an typischen Orten auf:

- › Verkehr: Entlang Hauptverkehrsstrassen und grossen Städten,
- › Haushalte/Dienstleistungen: In Bergtälern mit hohem Anteil Holzfeuerungen,
- › Industrie: In der Agglomeration Zürich und in der Umgebung von grossen Punktquellen (Churer Rheintal),
- › Land-/Forstwirtschaft: In den Landwirtschaftsgebieten der Ostschweiz mit hohen Tierzahlen,
- › Import auf der übrigen Schweiz: Wegen der meteorologisch vorherrschenden Westströmung und den im Westen von OSTLUFT-Kantonen gelegenen hohen Emissionsdichten treten die höchsten Konzentrationen entlang der westlichen Grenzen auf und betragen dort ca.  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , nehmen nach Osten kontinuierlich bis  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ab.
- › Import aus dem Ausland: Die höchsten Konzentrationen treten entlang der nördlichen und östlichen Grenzen des OSTLUFT-Gebiets auf und liegen im Bereich  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

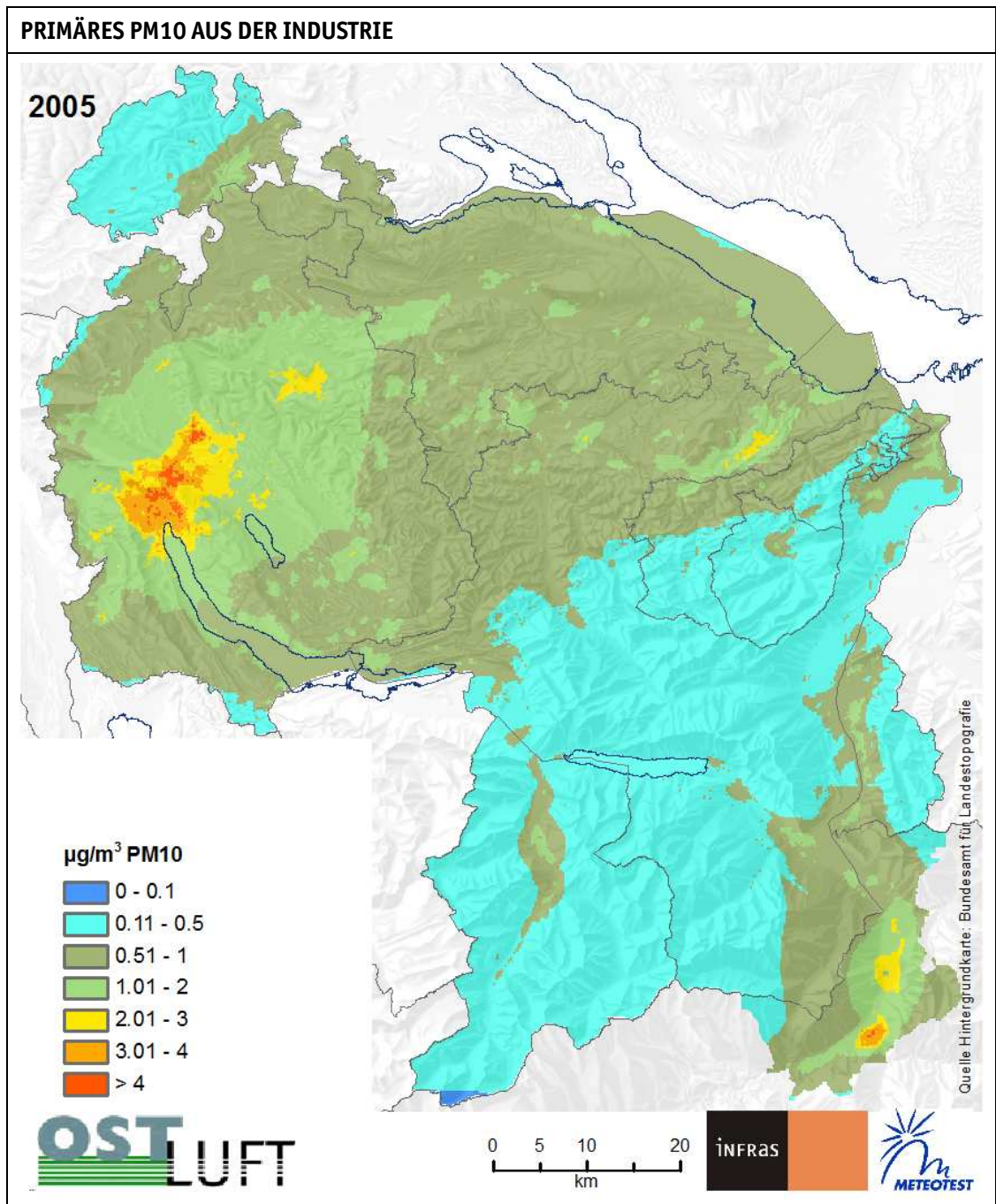




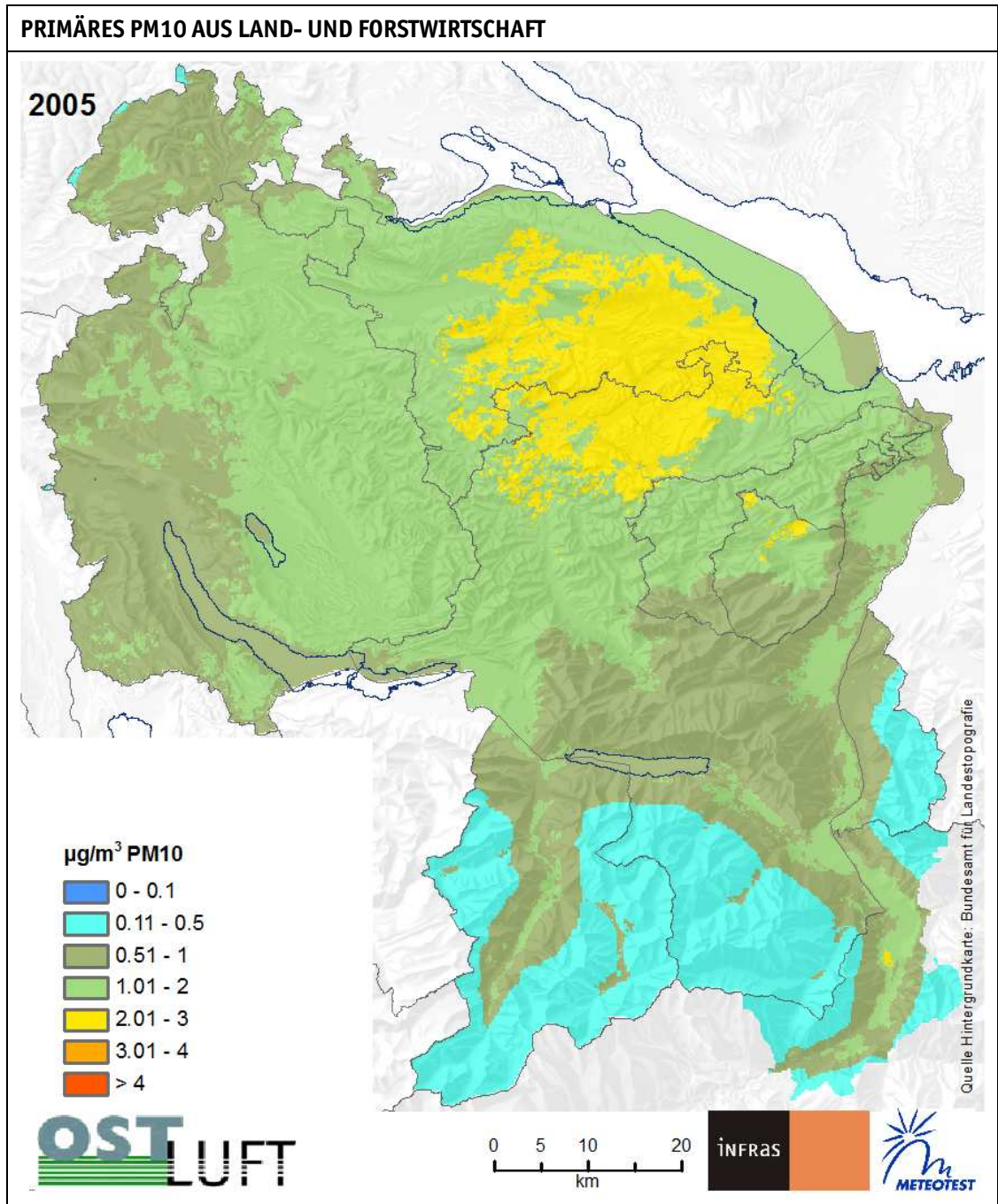
**Figur 11** Primäres PM10 aus dem Verkehr im OSTLUFT-Gebiet 2005: Strassen-, Schienen-, Schiffs-, Luftverkehr. Räumliche Auflösung: 200 m x 200 m.



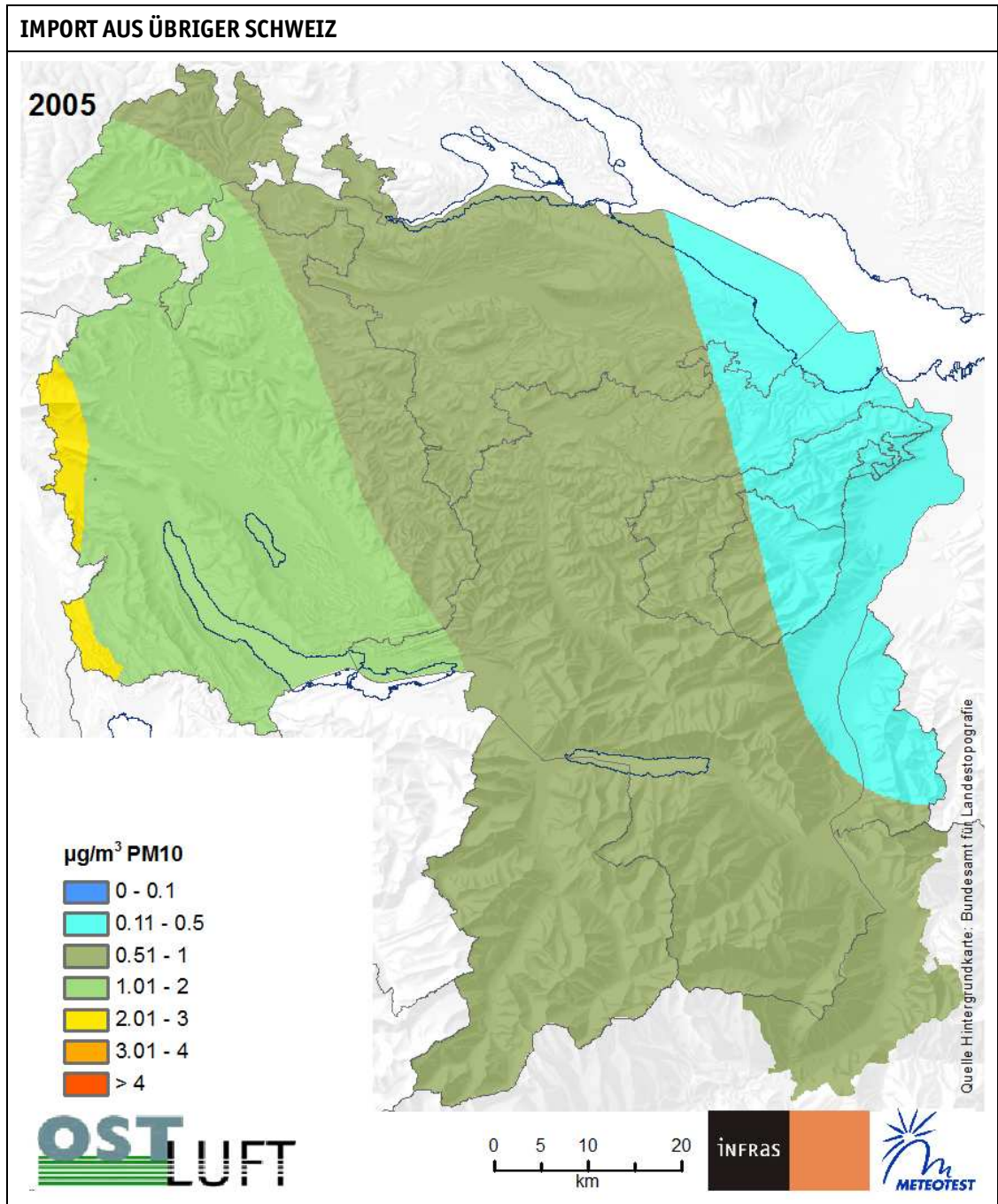
**Figur 12** Primäres PM<sub>10</sub> aus Haushalten und Dienstleistungsbetrieben im OSTLUFT-Gebiet 2005: Räumliche Auflösung: 200 m x 200 m.



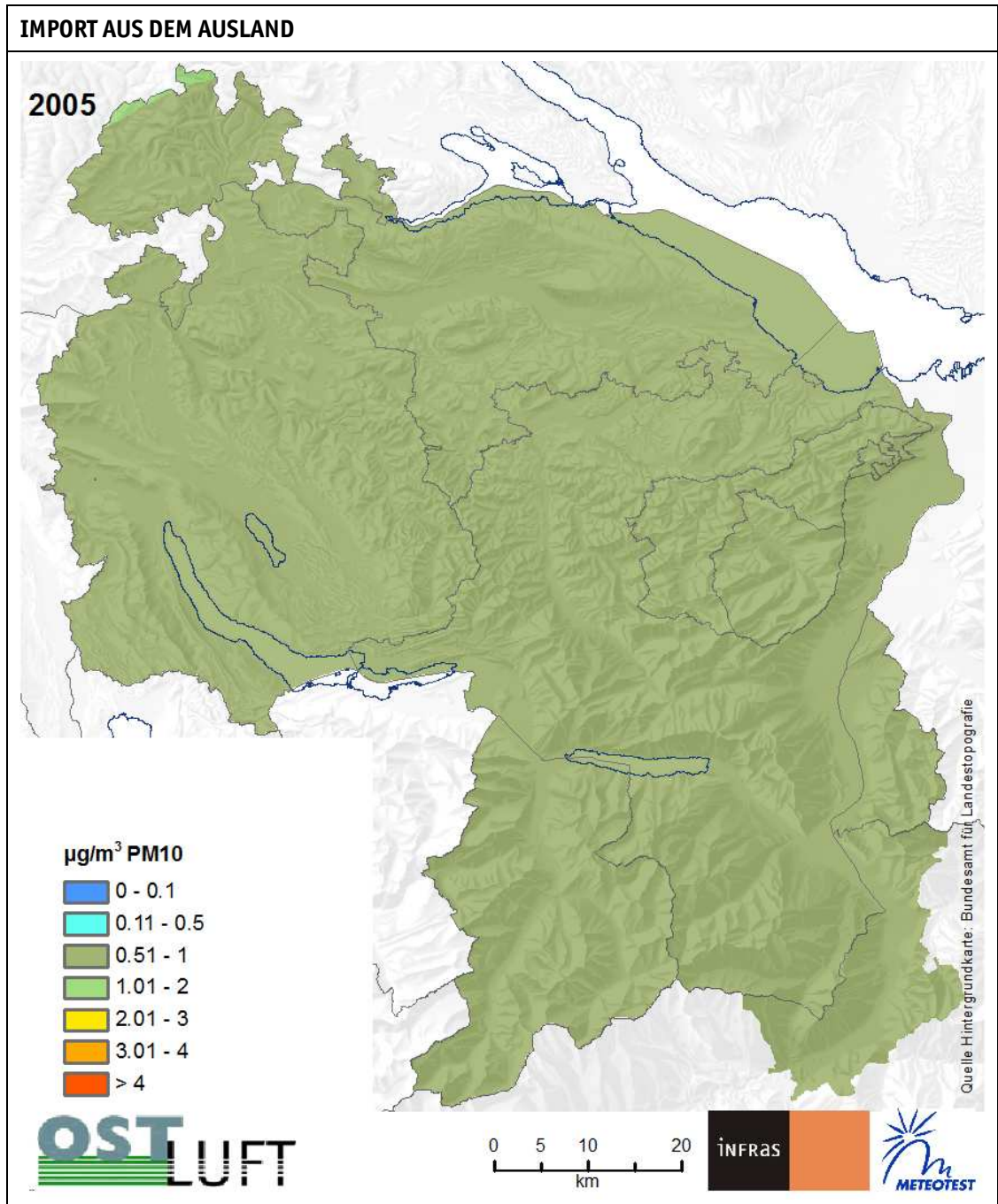
**Figur 13.** Primäres PM10 aus der Industrie im OSTLUFT-Gebiet 2005: Räumliche Auflösung: 200 m x 200 m.



**Figur 14** Primäres PM10 aus Land- und Forstwirtschaft im OSTLUFT-Gebiet 2005. Räumliche Auflösung: 200 m x 200 m.



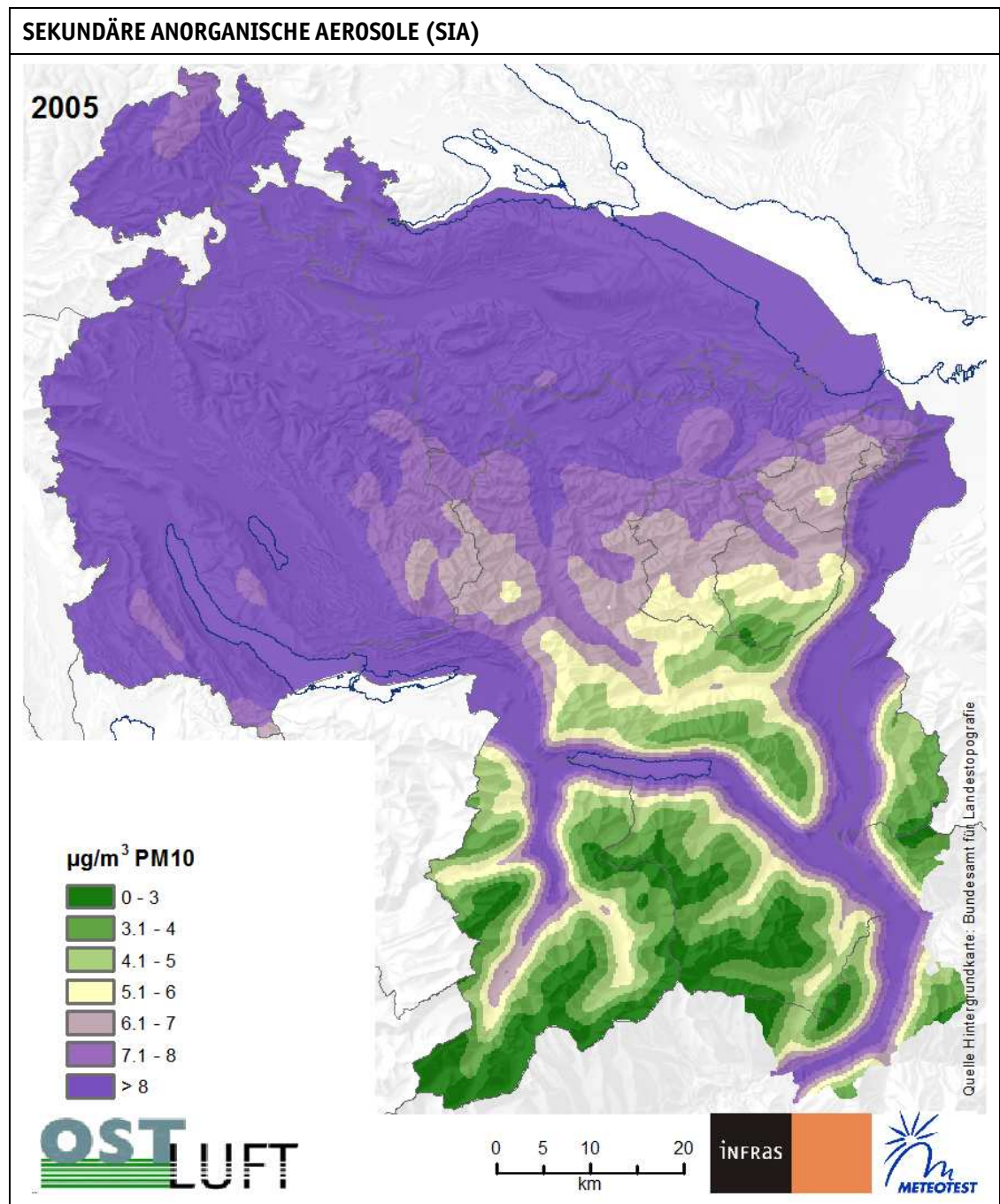
**Figur 15** Import von primärem PM10 (Summe aller Quellen) aus der übrigen Schweiz ins OSTLUFT-Gebiet im Jahr 2005.  
Räumliche Auflösung: 200 m x 200 m.



**Figur 16** Import von primärem PM10 (Summe aller Quellen) aus dem benachbarten Ausland ins OSTLUFT-Gebiet im Jahr 2005. Räumliche Auflösung: 200 m x 200 m.

## 5.2. BELASTUNGSKARTEN FÜR SEKUNDÄRES PM10

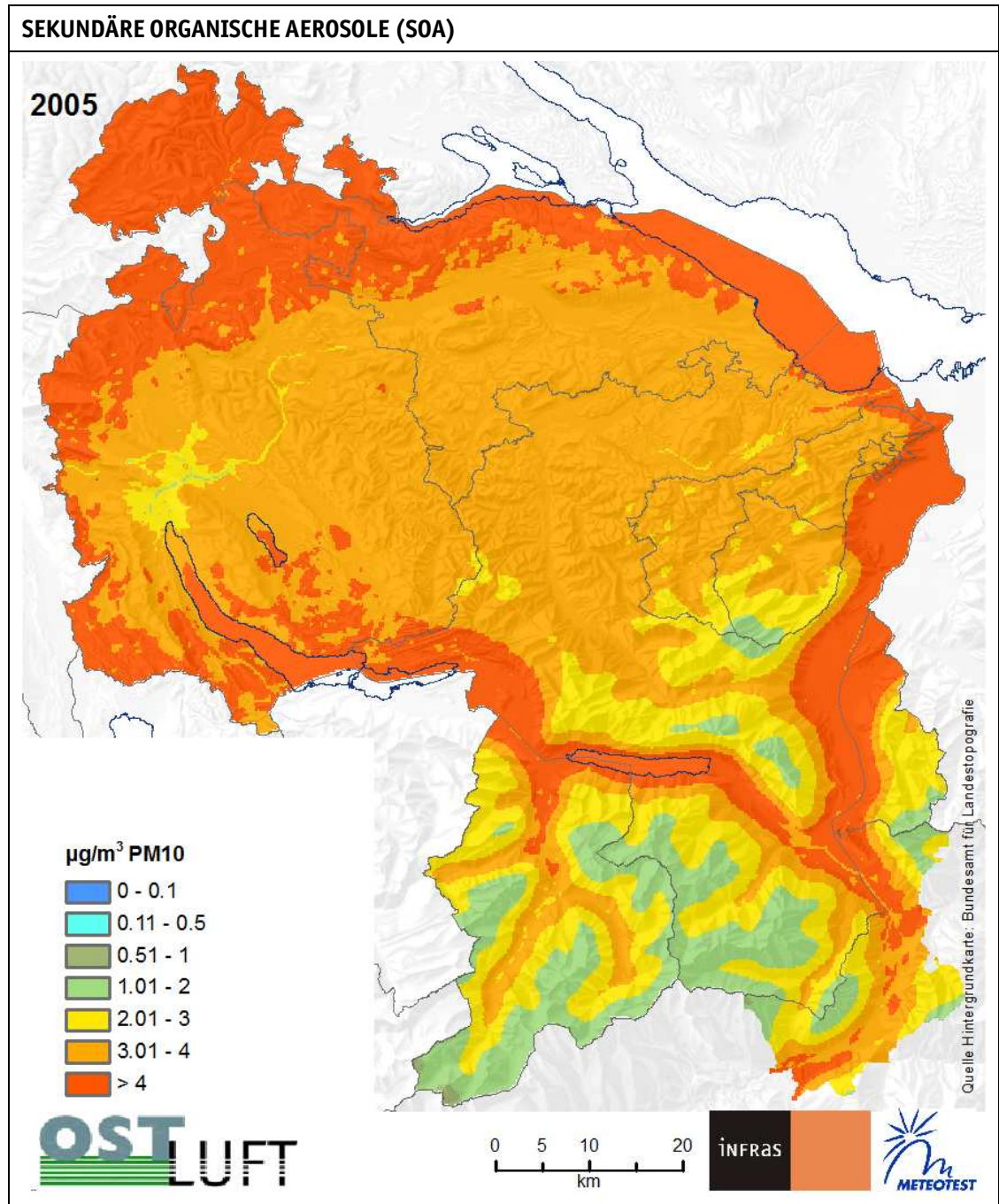
Die Karte in Figur 17 zeigt die Summe von Nitrat-, Sulfat- und Ammonium-Anteilen im PM10. Diese Daten wurden aus dem nationalen Immissionsmodell (FOEN 2013) übernommen.



**Figur 17** Summe von Nitrat-, Sulfat- und Ammonium-Anteilen im PM10 2005. Räumliche Auflösung: 200 m x 200 m. Die Anteile sind im Mittelland: Nitrat 41%, Sulfat 34% und Ammonium 25%.

Die Karte in Figur 18 enthält die sekundären organischen Aerosole. Beachte, dass die Summe der primären und sekundären Aerosole (organisches Material) im Mittelland im Jahr 2005 knapp  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beträgt. Wo primäres organisches PM10 hoch ist (quellennah), ist sekundäres organisches PM10 entsprechend tiefer. Das folgt aus der Gleichung  $\text{SOA} = \text{OM} - \text{POA}$  (Kap. 4.2.3) und der empirisch abgestützten Annahme, dass OM nur in Funktion der Höhe variiert. Die Belastungskarte für SOA unterscheidet sich von der SOA-Belastungskarte im BAFU-Modell (FOEN 2013), weil das primäre organische Material von den lokalen Emissionen abhängig ist und diese im nationalen und im OSTLUFT-Modell nicht (genau) gleich sind.





**Figur 18** Sekundäre organische Anteile im PM10 2005 (SOA). Räumliche Auflösung: 200 m x 200 m.

### 5.3. GESAMTBELASTUNGEN PM10, PM2.5 UND EC

#### 5.3.1. GENERELLE MERKMALE 2005–2020

Die folgenden Karten zeigen:

- › Zeitreihe 2005–2020 der gesamten PM10-Immissionen (Figur 19 bis Figur 22)
- › Zeitreihe 2005–2020 der PM2.5-Immissionen und der Anteile des PM2.5 am PM10 (Figur 23 bis Figur 30)
- › Zeitreihe 2005–2020 der EC-Immissionen (Figur 31 bis Figur 34)

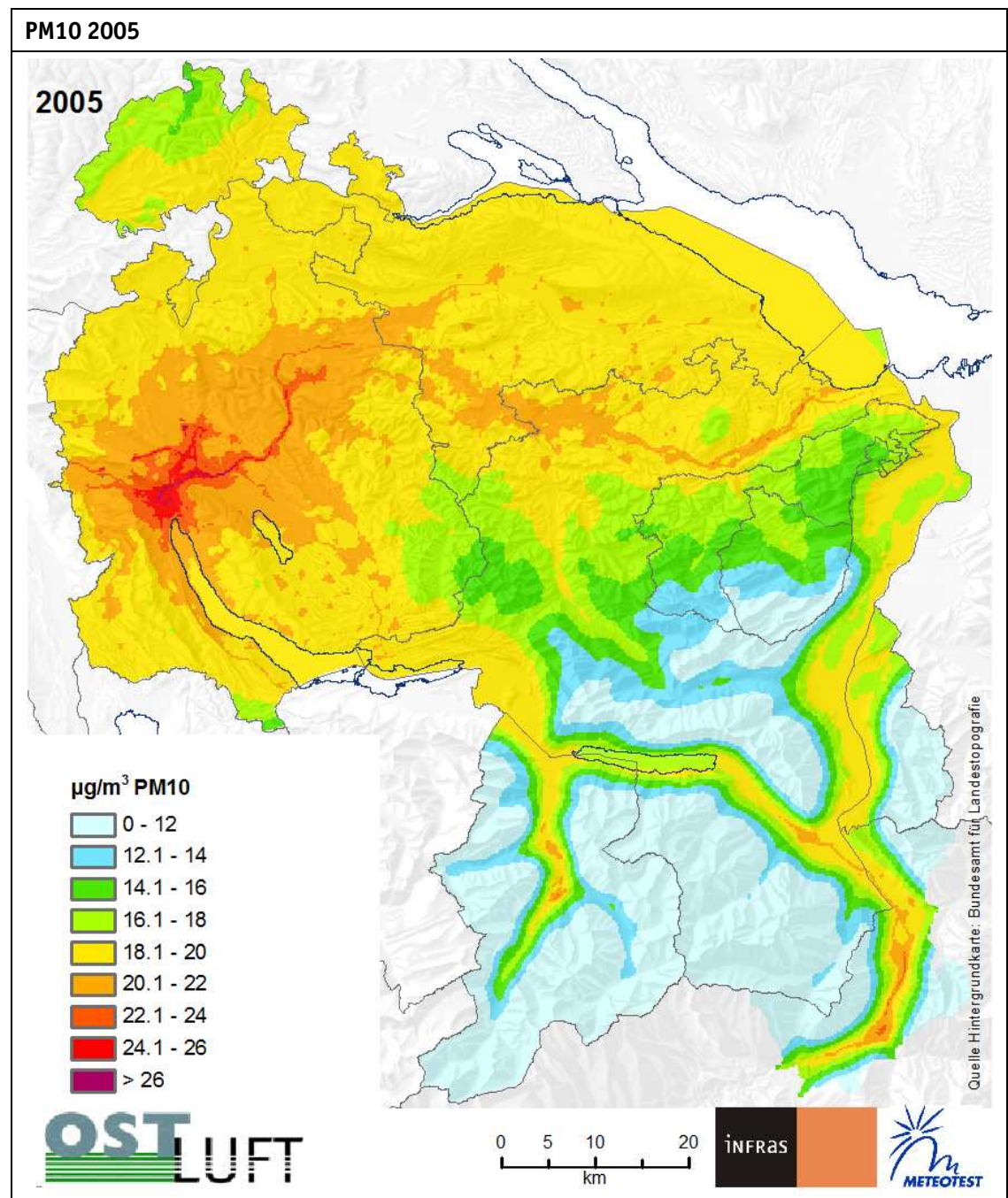
Für die Beurteilung der Immissionen sind vor allem die **PM10-Immissionen** bedeutsam, weil dazu ein Grenzwert in der Luftreinhalte-Verordnung existiert ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Im Jahr 2005 sind die Agglomerationsgebiete Zürich, Winterthur, St.Gallen, weitere Städte und grosse Ortschaften, stark befahrene Strassen und Teile des Churer Rheintals sowie Tallagen des Glarnerlands (hoher Anteil Holzfeuerungen) noch über dem Grenzwert. Bis im Jahr 2020 ist die Belastung rückläufig und grossflächige Grenzwertüberschreitungen kommen nur noch in den Agglomerationen Zürich und Winterthur vor. Auch an anderen exponierten Stellen sind noch Überschreitungen möglich, aber nur noch punktuell.

**PM2.5-Immissionen** folgen dem Trend der PM10-Immissionen. Im Mittelland liegen sie im Jahr 2005 im Bereich  $13\text{--}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , das Niveau sinkt bis ins Jahr 2020 auf  $11\text{--}15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der Anteil des PM2.5 am PM10 ist in der Nähe von Emissionsquellen typischerweise tiefer als fern von Quellen. Im Jahr 2005 ist der Anteil in der Stadt Zürich knapp unter 70%, in den Agglomerationsgebieten zwischen 70% und 75%. In den voralpinen Regionen kann er noch höher werden. bis ins Jahr 2020 sinkt der Anteil in Quellennähe noch etwas ab und kann in der Stadt Zürich bis auf 60% abnehmen. Grund für diese Entwicklung sind vor allem die Reduktionen von Dieseleruss dank der Durchsetzung des Partikelfilters. Deswegen nimmt die feine Fraktion ab (PM2.5), die grobe Fraktion ist davon nicht betroffen, diese nimmt sogar mit wachsender Fahrleistung der Motorfahrzeuge noch zu.

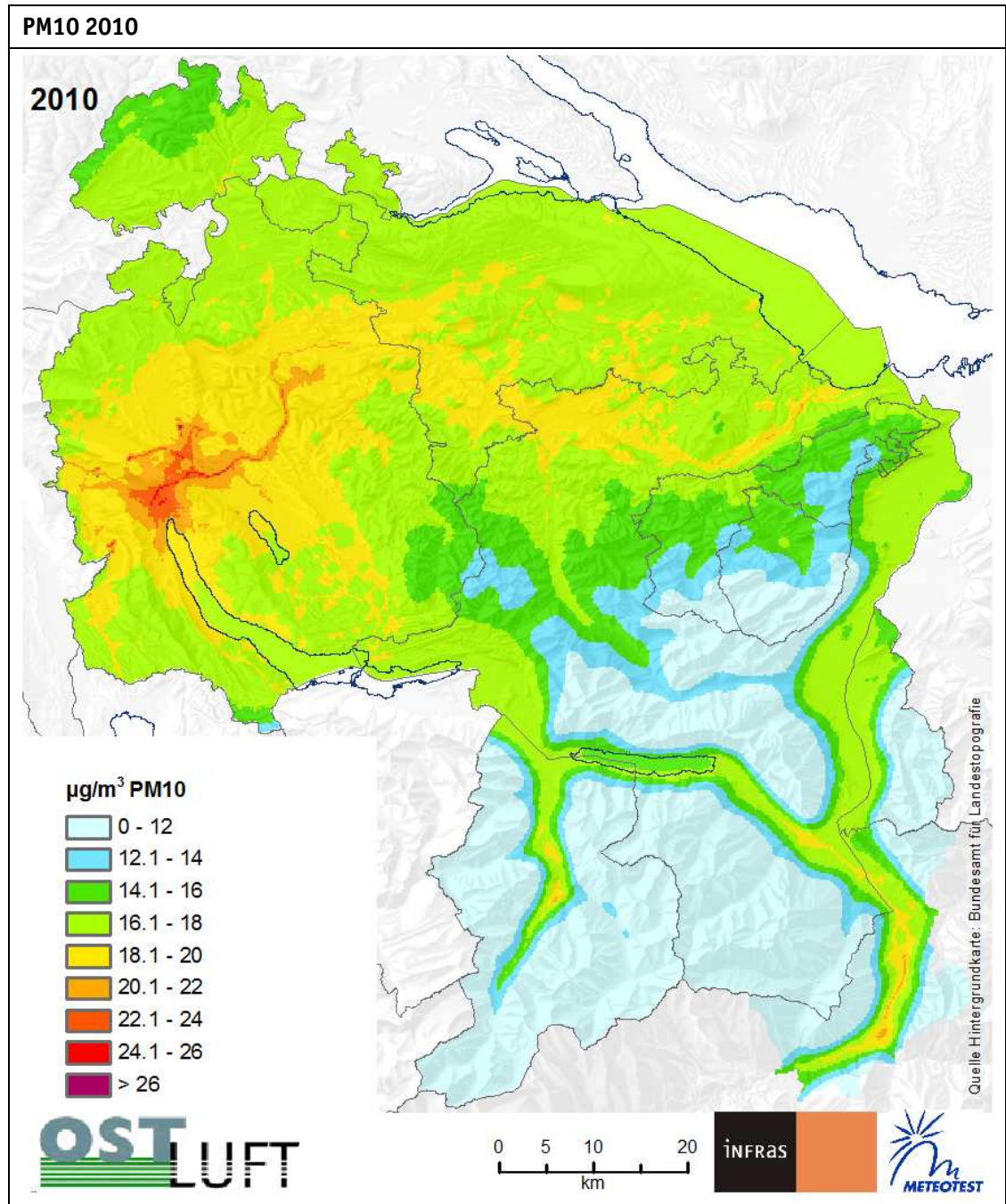
Auch die **EC-Immissionen** zeigen einen ähnlich abnehmenden Trend wie PM10 und PM2.5. Im Jahr 2005 waren in der Stadt Zürich und ihrer nahen Umgebung die EC-Immissionen höher als  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mit Maximalwerten bis  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dasselbe gilt für die Nationalstrassen, die zwischen den Städten Zürich und Winterthur durchgehend, an den übrigen Orten des OSTLUFT-Gebiets zumindest stellenweise über diesem Wert liegen. In den übrigen Teilen des Kantons Zürich, in der Stadt Schaffhausen, in der weiteren Umgebung der Nationalstrasse A1 in den Kantonen Thurgau, St.Gallen sowie im Talgrund des Glarnerlands und im Churer Rheintal sind die EC-

Immissionen mehrheitlich zwischen  $1.0$  und  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , in den übrigen Regionen tiefer als  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Bis ins Jahr 2020 sollten die EC-Immissionen generell unter  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sinken.

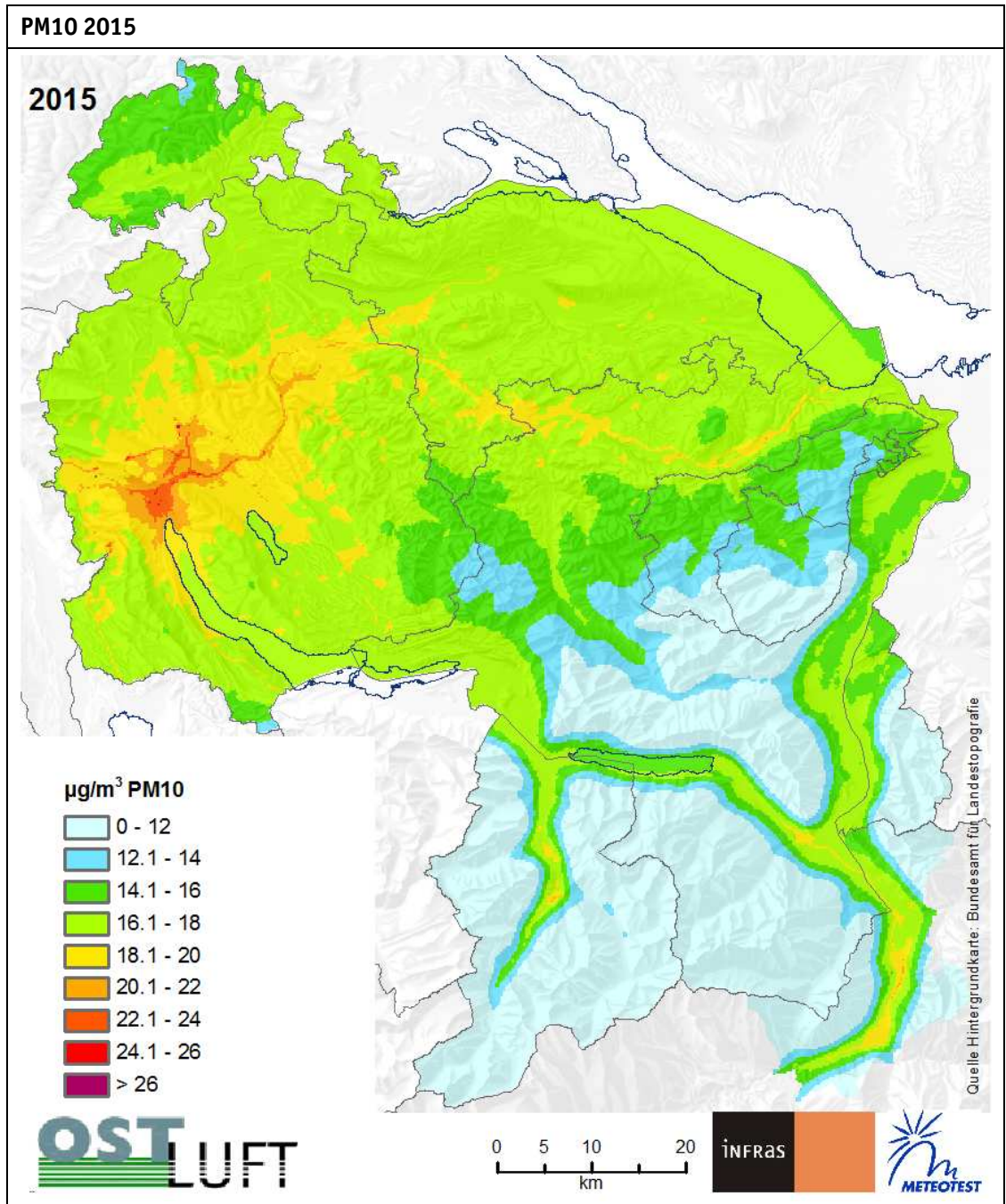
### 5.3.2. PM10-BELASTUNGSKARTEN 2005–2020



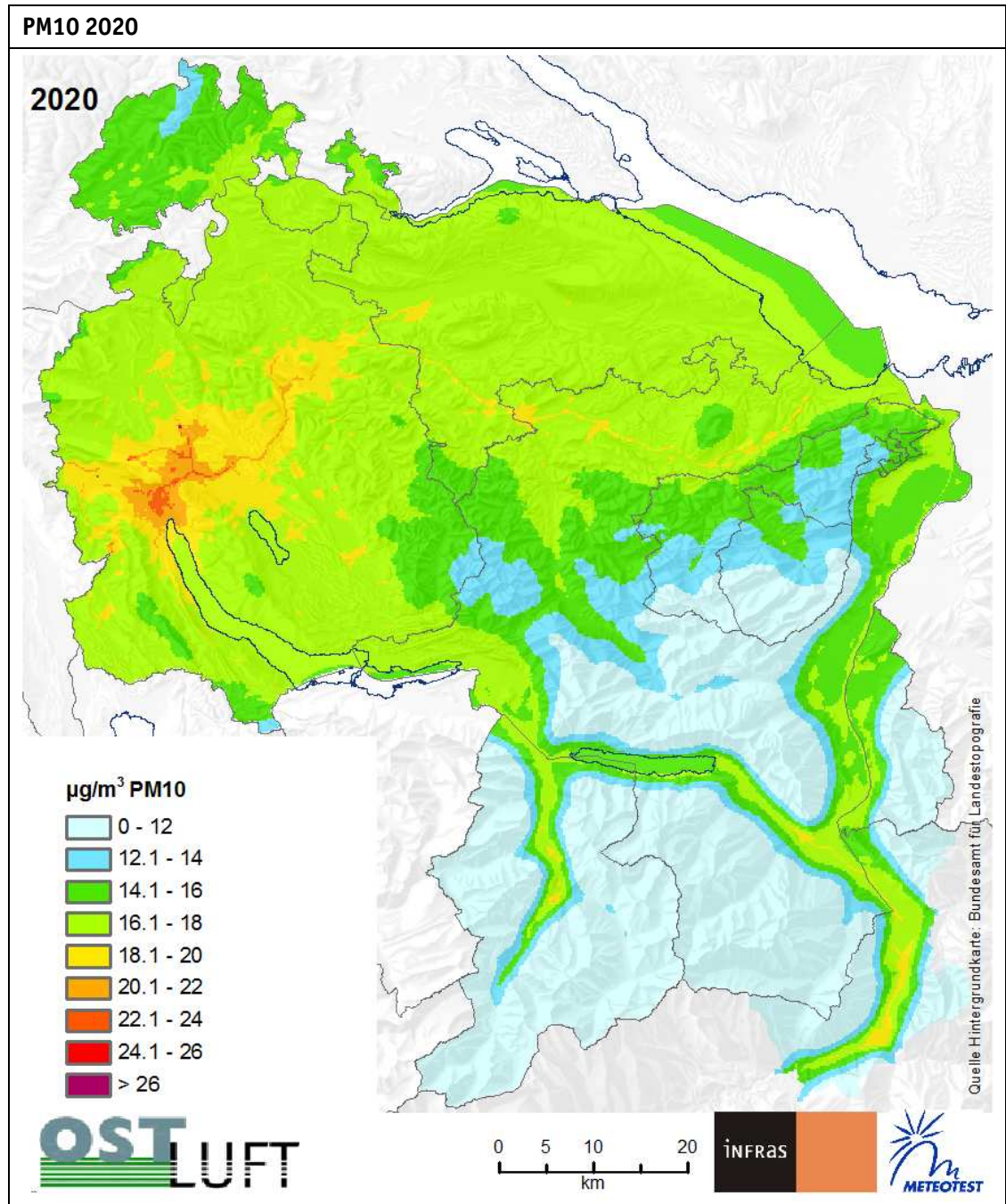
Figur 19 PM10 Immissionen 2005. Räumliche Auflösung  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ .



Figur 20 PM10 Immissionen 2010. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

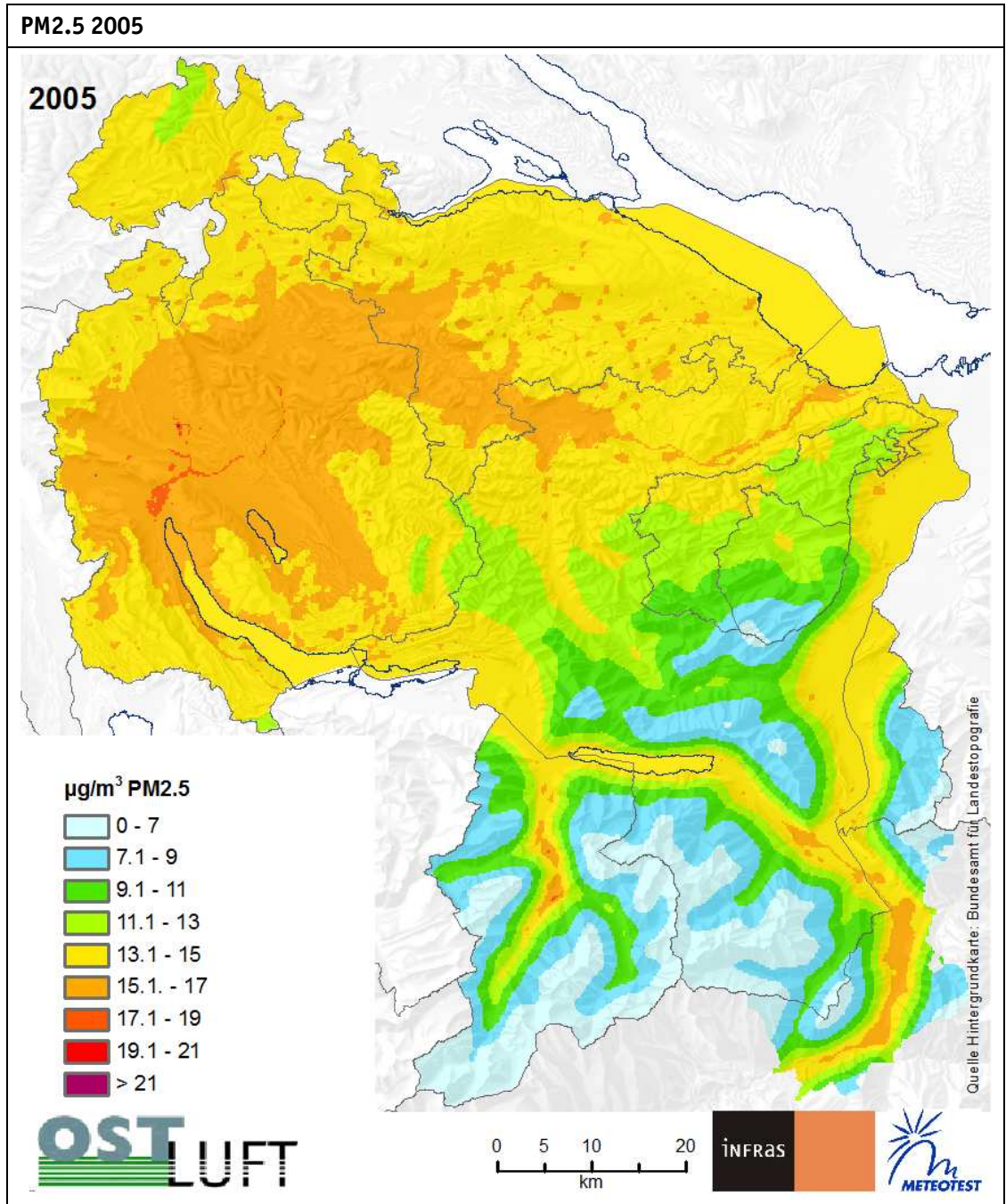


Figur 21 PM10 Immissionen 2015. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

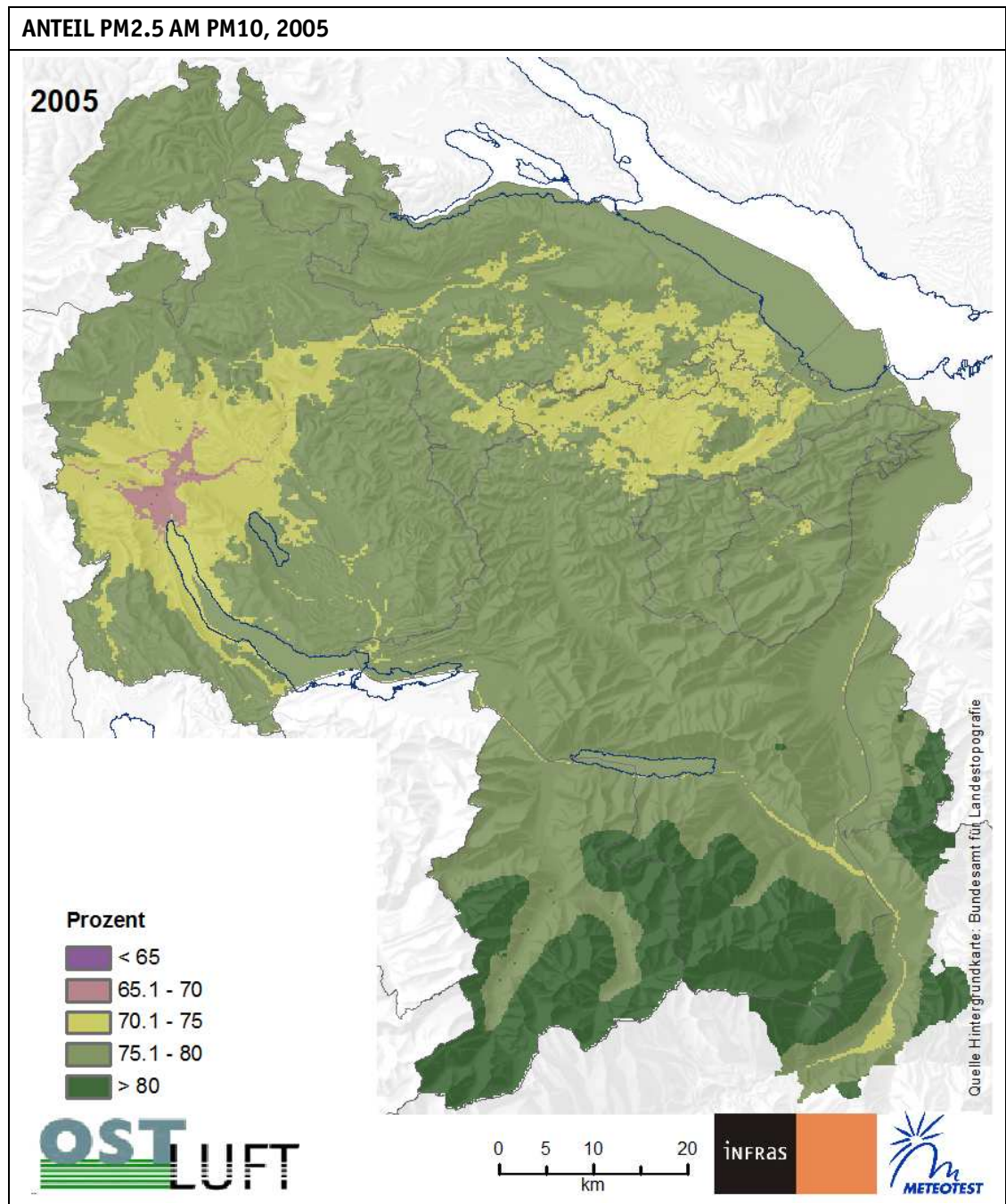


Figur 22 PM10 Immissionen 2020. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

### 5.3.3. PM2.5-BELASTUNGSKARTEN 2005–2020

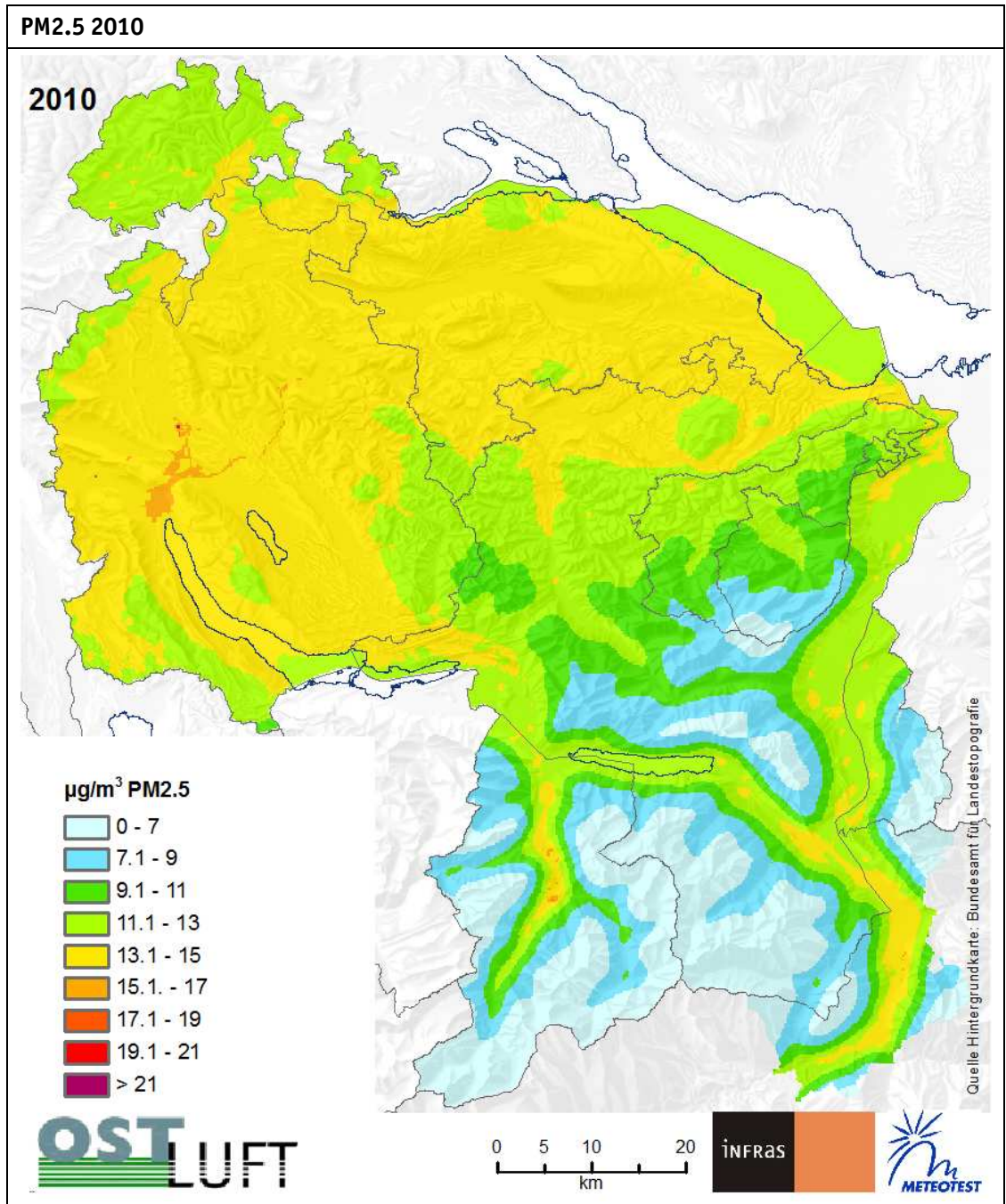


Figur 23 PM2.5 Immissionen 2005. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

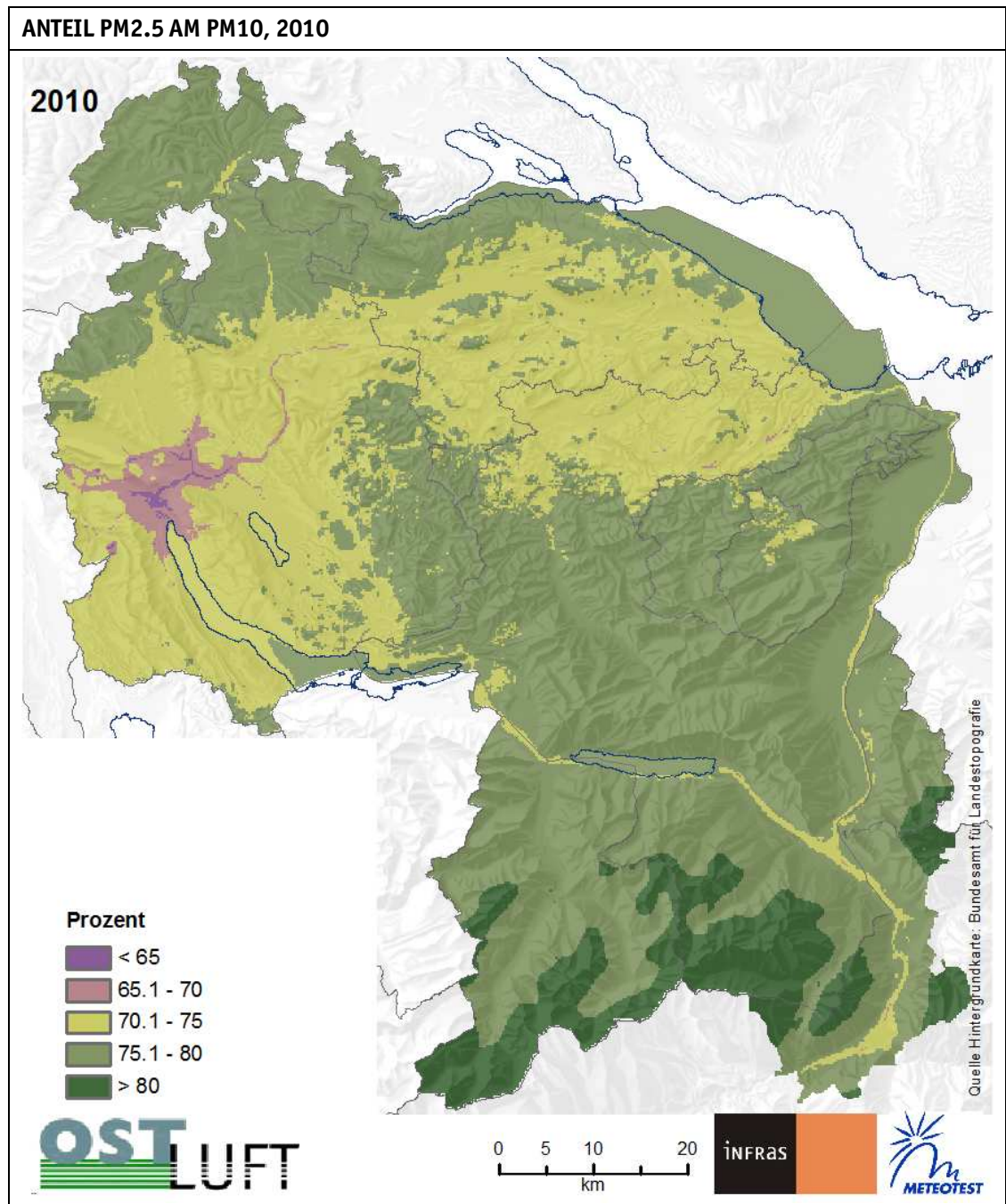


**Figur 24** PM2.5- Anteil an den PM10-Immissionen 2005. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

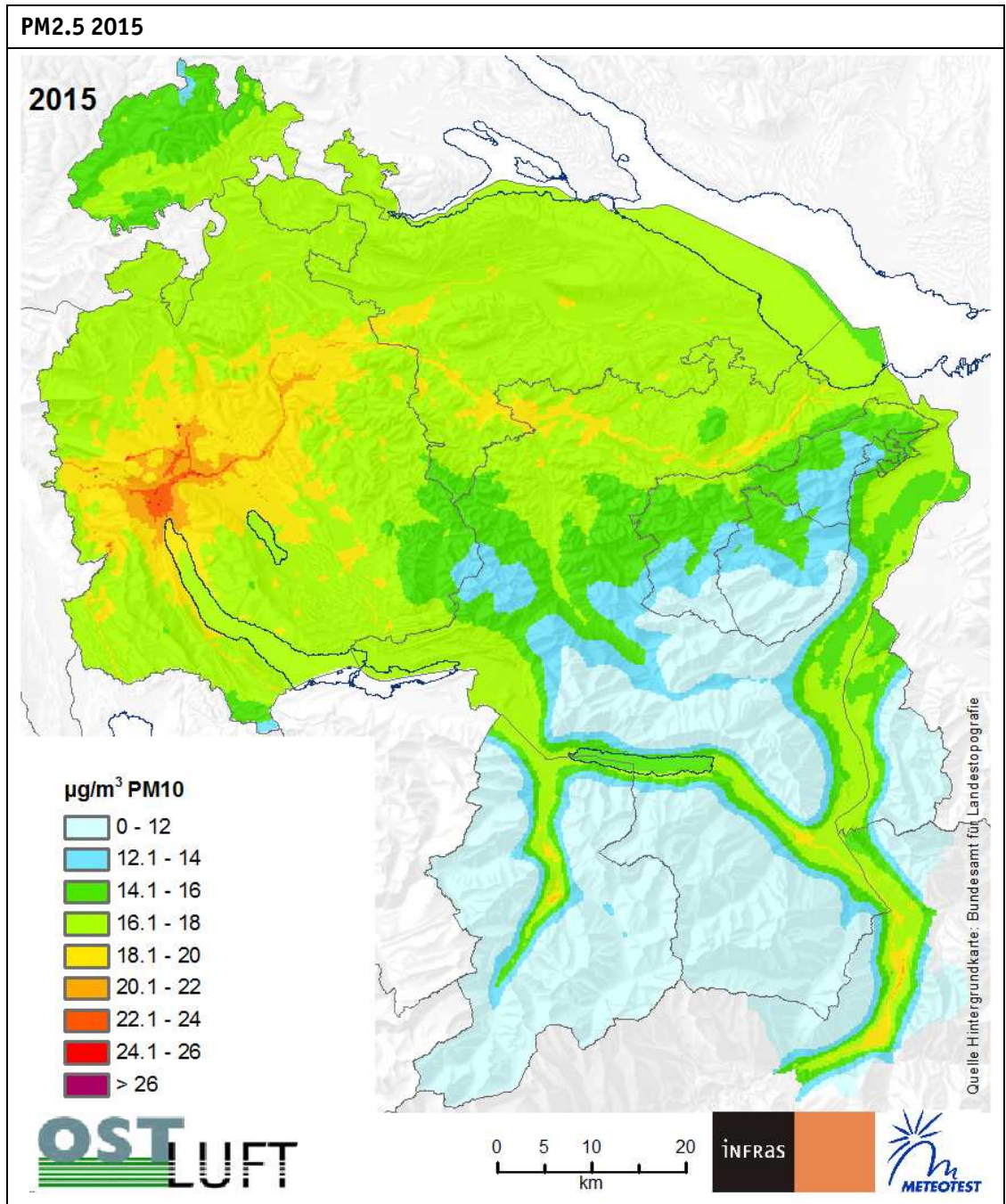




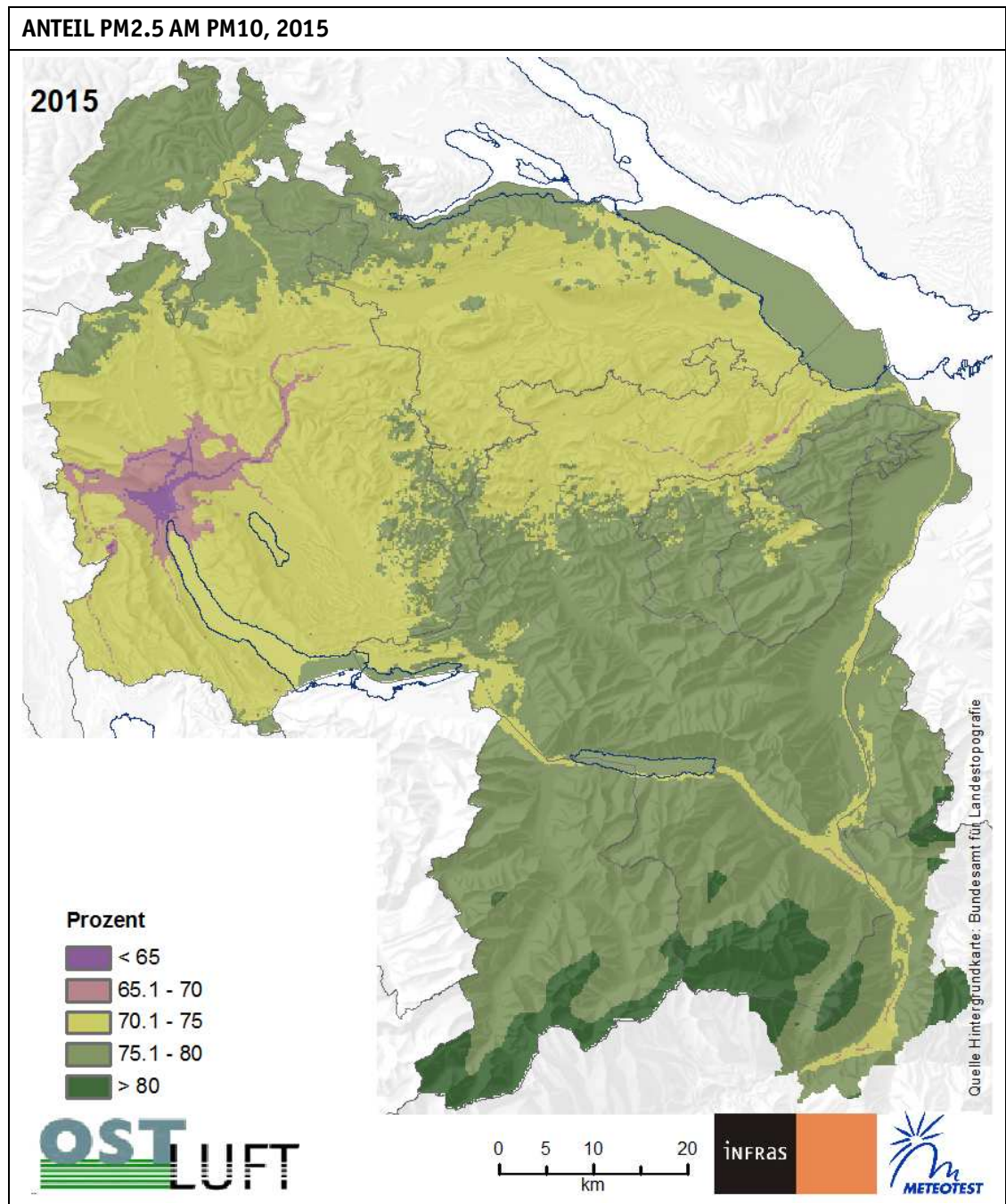
Figur 25 PM2.5-Immissionen 2010. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.



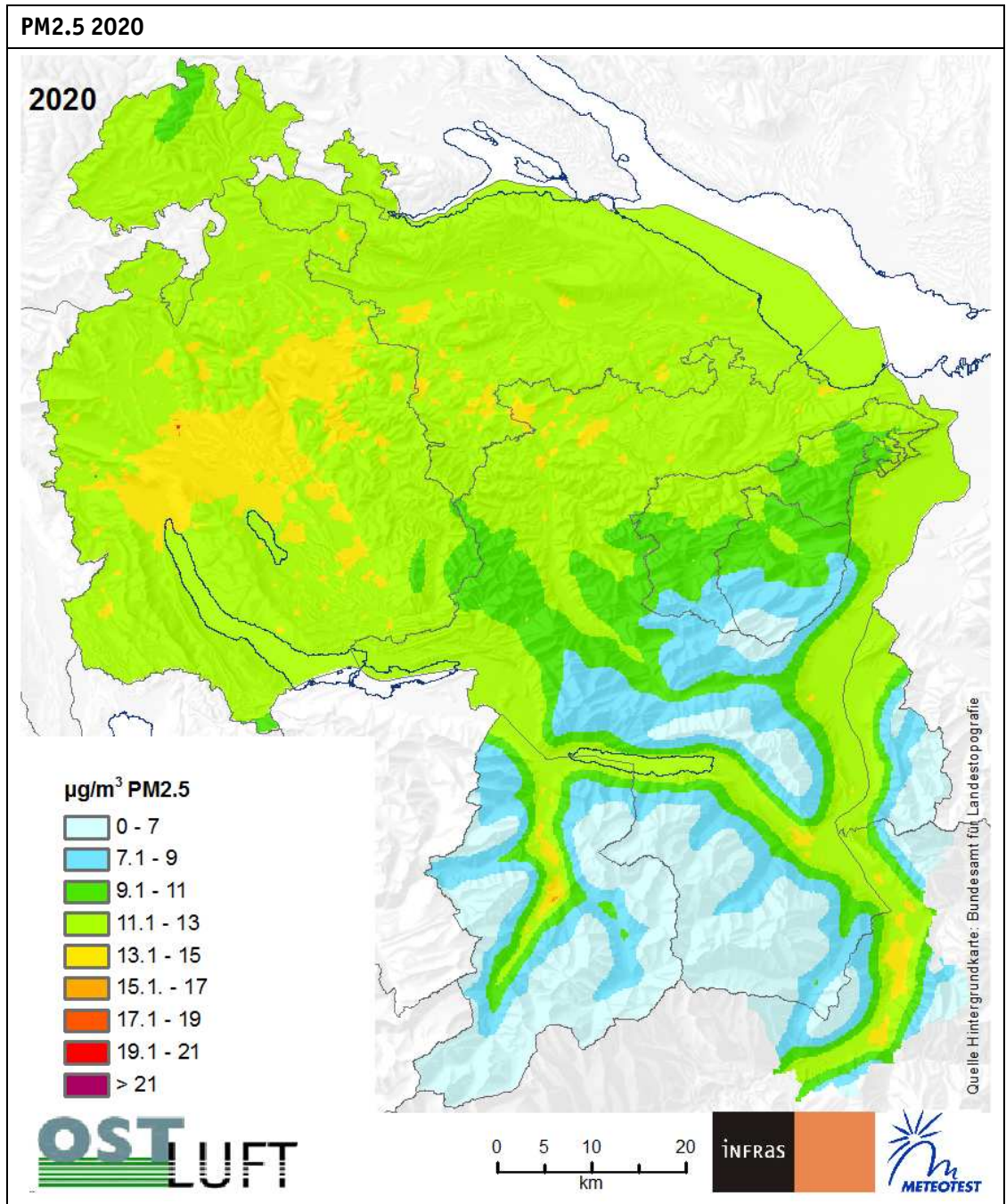
Figur 26 PM2.5-Anteil an den PM10-Immissionen 2010. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.



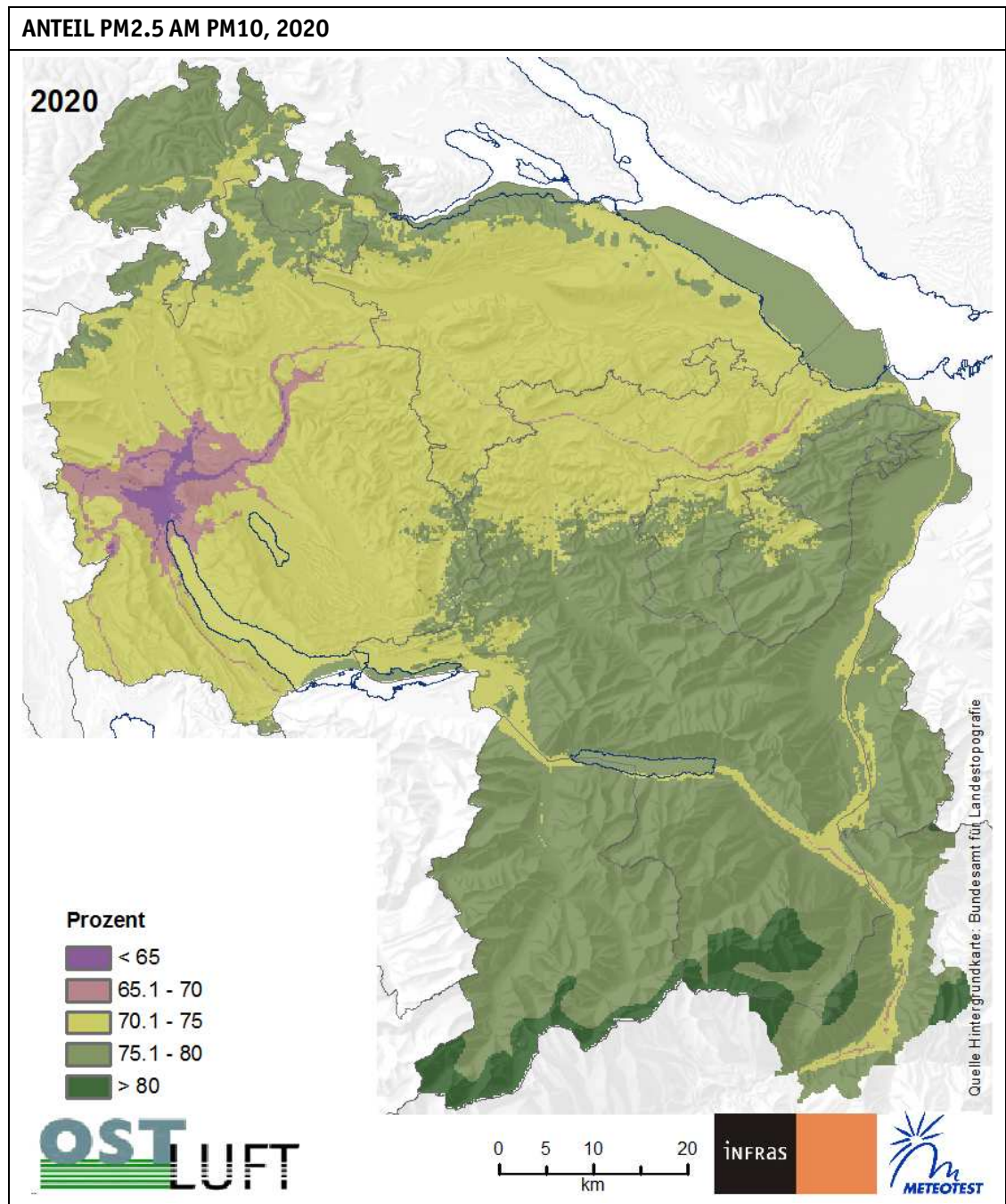
Figur 27 PM2.5-Immissionen 2015. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.



Figur 28 PM2.5-Anteil an den PM10-Immissionen 2015. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

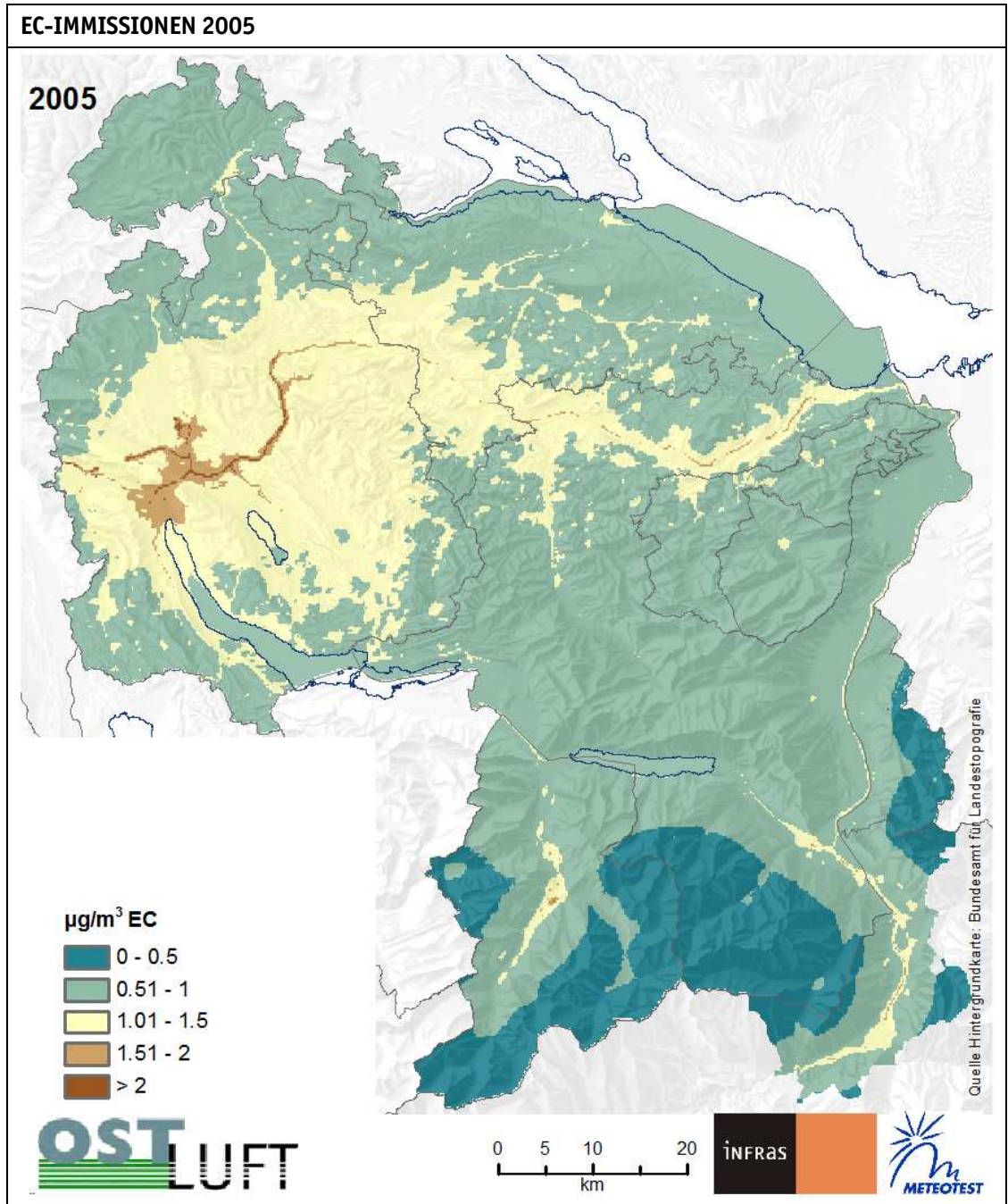


Figur 29 PM2.5-Immissionen 2020. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

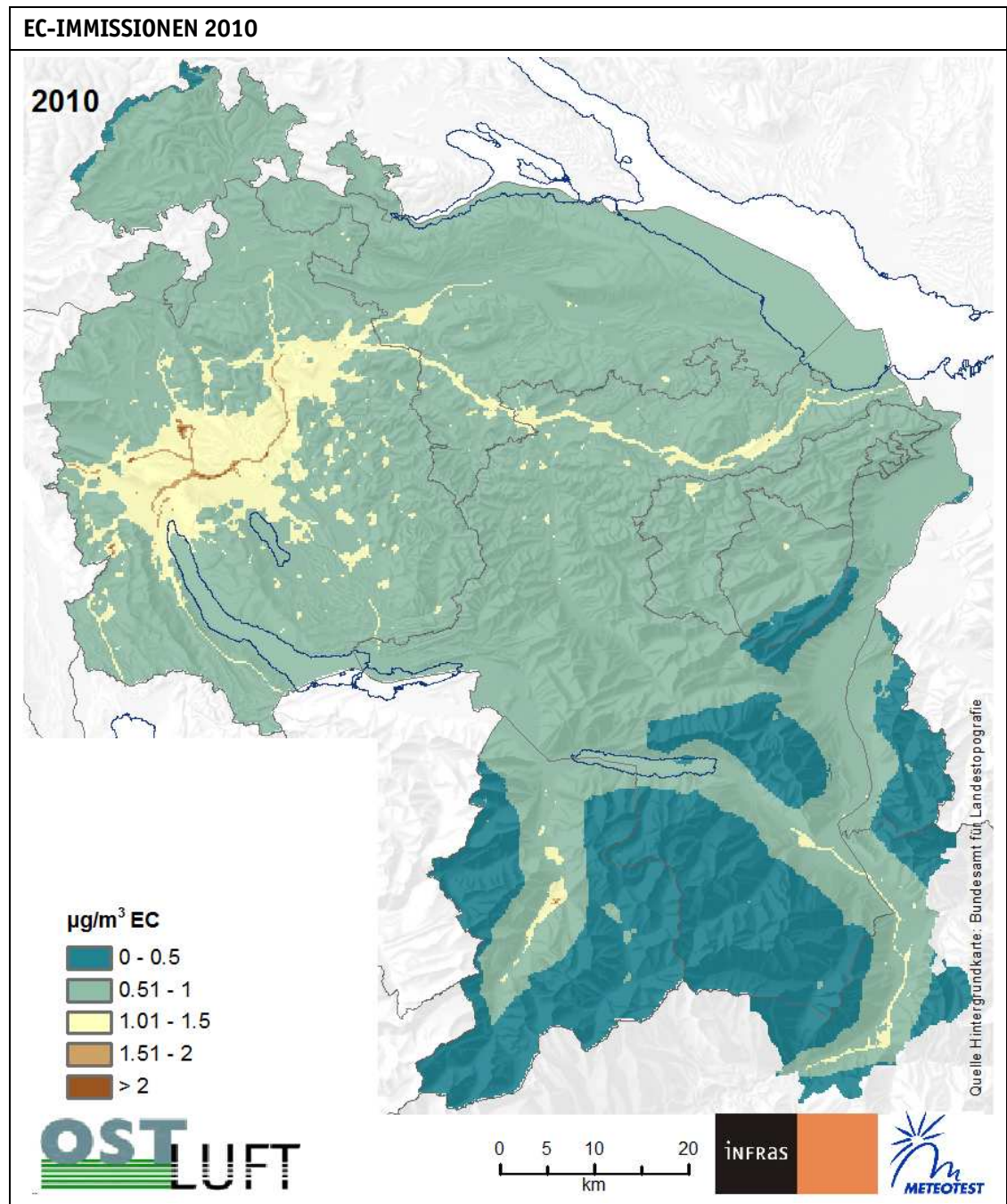


Figur 30 PM2.5-Anteil an den PM10-Immissionen 2020. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

5.3.4. EC-BELASTUNGSKARTEN 2005–2020

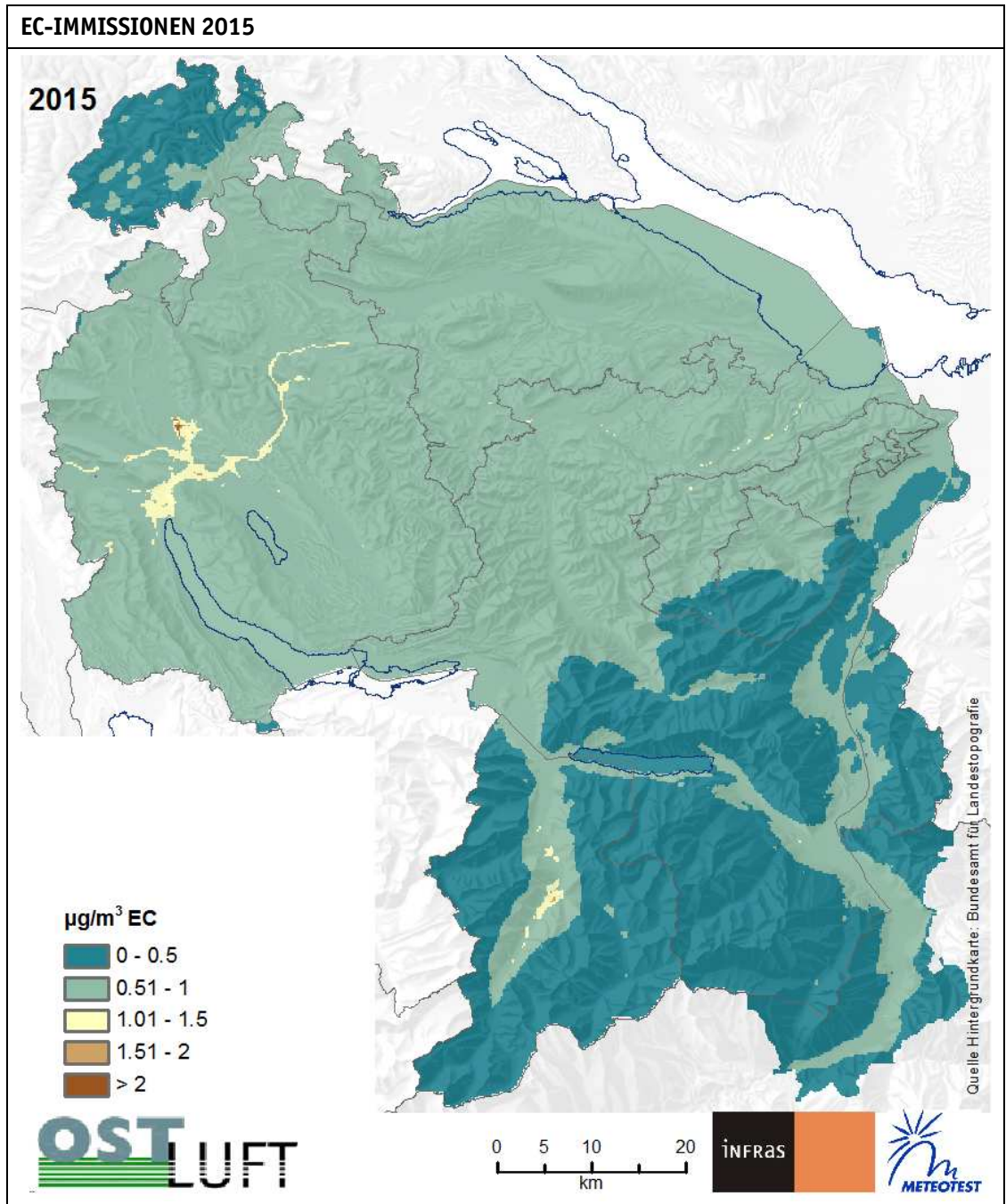


Figur 31 EC-Immissionen im Jahr 2005. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

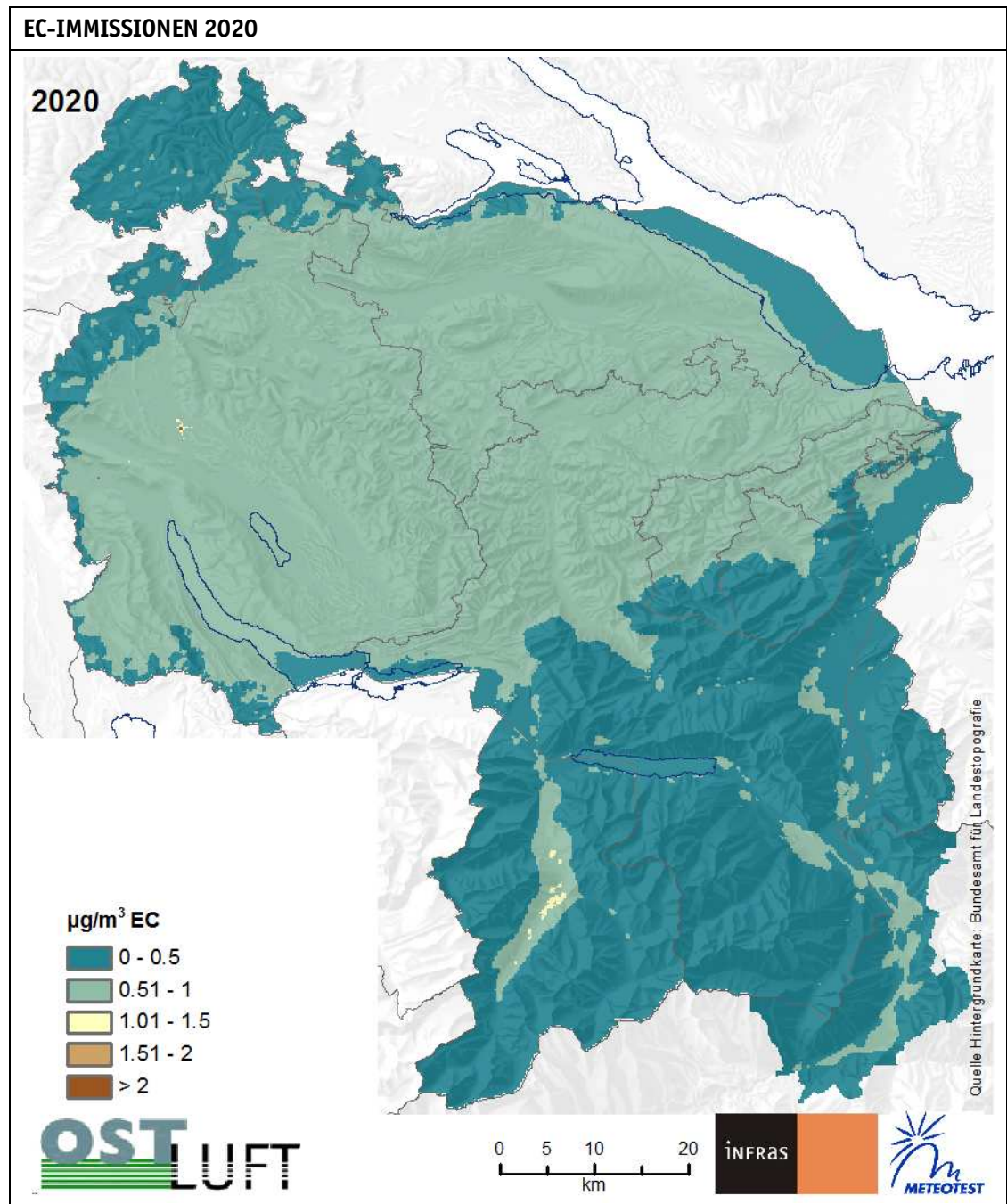


Figur 32 EC-Immissionen im Jahr 2010. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.





Figur 33 EC-Immissionen im Jahr 2015. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

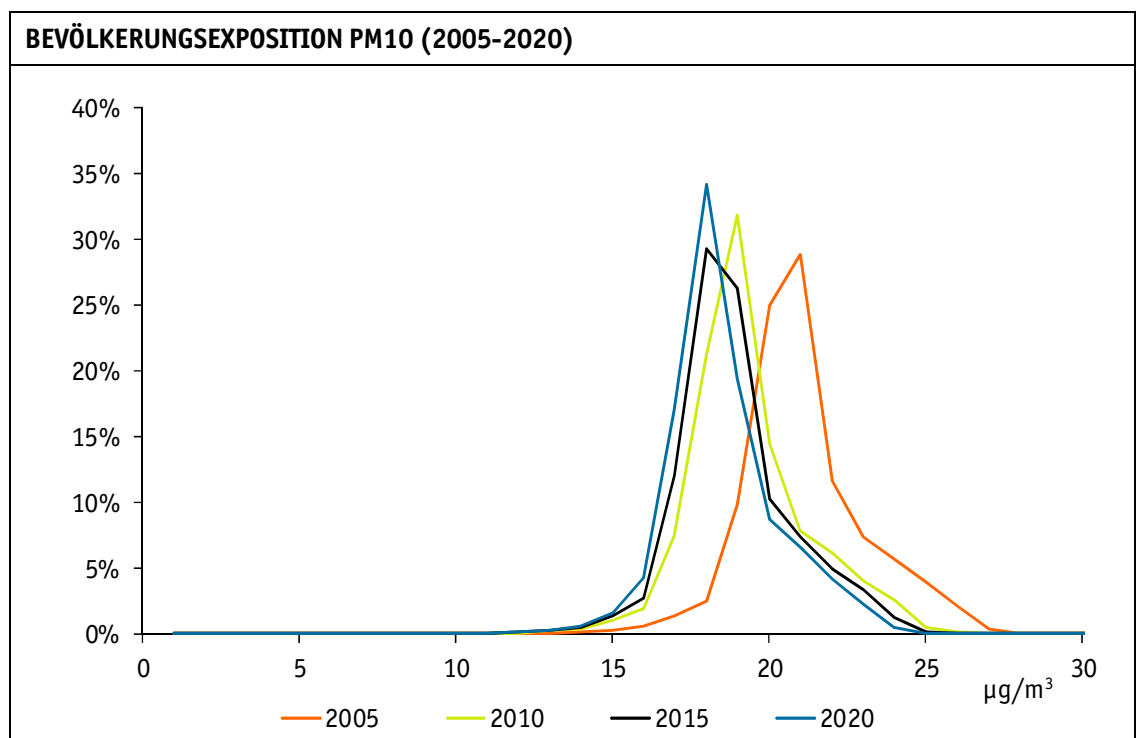


Figur 34 EC-Immissionen im Jahr 2020. Räumliche Auflösung 200 m x 200 m.

## 5.4. BEVÖLKERUNGSEXPOSITION 2005–2020

Die Bevölkerungsexposition gibt an, wie stark die Bevölkerung im OSTLUFT-Gebiet den Feinstaub-Immissionen ausgesetzt ist. Die Exposition ist ein relevanter Indikator für die negative Auswirkung auf die Gesundheit. Luftschadstoffe, insbesondere Feinstaub, haben erwiesenermaßen schädigende Auswirkungen auf den Atmungsapparat des Menschen und können auch das kardiovaskuläre System beeinträchtigen (vgl. z.B. BUWAL 2005, BAFU 2007).

Datengrundlage für die Expositionsrechnungen 2005–2020 sind neben den Belastungskarten die Hektardaten der Volkszählung 2010 (BFS 2012). Das Leistungszentrum Modellierung von OSTLUFT hat einen Datensatz inkl. Einwohner im Fürstentum Liechtenstein zur Verfügung gestellt. Für 2015 und 2020 stehen keine hektar-genauen Prognosen zur Verfügung. Die Expositionsergebnisse 2015/2020 gehen deshalb von einer unveränderten räumlichen Verteilung der Einwohner aus. Aus den Immissionskonzentrationen und den Bevölkerungszahlen lässt sich berechnen, wie viele Einwohner an ihren Wohnorten welcher Immissionskonzentration ausgesetzt sind. Figur 35 zeigt die Exposition als Häufigkeitsverteilung 2005–2020.



**Figur 35** Die Bevölkerungsexposition für PM10 zeigt den Anteil an der Gesamtbevölkerung des Ostluft-Gebietes pro Immissionsklasse ( $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) für 2005, 2010, 2015, 2020. Die Farbe der Kurve zeigt das Jahr an. Lesebeispiel: Im Jahr 2005 (rote Kurve) leben ca. 20% der Bevölkerung an einem Wohnort mit einem Jahresdurchschnitt von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  PM10. (100% entsprechen 2.39 Mio. Einwohner.)

Aus den Expositionsdaten lassen sich zwei wichtige Parameter berechnen:

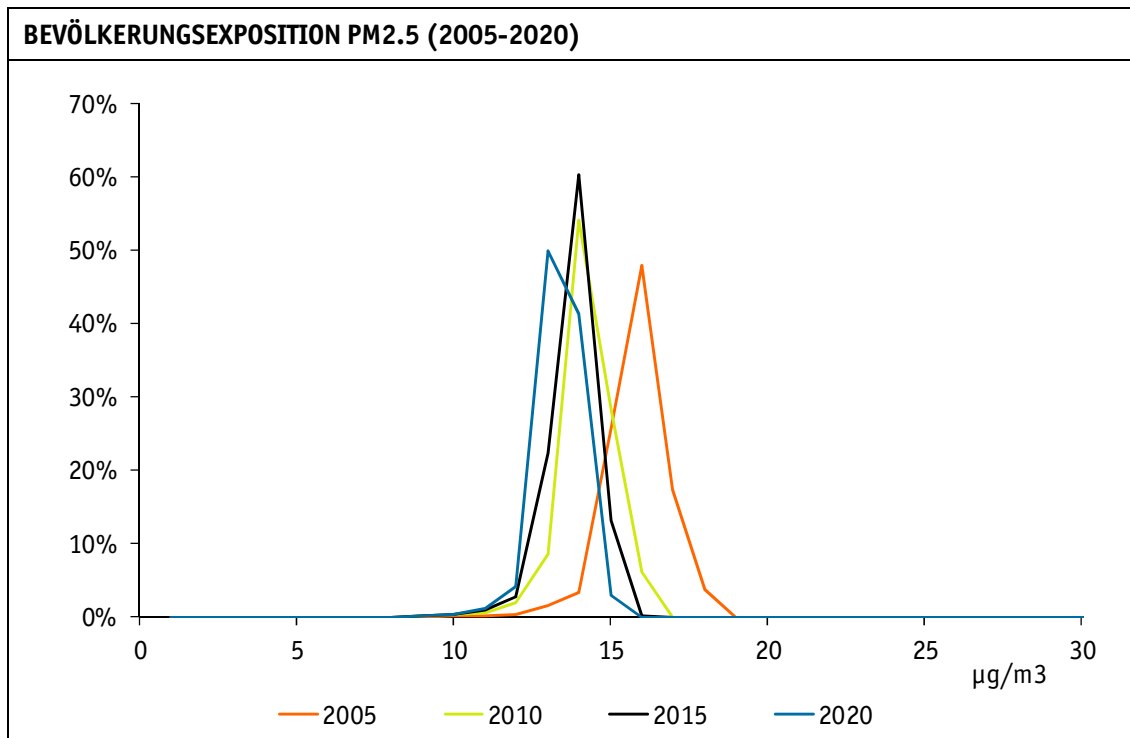
- › Die bevölkerungsgewichteten Immissionskonzentrationen 2005–2020 und
- › die Anteile der Einwohner im OSTLUFT-Gebiet, die an Orten mit übermässiger (über dem Grenzwert liegender) Immission wohnen.

Diese beiden Parameter sind in Tabelle 18 für die betrachteten vier Jahre im Zeitraum 2005–2020 angegeben. Der bevölkerungsgewichtete Mittelwert der PM10-Immissionskonzentration lag 2005 mit  $20.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  noch knapp über dem Grenzwert und sinkt bis ins Jahr 2020 voraussichtlich auf  $18.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ab (siehe Tabelle 18). Der Anteil der Einwohner mit Wohnorten über dem Grenzwert lag 2005 noch bei 60%. Der Wert sank bis 2010 sehr stark, nachher nur noch schwächer bis voraussichtlich 14% ab. Diese Dynamik geschieht dank der beschlossenen Reduktionsmassnahmen bei den Feinstaubemissionen, und zwar vor allem dank der Massnahmen im Verkehr: Weil der Verkehr bodennah emittiert, beeinflusst dessen Dynamik die bodennahen Immissionen stärker als Feuerungsemissionen, die auf höheren Niveaus ausgestossen werden.

<b>PARAMETER DER BEVÖLKERUNGSEXPOSITION PM10</b>				
Parameter	2005	2010	2015	2020
Bevölkerungsgewichteter Mittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10	20.6	18.8	18.4	18.0
Proz. Anteil Einwohner über dem Immissionsgrenzwert ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	60%	21%	17%	14%

**Tabelle 18** Eckdaten der Bevölkerungsexposition PM10. Erläuterungen siehe Text.

Figur 36 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Bevölkerungsexposition für PM2.5 analog zum PM10 in Figur 35. In Tabelle 19 **Tabelle 21** sind die bevölkerungsgewichteten Mittelwerte für PM2.5 angegeben. Ausserdem ist das Verhältnis dieser PM2.5-Mittelwerte zu den PM10-Mittelwerten der Tabelle 18 angegeben. Das Verhältnis betrug 2005 noch 74.6% und ist 2010 auf 73.1% abgesunken. Bis 2020 wird es bis auf 71.5% weiter sinken. Grund für diese Dynamik sind die Reduktionsmassnahmen für Feinstaubemissionen: Diese sind auf die gesundheitsgefährdenden Verbrennungspartikel ausgerichtet, die praktisch ausschliesslich in der Fraktion PM2.5 liegen. Umgekehrt bleiben die non-exhaust-Partikel, die zum grossen Teil in der groben Fraktion PM10-PM2.5 liegen, praktisch unverändert. Dabei ist noch zu beachten, dass die vom Verkehr bodennah ausgestossenen Feinstaubemissionen einer besonders starken Dynamik unterliegen: Die PM2.5 Emissionen halbieren sich fast in der Periode 2005–2020, während sich die PM10-Emissionen des Verkehrs lediglich um 9% verringern. Das ist der Hauptgrund für die Abnahme des Verhältnisses PM2.5/PM10 in den kommenden Jahren.



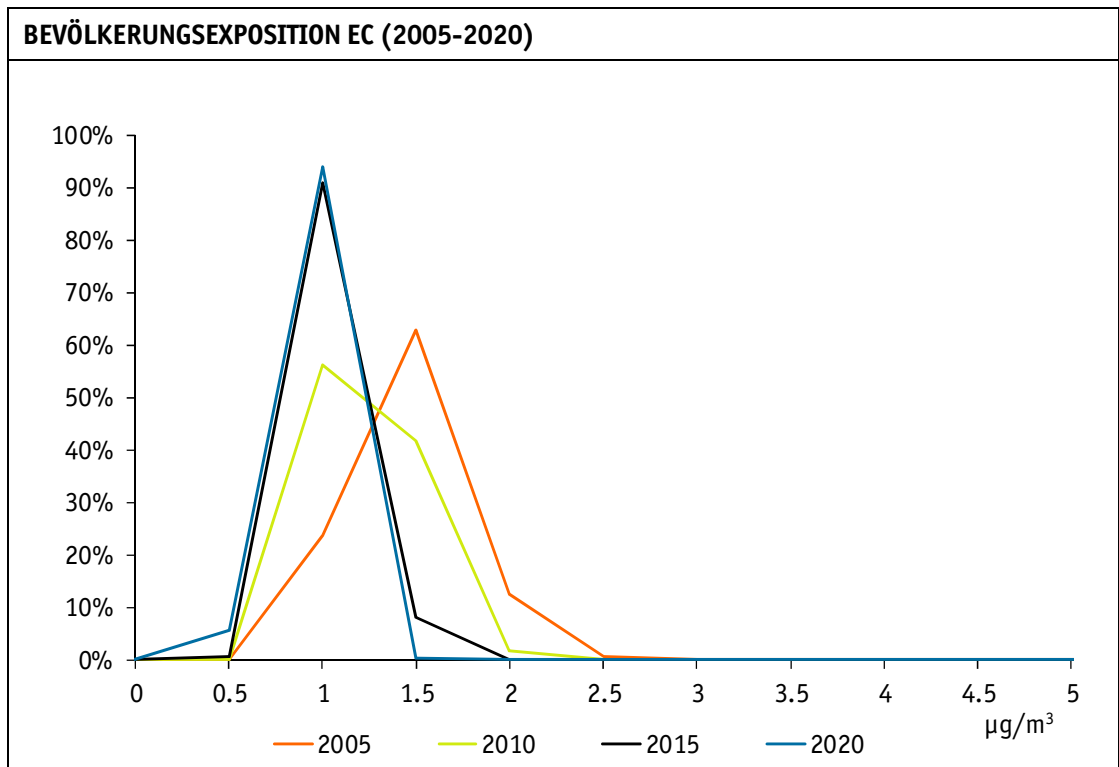
**Figur 36** Die Bevölkerungsexposition für PM2.5 zeigt den Anteil an der Gesamtbevölkerung des Ostluft-Gebietes pro Immisionsklasse (0.5 µg/m<sup>3</sup>) für 2005, 2010, 2015, 2020. Siehe auch Figur 35. (100% entsprechen 2.39 Mio Einwohner).

PARAMETER DER BEVÖLKERUNGSEXPOSITION PM2.5				
Parameter	2005	2010	2015	2020
Bevölkerungsgewichteter Mittelwert in µg/m <sup>3</sup> PM2.5	15.4	13.8	13.3	12.9
Verhältnis PM2.5/PM10	74.6%	73.1%	72.4%	71.5%

**Tabelle 19** Eckdaten der Bevölkerungsexposition PM2.5. Erläuterungen siehe Text.

Figur 37 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Bevölkerungsexposition für EC analog zum PM10 in Figur 35. In Tabelle 20 sind die bevölkerungsgewichteten Mittelwerte für EC angegeben. Ausserdem ist das Verhältnis dieser EC-Mittelwerte zu den PM10-Mittelwerten der Tabelle 18 angegeben. Das Verhältnis betrug 2005 noch 5.8% und ist 2010 auf 5.2% abgesunken. Bis 2020 wird es bis auf 4.0% weiter sinken. Grund für diese Dynamik sind wie bereits oben erwähnt die Reduktionsmassnahmen für Feinstaubemissionen: Diese sind auf die gesundheitsgefährdenden Verbrennungspartikel mit hohem Anteil EC (Tabelle 25) ausgerichtet. Umgekehrt bleiben die non-exhaust-Partikel mit niedrigem Anteil EC praktisch unverändert. Auch hier ist zu beachten, dass die vom Verkehr bodennah ausgestossenen Feinstaubemissionen einer besonders starken Dynamik unterliegen: Die EC-Emissionen nehmen in der Periode 2010–2020 um 74% ab (Tabelle 13),

während die die PM10-Emissionen des Verkehrs lediglich um 9% verringern (Tabelle 7). Das ist der Hauptgrund für die Abnahme des Verhältnisses EC/PM10.



**Figur 37** Die Bevölkerungsexposition für EC zeigt den Anteil an der Gesamtbevölkerung des Ostluft-Gebietes pro Immissionsklasse ( $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) für 2005, 2010, 2015, 2020. Siehe auch Figur 35. (100% entsprechen 2.39 Mio Einwohner).

PARAMETER DER BEVÖLKERUNGSEXPOSITION EC				
Parameter	2005	2010	2015	2020
Bevölkerungsgewichteter Mittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ EC	1.20	0.98	0.79	0.72
Verhältnis EC/PM10	5.8%	5.2%	4.3%	4.0%

**Tabelle 20** Eckdaten der Bevölkerungsexposition EC. Erläuterungen siehe Text.

## 6. DATENQUALITÄT

### 6.1. METHODIK

#### 6.1.1. KALIBRATION UND VALIDIERUNG

Folgendes Vorgehen wurde für den Vergleich von Modell- mit Messdaten gewählt:

- › Kalibration 2005: Zuerst wurden die PM10-Immissionen für das Jahr 2005 mit dem Modell berechnet und die Modellwerte mit den Messwerten verglichen. In mehreren Iterationsschritten wurde das Modell kalibriert, um eine optimale Übereinstimmung mit den Messdaten zu erreichen.
- › Validierung 2010: Anschliessend wurden die PM10-Immissionen für das Jahr 2010 modelliert und die Modellwerte mit den Messwerten verglichen. In diesem Vergleich wurde am Modell nichts mehr verändert. Das bedeutet, dass dem Vergleich 2010 der Status einer Validierung zukommt. In diesem Sinn lässt sich die Modellqualität korrekterweise am Zustand 2010 bestimmen.

#### 6.1.2. MESSSTATIONEN

Für den Vergleich von PM10- und EC-Modelldaten mit Messdaten stehen eine Reihe von Messwerten zur Verfügung, primär natürlich die Messwerte des OSTLUFT-Messnetzes und zusätzlich noch Messwerte von NABEL-Stationen, die sich auf dem OSTLUFT-Gebiet befinden. In Tabelle 21 sind alle Messstationen aufgelistet. Für den Vergleich der Modelldaten 2005 (Kap. 6.2) werden Messwerte über 2004 und 2005 verwendet (als Mittelwerte, um meteorologisch bedingte Schwankungen zu reduzieren). In Tabelle 21 ist deshalb für die betreffenden Jahre angegeben, für welche Stationen gültige Jahresmittelwerte PM10 und EC für 2004 und 2005 vorliegen. Analog gilt auch, dass für den Vergleich der Modelldaten 2010 die Messdaten 2009 und 2010 benutzt werden.

MESSSTATIONEN OSTLUFT								
Station	PM10				EC			
	2004	2005	2009	2010	2004	2005	2009	2010
Arbon, Bahnhofstrasse				x				
Chur, A13	x	x	x	x	x	x	x	x
Frauenfeld, Bahnhofstrasse	x	x	x	x			x	x
Glarus Feuerwehrstützpunkt	x	x	x	x				
Grabs, Marktplatz	x	x	x	x				
Heiden, Dunantheus	x	x						x
Mels, Waeltigasse			x	x				
NABEL, Duebendorf	x	x	x	x				
NABEL, Taenikon	x	x	x	x				
NABEL, Zürich	x	x	x	x				
Neuhausen, Galgenbuck			x	x				
Opfikon, Balsberg	x	x	x	x			x	x
Rapperswil, Tüchelweier	x	x	x	x			x	
St. Gallen, Bild	x	x						
St. Gallen, Rorschacher Strasse	x	x	x	x			x	x
Vaduz, Austrasse	x	x	x	x		x	x	x
Vaduz, Mühleholz	x	x						
Wald, Höhenklinik			x	x				
Wallisellen, Dietlikonerstrasse	x	x						
Wettswil, Filderen			x	x			x	x
Weerswilen, Weerstein	x	x	x	x				x
Wettswil, Weieraecher			x	x				x
Winterthur, Obertor	x	x	x	x			x	x
Zürich, Heubeerbueel	x	x						
Zürich, Schimmelstrasse	x	x	x	x	x			x
Zürich, Schwamendingen	x	x	x	x		x	x	
Zürich, Stampfenbachstrasse	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Anzahl</i>	<i>21</i>	<i>21</i>	<i>21</i>	<i>22</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>10</i>	<i>12</i>
<i>Anzahl verfügbar f. 2004/2005 resp. 2009/2020</i>		<i>21</i>		<i>22</i>		<i>5</i>		<i>14</i>

**Tabelle 21** OSTLUFT- und NABEL-Messstation sowie die Verfügbarkeit von Messdaten für PM10 und EC. Ein „x“ bedeutet, dass im betreffenden Jahr ein gültiger Jahresmittelwert vorhanden ist. Die unterste Zeile gibt die Anzahl der verfügbaren Messwerte (die mit den Modellwerten verglichen werden können).

## 6.2. MESSDATEN UND MODELLEDATEN

### 6.2.1. PM10

Tabelle 22 zeigt Messdaten, Modelldaten und die Differenz zwischen Modell- und Messdaten. Um meteorologische Schwankungen zu verringern, werden (wie oben bereits erwähnt) die Messwerte gemittelt. Wenn nur ein Messwert vorhanden ist, z.B. für 2005, nicht aber für 2004, so wird der Messwerte 2005 für den Vergleich benutzt. Als Modellwert dient ein gewichteter Mittelwert, der sich aus dem Konzentrationswert der Hektare berechnet, in der sich die Messstation befindet, gewichtet mit den Konzentrationen aus den vier direkt benachbarten Hektaren<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Technisch gesprochen handelt es sich um eine bilineare Interpolation [ArcINFO-Funktion LATTICESPOT(TIN)]



PM10-MESS- UND MODELLWERTE						
Station	2004/2005 Messung	2005 Modell	--- Mod.-Mess.	2009/2010 Messung	2010 Modell	--- Mod.-Mess.
Arbon, Bahnhofstrasse				19.5	17.8	-1.7
Chur, A13	20.1	21.1	1.0	19.7	19.2	-0.5
Frauenfeld, Bahnhofstrasse	22.3	21.0	-1.3	20.7	19.2	-1.5
Glarus Feuerwehrstützpunkt	19.2	19.7	0.6	17.8	18.0	0.2
Grabs, Marktplatz	21.0	19.1	-1.9	18.3	17.4	-0.9
Heiden, Dunanthaus	17.5	17.7	0.3	---	---	---
Mels, Waeltigasse	---	---	---	17.0	18.6	1.6
NABEL, Duebendorf	21.5	22.3	0.8	18.5	20.5	2.0
NABEL, Taenikon	18.5	20.2	1.7	16.7	18.4	1.8
NABEL, Zürich	24.5	24.9	0.4	20.0	23.1	3.2
Neuhausen, Galgenbuck	---	---	---	16.7	17.4	0.7
Opfikon, Balsberg	26.0	25.0	-0.9	21.9	23.3	1.4
Rapperswil, Tüchelweier	22.5	19.9	-2.6	19.1	18.1	-1.0
St. Gallen, Bild	20.6	21.7	1.1	---	---	---
St. Gallen, Rorschacher Strasse	19.0	20.1	1.1	18.4	18.4	0.0
Vaduz, Austrasse	19.1	18.9	-0.2	18.8	17.1	-1.7
Vaduz, Mühleholz	20.1	18.4	-1.7	---	---	---
Wald, Höhenklinik	---	---	---	13.0	15.4	2.4
Wallisellen, Dietlikonerstrasse	20.7	22.1	1.4	---	---	---
Wettswil, Filderer	---	---	---	18.7	20.6	1.9
Weerswilen, Weerstein	19.4	19.4	0.0	14.2	17.6	3.4
Wettswil, Weieraecher	---	---	---	19.4	19.1	-0.3
Winterthur, Obertor	22.7	22.7	0.0	19.9	20.9	1.0
Zürich, Heubeebueel	21.0	22.5	1.5	---	---	---
Zürich, Schimmelstrasse	28.7	25.4	-3.3	23.4	23.6	0.2
Zürich, Schwamendingen	28.7	27.2	-1.5	25.1	25.2	0.1
Zürich, Stampfenbachstrasse	25.9	25.2	-0.7	23.2	23.3	0.1
<b>Mittelwert</b>	<b>21.85</b>	<b>21.64</b>	<b>-0.21</b>	<b>19.07</b>	<b>19.73</b>	<b>0.67</b>
<b>Korrelationskoeffizient R</b>		<b>0.90</b>			<b>0.85</b>	
<b>Bestimmtheitsmass R<sup>2</sup></b>		<b>0.81</b>			<b>0.72</b>	
<b>Anzahl Mess-/Modellwerte</b>		<b>21</b>			<b>22</b>	
<b>Standardfehler</b>		<b>1.5</b>			<b>1.6</b>	

**Tabelle 22** PM10-Messwerte (2004/2005 und 2009/2010), Modellwerte (2005, 2010) und Differenzen zwischen Modell- und Messwerten. Die untersten fünf Zeilen geben Auskunft über Qualität des Zusammenhangs zwischen Modell- und Messwerten (siehe Text).

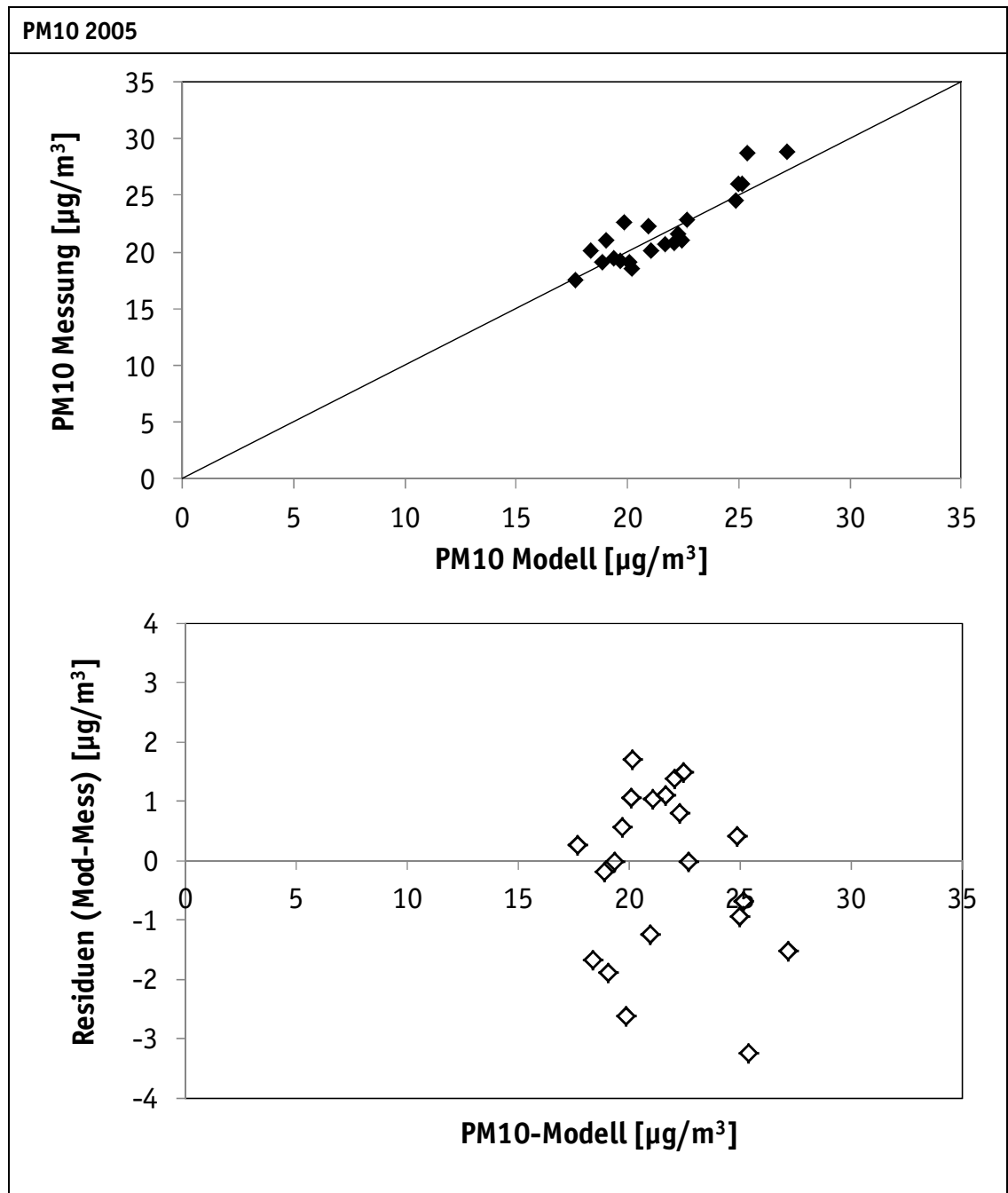
- › 2005: Die Messwerte 2004/2005 dienen für **Kalibrierungszwecke** des Modells.
  - › Die Mittelwerte der Mess- ( $21.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und der Modellwerte ( $21.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) stimmen fast exakt überein.
  - › Korrelation  $R = 0.90$  und Bestimmtheitsmass  $R^2 = 81\%$  sind hoch.
  - › Aus den Residuen und der Anzahl Messwerte folgt für den Standardfehler<sup>5</sup>  $SE = 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

<sup>5</sup> Standardfehler =  $[(\sum \text{Residuen}^2)/(n-2)]^{0.5}$ . Der Standardfehler ist ein Mass für die mittlere Differenz zwischen Modell- und Messwerten multipliziert mit einem Faktor, der von der Anzahl Messwerte abhängig ist und der sich wie  $[(n)/(n-2)]^{0.5}$  verhält. Bei 5 Messwerten ist der Faktor ca. 1.3, bei 20 Messwerten ca. 1.05 (je grösser n ist, umso kleiner wird der Faktor).

- › 2010: Die Messwerte 2009/2010 dienen zur **Validierung** des Modells
  - › Das Mittel der Modellwerte ( $19.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ist ca.  $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  höher als das Mittel der Messwerte ( $19.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
  - › Korrelation  $R = 0.85$  und Bestimmtheitsmass  $R^2 = 72\%$  sind etwas weniger gut als im Zustand 2005, aber immer noch hoch.
  - › Aus den Residuen und der Anzahl Messwerte folgt für den Standardfehler  $SE = 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- › Modellunsicherheit: Im Jahr 2010 liegen mindestens  $68\%^6$  (16 von 22) Messwerte innerhalb des Intervalls [lower, upper] mit  $\text{lower} = \text{Modellwert} / 1.10$  und  $\text{upper} = 1.10 * \text{Modellwert}$ . Unter der Annahme, die gemessenen Werte seien exakt, kann daraus eine Modellunsicherheit von 10% (Standardabweichung) abgeleitet werden.

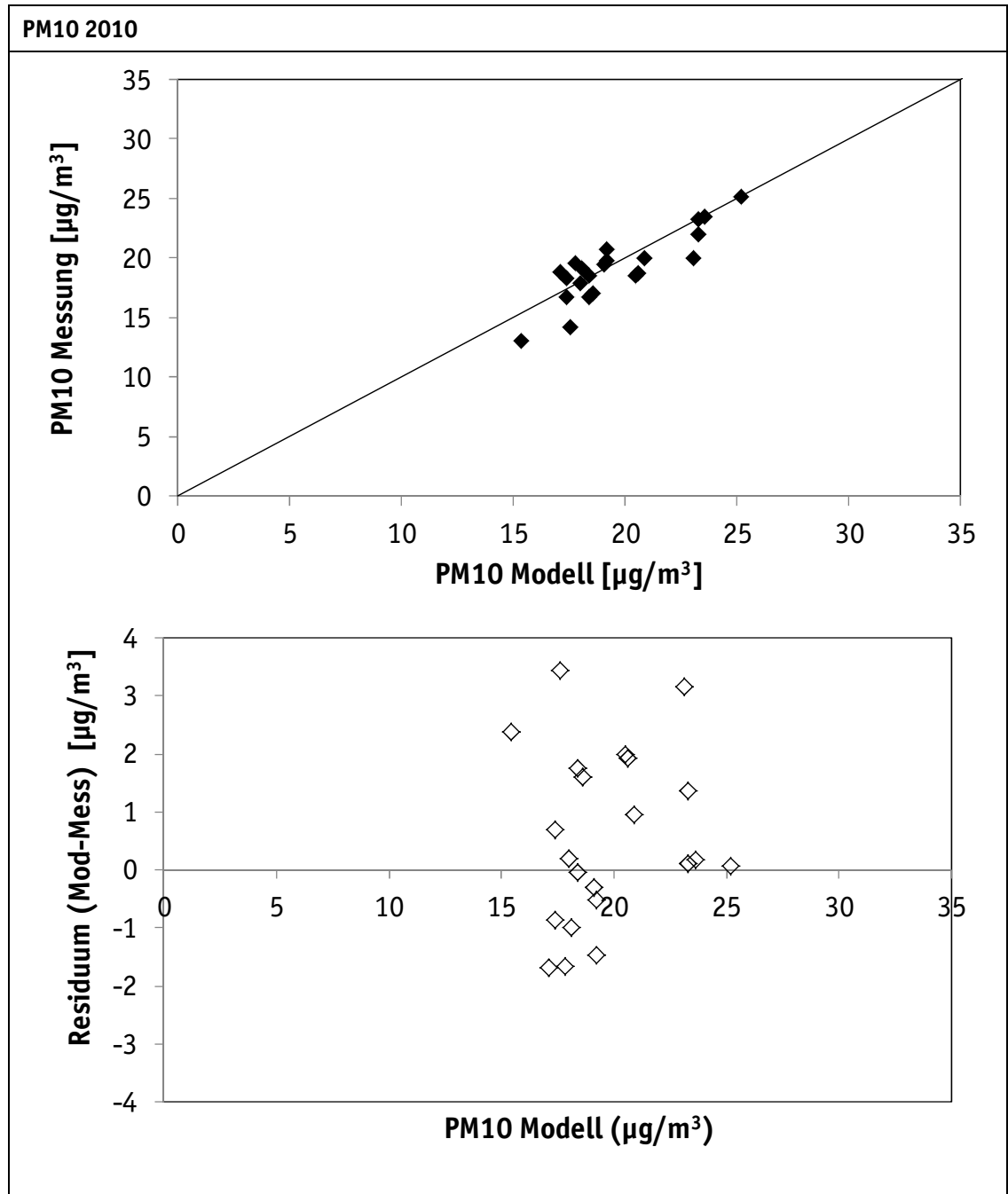
Figur 38 zeigt den Scatter- und den Residuenplot für Modell- und Messwerte PM10 2005. Die Verteilung der Residuen (Differenz Mess- minus Modellwert) in Funktion der Modellwerte kann Hinweise auf systematische Modellfehler geben. Sowohl für 2005 als auch für 2010 sind aber keine systematischen Abweichungen erkennbar.

<sup>6</sup> im Fall einer Normalverteilung liegen 68% der Werte innerhalb des Intervalls  $m \pm s$  ( $m$  Mittelwert,  $s$  Standardabweichung)



**Figur 38** Scatterplot (links) und Residuenplot (rechts) für PM10 im Jahr 2005.

Figur 39 zeigt dieselben Plots für Modell- und Messwerte PM10 2010. Die Verteilung der Residuen (Differenz Mess- minus Modellwert) in Funktion der Modellwerte kann Hinweise auf systematische Modellfehler geben. Sowohl für 2005 als auch für 2010 sind aber keine systematischen Abweichungen erkennbar.



Figur 39 Scatterplot (oben) und Residuenplot (unten) für PM10 im Jahr 2010.

### 6.2.2. PM2.5

Im OSTLUFT-Messnetz sind PM2.5-Messungen nicht im Messprogramm enthalten. Entsprechend können Modellwerte nicht mit Messwerten verglichen werden.

### 6.2.3. EC

An einigen Stationen des OSTLUFT-Messnetzes werden die EC-Anteile im PM10 gemessen (siehe Tabelle 23). Für den Vergleich 2005 stehen nur 5 Messwerte zur Verfügung, für 2010 immerhin 14.

› 2005:

- › Bei lediglich 5 Vergleichswerten sind die statistischen Parameter wenig aussagekräftig.
- › Der Mittelwert der Messwerte ( $2.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) liegt  $0.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$  über dem Mittel der Modellwerte ( $1.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
- › Korrelation  $R = 0.80$  und Bestimmtheitsmass  $R^2 = 64\%$  sind trotz geringer Zahl von Vergleichswerten (5) relativ hoch.
- › Aus den Residuen und der Anzahl Messwerte folgt für den Standardfehler  $SE = 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

› 2010:

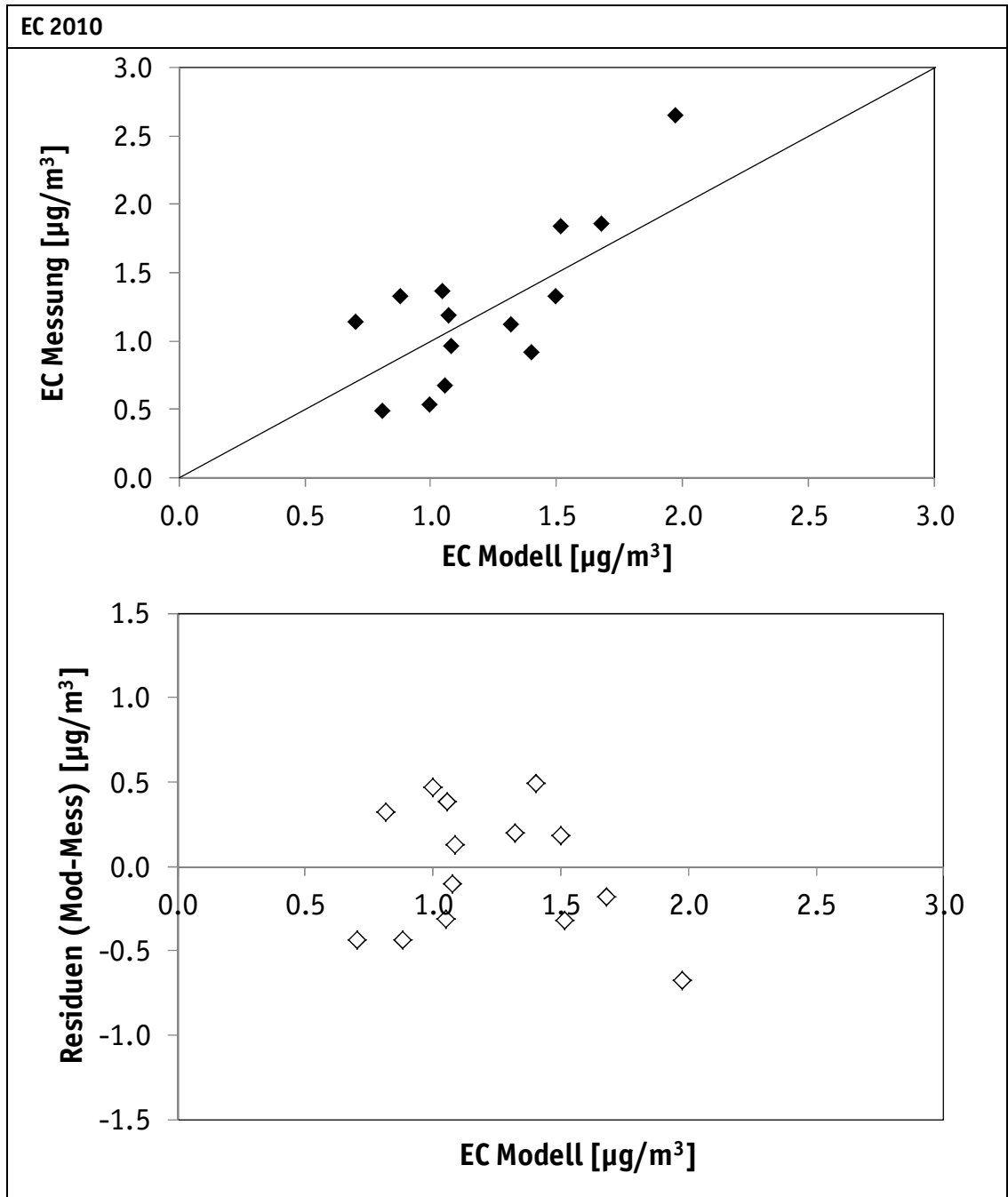
- › Das Mittel der Modellwerte ( $1.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ist nur gerade  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tiefer als das Mittel der Messwerte ( $1.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
- › Korrelation  $R = 0.77$  und Bestimmtheitsmass  $R^2 = 59\%$  sind niedriger als beim PM10.
- › Aus den Residuen und der Anzahl Messwerte folgt für den Standardfehler  $SE = 0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

<b>EC-MESS- UND MODELLWERTE</b>						
<b>Station</b>	<b>2004/2005</b>	<b>2005</b>	<b>---</b>	<b>2009/2010</b>	<b>2010</b>	<b>---</b>
	Messung	Modell	Mod.-Mess.	Messung	Modell	Mod.-Mess.
Arbon, Bahnhofstrasse						
Chur, A13	1.5	1.3	-0.2	1.4	1.0	-0.3
Frauenfeld, Bahnhofstrasse				1.2	1.1	-0.1
Glarus Feuerwahrstützpunkt						
Grabs, Marktplatz						
Heiden, Dunanthaus				0.5	1.0	0.5
Mels, Waeltigasse						
NABEL, Duebendorf						
NABEL, Taenikon						
NABEL, Zürich						
Neuhausen, Galgenbuck						
Opfikon, Balsberg				1.9	1.7	-0.2
Rapperswil, Tüchelweier				1.3	0.9	-0.4
St. Gallen, Bild						
St. Gallen, Rorschacher Strasse				1.0	1.1	0.1
Vaduz, Austrasse	1.7	0.9	-0.8	1.1	0.7	-0.4
Vaduz, Mühleholz						
Wald, Höhenklinik						
Wallisellen, Dietlikonerstrasse						
Wettswil, Filderer				0.9	1.4	0.5
Weerswilen, Weerstein				0.5	0.8	0.3
Wettswil, Weieraecher				0.7	1.1	0.4
Winterthur, Obertor				1.1	1.3	0.2
Zürich, Heubeeribueel						
Zürich, Schimmelstrasse	3.2	1.9	-1.3	1.8	1.5	-0.3
Zürich, Schwamendingen	3.2	2.4	-0.7	2.6	2.0	-0.7
Zürich, Stampfenbachstrasse	1.9	1.8	-0.1	1.3	1.5	0.2
<b>Mittelwert</b>	<b>2.29</b>	<b>1.66</b>	<b>-0.63</b>	<b>1.24</b>	<b>1.22</b>	<b>-0.02</b>
<b>Korrelationskoeffizient R</b>		<b>0.80</b>			<b>0.77</b>	
<b>Bestimmtheitsmass R<sup>2</sup></b>		<b>0.64</b>			<b>0.59</b>	
<b>Anzahl Mess-/Modellwerte</b>		<b>5</b>			<b>14</b>	
<b>Standardfehler</b>		<b>1.0</b>			<b>0.40</b>	

**Tabelle 23** EC-Messwerte (2004/2005 und 2009/2010), Modellwerte (2005, 2010) und Differenzen zwischen Modell- und Messwerten. Die untersten fünf Zeilen geben Auskunft über Qualität des Zusammenhangs zwischen Modell- und Messwerten (siehe Text).

In Figur 40 sind Scatter- und Residuenplot 2010 dargestellt.

- › Die Residuen zeigen keine systematische Abweichung, die Hälfte der Modellwerte überschätzt, die andere Hälfte unterschätzt die Messwerte.
- › Modellunsicherheit: Im Jahr 2010 liegen ca. 68% (9 von 14) Messwerten innerhalb des Intervalls [lower, upper] mit lower = Modellwert / 1.50 und upper = 1.50 \* Modellwert. Unter der Annahme, die gemessenen Werte seien exakt, kann daraus eine Modellunsicherheit von 50% (Standardabweichung) abgeleitet werden. Diese ist deutlich höher als beim PM10, was zu erwarten ist, weil EC eine Teilmenge des PM10 ist und mit der Bestimmung der EC-Anteile zusätzliche Unsicherheiten auftreten.



Figur 40 Scatterplot (oben) und Residuenplot (unten) für EC im Jahr 2010.

## ANNEX

## A1. ANTEIL DER PM2.5- UND DER EC-EMISSIONEN

<b>ANTEIL PM2.5- AN DEN PM10-EMISSIONEN</b>					
<b>Haupt- und Quellengruppe</b>	<b>exh./ nonexh.</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>
<b>Verkehr</b>					
Strassenverkehr Link hot	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Strassenverkehr Tunnel	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Zonenverkehr hot	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Zonenverkehr Start	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Schiene	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Schiffe	exhaust	0.00	0.00	0.00	0.00
Luftfahrt (nur zivil)	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Strassenverkehr Link hot	nonexhaust	0.15	0.15	0.15	0.15
Strassenverkehr Tunnel	nonexhaust	0.15	0.15	0.15	0.15
Zonenverkehr hot	nonexhaust	0.15	0.15	0.15	0.15
Schiene	nonexhaust	0.17	0.16	0.16	0.15
Schiffe	nonexhaust	0.00	0.00	0.00	0.00
Luftfahrt (nur zivil)	nonexhaust	0.19	0.22	0.26	0.29
<b>Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen</b>					
HH, Gew., DL (nicht Holz)	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
HH, Gew., DL (Holz)	exhaust	0.87	0.87	0.87	0.87
Garten, Hobby	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>Industrie</b>					
Baumaschinen	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Industrielle Fahrzeuge	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Baumaschinen	nonexhaust	0.25	0.21	0.18	0.17
Industrielle Fahrzeuge	nonexhaust	0.25	0.21	0.18	0.17
Industrie, Flächenquellen	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Industrie, Punktquellen bis 80m	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Industrie, Punktquellen >= 80m	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Industrie, Flächenquellen	nonexhaust	0.46	0.44	0.44	0.45
Industrie, Punktquellen bis 80m	nonexhaust	0.46	0.44	0.44	0.45
<b>Land-/Forstwirtschaft</b>					
Landwirtschaftl. Fhrz	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Forstwirtschaftl. Fhrz.	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Landwirtschaftl. Fhrz	nonexhaust	0.23	0.22	0.20	0.18
Forstwirtschaftl. Fhrz.	nonexhaust	0.23	0.22	0.20	0.18
Landwirtschaft, Feuerungen	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Landwirtschaft, Tiere, Kulturen, Böden	nonexhaust	0.15	0.15	0.15	0.15
Landwirtschaft, offene Verbrennung	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00
Forstwirtschaft, offene Verbrennung	exhaust	1.00	1.00	1.00	1.00

**Tabelle 24** PM2.5 Anteile („k-Werte“) am PM10 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Die Unterscheidung nach Höhen (z.B. bei den Haushalts- und Dienstleistungsfeuerungen) dient der Immissionsmodellierung. Quellenhinweise: FOEN (2011a).

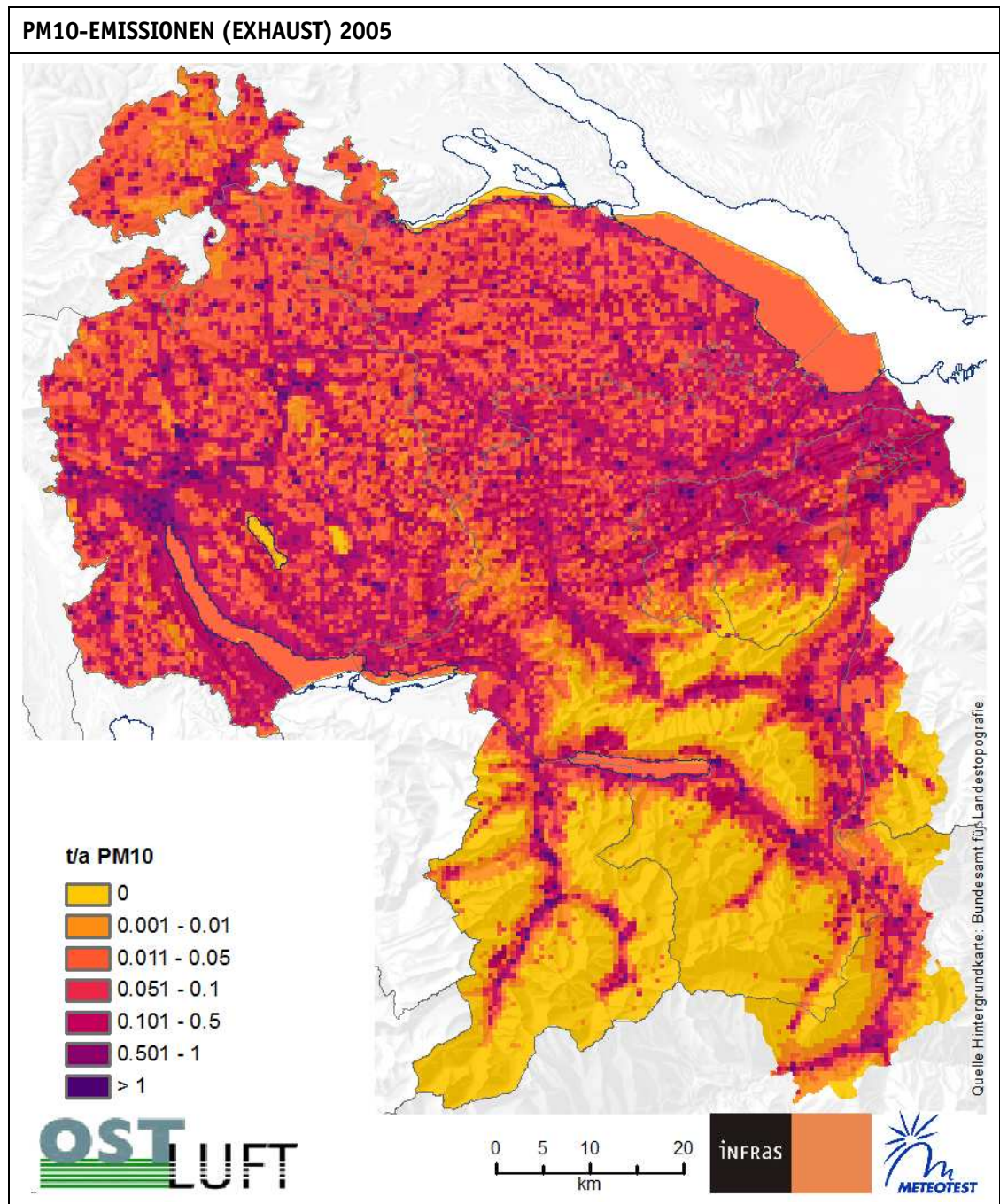


Für die Immissionsmodellierung muss der Anteil PM2.5 für weitere Kategorien festgelegt werden: Importierte Immission aus dem Ausland (und der übrigen Schweiz): 0.5. Immissions-Grid Schiffsverkehr (FOEN 2013): 1.0. (ausschliesslich Verbrennungspartikel). Für primäre Partikel aus natürlichen Quellen wird angenommen, der Anteil betrage 1.0.

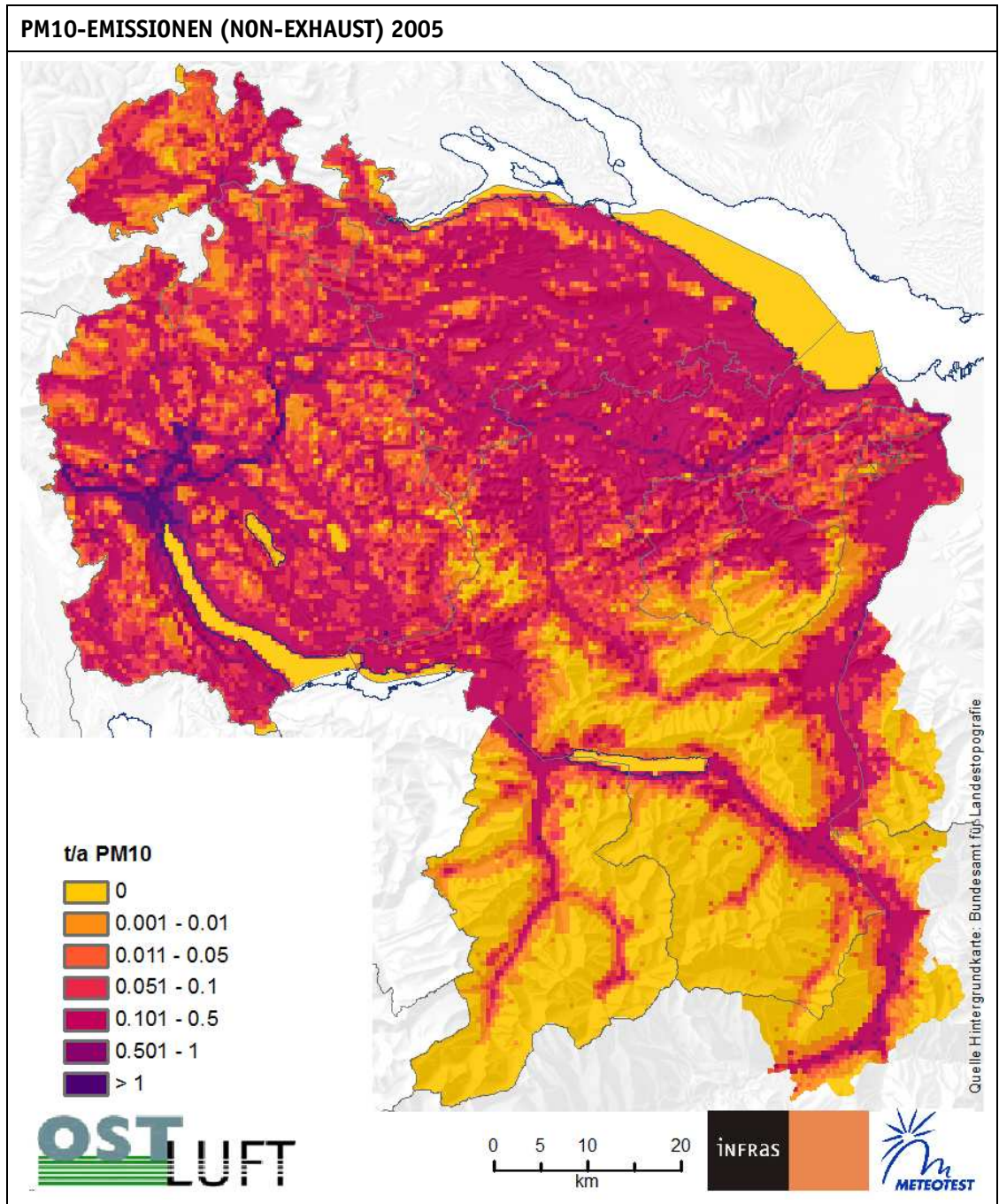
<b>ANTEIL EC- AN DEN PM2.5-EMISSIONEN</b>					
<b>Haupt- und Quellengruppe</b>	<b>exh./ nonexh.</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>
<b>Verkehr</b>					
Strassenverkehr Link hot	exhaust	0.54	0.56	0.47	0.28
Strassenverkehr Tunnel	exhaust	0.54	0.56	0.47	0.28
Zonenverkehr hot	exhaust	0.54	0.56	0.47	0.28
Zonenverkehr Start	exhaust	0.54	0.56	0.47	0.28
Schiene	exhaust	0.42	0.42	0.39	0.35
Schiffe	exhaust	0.42	0.42	0.39	0.35
Luftfahrt (nur zivil)	exhaust	0.54	0.56	0.47	0.28
Strassenverkehr Link hot	nonexhaust	0.07	0.07	0.07	0.07
Strassenverkehr Tunnel	nonexhaust	0.07	0.07	0.07	0.07
Zonenverkehr hot	nonexhaust	0.07	0.07	0.07	0.07
Schiene	nonexhaust	0.00	0.00	0.00	0.00
Schiffe	nonexhaust	0.00	0.00	0.00	0.00
Luftfahrt (nur zivil)	nonexhaust	0.29	0.29	0.29	0.29
<b>Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen</b>					
HH, Gew., DL (nicht Holz)	exhaust	0.07	0.07	0.07	0.07
HH, Gew., DL (Holz)	exhaust	0.21	0.21	0.21	0.21
Garten, Hobby	exhaust	0.15	0.15	0.15	0.15
<b>Industrie</b>					
Baumaschinen	exhaust	0.42	0.42	0.39	0.35
Industrielle Fahrzeuge	exhaust	0.42	0.42	0.39	0.35
Baumaschinen	nonexhaust	0.06	0.06	0.06	0.06
Industrielle Fahrzeuge	nonexhaust	0.06	0.06	0.06	0.06
Industrie, Flächenquellen	exhaust	0.02	0.02	0.02	0.02
Industrie, Punktquellen bis 80m	exhaust	0.02	0.02	0.02	0.02
Industrie, Punktquellen >= 80m	exhaust	0.02	0.02	0.02	0.02
Industrie, Flächenquellen	nonexhaust	0.00	0.00	0.00	0.00
Industrie, Punktquellen bis 80m	nonexhaust	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Land-/Forstwirtschaft</b>					
Landwirtschaftl. Fhrz	exhaust	0.42	0.42	0.39	0.35
Forstwirtschaftl. Fhrz.	exhaust	0.42	0.42	0.39	0.35
Landwirtschaftl. Fhrz	nonexhaust	0.06	0.06	0.06	0.06
Forstwirtschaftl. Fhrz.	nonexhaust	0.06	0.06	0.06	0.06
Landwirtschaft, Feuerungen	exhaust	0.21	0.21	0.21	0.21
Landwirtschaft, Tiere, Kulturen, Böden	nonexhaust	0.00	0.00	0.00	0.00
Landwirtschaft, offene Verbrennung	exhaust	0.21	0.21	0.21	0.21
Forstwirtschaft, offene Verbrennung	exhaust	0.21	0.21	0.21	0.21

**Tabelle 25** EC-Anteile am PM2.5 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Die Unterscheidung nach Höhen (z.B. bei den Haushalts- und Dienstleistungsfeuerungen) dient der Immissionsmodellierung. Quellenhinweise: IIASA (2010): Exhaust-Emissionen aus Strassenverkehr und aus allen Off-road Fahrzeugen, alle Feuerungen. Reff (2009): Non-exhaust-Emissionen Strassenverkehr, Off-road Fzge. Pneuabrieb Luftverkehr.

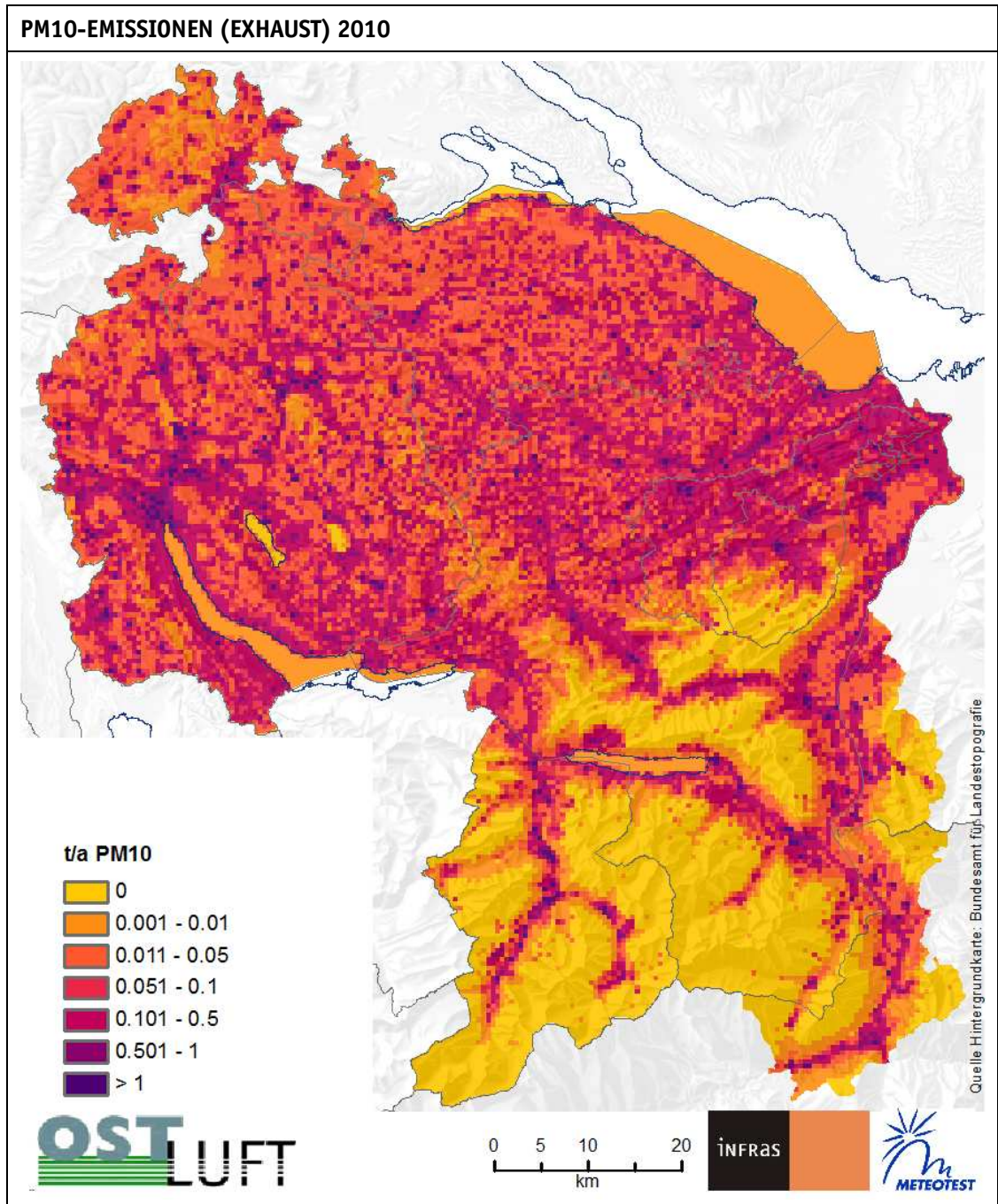
## A2. EMISSIONSKARTEN 2005–2020



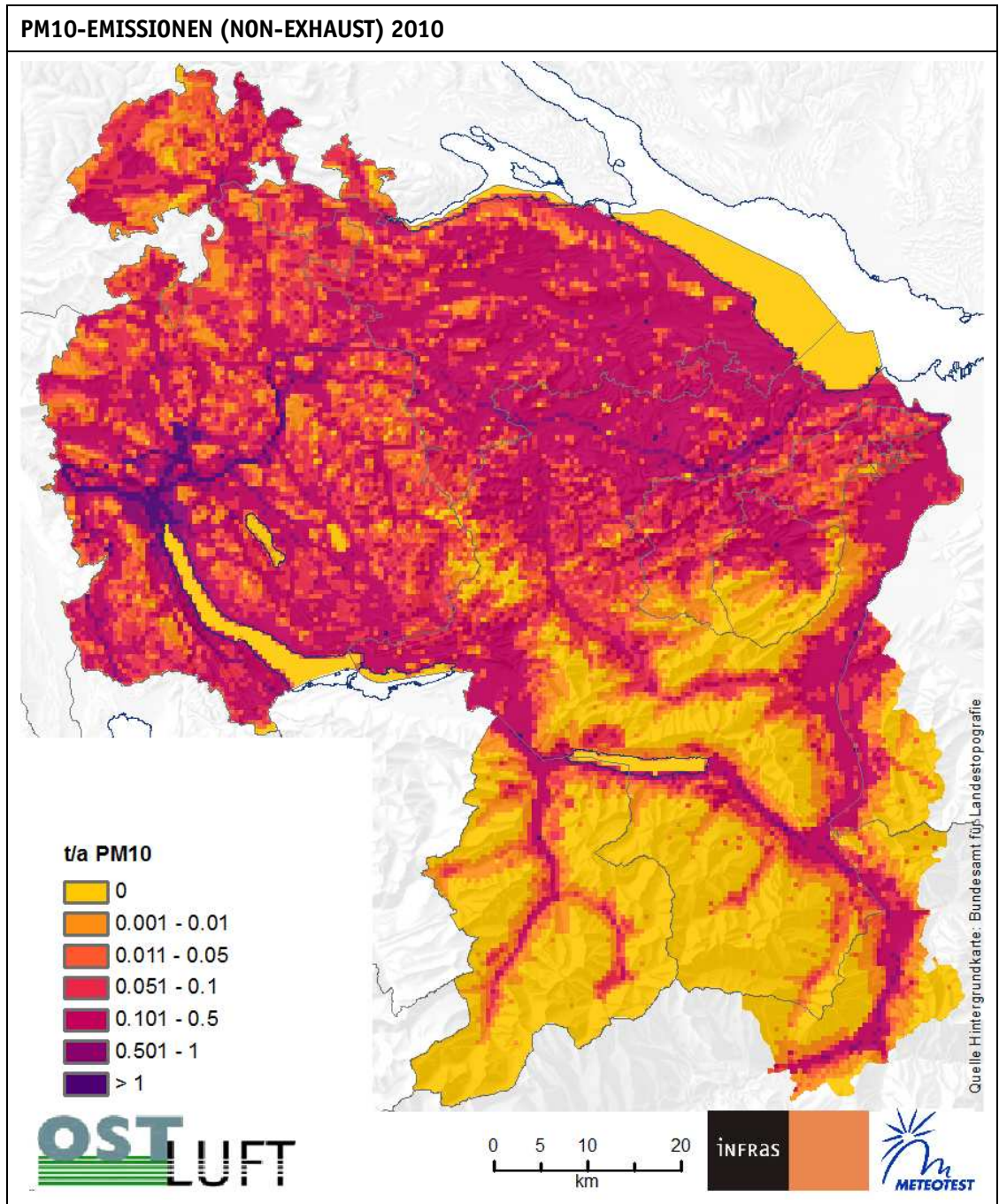
**Figur 41** Summe der PM10-Emissionen 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



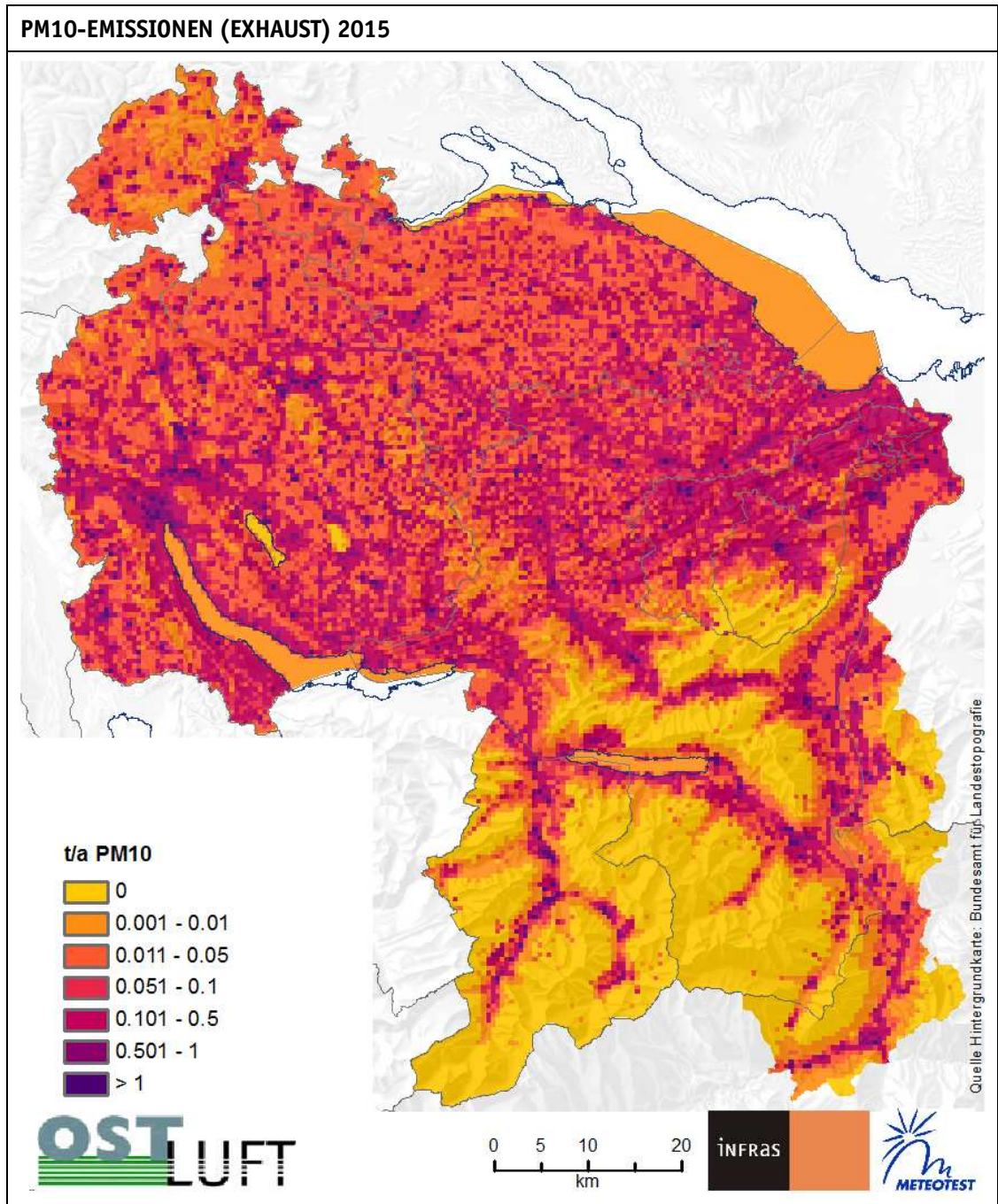
Figur 42 Summe der PM10-Emissionen 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



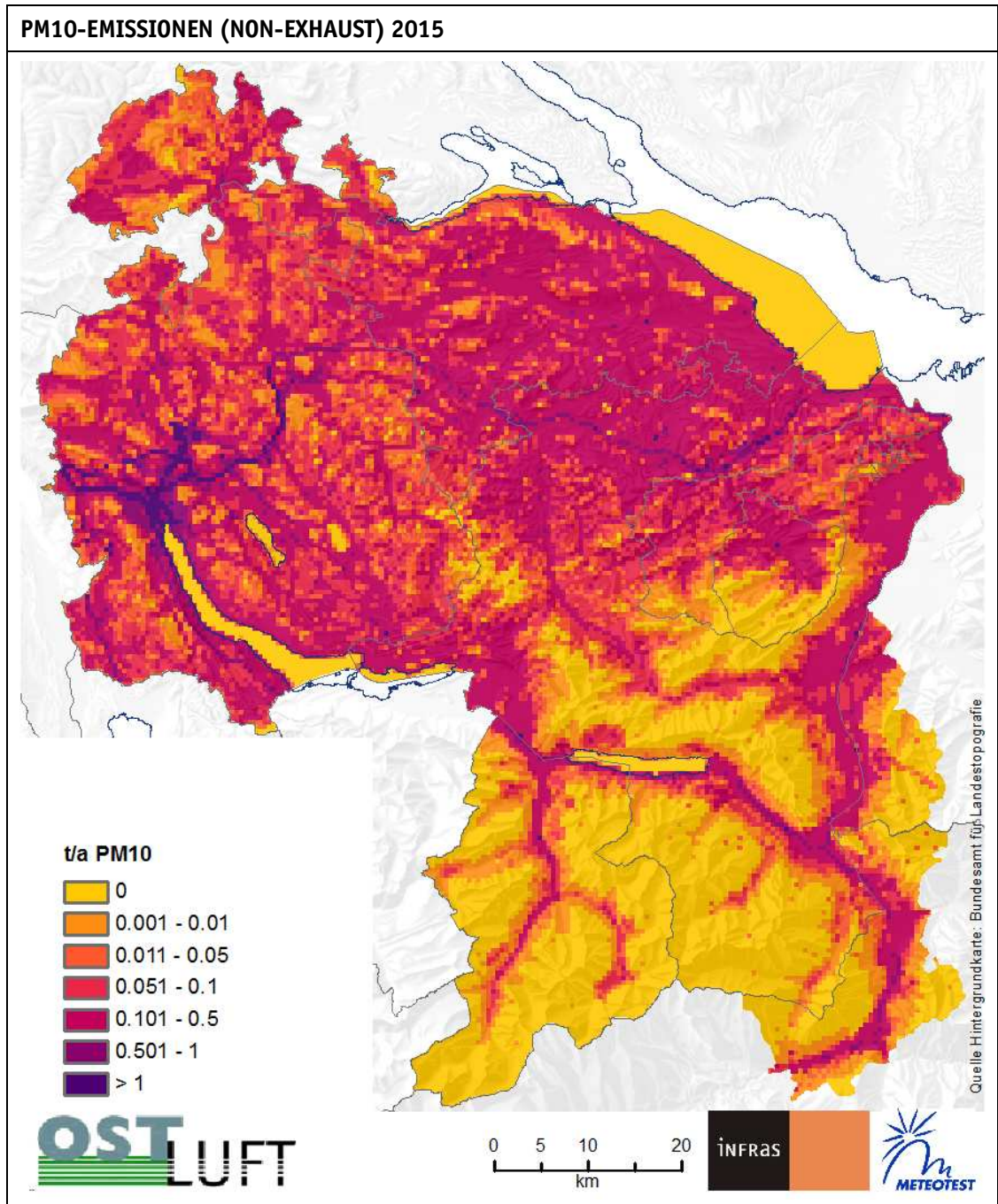
**Figur 43** Summe der PM10-Emissionen 2010 (exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



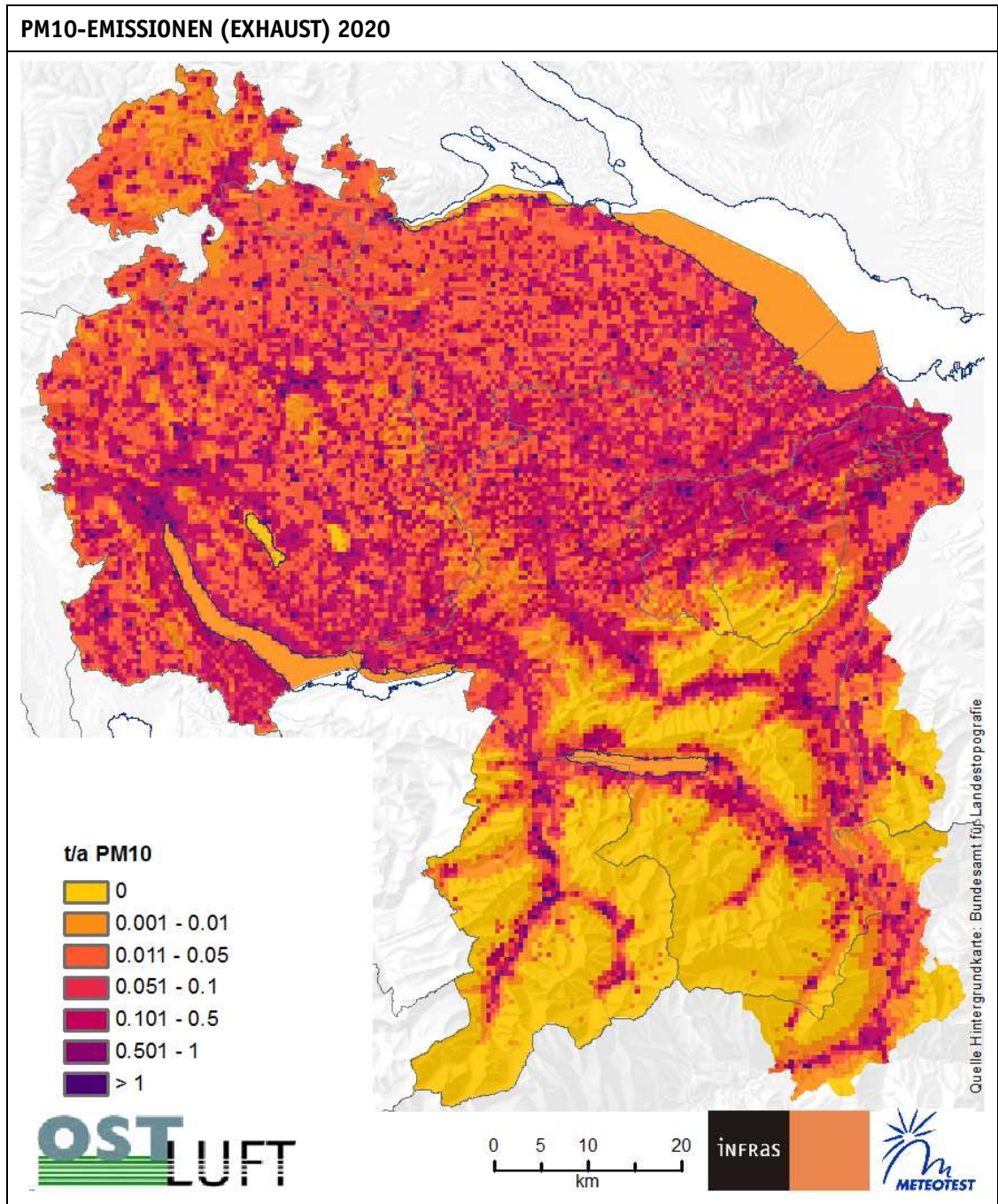
**Figur 44** Summe der PM10-Emissionen 2010 (non-exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



**Figur 45** Summe der PM10-Emissionen 2015 (exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.

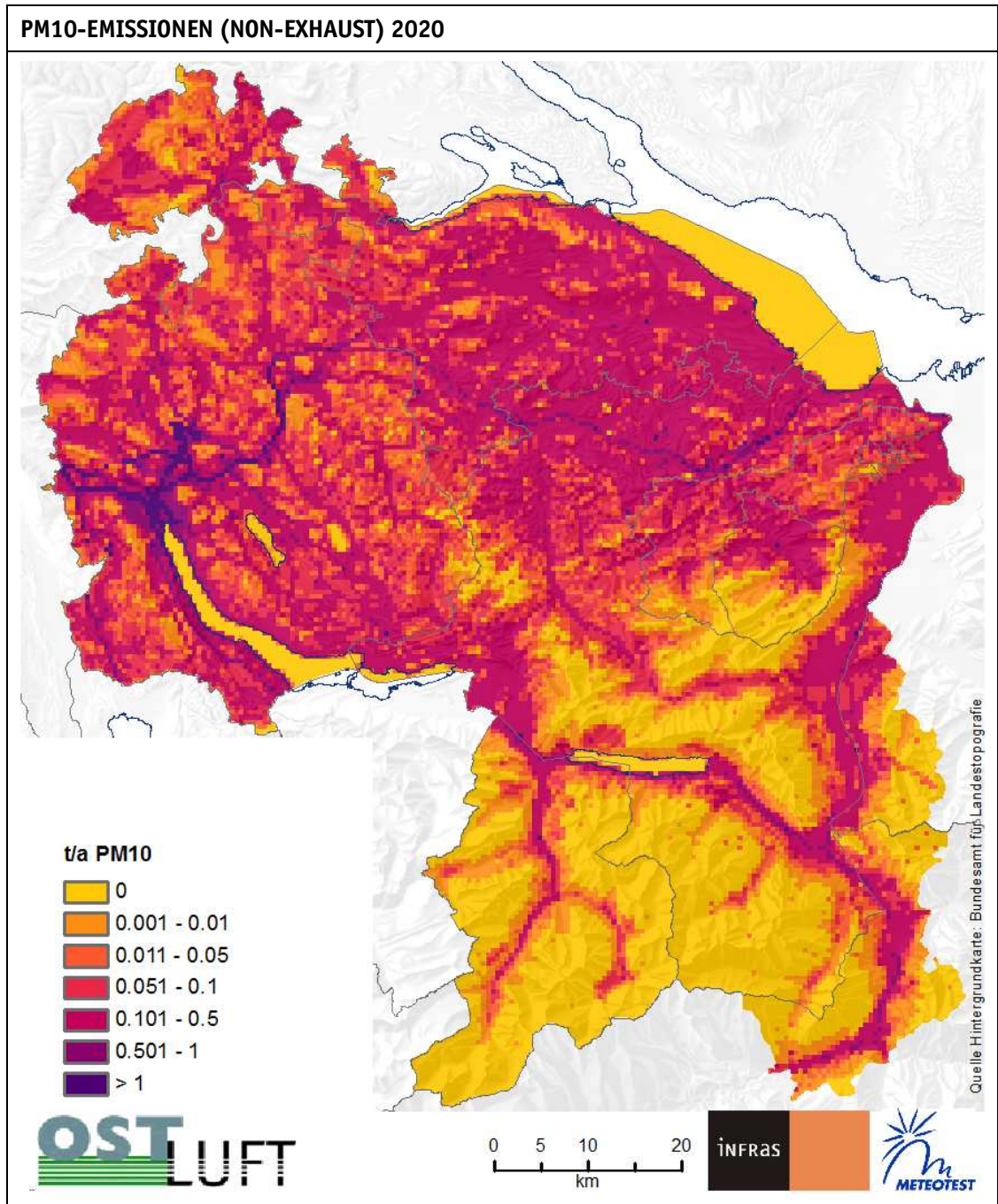


**Figur 46** Summe der PM10-Emissionen 2015 (non-exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.

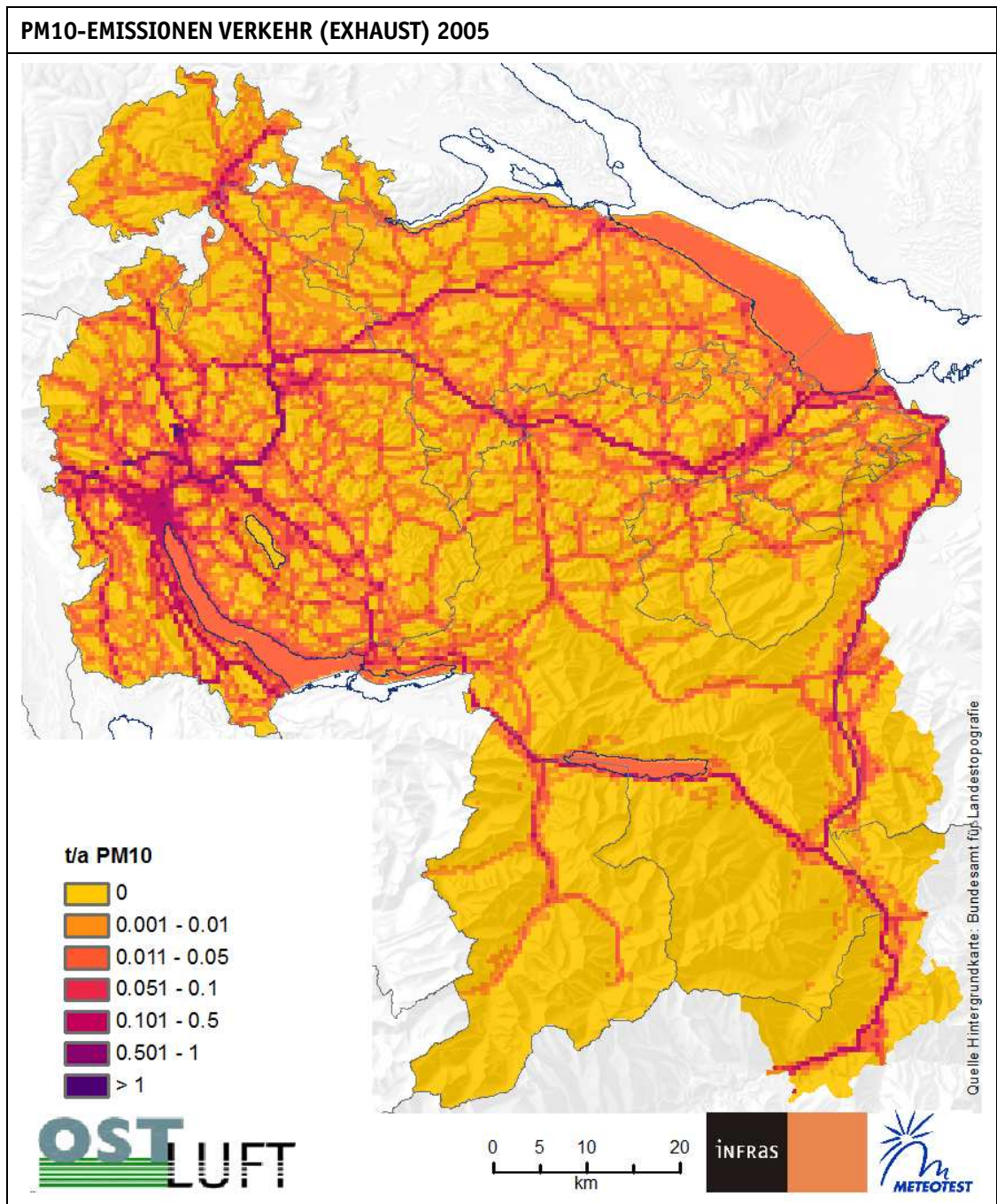


**Figur 47** Summe der PM10-Emissionen 2020 (exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.

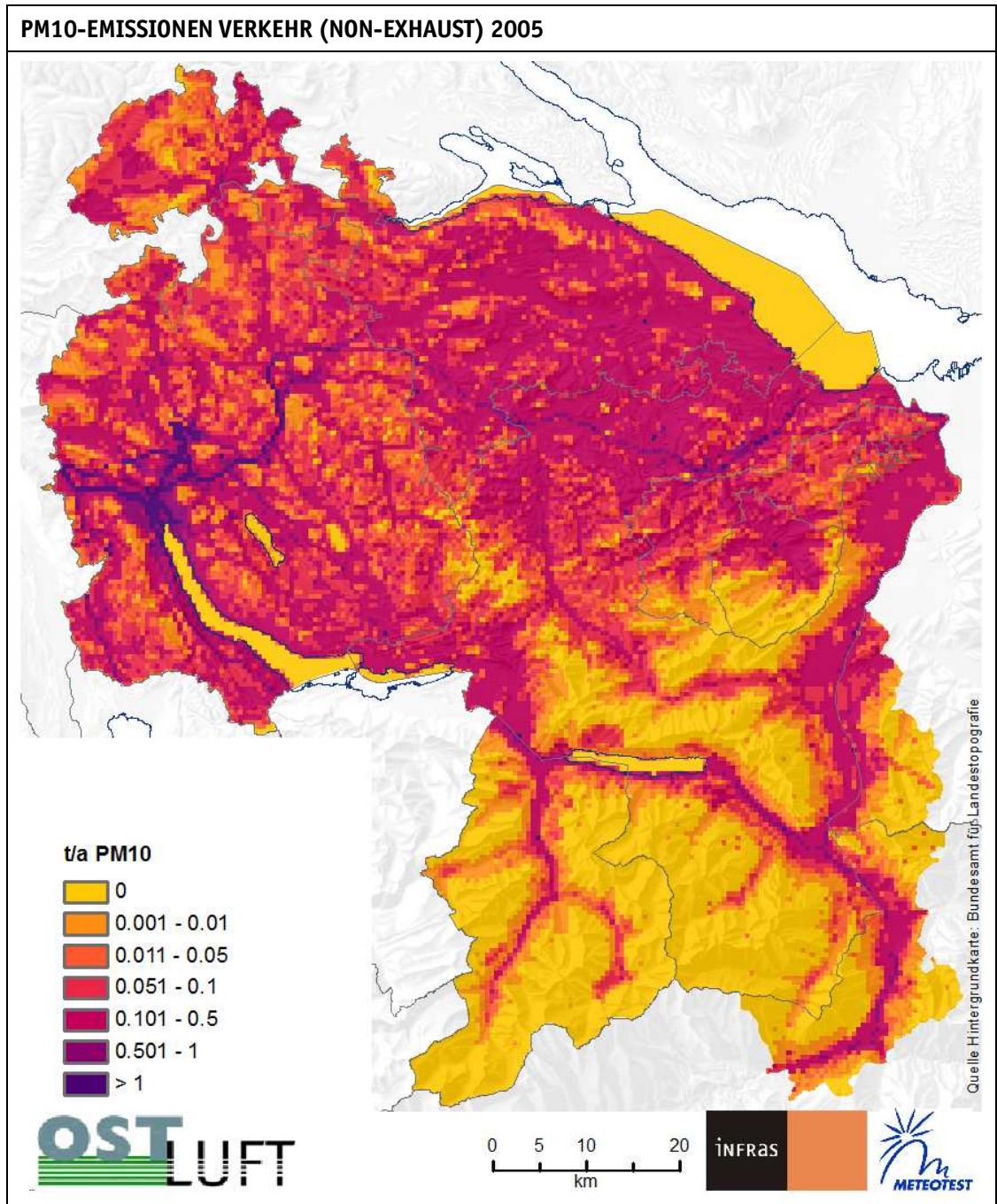




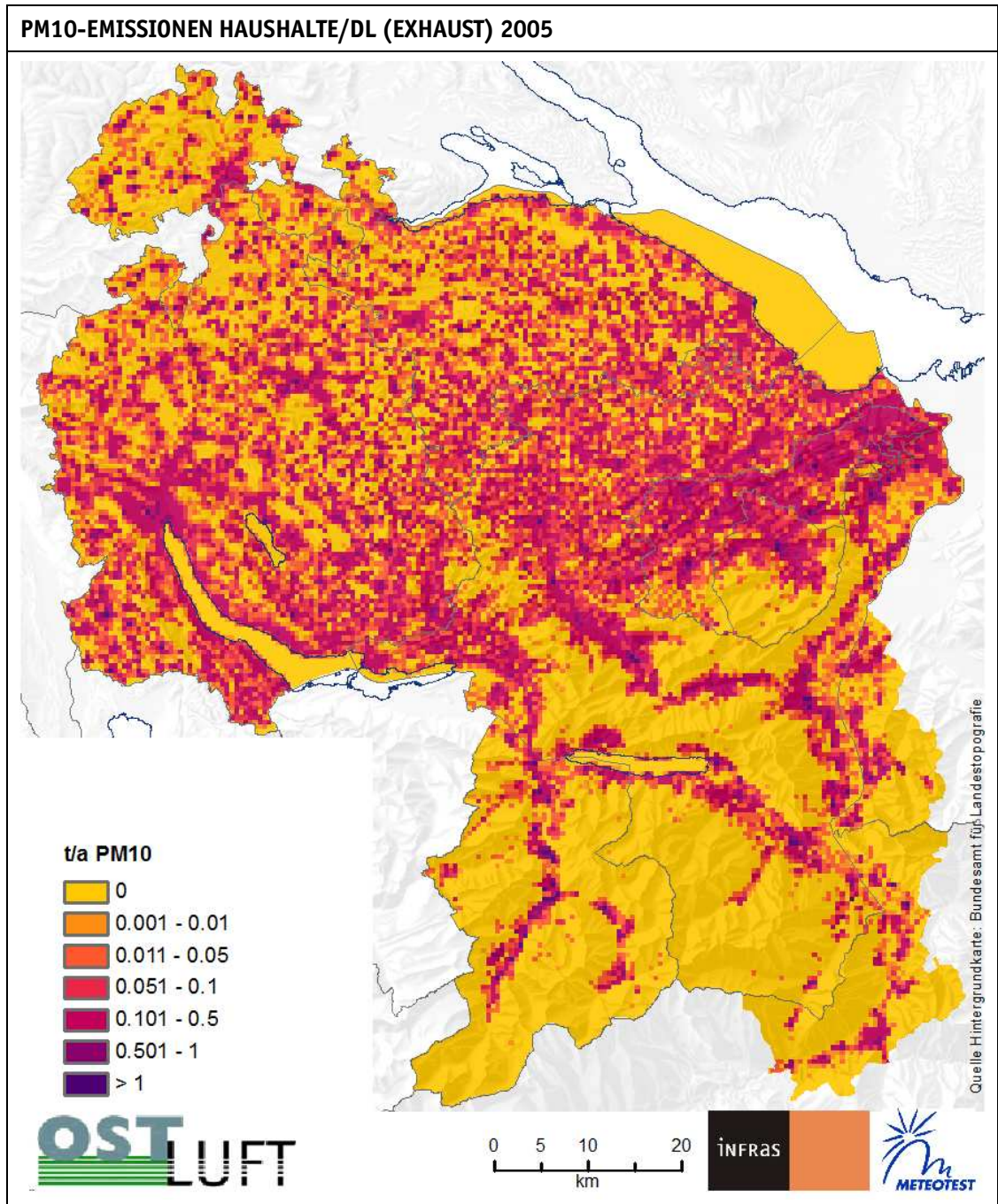
**Figur 48** Summe der PM10-Emissionen 2020 (non-exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



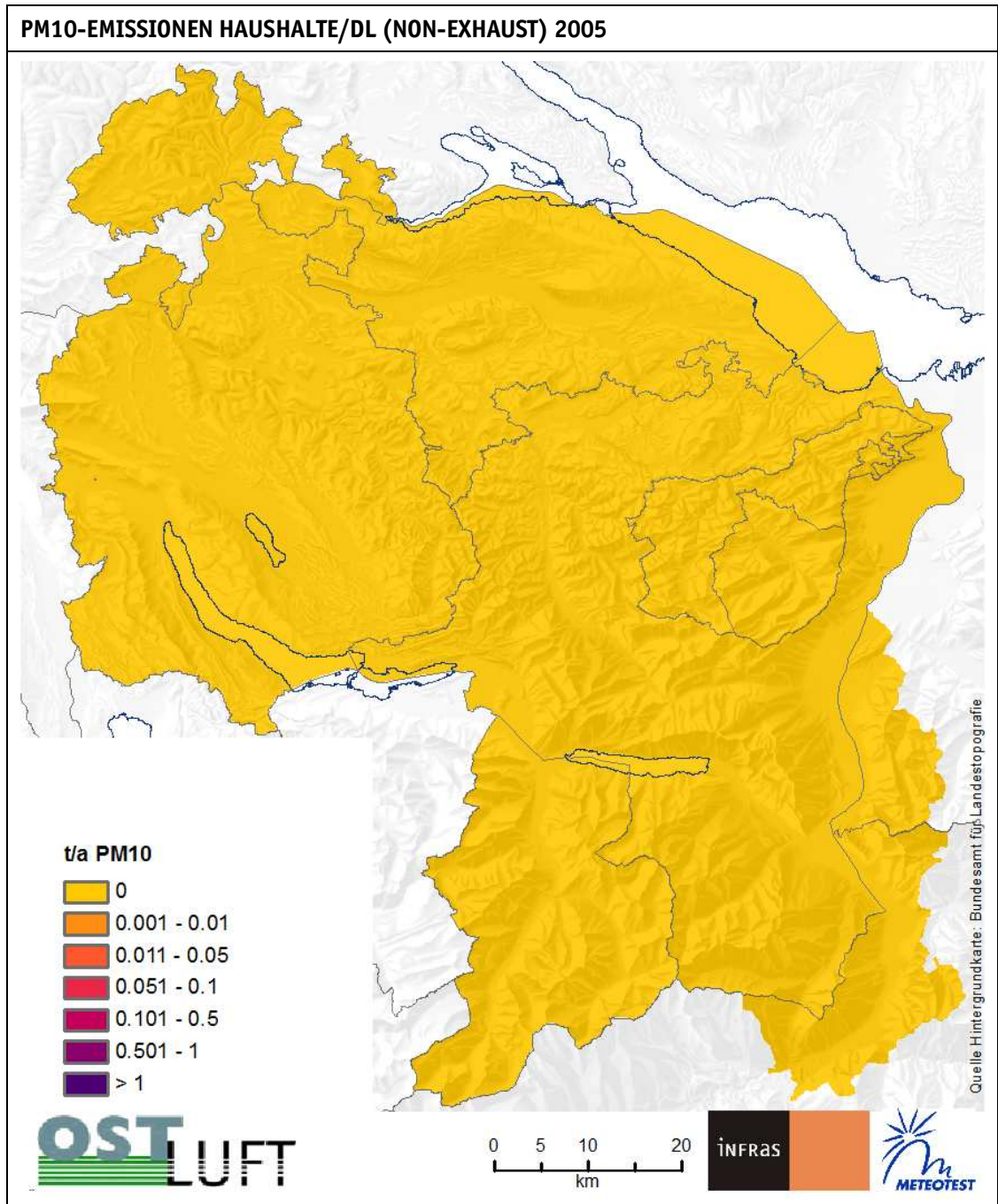
**Figur 49** PM10-Emissionen Verkehr 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



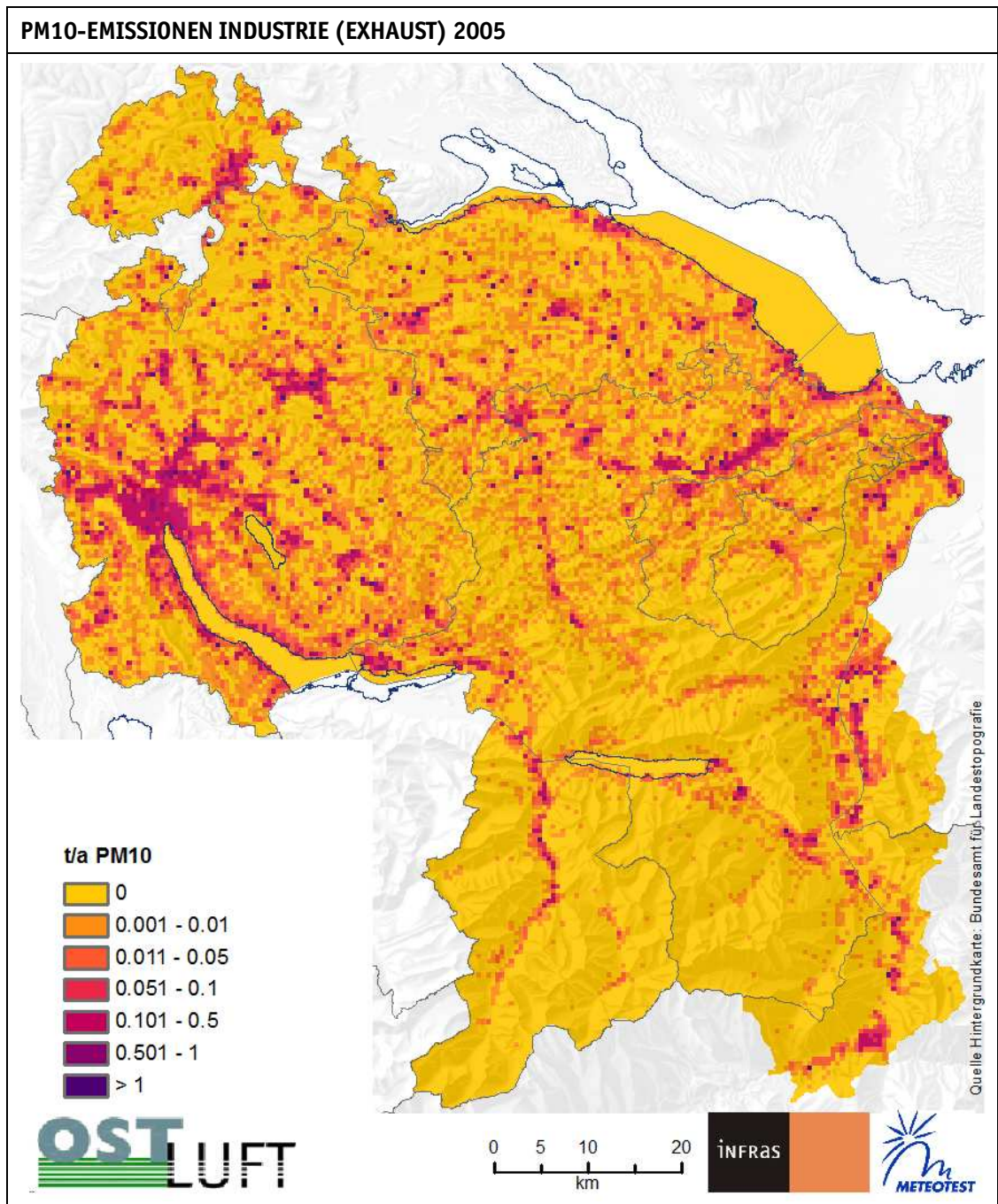
Figur 50 PM10-Emissionen Verkehr 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



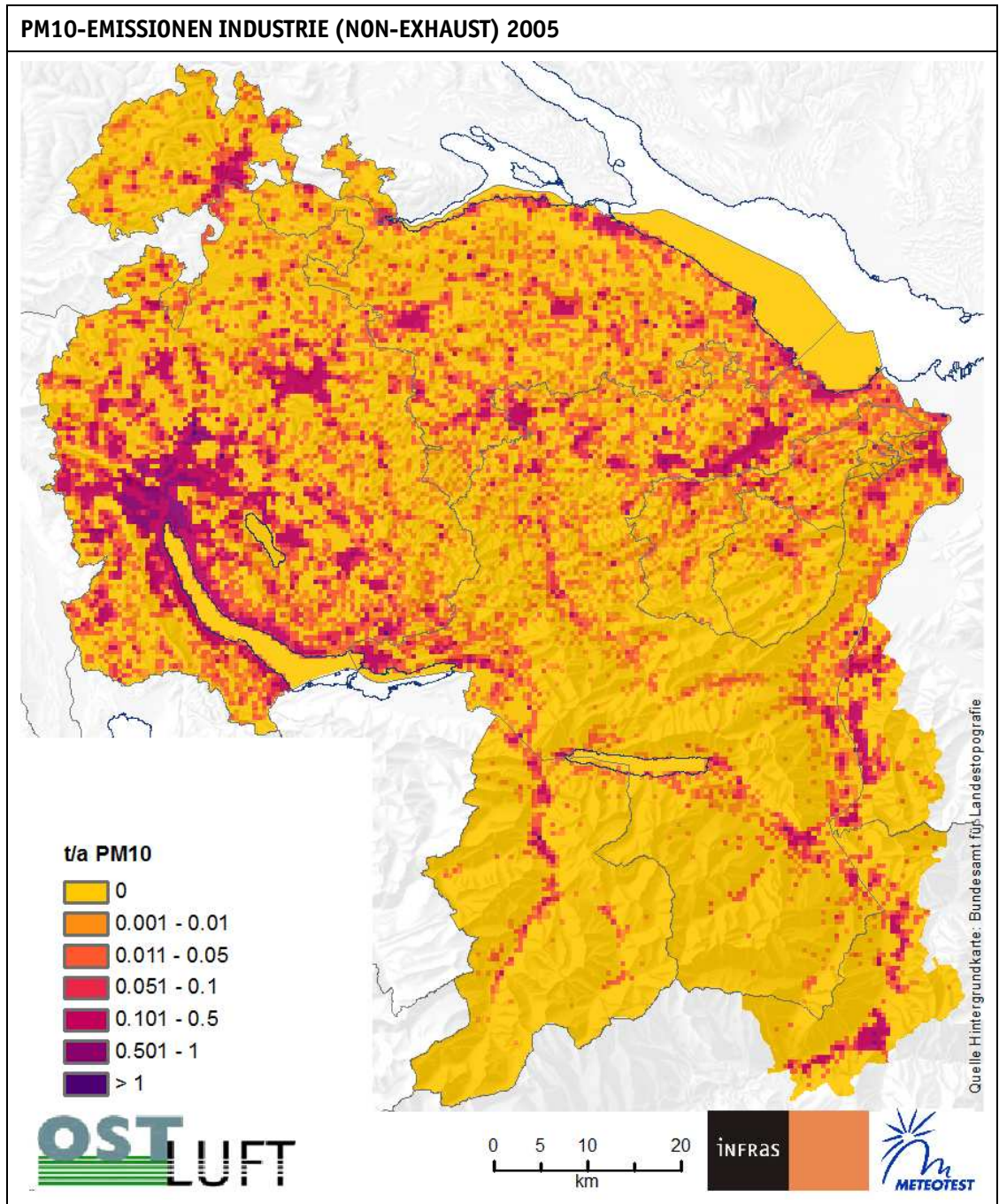
**Figur 51** PM10-Emissionen Haushalte/Dienstleistungen 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



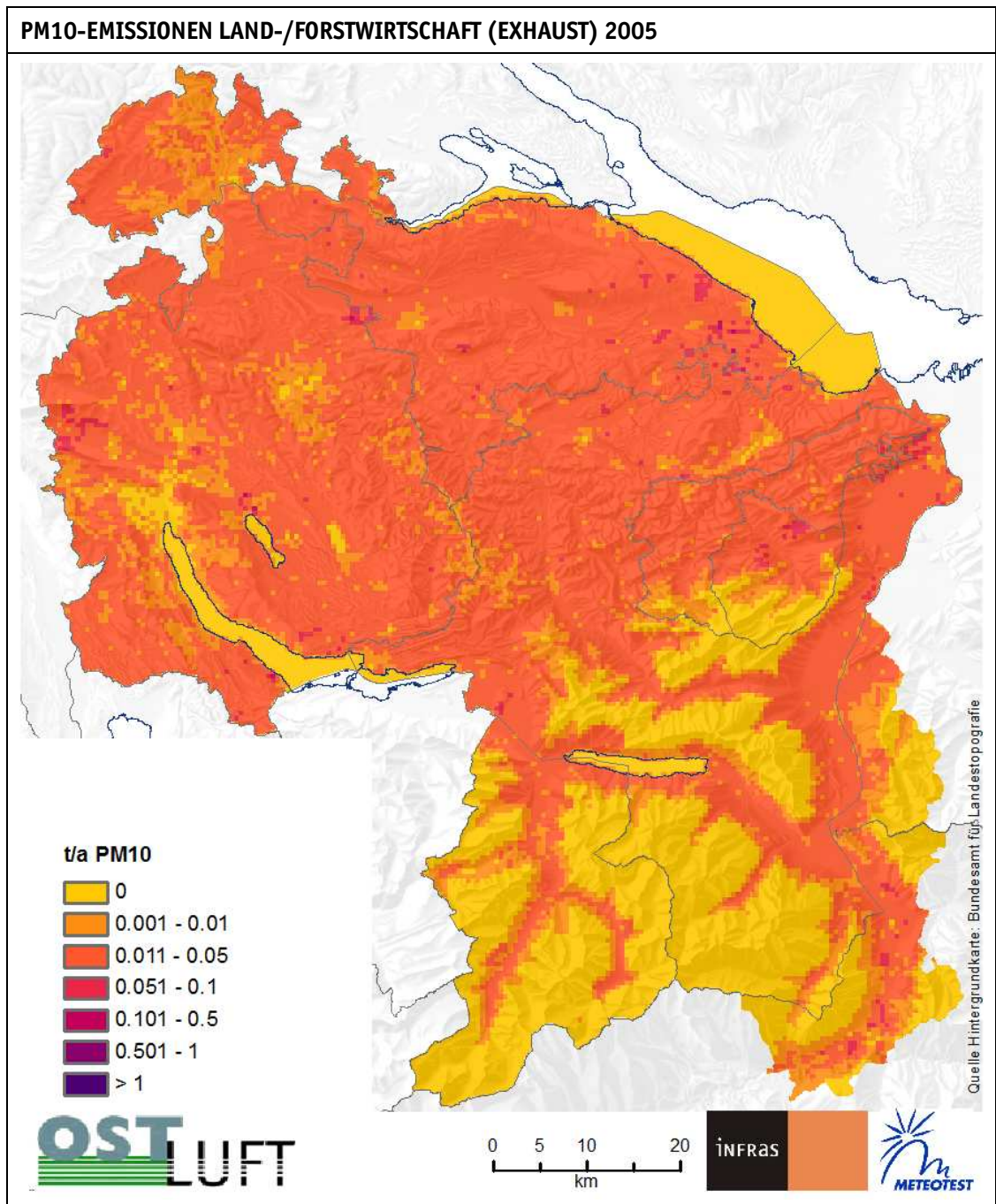
Figur 52 PM10-Emissionen Haushalte/Dienstleistungen 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



**Figur 53** PM10-Emissionen Industrie 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.

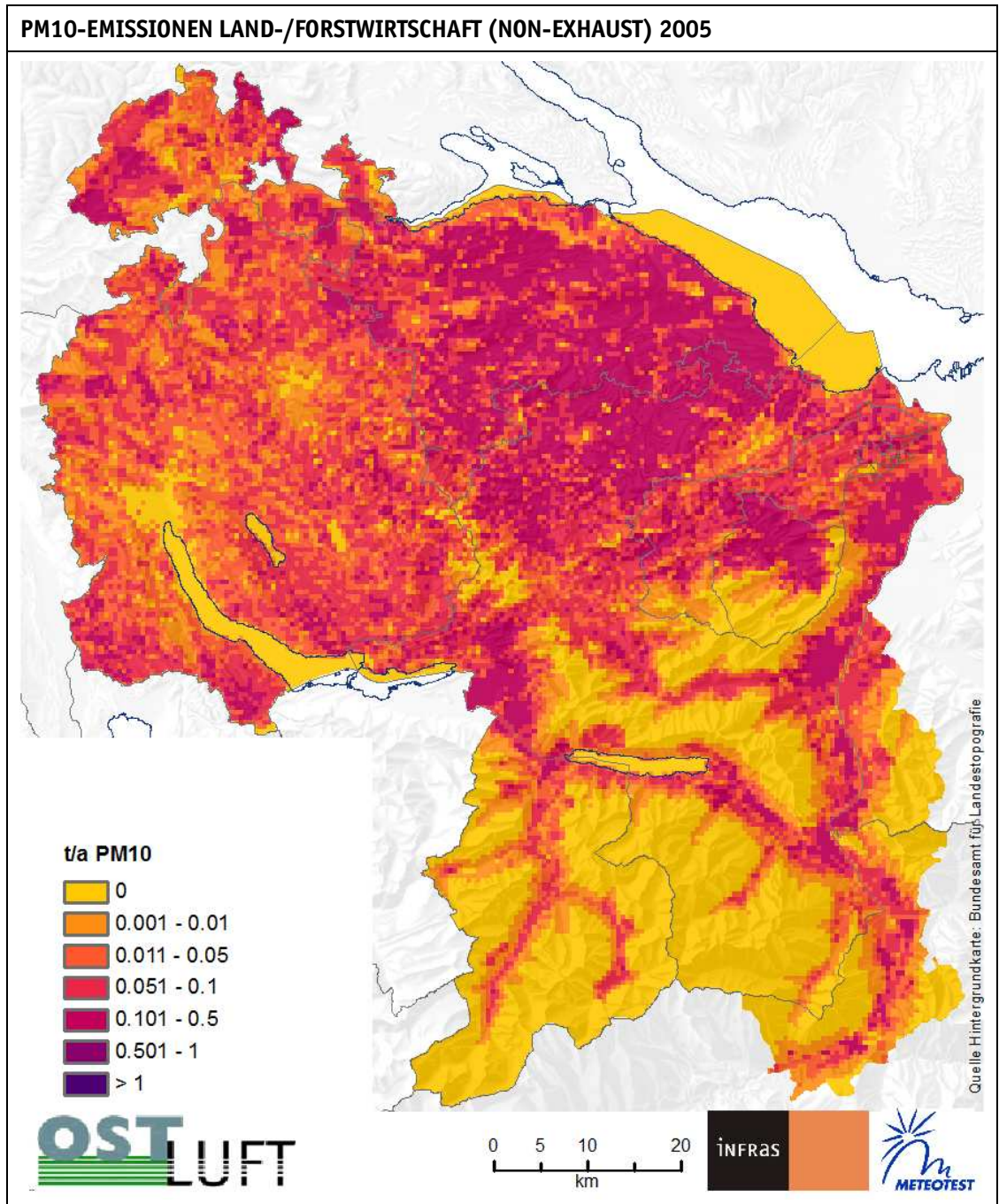


Figur 54 PM10-Emissionen Industrie 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.



Figur 55 PM10-Emissionen Land-/Forstwirtschaft 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.





Figur 56 PM10-Emissionen Land-/Forstwirtschaft 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.

## VERZEICHNIS DER FIGUREN

<b>Figur 1</b> Jahresmittelwert PM10–Immissionen 2010. Räumliche Auflösung: 1 ha.....	5
<b>Figur 2</b> Ablaufschema Feinstaub-Immissionsmodell OSTLUFT.....	8
<b>Figur 3</b> Das für die OSTLUFT-Verkehrsmodellierung berücksichtigte Strassennetz 2010. ....	12
<b>Figur 4</b> Europäische PM10-Emissionen (Quelle TNO 2010). ....	19
<b>Figur 5</b> Entwicklung der PM10-Emissionen (exhaust plus non-exhaust) im OSTLUFT-Gebiet 2005–2020 nach den Sektoren.....	22
<b>Figur 6</b> PM10-Emissionen (exhaust plus non-exhaust) OSTLUFT: Anteile der Sektoren 2005–2020.	22
<b>Figur 7</b> Summe der PM10-Emissionen exhaust 2010. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km.....	27
<b>Figur 8</b> Summe der PM10-Emissionen non-exhaust 2010. Räumliche Auflösung 0.5 km x 0.5 km. ..	28
<b>Figur 9</b> Definition der Windregionen des OSTLUFT Gebiets. Wo die Windregion „Alpentäl“ in „Mittelland“ übergeht, wird eine abgestufte Ausbreitung angewendet (siehe Text) .....	31
<b>Figur 10</b> Nitrat-, Sulfat- und Ammoniumkonzentration in Funktion der Höhe über Meer. ....	37
<b>Figur 11</b> Primäres PM10 aus dem Verkehr im OSTLUFT-Gebiet 2005: Strassen-, Schienen-, Schiffs-, Luftverkehr. Räumliche Auflösung: 1 ha. ....	41
<b>Figur 12</b> Primäres PM10 aus Haushalten und Dienstleistungsbetrieben im OSTLUFT-Gebiet 2005: Räumliche Auflösung: 1 ha. ....	42
<b>Figur 13.</b> Primäres PM10 aus der Industrie im OSTLUFT-Gebiet 2005: Räumliche Auflösung: 1 ha... ..	43
<b>Figur 14</b> Primäres PM10 aus Land- und Forstwirtschaft im OSTLUFT-Gebiet 2005. Räumliche Auflösung: 1 ha. ....	44
<b>Figur 15</b> Import von primärem PM10 (Summe aller Quellen) aus der übrigen Schweiz ins OSTLUFT-Gebiet im Jahr 2005. Räumliche Auflösung: 1 ha. ....	45
<b>Figur 16</b> Import von primärem PM10 (Summe aller Quellen) aus dem benachbarten Ausland ins OSTLUFT-Gebiet im Jahr 2005. Räumliche Auflösung: 1 ha.....	46
<b>Figur 17</b> Summe von Nitrat-, Sulfat- und Ammonium-Anteilen im PM10 2005. Räumliche Auflösung: 1 ha. Die Anteile sind im Mittelland: Nitrat 41%, Sulfat 34% und Ammonium 25%.....	47
<b>Figur 18</b> Sekundäre organische Anteile im PM10 2005 (SOA). Räumliche Auflösung: 1 ha. ....	49
<b>Figur 19</b> PM10 Immissionen 2005. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	51
<b>Figur 20</b> PM10 Immissionen 2010. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	52
<b>Figur 21</b> PM10 Immissionen 2015. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	53
<b>Figur 22</b> PM10 Immissionen 2020. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	54
<b>Figur 23</b> PM2.5 Immissionen 2005. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	55
<b>Figur 24</b> PM2.5- Anteil an den PM10-Immissionen 2005. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	56
<b>Figur 25</b> PM2.5-Immissionen 2010. Räumliche Auflösung 1 ha.....	57
<b>Figur 26</b> PM2.5-Anteil an den PM10-Immissionen 2010. Räumliche Auflösung 1 ha.....	58
<b>Figur 27</b> PM2.5-Immissionen 2010. Räumliche Auflösung 1 ha.....	59
<b>Figur 28</b> PM2.5-Anteil an den PM10-Immissionen 2015. Räumliche Auflösung 1 ha.....	60
<b>Figur 29</b> PM2.5-Immissionen 2010. Räumliche Auflösung 1 ha.....	61
<b>Figur 31</b> EC-Immissionen im Jahr 2005. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	63
<b>Figur 32</b> EC-Immissionen im Jahr 2010. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	64

<b>Figur 33</b> EC-Immissionen im Jahr 2015. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	65
<b>Figur 34</b> EC-Immissionen im Jahr 2020. Räumliche Auflösung 1 ha. ....	66
<b>Figur 35</b> Die Bevölkerungsexposition für PM10 zeigt den Anteil an der Gesamtbevölkerung des Ostluft-Gebietes pro Immissionsklasse ( $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) für 2005, 2010, 2015, 2020. Die Farbe der Kurve zeigt das Jahr an. Lesebeispiel: Im Jahr 2005 (rote Kurve) leben ca. 20% der Bevölkerung an einem Wohnort mit einem Jahresdurchschnitt von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10. (100% entsprechen 2.39 Mio. Einwohner.) .....	67
<b>Figur 36</b> Die Bevölkerungsexposition für PM2.5 zeigt den Anteil an der Gesamtbevölkerung des Ostluft-Gebietes pro Immissionsklasse ( $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) für 2005, 2010, 2015, 2020. Siehe auch Figur 35. (100% entsprechen 2.39 Mio Einwohner). ....	69
<b>Figur 37</b> Die Bevölkerungsexposition für EC zeigt den Anteil an der Gesamtbevölkerung des Ostluft-Gebietes pro Immissionsklasse ( $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) für 2005, 2010, 2015, 2020. Siehe auch Figur 35. (100% entsprechen 2.39 Mio Einwohner). ....	70
<b>Figur 38</b> Scatterplot (links) und Residuenplot (rechts) für PM10 im Jahr 2005. ....	75
<b>Figur 39</b> Scatterplot (oben) und Residuenplot (unten) für PM10 im Jahr 2010. ....	76
<b>Figur 40</b> Scatterplot (oben) und Residuenplot (unten) für EC im Jahr 2010. ....	79
<b>Figur 41</b> Summe der PM10-Emissionen 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	82
<b>Figur 42</b> Summe der PM10-Emissionen 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	83
<b>Figur 43</b> Summe der PM10-Emissionen 2010 (exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	84
<b>Figur 44</b> Summe der PM10-Emissionen 2010 (non-exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	85
<b>Figur 45</b> Summe der PM10-Emissionen 2015 (exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	86
<b>Figur 46</b> Summe der PM10-Emissionen 2015 (non-exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	87
<b>Figur 47</b> Summe der PM10-Emissionen 2020 (exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	88
<b>Figur 48</b> Summe der PM10-Emissionen 2020 (non-exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	89
<b>Figur 49</b> PM10-Emissionen Verkehr 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	90
<b>Figur 50</b> PM10-Emissionen Verkehr 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ..	91
<b>Figur 51</b> PM10-Emissionen Haushalte/Dienstleistungen 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	92
<b>Figur 52</b> PM10-Emissionen Haushalte/Dienstleistungen 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	93
<b>Figur 53</b> PM10-Emissionen Industrie 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	94
<b>Figur 54</b> PM10-Emissionen Industrie 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	95
<b>Figur 55</b> PM10-Emissionen Land-/Forstwirtschaft 2005 (exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	96
<b>Figur 56</b> PM10-Emissionen Land-/Forstwirtschaft 2005 (non-exhaust). Räumliche Auflösung $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ . ....	97

## VERZEICHNIS DER TABELLEN

<b>Tabelle 1</b> Emissionsgrundlagen: Emissionsquellen, Berechnungsgrundlage der Emissionen. Abk. VM- UVEK Verkehrsmodell des UVEK, EMIS = Emissionsinformations-System Schweiz / Emissionsdatenbank des BAFU, GZ: Gebäudezählung der Schweiz, HH: Haushalte, DL: Dienstleistungen, BZ: Betriebszählung Schweiz. ....	11
<b>Tabelle 2</b> Zeitliche Entwicklung der Aktivitätsdaten Strassenverkehr bezogen auf den Basiszeitstand 2005 (INFRAS 2010). Folgende Aktivitäten wurden verwendet: Fahrleistungen (relevant für die Emissionen aus dem Fahrbetrieb), Anzahl Starts (relevant für Kaltstartemissionen). Fahrzeugkategorien: PW= Personenwagen, LI= Lieferwagen, SNF = schweres Nutzfahrzeuge.....	13
<b>Tabelle 3</b> Quellenangaben: Die PM10-Emissionen stammen von der Flughafen Zürich AG (2012), für PM2.5- Anteile siehe Tabelle 24 und für EC-Anteile siehe Tabelle 25. Weitere Erläuterungen siehe Text. ....	15
<b>Tabelle 4</b> Zeitentwicklung der Parameter, die für die Immissionsmodellierung relevant sind. Quellen: Emissionen LTO, APU, Pneubetrieb stammen aus FOEN (2011a), EC-Anteile siehe Tabelle 25 im Annex. ....	16
<b>Tabelle 5</b> Bilanz der PM10 Emissionen exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Unter den Holzfeuerungen (HH, Gew. DL) sind COC (condensable org. carbon) eingeschlossen. Die Unterscheidung nach Emissionshöhen bei „Industrie, Punktquellen“ dient der Immissionsmodellierung. Emissionen aus offener Verbrennung werden je hälftig der Land-/ und Forstwirtschaft zugewiesen. Verwendete Datengrundlagen siehe <b>Tabelle 1</b> . ....	20
<b>Tabelle 6</b> Bilanz der PM10 Emissionen non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. ....	21
<b>Tabelle 7</b> Bilanz der PM10 Emissionen exhaust plus non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. ....	21
<b>Tabelle 8</b> Bilanz der PM2.5 Emissionen exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Unter den Holzfeuerungen (HH, Gew. DL) sind COC (condensable org. carbon) eingeschlossen. Die Unterscheidung nach Emissionshöhen bei „Industrie, Punktquellen“ dient der Immissionsmodellierung. ....	23
<b>Tabelle 9</b> Bilanz der PM2.5 Emissionen non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. ....	24
<b>Tabelle 10</b> Bilanz der PM2.5 Emissionen exhaust plus non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. ....	24
<b>Tabelle 11</b> Bilanz der EC- Emissionen exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Unter den Holzfeuerungen (HH, Gew. DL) sind COC (condensable org. carbon) eingeschlossen. Die Unterscheidung nach Emissionshöhen bei „Industrie, Punktquellen“ dient der Immissionsmodellierung. ....	25
<b>Tabelle 12</b> Bilanz der EC-Emissionen non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. ....	26
<b>Tabelle 13</b> Bilanz der EC-Emissionen exhaust plus non-exhaust (t/a) für das OSTLUFT-Gebiet 2005–2020. ....	26
<b>Tabelle 14</b> Übersicht über PM10-, PM2.5- und EC-Emissionen und Emissionsanteile. ....	26
<b>Tabelle 15</b> Messwerte Nitrat, Sulfat, Ammonium und OM (OM wurde aus OC-Messdaten bestimmt durch Multiplikation mit dem Faktor 1.6). Quelle: Gianini (2012).....	35
<b>Tabelle 16</b> Modellwerte für das Konzentrationsniveau Nitrat, Sulfat und OM im Mittelland (alle Lagen tiefer 600 m).....	36

<b>Tabelle 17</b> OC-Anteile an den PM10-Emissionen (FOEN 2013).....	38
<b>Tabelle 18</b> Eckdaten der Bevölkerungsexposition PM10. Erläuterungen siehe Text. ....	68
<b>Tabelle 19</b> Eckdaten der Bevölkerungsexposition PM2.5. Erläuterungen siehe Text. ....	69
<b>Tabelle 20</b> Eckdaten der Bevölkerungsexposition EC. Erläuterungen siehe Text. ....	70
<b>Tabelle 21</b> OSTLUFT-Messstation und die Verfügbarkeit von Messdaten für PM10 und EC. Ein „x“ bedeutet, dass im betreffenden Jahr ein Jahresmittelwert vorhanden ist. Die unterste Zeile gibt die Anzahl der verfügbaren Messwerte (die mit den Modellwerten verglichen werden können).....	72
<b>Tabelle 22</b> PM10-Messwerte (2004/2005 und 2009/2010), Modellwerte (2005, 2010) und Differenzen zwischen Modell- und Messwerten. Die untersten fünf Zeilen geben Auskunft über Qualität des Zusammenhangs zwischen Modell- und Messwerten (siehe Text).....	73
<b>Tabelle 23</b> EC-Messwerte (2004/2005 und 2009/2010), Modellwerte (2005, 2010) und Differenzen zwischen Modell- und Messwerten. Die untersten fünf Zeilen geben Auskunft über Qualität des Zusammenhangs zwischen Modell- und Messwerten (siehe Text). ....	78
<b>Tabelle 24</b> PM2.5 Anteile („k-Werte“) am PM10 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Die Unterscheidung nach Höhen (z.B. bei den Haushalts- und Dienstleistungsfeuerungen) dient der Immissionsmodellierung. Quellenhinweise: FOEN (2011a)..	80
<b>Tabelle 25</b> EC-Anteile am PM2.5 2005–2020. HH= Haushalte, Gew. = Gewerbe, DL = Dienstleistungen. Die Unterscheidung nach Höhen (z.B. bei den Haushalts- und Dienstleistungsfeuerungen) dient der Immissionsmodellierung. Quellenhinweise: IIASA (2010): Exhaust-Emissionen aus Strassenverkehr und aus allen Off-road Fahrzeugen, alle Feuerungen. Reff (2009): Non-exhaust-Emissionen Strassenverkehr, Off-road Fzge. Pneuabrieb Luftverkehr. ....	81

## LITERATUR

- ARE 2010: Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK, Basismodell 2005. Bundesamt für Raumentwicklung. Bern. 21.12.2010
- ATAL/BUWAL 1994: Amt für Technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich (heute AWEL) und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (heute BAFU), Empirisches Modell für NO<sub>2</sub>-Immissionen, Konzeptstudie INFRAS/METEOTEST, Zürich/Bern, 21.11.1994
- AWEL 1996: Luftprogramm für den Kanton Zürich, Massnahmenplan Lufthygiene. Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie, Luft AWEL.
- BAFU 2007: Dreckige Luft schlägt auch aufs Herz. UMWELT 4/07, pp.11-14, Bern.
- BAFU 2010: Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990–2035, Aktualisierung 2010, Umweltwissen Nr. 1021, INFRAS im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Bern
- BFS 2001: Arealstatistik 1992/97 – Nomenklatur NOAS92: Basiskategorien und Aggregationen [http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/infothek/erhebungen\\_quellen/blank/blank/arealstatistik/03/03\\_04.Document.87948.pdf](http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/infothek/erhebungen_quellen/blank/blank/arealstatistik/03/03_04.Document.87948.pdf) [12.11.2012]
- BFS 2012: Volkszählung 2010, BFS GEOSTAT, <http://www.geostat.admin.ch>; Dez. 2012
- BMJ 1987: Richtlinie zur Durchführung von Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft mit dem Programmsystem AUSTAL86. Bundesminister für Justiz (BMJ), Bundesanzeiger G 1989 A, 39, number 131a (ISSN 0720-6100)
- BUWAL 1997: NO<sub>2</sub>-Immissionen in der Schweiz 1990–2010. Schriftenreihe Umwelt Nr. 289, INFRAS/METEOTEST im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL 1999: Modellierung der PM<sub>10</sub>-Belastung in der Schweiz, Schriftenreihe Umwelt Nr. 310, INFRAS/METEOTEST im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL 2005: Feinstaub macht krank. Herausgeber: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Bern.  
<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00653/index.html?lang=de>
- Collaud 2004: Saharan dust events at the Jungfrauoch: detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and first climatology analysis. M. Collaud Coen et al., Atmos. Chem. Phys., 4, 2465–2480, 2004.
- Flughafen Zürich AG, E-Mail von S. Maraini an F. Leippert, INFRAS vom 3. 6. 2010 und E-Mails von S. Maraini an J. Heldstab vom 13.12.2012 und 17.12.2012.
- FOEN 2011: NO<sub>2</sub> ambient concentrations in Switzerland. Modelling results for 2005, 2010, 2015. Federal Office for the Environment. Environmental studies no. 1123. Bern.

- FOEN 2011a: Switzerland's Informative Inventory Report 2011 (IIR). Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Submission of March 2011 to the United Nations ECE Secretariat. Federal Office for the Environment. Bern.
- FOEN 2013: PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland. Modelling results for 2005, 2010 and 2020. Federal Office for the Environment, Bern. Environmental studies no. 1304.
- Gianini 2012: Chemical composition of PM10 in Switzerland: An analysis for 2008/2009 and changes since 1998/1999. M.F.D. Gianini, R. Gehrig, A. Fischer, A. Ulrich, A. Wichser, C. Hueglin. In Press, Accepted Manuscript accepted paper to the Atmosph. Env. Available online. 3.3.2012.
- IIASA 2010: Principal emission outputs from the GAINS model documenting current state of BC/OC and PM2.5 implementation in the model, Excelfile, 29.6.2010.
- INFRAS 2010 : Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 3.1, INFRAS im Auftrag des Bundesamts für Umwelt. Bern.
- LHA/AFU 2005: NO<sub>2</sub>- und PM10-Immissionen, Modellresultate 2000, 2010, INFRAS/METEOTEST im Auftrag des Lufthygieneamts beider BASEL (LHA) und des Amts für Umwelt des Kantons Solothurn, Schlussbericht. Zürich.
- Nussbaumer 2010: 11. Holzenergie-Symposium, Potenzial und Technik zur Holzenergienutzung. ETH Zürich.
- OSTLUFT 2007: Partikelimmissionen Ostschweiz/Liechtenstein, Modell und Resultate 2000. Schlussbericht. INFRAS/METEOTEST im Auftrag der Luftreinhalte-Fachstellen der Ostschweizer Kantone und des Fürstentum Liechtensteins, Zürich/Bern.
- OSTLUFT 2011: Dokumentation Emissionskataster OSTLUFT, Version 2.0, November 2011
- OSTLUFT 2012: NO<sub>2</sub>-Immissionen Ostschweiz/Liechtenstein, Modell und Resultate 2005-2020, INFRAS/METEOTEST im Auftrag OSTLUFT – Die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein. Schlussbericht. Zürich/Bern, 27. November 2012.
- Reff 2009: Reff A., Bhave P., Simon H., Pace T., Pouliot G., Mobley D., Houyoux M.: Emissions Inventory of PM2.5 Trace Elements across the United States, Environ. Sci. Technol., 43, 5790–5796, 2009.
- SAEFL 2003: Modelling of PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010, Environmental Documentation No. 169, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern.
- SBB 2010: Email by C. Rémy, Leiter Bahn-Umwelt Center to F. Leippert, INFRAS, 29.6.2010.

- Schäffeler/Keller 2008: Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors, Studie für die Jahre 1980–2020, Umwelt-Wissen Nr. 0828, Bundesamt für Umwelt BAFU 2008, Bern.
- Swisstopo 2007: VECTOR25, das digitale Landschaftsmodell der Schweiz, Bundesamt für Landestopografie, Juni 2007  
[www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/vector25.parsysrelated1.47641.downloadList.50692.DownloadFile.tmp/vector25infode.pdf](http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/vector25.parsysrelated1.47641.downloadList.50692.DownloadFile.tmp/vector25infode.pdf)
- TNO 2010: A high resolution European emission data base for the year 2005. A contribution to UBA-Projekt: “Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung” – PAREST: Partikelreduktionsstrategien – Particle Reduction Strategies, TNO-034-UT-2010-01895\_RPT-ML, June 2010.
- VDI 1988: Ausbreitung von Luftverunreinigungen, Ausbreitungsmodell für Luftreinhaltepläne, VDI-Richtlinie 3782, Blatt 1. Düsseldorf.