

Der "Alpenfaktor": Höhere Immissionen pro Emissionseinheit in Alpentälern

Betrachtung von 2004 – 2012

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Dr. Jürg Thudium
09.12.2013 / 5716.30 V3

Oekoscience AG

Postfach 452
CH - 7001 Chur

Telefon: +4181 250 3310
science@oekoscience.ch

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Ökonomie und Umweltbeobachtung, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Oekoscience.

Autor: Dr. Jürg Thudium.

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

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Immissionen und Emissionen an den MfMU-Standorten 2004 – 2012	3
2.1. Jahreswerte von NO _x	3
2.2. Jahreswerte zur Partikelanzahl	4
2.3. Jahreswerte von PM ₁₀ und Russ	4
2.4. Überblick zu den Emissions- und Immissionsverhältnissen an den MfMU-Standorten	6
3. Umsetzung der Emissionen in Immissionen – der τ-Faktor	7
4. Die Alpenfaktoren	11
5. Fragen zum Verhalten von Emissionen und Immissionen beim NO_x	14
5.1. Entwicklung der Emissionen und Immissionen 2004 – 2012	14
5.2. Zum 'Sonntagseffekt' bei NO _x und Partikelanzahl	17
6. Zusammenfassung	20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Emissionen und Immissionen bei den MfMU-Standorten 2012 relativ zu MuttENZ (Wert bei MuttENZ = 100% für jede Komponente). PN: Partikelanzahlkonzentration.	6
Abbildung 3.1: Relative Tagesgänge der NO _x -Emissionen 2012 der A2 bzw. A13 an den sechs MfMU-Standorten. 100% = Jahresmittel je Standort.	8
Abbildung 3.2: Monatliche Mittelwerte für Tau von NO _x 2012 an den sechs MfMU-Standorten.	9
Abbildung 3.3: Relative monatliche Mittelwerte für Tau von NO _x 2012 an den sechs MfMU-Standorten, Wert für MuttENZ=1 für jeden Monat.	9
Abbildung 3.4: Relative Tagesgänge der Tauwerte für NO _x 2012 an den sechs MfMU-Standorten. 100% = Jahresmittel je Standort.	10
Abbildung 4.1: Alpenfaktoren der Immissionen an NO _x , PM ₁₀ , EC und OC für die MfMU-Stationen relativ zu Reiden, 2012.	13
Abbildung 4.2: Alpenfaktoren der NO _x -Immissionen für die MfMU-Stationen relativ zu Reiden, Entwicklung von 2004 – 2012.	13
Abbildung 5.1: (Virtuelle!) Zusammensetzung der NO _x -Immissionen an den MfMU-Standorten nach strassenseitigen und strassenfremden Anteilen zur Erklärung der unterschiedlichen Entwicklung der NO _x -Emissionen und –Immissionen 2004-2011 (links) bzw. 2004-2012 (rechts).	16
Abbildung 5.2: Sonntagseffekte an den MfMU-Standorten für NO _x 2004-2012 und Partikelanzahlkonzentration (PN) 2012. Rosa Zone: Erwartungsbereich der Differenz Immissionen – Emissionen bei den Sonntagseffekten.	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Jahreswerte der Emissionen und Immissionen 2004, 2011 und 2012 an NO _x an den sechs MfMU-Standorten:	3
Tabelle 2.2: Jahreswerte der Partikelanzahlemission und der Partikelkonzentration (Immission) 2012 an den sechs MfMU-Standorten:	4
Tabelle 2.3: Jahresmittel 2012 für die Partikelmassenemission (E _{PM}) sowie die PM ₁₀ -, EC- und OC-Konzentrationen an den sechs MfMU-Standorten.	5
Tabelle 3.1: Mittlere τ -Werte von 2004, 2011 und 2012 für NO _x und Partikelanzahl (PN) an den sechs MfMU-Standorten:	7
Tabelle 4.1: Alpenfaktoren für NO _x und Partikelkonzentration (PN) für 2004, 2011 und 2012 für die MfMU-Standorte mit Referenz Reiden (oben) bzw. MuttENZ (unten):	11
Tabelle 4.2: Alpenfaktoren für 2012 für die PM ₁₀ -, EC- und OC-Konzentrationen an den MfMU-Standorten mit Reiden als Referenzstation.	12
Tabelle 5.1: Änderung der NO _x -Emissionen und –Immissionen 2004-2012 (oben) bzw. 2004-2011 (unten). Theoretisch notwendige Sockelimmersion zur Erklärung der Diskrepanz zwischen Emissions- und Immissionsentwicklung.	15
Tabelle 5.2: Sonntagseffekte der Emissionen und Immissionen 2004, 2011 und 2012 an NO _x und Partikelanzahl (PN) an den sechs MfMU-Standorten:	17
Tabelle 5.3: Diskrepanzen zwischen den Sonntagseffekten von Immissionen und Emissionen an NO _x und Partikelanzahl (PN) 2004, 2011 und 2012 an den sechs MfMU-Standorten:	18

1. Einleitung

Eine bestimmte Emission von Luftschadstoffen in einem Gebirgstal hat im Mittel eine höhere Immission im bodennahen Bereich zur Folge als über flacherem Land. Der 'lufthygienische Alpenfaktor' ist ein Mass dafür. Die Gründe liegen in häufigeren und wirksameren atmosphärischen Inversionen, welche die vertikale Ausbreitung einschränken; ebenso behindern die Talflanken die horizontale Ausbreitung, und die Winde werden häufig mehr oder weniger entlang der Talachse kanalisiert.

Die Messstandorte für Luftschadstoffe im Projekt MfMU sind nahe an Transitautobahnen gewählt worden mit wenig Einfluss von anderen Schadstoffquellen. Deshalb kann ein erster Eindruck zum Alpenfaktor erhalten werden, indem je Standort schlicht das Verhältnis der Jahresmittel von Immission zu Emission der vorbeiführenden Strasse gebildet wird und diese Verhältnisse miteinander verglichen werden. Etwas präziser kann der Alpenfaktor den Mittelwerten von τ (Tau) des 'Taumodells' – eines empirischen Ausbreitungsmodells für quellennahe Standorte, welches auch für die Zukunftsszenarien von MfMU verwendet worden ist – für verschiedene Standorte entnommen werden. Der Faktor τ entspricht dem Verhältnis von Immission zu dafür ursächlicher Emission, wobei quellenfremde Immissionen ('Hintergrund') und solche, welche von früheren Emissionen stammen, nicht in das Verhältnis eingehen. Der Faktor τ ist also gleich der Immission pro Emissionseinheit, und das Verhältnis der τ -Faktoren an verschiedenen Standorten drückt aus, wie viel schlechter oder besser sich die Luftschadstoffe an einem Standort im Vergleich zu einem anderen Standort verdünnen. Handelt es sich bei den beiden Standorten um einen aus einem Alpental und einen anderen aus dem Mittelland oder der Region Basel, so ist das Verhältnis der beiden τ -Faktoren gleich dem Alpenfaktor für den betreffenden Alpental-Standort.

Für die fünf MfMU-Stationen Camignolo, Moleno, Erstfeld, Reiden und Rothenbrunnen wurde der Alpenfaktor im Verhältnis zum MfMU-Standort MuttENZ bereits für 2003 und 2004 bestimmt, wobei für 2003 nur Daten für den Zeitraum September – Dezember vorlagen ("Verkehr und Immissionen entlang der schweizerischen Alpentransitstrecken 2003", Oekoscience im Auftrag des BAFU; "Immissionsklimatische Untersuchungen an den Messstationen für 2004", Oekoscience im Auftrag des BAFU). Relativ zu MuttENZ waren die τ -Faktoren um bis zu einem Faktor 4 höher.

Für 2004 waren die Emissionen gemäss dem Handbuch der Emissionsfaktoren HBEFA2 bestimmt worden. In dieser Studie werden sie nochmals nach dem neueren HBEFA3.1 bestimmt, wie auch für 2011 und 2012.

Die Alpenfaktoren hängen über die Immissionen von den meteorologischen Bedingungen ab und weisen deshalb von Jahr zu Jahr eine gewisse zufällige Streuung auf, wobei sich die ausbreitungswirksamen meteorologischen Bedingungen über ein Jahr oft tendenziell ausgleichen. Ein wichtiger meteorologischer Faktor hierbei ist die Inversionshäufigkeit, welche für die beiden Jahre 2011 und 2012 deutlich unterschiedlich war.

Grundsätzlich sollte der Alpenfaktor von der Entwicklung der Emissionen unbeeinflusst bleiben, da das Verhältnis zwischen Immissionen und ursächlicher Emission ja nicht vom Betrag der Emission abhängt. Eine andere jahreszeitliche oder tageszeitliche Aufteilung der Emissionen (z.B. durch geänderte Anteile von Leicht- und Schwerverkehr) kann allerdings den Alpenfaktor beeinflussen. Im Weiteren könnten sich zeitlich ändernde Fehler in der Emissionsbestimmung ebenfalls auf die τ -Werte und die Alpenfaktoren auswirken.

In dieser Studie werden die Alpenfaktoren der MfMU-Standorte MuttENZ, Reiden, Erstfeld, Moleno, Camignolo und Rothenbrunnen für die Jahre 2004, 2011 und 2012 und die Komponenten NO_x, Partikelkonzentration, PM₁₀ und Russ bestimmt. Ein spezielles Augenmerk wird auf die zeitliche Entwicklung gelegt.

2. Immissionen und Emissionen an den MfMU-Standorten 2004 – 2012

Die Immissionen werden als kontinuierlich gemessene Halbstundenwerte erfasst (bei PM10 und Russ Tageswerte). Die Emissionen berechnen sich aus den kontinuierlichen stündlichen Verkehrszählungen in 7 Fahrzeugkategorien (Swiss7) und den zugehörigen kategorienspezifischen Emissionsfaktoren nach HBEFA3.1 (Autobahn Schweiz, ländlich, free flow, 120 km/h [Erstfeld 110 km/h, Rothenbrunnen 100 km/h], 0% Längsneigung [Camignolo $\pm 2\%$]).

2.1. Jahreswerte von NO_x

Grundlegende Merkmale der Immissions- und Emissionssituation an den sechs MfMU-Standorten lassen sich anhand der Jahreswerte für 2004, 2011 und 2012 erkennen.

Tabelle 2.1: Jahreswerte der Emissionen und Immissionen 2004, 2011 und 2012 an NO_x an den sechs MfMU-Standorten:

Station	E NO _x [g/km/h]				I NO _x [ppb]		
	2012	2011	2004	2004	2012	2011	2004
	HB3.1	HB3.1	HB3.1	HB2			
Muttenz	3684	3910	5845	5576	68	69	121
Reiden	1601	1717	2764	2744	41	43	52
Erstfeld	668	725	1314	1451	43	48	56
Moleno	941	1008	1617	1605	67	78	97
Camignolo	1509		2517	2436	79	87	114
Rothenbrunnen	353	364	532	652	26	27	29

Für 2004 sind die Emissionen sowohl nach HBEFA2 als auch nach HBEFA3.1 berechnet worden.

Es ist sofort zu erkennen, dass die Verhältnisse zwischen NO_x-Immission und –Emission je Standort stark unterschiedlich sind. Im Jahre 2012 beispielsweise unterscheiden sich die Emissionen an den sechs Standorten um einen Faktor 10, die Immissionen um einen Faktor 3.

2.2. Jahreswerte zur Partikelanzahl

Die folgende Tabelle zeigt die Jahresmittel der Partikelanzahlemission und der Partikelkonzentration (Immission), welche nur an vier Standorten gemessen wurde.

Tabelle 2.2: Jahreswerte der Partikelanzahlemission und der Partikelkonzentration (Immission) 2012 an den sechs MfMU-Standorten:

Station	E PN [p/km/h]	I PN [p/cm ³]
	2012	2012
	HB3.1	
Muttenz	9.8E+16	2.8E+04
Reiden	5.3E+16	
Erstfeld	1.9E+16	1.5E+04
Moleno	2.5E+16	3.2E+04
Camignolo	3.8E+16	
Rothenbrunnen	1.2E+16	1.1E+04

Die Verhältnisse zwischen Immissionen und Emissionen sind auch hier deutlich unterschiedlich. Im Jahre 2012 unterscheiden sich die Emissionen an den sechs Standorten um einen Faktor 8, die Immissionen um einen Faktor 2.5. Moleno ist mit grösserem Abstand 'Spitzenreiter' als beim NO_x.

2.3. Jahreswerte von PM₁₀ und Russ

Für PM₁₀ und Russ (EC) kann kein Taumodell auf der Basis von Stundenwerten aufgesetzt werden.

Der Russ stammt zwar überwiegend von der nahe gelegenen Strasse (s. Abbildung 2.2 in "Anteil der schweren Nutzfahrzeuge an Verkehr und Immissionen", Oekoscience im Auftrag des BAFU, 2013), es gibt aber nur Tageswerte etwa alle vier Tage. Andere Messungen wie BC sollten eher nicht verwendet werden. Beim PM₁₀ haben andere Quellen als der Strassenverkehr und die Sekundärpartikelbildung einen erheblichen Anteil an den Konzentrationen. Ausserdem stellen die Halbstundenwerte faktisch das Mittel über einen längeren Zeitraum dar.

Für diese beiden Komponenten und die organische Partikelmassenkonzentration OC wurde deshalb das folgende Prozedere durchgeführt: Als relevante Emission

wurde die täglich emittierte Partikelmasse (ohne Wiederaufwirbelung) bestimmt. Als Kennzahlen der Ausbreitungsverhältnisse dienten die Verhältnisse zwischen Russ- bzw. PM10- bzw. OC-Immission (Tageswerte) und Partikelmassenemission.

Die folgende Tabelle zeigt die Jahresmittel 2012 für die oben diskutierten Parameter.

Tabelle 2.3: Jahresmittel 2012 für die Partikelmassenemission (E_{PM}) sowie die PM10-, EC- und OC-Konzentrationen an den sechs MfMU-Standorten.

Jan-Dez 2012	E PM [g/km/h]	PM10 [µg/m ³]	EC [µg/m ³]	OC [µg/m ³]
Station	2012	2012	2012	2012
	HB3.1			
Muttenz	112	21.0	1.8	4.5
Reiden	47	19.4	1.3	4.3
Erstfeld	20	14.4	1.3	3.0
Moleno	28	20.9	2.4	5.7
Camignolo	45	23.6	2.1	5.1
Rothenbrunnen	11	13.8	1.0	3.2

Die Verhältnisse der drei Konzentrationen zur Partikelmassenemission stellen in Näherung eine Art Umsetzungsfaktor zwischen Emissionen und Immissionen für diese Komponenten dar. Andere Quellen und die zeitlich versetzte Sekundärpartikelbildung mischen hier im Gegensatz zu NO_x und Partikelanzahl aber in erheblichem Masse mit, vor allem beim PM10 und bei Moleno auch bei EC und OC, wohl infolge der verbreiteten Holzfeuerungen, so dass diese Umsetzungs faktoren nicht einfach die Ausbreitungsverhältnisse widerspiegeln. Diese genäherten Umsetzungs faktoren stellen die Basis für die Alpenfaktoren für diese Komponenten dar, welche in Kapitel 4 erläutert werden.

2.4. Überblick zu den Emissions- und Immissionsverhältnissen an den MfMU-Standorten

Die folgenden Grafiken fassen die in Tabelle 2.1, Tabelle 2.3 und Tabelle 2.6 aufgeführten Ergebnisse zusammen. Dabei werden alle Emissionen und Immissionen des Jahres 2012 relativ zu Muttentz dargestellt.

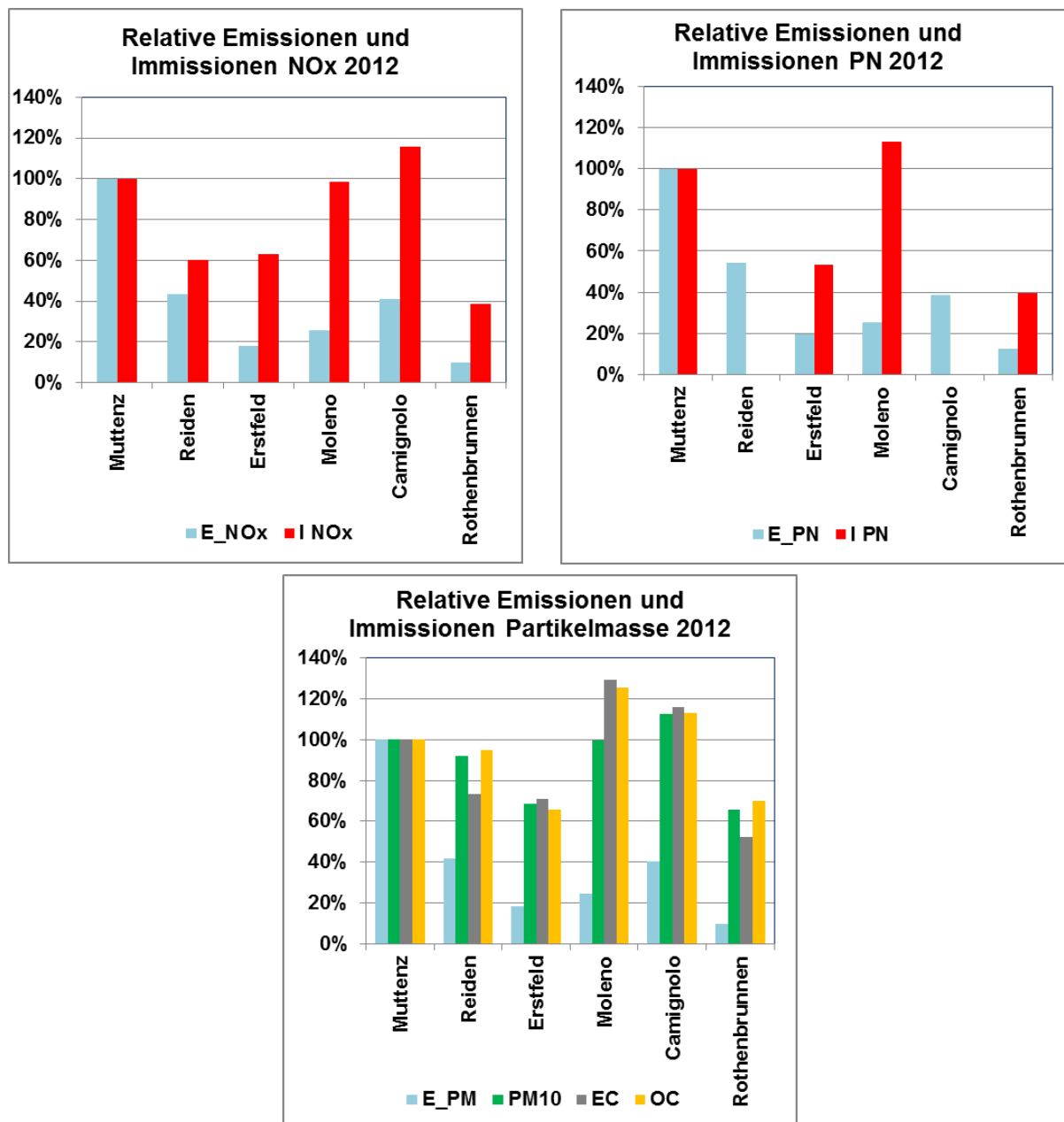


Abbildung 2.1: Emissionen und Immissionen bei den MfMU-Standorten 2012 relativ zu Muttentz (Wert bei Muttentz = 100% für jede Komponente). PN: Partikelanzahlkonzentration.

Die Verteilung der relativen Emissionen unter den MfMU-Standorten ist für alle Komponenten (NO_x, PN, PM [Partikelmasse]) recht ähnlich. Für die relative Immissionsverteilung gilt das grundsätzlich auch, hier weisen allerdings Reiden und Moleno teilweise grössere Unterschiede zwischen den Stoffen auf.

3. Umsetzung der Emissionen in Immissionen – der τ -Faktor

Der Faktor τ (Tau) entspricht dem Verhältnis von Immission zu dafür ursächlicher Emission, wobei quellenfremde Immissionen ('Hintergrund') und solche, welche von früheren Emissionen stammen, nicht in das Verhältnis eingehen. Der Faktor τ ist also gleich der Immission pro Emissionseinheit – ein empirisches Mass für die Ausbreitung der Luftschadstoffe, und das Verhältnis der τ -Faktoren an verschiedenen Standorten drückt aus, wie viel schlechter oder besser sich die Luftschadstoffe an einem Standort im Vergleich zu einem anderen Standort verdünnen.

Dieses Verfahren eignet sich für NO_x und Partikelanzahl, wo Stundenwerte vorliegen und andere Quellen als die Strasse von untergeordneter Bedeutung sind. Die mittleren Tauwerte sind an den sechs MfMU-Standorten sehr unterschiedlich, wie folgende Tabelle für NO_x und Partikelanzahl zeigt.

Tabelle 3.1: Mittlere τ -Werte von 2004, 2011 und 2012 für NO_x und Partikelanzahl (PN) an den sechs MfMU-Standorten:

Station	2012		2011	2004 HB3.1	2004 HB2
	NO _x	PN	NO _x	NO _x	NO _x
	[ppb/(g/km/h)]	[3.6E+12 s/m ²]	[ppb/(g/km/h)]	[ppb/(g/km/h)]	[ppb/(g/km/h)]
Muttenz	0.0150	2.25801E-13	0.0147	0.0173	0.0184
Reiden	0.0284		0.0252	0.0228	0.0198
Erstfeld	0.0792	8.61091E-13	0.0755	0.0477	0.0421
Moleno	0.0961	1.17478E-12	0.0947	0.0838	0.0864
Camignolo	0.0462			0.0443	0.0435
Rothenbrunnen	0.0755	1.05916E-12	0.0946	0.0695	0.0579

Die Tauwerte sind von 2004 bis 2011 und 2012 an fünf Standorten angestiegen. Dies kann aufgrund schlechterer meteorologischer Ausbreitungsbedingungen oder infolge Unterschätzens der effektiven Emissionen der Fall sein. Bei Muttenz ist der Tauwert für NO_x zurückgegangen (s. dazu Bemerkung auf Seite 5). Die-

ses singuläre Verhalten macht MuttENZ als Referenzstation für den Alpenfaktor wenig geeignet, Reiden ist da vertrauenswürdiger.

Die relativen tageszeitlichen Verteilungen der Emissionen sind an allen Standorten sehr ähnlich, wie folgende Grafik zeigt. Diese Verteilung ist jedenfalls nicht Ursache unterschiedlicher Immission/Emissions-Verhältnisse.

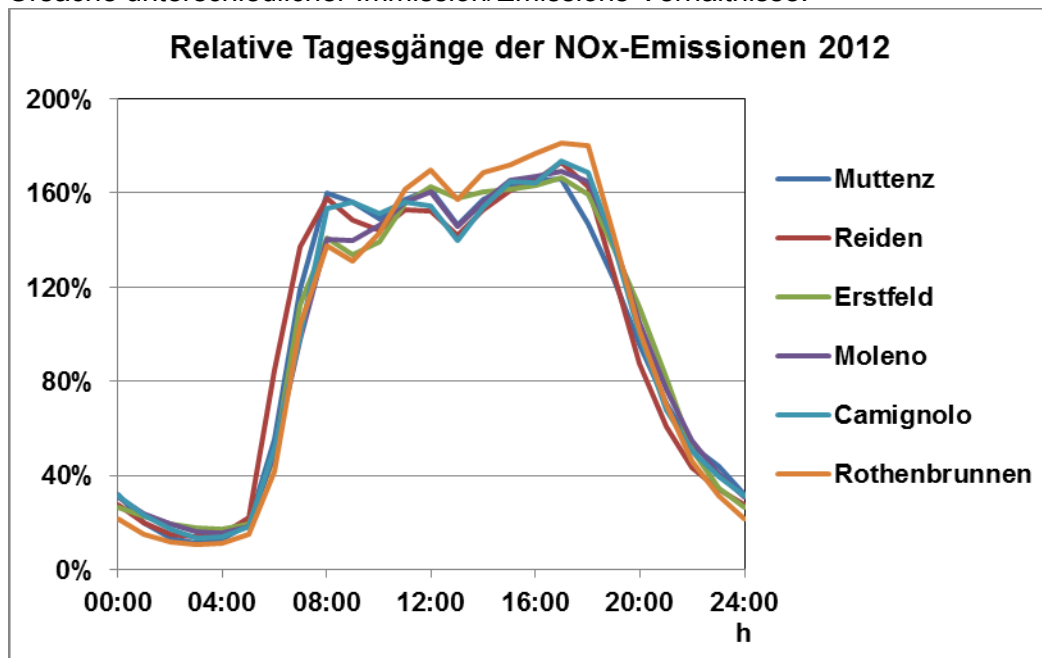


Abbildung 3.1: Relative Tagesgänge der NOx-Emissionen 2012 der A2 bzw. A13 an den sechs MfMU-Standorten. 100% = Jahresmittel je Standort.

Die Tauwerte weisen einen deutlichen Jahresgang auf mit höheren Werten (=schlechteren Ausbreitungsbedingungen) im Winter. Die drei Alpentalstandorte weisen über das ganze Jahr höhere Werte auf. Die Hierarchie zwischen den Stationen bleibt über das ganze Jahr generell gewahrt.

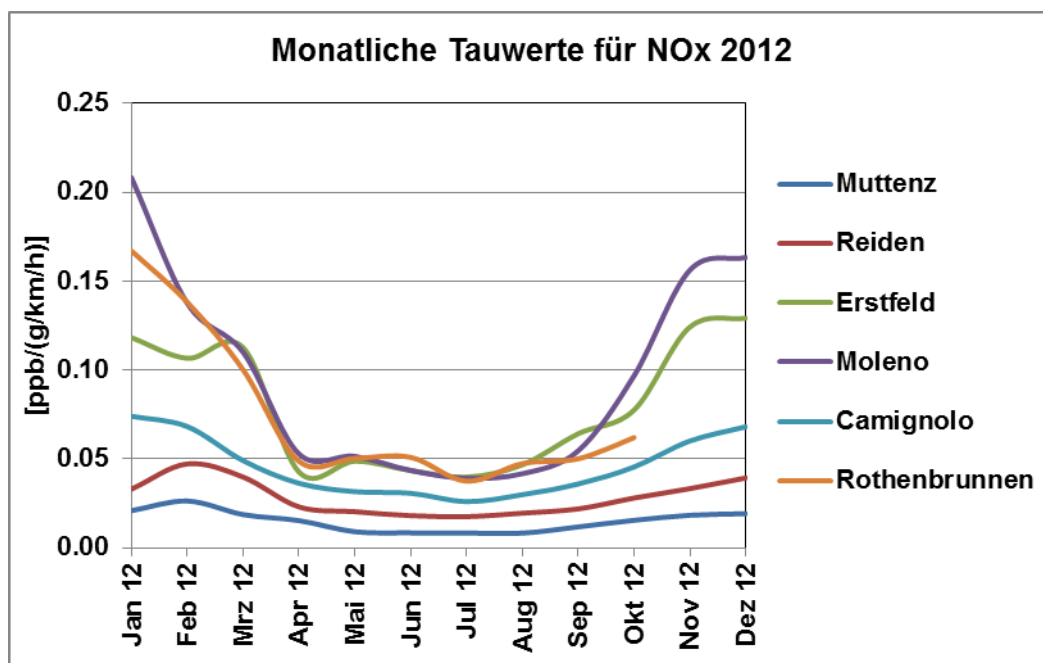


Abbildung 3.2: Monatliche Mittelwerte für Tau von NOx 2012 an den sechs MfMU-Standorten.

Die Monatswerte von Tau relativ zu MuttENZ zeigen die Verhältnisse zwischen den Stationen noch etwas klarer; im Winter sind die Unterschiede zu den drei Alpentalstandorten noch mehr ausgeprägt als zu den übrigen Jahreszeiten.

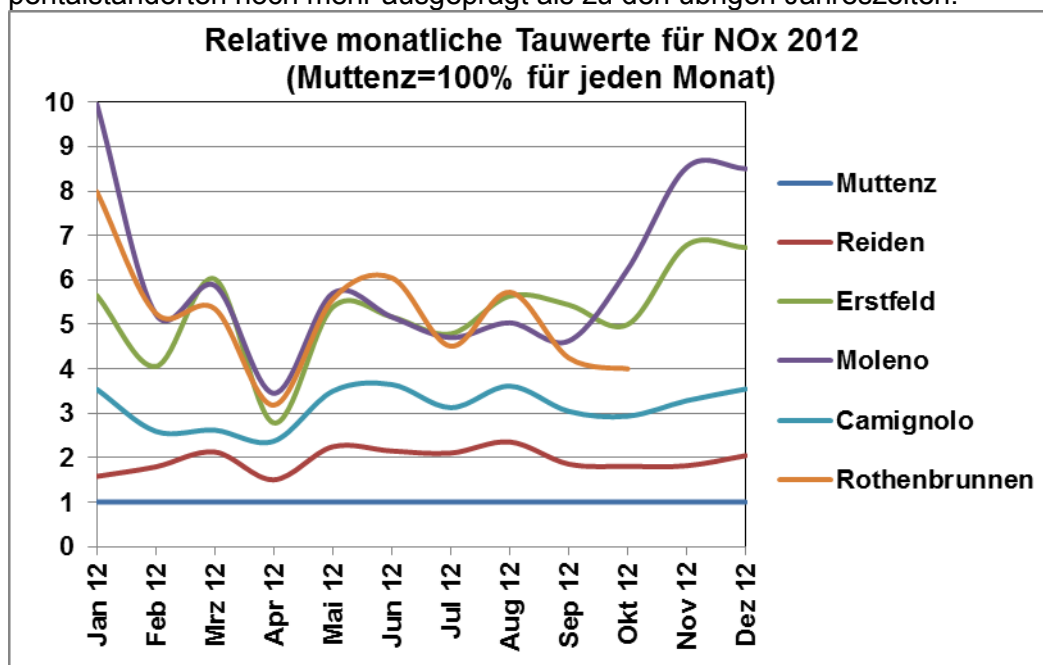


Abbildung 3.3: Relative monatliche Mittelwerte für Tau von NOx 2012 an den sechs MfMU-Standorten, Wert für MuttENZ=1 für jeden Monat.

Die relativen Tagesgänge von Tau sind für die vier MfMU-Stationen Reiden, Erstfeld, Moleno und Rothenbrunnen sehr ähnlich: Maximum in der zweiten Nachthälfte, Minimum über Mittag. Camignolo zeigt dies auch, aber flacher. MuttENZ ist auch hier eine wirkliche Ausnahme, mit zwei Maxima und dem Minimum um 18 Uhr. Ein spezielles Windfeld könnte dafür die Ursache sein.

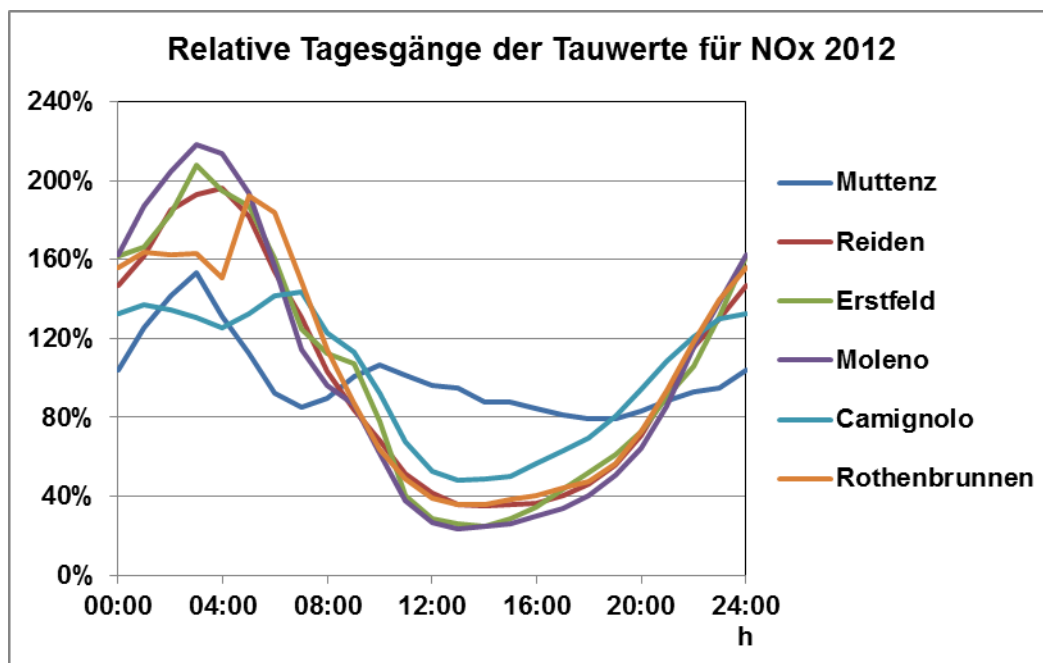


Abbildung 3.4: Relative Tagesgänge der Tauwerte für NOx 2012 an den sechs MfMU-Standorten.
100% = Jahresmittel je Standort.

Die Verhältnisse der Tauwerte bezogen auf eine Referenzstation stellen den Alpenfaktor dar, was im nächsten Kapitel dargelegt wird.

4. Die Alpenfaktoren

Der Alpenfaktor ist definiert als Verhältnis zwischen den Tauwerten (s. Kap. 3) bzw. den Umsetzungsfaktoren (für PM₁₀ und Russ, s. Kap. 2.5) an einer Station in einem Alpental und einer im Mittelland oder in einer ähnlichen Region gelegenen Station. Bei den MfMU-Stationen eignet sich vor allem Reiden als Referenzstation, da sich bei Muttenez nicht erklärbare Veränderungen ergeben haben (s. Seite 5). Die Alpenfaktoren in Bezug auf Muttenez werden aber auch gezeigt.

Die folgende Tabelle zeigt die Alpenfaktoren für NO_x und Partikelkonzentration (PN).

Tabelle 4.1: Alpenfaktoren für NO_x und Partikelkonzentration (PN) für 2004, 2011 und 2012 für die MfMU-Standorte mit Referenz Reiden (oben) bzw. Muttenez (unten):

Station	2012		2011	2004 HB3.1	2004 HB2
	NO _x	PN	NO _x	NO _x	NO _x
Muttenez	0.5		0.6	0.8	0.9
Reiden	1.0		1.0	1.0	1.0
Erstfeld	2.8		3.0	2.1	2.1
Moleno	3.4		3.8	3.7	4.4
Camignolo	1.6			1.9	2.2
Rothenbrunnen	2.7		3.8	3.0	2.9

Station	2012		2011	2004 HB3.1	2004 HB2
	NO _x	PN	NO _x	NO _x	NO _x
Muttenez	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Reiden	1.9		1.7	1.3	1.1
Erstfeld	5.3	3.8	5.1	2.8	2.3
Moleno	6.4	5.2	6.4	4.8	4.7
Camignolo	3.1			2.6	2.4
Rothenbrunnen	5.0	4.7	6.4	4.0	3.1

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass auch im 2011 und 2012 wie schon 2004 eine bestimmte Emissionseinheit an NO_x in einem Alpental eine etwa dreimal so hohe Immission erzeugt wie über flachem Land (Alpenfaktor = 3). Bei der Partikelkonzentration hat der Alpenfaktor eine ähnliche Grössenordnung; genauer lässt sich dies nicht abschätzen, weil es bei Reiden leider keine Partikelmessung gab.

Verglichen mit 2004 und Referenz Reiden hat der Alpenfaktor bei Erstfeld zugenommen, bei Camignolo und Moleno hat er im 2012 abgenommen, aber nicht im 2011; dies nur, weil an den beiden Stationen eine erhebliche Immissionsabnahme von 2011 auf 2012 eintrat, welche so an den übrigen autobahnnahen Tessi-

ner Stationen nicht wiedergefunden wurde. Bei Rothenbrunnen hat sich der Alpenfaktor von 2004 auf 2012 kaum verändert, war aber im 2011 deutlich höher.

Zwischen den beiden Emissionsbestimmungen nach HB2 und HB3.1 für 2004 gibt es kaum Unterschiede im resultierenden Alpenfaktor. Dieser scheint bezüglich der Problematiken bei der Emissionsbestimmung ziemlich robust zu sein.

Das Verhältnis zwischen MuttENZ und Reiden hat sich von 2004 auf 2012 von 0.9 auf 0.5 verringert. In MuttENZ muss etwas vorgegangen sein, was im Rahmen dieser Studie jedoch nicht weiter untersucht werden kann.

Die aus den Umsetzungsfaktoren (s. Kap. 2.5) ermittelten Alpenfaktoren für Russ (EC), OC (organische Komponenten) und PM10 ergeben sich wie folgt:

Tabelle 4.2: Alpenfaktoren für 2012 für die PM10-, EC- und OC-Konzentrationen an den MfMU-Standorten mit Reiden als Referenzstation.

Jan-Dez 2012	PM10	EC	OC
Station	2012	2012	2012
MuttENZ	0.4	0.5	0.4
Reiden	1.0	1.0	1.0
Erstfeld	1.7	2.2	1.6
Moleno	1.9	3.2	2.4
Camignolo	1.3	1.7	1.3
Rothenbrunnen	3.1	2.9	3.2

Auch für die drei Partikelmassenkomponenten PM10, EC und OC ist der Alpenfaktor an den Alpentalstandorten grösser als eins. Auch ihre Konzentration ist also gemessen an der Emission höher als über flachem Land. Allerdings ist der Alpenfaktor bei PM10 und OC geringer als bei NO_x, mit Ausnahme von Rothenbrunnen; bei EC (Russ) ist er ähnlich wie beim NO_x.

Die Alpenfaktoren sind jahreszeitlich recht robust. Ebenso sind sich die Alpenfaktoren für PM10 und OC sehr ähnlich, mit Ausnahme von Moleno, wo vermutlich die Holzfeuerungen zu etwas erhöhten OC-Werten führen.

Für EC sind die Alpenfaktoren höher als für PM10 und OC mit Ausnahme von Rothenbrunnen, jedoch etwas niedriger als für NO_x. Auch hier zeigt Moleno einen speziell erhöhten Wert.

Die folgenden Übersichtsgrafiken fassen die Ergebnisse aus Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 zusammen:

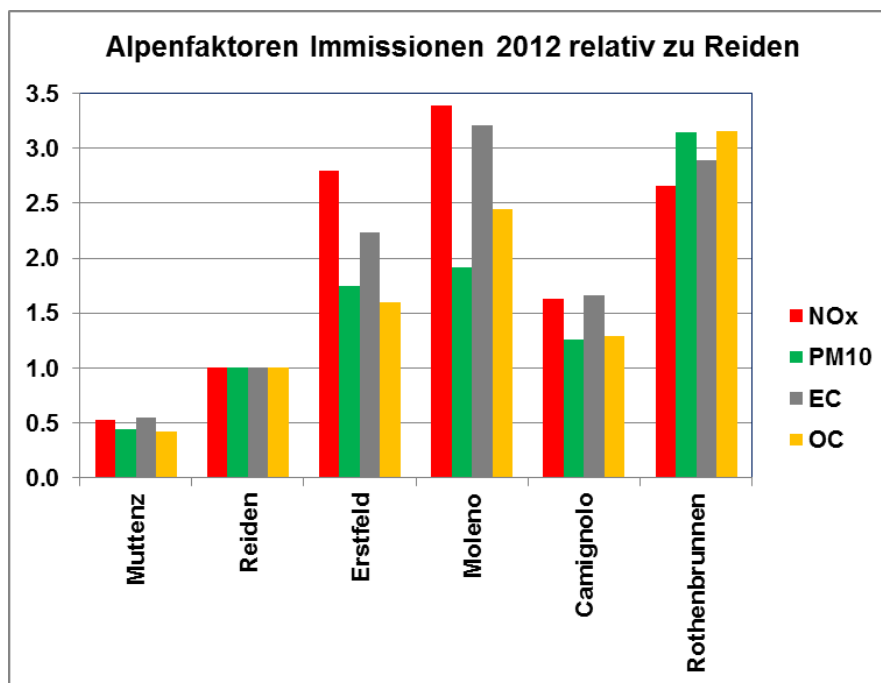


Abbildung 4.1: Alpenfaktoren der Immissionen an NO_x, PM₁₀, EC und OC für die MfMU-Stationen relativ zu Reiden, 2012.

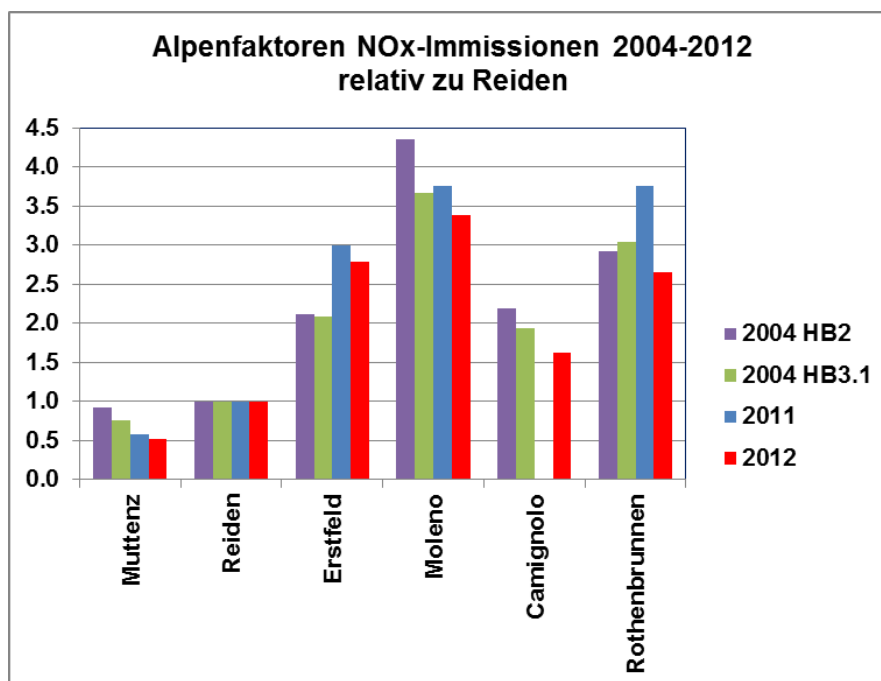


Abbildung 4.2: Alpenfaktoren der NO_x-Immissionen für die MfMU-Stationen relativ zu Reiden, Entwicklung von 2004 – 2012.

5. Fragen zum Verhalten von Emissionen und Immissionen beim NO_x

Bei der Betrachtung des Verhaltens der Emissionen und Immissionen von NO_x von 2004 – 2012 sind Fragen aufgetaucht, die im Folgenden diskutiert werden. Die Alpenfaktoren selbst als relatives Mass zwischen den Standorten sind von diesen Fragen wenig betroffen.

5.1. Entwicklung der Emissionen und Immissionen 2004 – 2012

Die Entwicklung von 2004 auf 2011 bzw. 2012 verlief bei den Emissionen und den Immissionen sehr unterschiedlich. Da es an den Standorten trotz der Quellennähe einen kleinen, nicht von der Strasse stammenden Hintergrund gibt, verringern sich die Immissionen nicht ganz proportional zu den Emissionen, sondern etwas weniger. Dieser Unterschied kann allerdings nicht gross sein, denn die Immissionen an den strassennahen Standorten entstammen ganz überwiegend der benachbarten Autobahn, und auch die Emissionen der übrigen Strassen entwickeln sich zeitlich im Wesentlichen parallel. Es kommt hinzu, dass die meteorologischen Bedingungen die Immissionen beeinflussen; dies beeinflusst auch die Differenz 2004 – 2011 bzw. 2004 – 2012. Allerdings dürfte dies im Jahresmittel kaum mehr als 5% ausmachen.

Die Diskrepanz in der Entwicklung der NO_x-Emissionen und –Immissionen ist allerdings erheblich (s. nächste Tabelle). Zur Erklärung der Bedeutung dieser Diskrepanz wird der Begriff der Sockelimmission herangezogen: eine rechnerische, zeitlich konstante Immission, die nicht mit der Hauptquelle, hier dem Strassenverkehr, in Verbindung steht. Real ist dies ein Hintergrund, der regional von Siedlungen, Industrie und Gewerbe stammt. Die zeitlich konstante Sockelimmission, die notwendig wäre, um die Diskrepanz zu erklären, wäre auch an einem Agglomerationsstandort weit höher als erklärbar, und besonders ist dies an den MfMU-Standorten der Fall.

Tabelle 5.1: Änderung der NO_x-Emissionen und –Immissionen 2004-2012 (oben) bzw. 2004-2011 (unten). Theoretisch notwendige Sockelimmission zur Erklärung der Diskrepanz zwischen Emissions- und Immissionsentwicklung.

Änderungen 2004 - 2012	E NO _x	I NO _x	Diskrepanz $\Delta I - \Delta E$	Sockel zur Aufhebung Diskrepanz	Anteil Sockel an Gesamt- NO _x
Muttenz	-37%	-44%	-7%	-23	-33%
Reiden	-42%	-22%	20%	25	61%
Erstfeld	-49%	-23%	26%	29	69%
Moleno	-42%	-31%	11%	25	37%
Camignolo	-40%	-31%	9%	25	32%
Rothenbrunnen	-34%	-10%	24%	20	78%

Änderungen 2004 - 2011	E NO _x	I NO _x	Diskrepanz $\Delta I - \Delta E$	Sockel zur Aufhebung Diskrepanz	Anteil Sockel an Gesamt- NO _x
Muttenz	-33%	-43%	-10%	-37	-53%
Reiden	-38%	-18%	20%	27	63%
Erstfeld	-45%	-13%	32%	40	82%
Moleno	-38%	-20%	18%	47	60%
Camignolo		-24%			
Rothenbrunnen	-32%	-8%	24%	22	82%

Ein kurzes Zahlenbeispiel zur 'Sockelimmission': Nehmen wir an, die Immission betrage 2004 100 ppb, wovon 50% nicht von der Strasse stammen würden. Eine Emissionsreduktion bis 2012 um -50% würde also die 50 ppb, die von der Strasse stammen, um die Hälfte reduzieren, ergäbe im 2012 insgesamt 75 ppb, wovon also 2/3 (50 ppb) nicht von der Strasse stammen würden. Diese Verhältnisse gelten ungefähr für Erstfeld. Eine Sockelimmission würde überwiegend als NO₂ vorliegen; so hoch sind die realen NO₂-Immissionen glücklicherweise nicht.

Die geringsten Diskrepanzen finden sich bei Moleno und Camignolo 2012. Dort haben die NO_x-Immissionen von 2011 auf 2012 um 10-15% abgenommen, während dem sie an den anderen A2-nahen Standorten Mendrisio und Chiasso nur um 2-8% abgenommen haben.

Auffallend sind die Werte für Muttenz: Dort haben die NO_x-Immissionen stärker abgenommen als die Emissionen, und zwar für 2011 und 2012. Dies kann eigentlich nur sein, wenn strassenfremde Emissionen, welche den Standort deutlich beeinflusst haben, sich stark verringert haben. Auf der anderen Seite war die Umsetzung von Emissionen in Immissionen am Standort Muttenz schon 2004 ge-

ringer als bei Reiden (in einem ziemlich flachen Gebiet gelegen) und ist 2012 nur noch etwa halb so hoch wie bei Reiden. Im Rahmen dieser Studie kann dies nicht weiter untersucht werden.

Die Diskrepanz zwischen Immissions- und Emissionsentwicklung könnte teilweise dadurch bedingt sein, dass sich die Emissionen effektiv nicht so stark verringert haben wie vom HBEFA3.1 postuliert. Auch unterschiedliche meteorologische Bedingungen könnten einen Anteil haben, aber nicht die gesamte Diskrepanz erklären.

Die folgenden Grafiken zeigen, wie hoch die (strassenfremden) Sockelimmissionen im Vergleich zu den Gesamtimmissionen sein müssten, damit die Diskrepanz in der Entwicklung von NO_x-Emissionen und –Immissionen erklärt werden könnte.

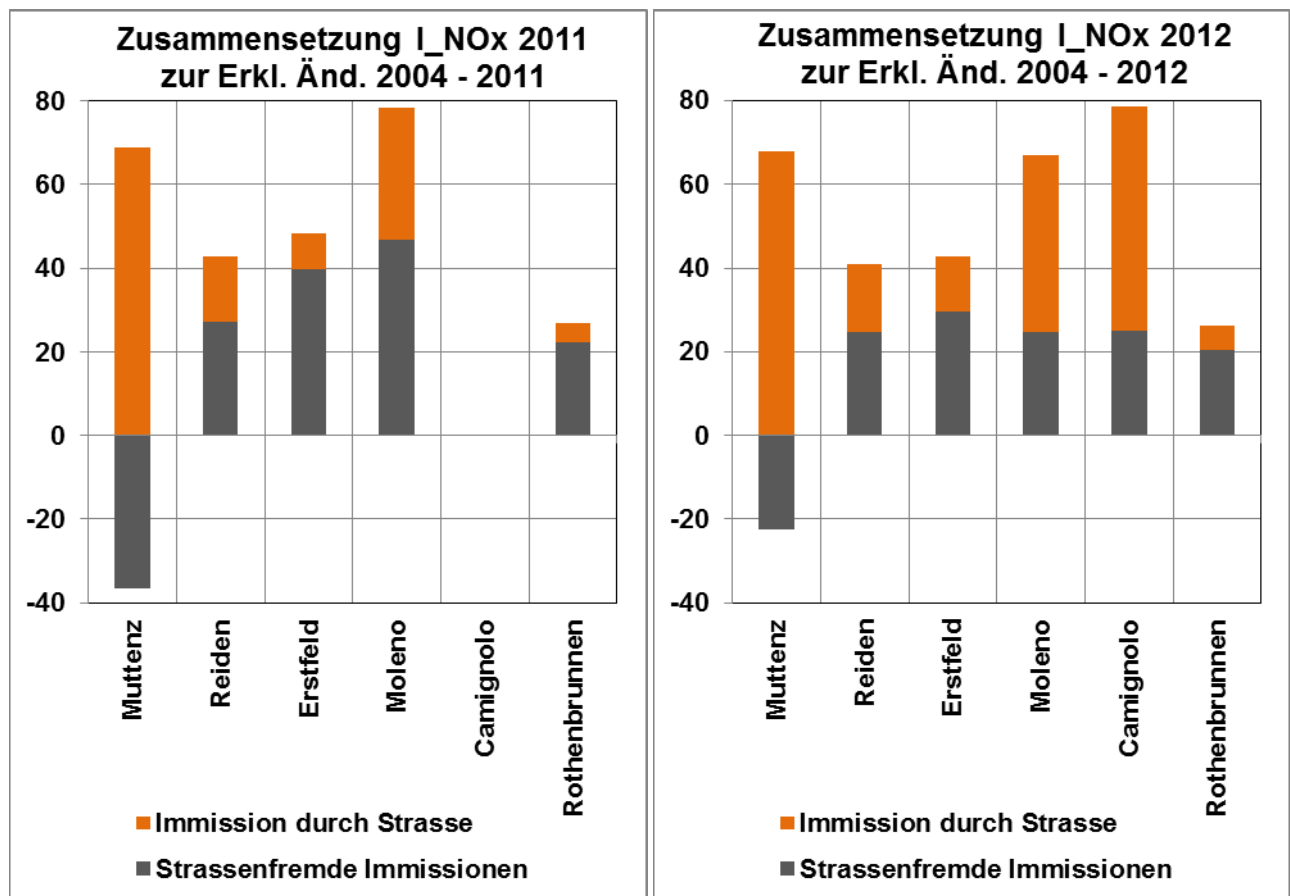


Abbildung 5.1: (Virtuelle!) Zusammensetzung der NO_x-Immissionen an den MfMU-Standorten nach strassenseitigen und strassenfremden Anteilen zur Erklärung der unterschiedlichen Entwicklung der NO_x-Emissionen und –Immissionen 2004-2011 (links) bzw. 2004-2012 (rechts).

5.2. Zum 'Sonntagseffekt' bei NO_x und Partikelanzahl

Der Sonntagseffekt beim NO_x besteht darin, dass die Emissionen sonn- und feiertags deutlich geringer sind als werktags, weil dann die Lastwagen fehlen. Darauf reagieren auch die Immissionen, allerdings oft nicht mit dem gleichen Prozentsatz. Natürlich sind da einerseits die meteorologisch bedingten Schwankungen, welche sich durchaus auch im Jahresmittel auf einzelne Wochentage unterschiedlich auswirken können. Andererseits können strassenfremde Quellen einen Einfluss haben: Hängen sie nicht vom Wochentag ab, so ändern sich die Immissionen am Sonntag prozentual weniger als die Strassenemissionen. Eine strassenfremde Quelle nur werktags erhöht die relative Änderung der Immissionen sonntags.

Der Sonntagseffekt ist ein Nebenergebnis des empirischen Taumodells zur Ausbreitung von Luftschadstoffen, da die Wochentagsabhängigkeit der Immissionen und Emissionen zur Abschätzung des Einflusses von früheren und strassenfremden Emissionen am Messstandort verwendet wird.

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung der Sonntagseffekte 2004 – 2012.

Tabelle 5.2: Sonntagseffekte der Emissionen und Immissionen 2004, 2011 und 2012 an NO_x und Partikelanzahl (PN) an den sechs MfMU-Standorten:

Station	Sonntagseffekt 2012		Sonntagseffekt 2012		Sonntagseffekt 2011		Sonntagseffekt 2004		
	E NO _x	I NO _x	E PN	I PN	E NO _x	I NO _x	E NO _x HB3.1	E NO _x HB2	I NO _x
Muttenz	-41%	-42%	-39%	-29%	-40%	-41%	-47%	-52%	-54%
Reiden	-47%	-50%			-46%	-42%	-47%	-53%	-48%
Erstfeld	-32%	-47%	-25%	-25%	-33%	-47%	-38%	-46%	-49%
Moleno	-26%	-39%	-22%	-17%	-27%	-30%	-35%	-42%	-42%
Camignolo	-38%	-36%					-37%	-42%	-45%
Rothenbrunnen	-22%	-36%	-17%	-24%	-25%	-32%	-24%	-21%	-39%

Aufschlussreich ist die Diskrepanz zwischen den Sonntagseffekten von Immissionen und Emissionen (nächste Tabelle): Für die auf freiem Feld stehenden MfMU-Standorte erwartet man Werte um die null oder leicht positiv (Immissionen nehmen sonntags weniger ab) aufgrund anderer Quellen. Für die Partikelanzahl ist dies auch weitgehend der Fall; der positive Wert bei Muttenz kann durch die Agglomeration und auch sonntags laufende Industriebetriebe erklärt werden, bei Moleno kann man einen kleinen Einfluss von Holzfeuerungen erkennen.

Beim NO_x liegen Muttenz, Reiden und Camignolo nicht weit vom Erwartungsbereich, allerdings überwiegend mit negativen Werten (Immission nimmt sonntags

mehr ab als Emissionen), was man an diesen Standorten eigentlich nicht erklären kann. An den drei Alpental-Standorten Erstfeld, Moleno und Rothenbrunnen sind die Werte deutlich negativ, vor allem 2012.

Tabelle 5.3: Diskrepanzen zwischen den Sonntagseffekten von Immissionen und Emissionen an NO_x und Partikelanzahl (PN) 2004, 2011 und 2012 an den sechs MfMU-Standorten:

Station	2012		2011	2004 HB3.1	2004 HB2
	NO _x	PN	NO _x	NO _x	NO _x
Muttenz	-1%	10%	-1%	-7%	-2%
Reiden	-3%		4%	-1%	5%
Erstfeld	-15%	0%	-14%	-11%	-3%
Moleno	-13%	5%	-3%	-7%	0%
Camignolo	2%			-8%	-3%
Rothenbrunnen	-14%	-7%	-7%	-15%	-18%

Interessant ist die Betrachtung zu 2004: Nach HB2 lagen die Diskrepanzen alle bei null. Nach HB3.1 rutschten sie an allen Standorten in den negativen Bereich; dies deshalb weil gegenüber HB2 die Emissionen der Pw zunahmen und diejenigen der Lastwagen abnahmen. Bei Rothenbrunnen wurden damals nach HB2 die Pw-Emissionen gegenüber den Lastwagen überschätzt, weil eine Fahrgeschwindigkeit von 120 statt 100 km/h zugrunde gelegt wurde; daraus ist die Diskrepanz von -18% zu erklären.

Die folgende Grafik fasst die Sonntagseffekte zusammen:

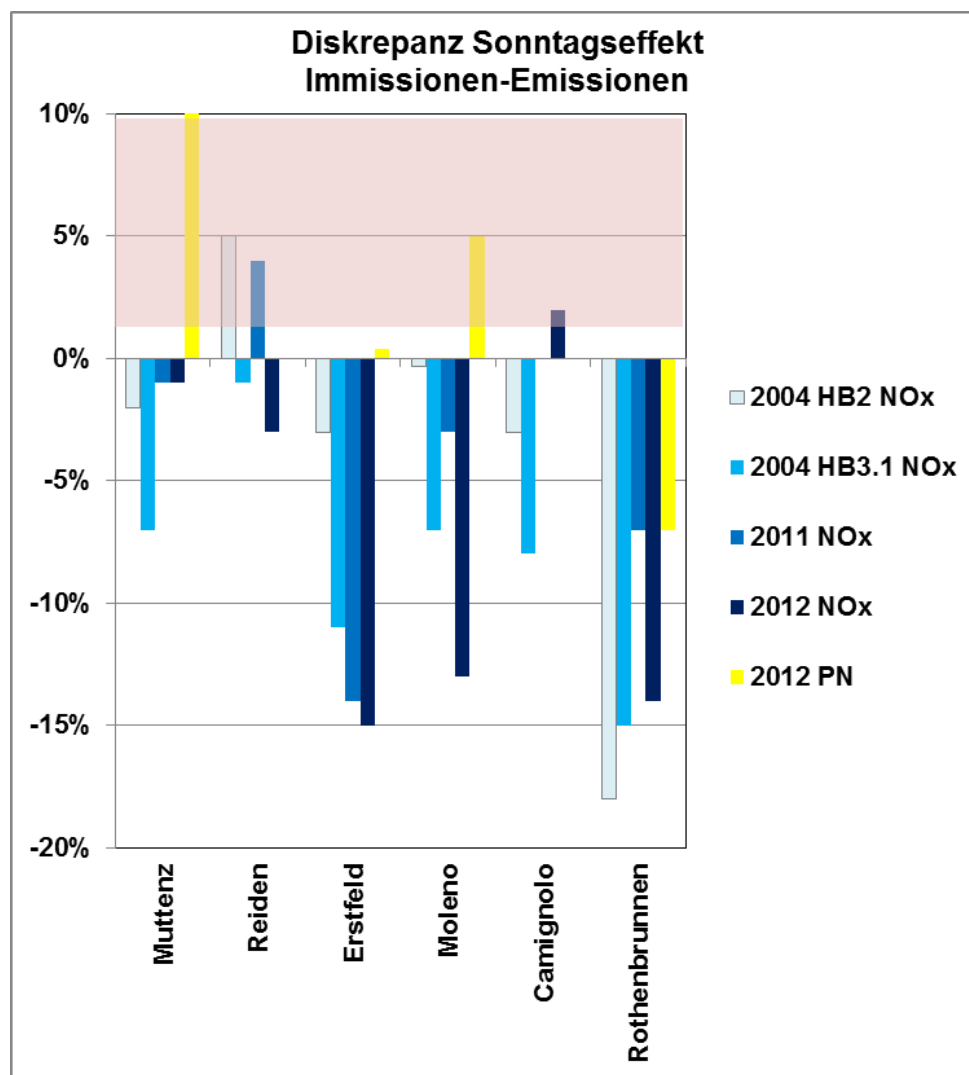


Abbildung 5.2: Sonntagseffekte an den MfMU-Standorten für NOx 2004-2012 und Partikelanzahlkonzentration (PN) 2012. Rosa Zone: Erwartungsbereich der Differenz Immissionen – Emissionen bei den Sonntagseffekten.

Eine Erklärung für die generellen Diskrepanzen in den Sonntagseffekten von Immissionen und Emissionen an NOx kann im Rahmen dieser Studie nicht angeboten werden. Rein rechnerisch könnte die Diskrepanz in Richtung positiv verschoben werden und gleichzeitig die Diskrepanzen in der Entwicklung 2004 – 2012 der Immissionen und Emissionen verringert werden, wenn die Emissionen der Lastwagen sich weniger stark reduzieren würden (beim Wechsel auf HB3.1 und von 2004-2012). Dies ist natürlich kein Beleg, nur eine Überlegung.

6. Zusammenfassung

Eine bestimmte Emission von Luftschadstoffen in einem Gebirgstal hat im Mittel eine höhere Immission im bodennahen Bereich zur Folge als über flacherem Land. Der 'lufthygienische Alpenfaktor' ist ein Mass dafür. Die Gründe liegen in häufigeren und wirksameren atmosphärischen Inversionen, welche die vertikale Ausbreitung einschränken; ebenso behindern die Talflanken die horizontale Ausbreitung, und die Winde werden häufig mehr oder weniger entlang der Talachse kanalisiert.

Der Alpenfaktor wurde für NO_x und die Partikelkonzentration dem 'Taumodell' entnommen, einem empirischen Ausbreitungsmodell. Der Faktor τ (Tau) entspricht dem Verhältnis von Immission zu dafür ursächlicher Emission, wobei quellenfremde Immissionen ('Hintergrund') und solche, welche von früheren Emissionen stammen, nicht in das Verhältnis eingehen. Der Faktor τ ist also gleich der Immission pro Emissionseinheit – ein empirisches Mass für die Ausbreitung der Luftschadstoffe, und das Verhältnis der τ -Faktoren an verschiedenen Standorten drückt aus, wie viel schlechter oder besser sich die Luftschadstoffe an einem Standort im Vergleich zu einem anderen Standort verdünnen.

Bei den drei Partikelmassenkonzentrationen PM₁₀, Russ (EC) und OC werden die Verhältnisse zur gesamten Partikelmassenemission als eine Art Umsetzungs-faktor zwischen Emissionen und Immissionen verwendet. Andere Quellen und die zeitlich versetzte Sekundärpartikelbildung mischen hier im Gegensatz zu NO_x und Partikelanzahl aber in erheblichem Masse mit, vor allem beim PM₁₀ und bei Moleno - wohl infolge der verbreiteten Holzfeuerungen - auch bei EC und OC, so dass diese Umsetzungsfaktoren nicht einfach die Ausbreitungsverhältnisse widerspiegeln. Diese genäherten Umsetzungsfaktoren stellen die Basis zur Ermittlung der Alpenfaktoren für diese Komponenten dar.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass auch im 2011 und 2012 wie schon 2004 eine bestimmte Emissionseinheit an NO_x in einem Alpental eine etwa dreimal so hohe Immission erzeugt wie über flachem Land (Alpenfaktor = 3). Bei der Partikelkonzentration hat der Alpenfaktor eine ähnliche Grössenordnung; genauer lässt sich dies nicht abschätzen, weil es bei Reiden leider keine Partikelmessung gab.

Verglichen mit 2004 und Referenz Reiden hat der Alpenfaktor bei Erstfeld zugenommen, bei Camignolo und Moleno hat er im 2012 abgenommen, aber nicht im 2011; dies nur, weil an den beiden Stationen eine erhebliche Immissionsabnah-

me von 2011 auf 2012 eintrat, welche so an den übrigen autobahnnahen Tessiner Stationen nicht wiedergefunden wurde. Bei Rothenbrunnen hat sich der Alpenfaktor von 2004 auf 2012 kaum verändert, war aber im 2011 deutlich höher.

Zwischen den beiden Emissionsbestimmungen nach HB2 und HB3.1 für 2004 gibt es kaum Unterschiede im resultierenden Alpenfaktor. Dieser scheint bezüglich der Problematiken bei der Emissionsbestimmung ziemlich robust zu sein.

Das Verhältnis der Alpenfaktoren von MuttENZ und Reiden hat sich von 2004 auf 2012 von 0.9 auf 0.5 verringert. In MuttENZ muss etwas vorgegangen sein, was im Rahmen dieser Studie jedoch nicht weiter untersucht werden kann.

Auch für die drei Partikelmassenkomponenten PM₁₀, EC und OC ist der Alpenfaktor an den Alpentalstandorten grösser als eins. Auch ihre Konzentration ist also gemessen an der Emission höher als über flachem Land. Allerdings ist der Alpenfaktor bei PM₁₀ und OC geringer als bei NO_x, bei EC nur leicht geringer. Rothenbrunnen stellt eine Ausnahme dar, indem dort die Alpenfaktoren für alle Komponenten rund 3 betragen. Moleno zeigt erhöhte Werte für EC und OC, was auf die dort zahlreichen Holzfeuerungen zurückzuführen ist.

Die Entwicklung von 2004 auf 2011 bzw. 2012 verlief bei den Emissionen und den Immissionen von NO_x sehr unterschiedlich. Diese Diskrepanz könnte teilweise dadurch bedingt sein, dass sich die Emissionen effektiv nicht so stark verringert haben wie vom HBEFA3.1 postuliert. Auch unterschiedliche meteorologische Bedingungen könnten einen Anteil haben, aber nicht die gesamte Diskrepanz erklären.