



Schadstoffmessungen im Islisbergtunnel 2011

14. Dezember 2012

Änderungsverzeichnis

Dokumentenname	Version	Datum	Verfasser	Bemerkung
Ostluft_2011_V20120607.docx	0.1	08.06.2012	FZ	Zusammenstellung Ergebnisse
Ostluft_2011_V20120917.docx	0.2	17.09.2012	FZ	Ergänzungen; Anm. MM, RE
Ostluft_2011_V20121018.docx	0.9	18.10.2012	FZ	Anm. MM, vollständiger Entwurf
Ostluft_2011_V20121206.docx	1.0	14.12.2012	FZ	Anm. aus Bespr. 24.10.2012

Verteiler

Name	Stelle	Berichtversion			
		0.1	0.2	0.9	1.0
Markus Meier	Ostluft / AWEL	x	x	x	x
Roy Eugster	Ostluft / AWEL	x	x	x	x
Valentin Delb	Ostluft / AWEL			x	x
Hansjörg Sommer	Ostluft / AWEL			x	x
Peter Federer	Ostluft / AfU AR			x	x
Peter Maly	Ostluft / IKL SH			x	x

Auswertung und Bericht

**Ingenieurbüro
Urs Steinemann**

Schwalbenbodenstrasse 15
CH-8832 Wollerau
Telefon 044 / 784 53 65
Telefax 044 / 784 53 66

**Ingenieurbüro
Franz Zumsteg**

Bahnhofstrasse 3
CH-5600 Lenzburg
Telefon 062 / 892 88 02
Telefax 062 / 892 88 04

Bezug

Download oder E-Mail-Bestellung unter www.ostluft.ch
oder

OSTLUFT, Geschäftsleitung, Postfach, 8090 Zürich

Tel. 043 259 30 18
Fax. 043 259 51 78
E-Mail: bestellungen@ostluft.ch

Inhalt

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	9
2 Grundlagen	10
2.1 Tunneldaten	10
2.1.1 Geometrie	10
2.1.2 Lüftung	11
2.1.3 Strassenbelag	11
2.2 Messungen	11
2.2.1 Verkehr	11
2.2.2 Luftströmung	13
2.2.3 Schadstoffe	14
3 Messungen.....	17
3.1 Messprinzip und Schritte zur Auswertung.....	17
3.2 NO _x -, CO- und TVOC-Messergebnisse	18
3.2.1 NO _x	18
3.2.2 Oxidationsgrad NO ₂ /NO _x	19
3.2.3 CO	19
3.2.4 TVOC.....	20
3.2.5 Methan CH ₄ und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe NMVOC	20
3.3 HiVol-Messungen mit PM10- und C-Analyse.....	21
3.4 Messungen der Sichttrübung.....	22
3.4.1 Messeinrichtung	22
3.4.2 Messwerte Isisbergtunnel.....	23
3.4.3 Vergleich von Berechnung und Messergebnissen.....	23
4 Beurteilung	24
4.1 Entwicklung der Emissionsfaktoren von NO _x , CO und TVOC	24
4.2 Entwicklung der Emissionsfaktoren von PM10, TC, EC und ST	26
4.3 HBEFA-Vergleich	27
4.3.1 Stickoxide NO _x und Oxidationsgrad NO ₂ /NO _x	27
4.3.2 Kohlenmonoxid CO	28
4.3.3 Kohlenwasserstoff TVOC	28
4.3.4 PM10, totaler (TC) und elementarer Kohlenstoff (EC)	29

5	Ausblick.....	30
6	Literaturverzeichnis	32
A.	Kalibrierung der automatischen Verkehrszählung.....	34
B.	Strömungsmessungen und Transportzeit	37
C.	Messungen der Sichttrübung.....	38
D.	Messwerte der gasförmigen Emissionen	42

Zusammenfassung

Seit 1988 führt das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) im 1- bis 3-Jahresabstand Schadstoffmessungen in Tunneln durch. Die Messungen dienen der Bestimmung der realen Emissionsfaktoren der Motorfahrzeuge in der Verkehrssituation Autobahn mit 100 km/h und zeigen deren zeitliche Entwicklung auf. Seit dem Jahr 2002 werden die Messkampagnen als Projekt in der Zusammenarbeit mit OSTLUFT (www.ostluft.ch) realisiert.

Die Messkampagnen von 1990 bis 2008 wurden im Gubristtunnel durchgeführt. Aufgrund der umfangreichen Sanierungsarbeiten im Gubristtunnel erfolgten die Messungen im Jahr 2011 in der Oströhre des Isisbergtunnels. Die Messungen fanden zwischen dem 29. April und dem 21. Juni 2011 in der in Richtung Nord steigenden Oströhre statt. Gemessen wurden die gasförmigen Schadstoffkonzentrationen von Stickstoffmonoxid NO, Stickstoffdioxid NO₂, Stickoxid NO_x, Kohlenmonoxid CO und die flüchtigen organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen als TVOC sowie die Feinstaubfraktion PM10 und die Sichttrübung ST. Über einen begrenzten Zeitraum wurde der in PM10 enthaltene gesamte Kohlenstoffanteil (TC) als Summe von elementarem Kohlenstoff (EC) und organischem Kohlenstoff (OC) ermittelt.

Die Auswertung erfolgte mit der Differenz der Messungen an den Standorten vor dem Ausfahrtsportal Wettswil am Albis und dem Einfahrtsportal Süd. Ergänzend zu den Schadstoffmessungen erfasste man die Strömungsgeschwindigkeit, den Druck, die Temperatur und die Feuchte im Tunnel.

Vom Gesamtverkehr wurden die Fahrzeuganzahl, differenziert in die 10 Klassen nach SWISS10, sowie die Fahrgeschwindigkeit aufgezeichnet. Die in der Auswertung als kurze Fahrzeuge bezeichnete Gruppe umfasst die Personenwagen PW und die leichten Nutzfahrzeuge LNF mit einer Länge kleiner 7 m, die als lange Fahrzeuge bezeichnete Gruppe die schweren Nutzfahrzeuge SNF und die Reisebusse mit einer Länge grösser 7 m.

In jedem Zeitschritt lassen sich mit diesen Daten der mittlere Emissionsfaktor der Fahrzeuge und der Emissionsfaktor für kurze Fahrzeuge und lange Fahrzeuge ableiten.

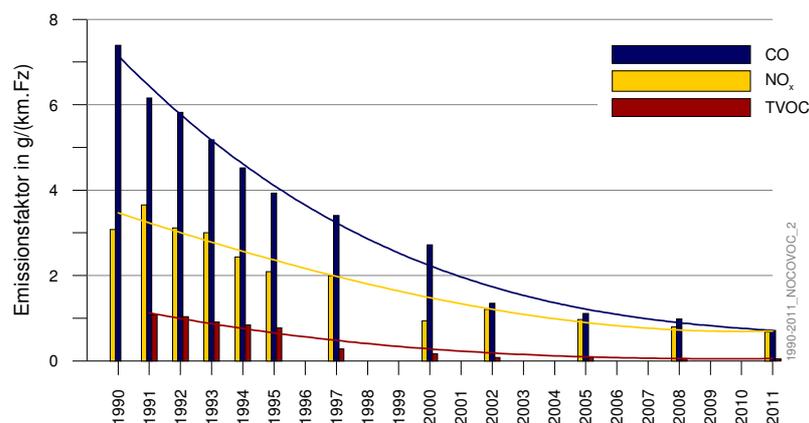


Abbildung 1.1 Entwicklung der mittleren Emissionsfaktoren pro Fahrzeug seit 1990 für NO_x, CO und TVOC aus den Messkampagnen bis 2008 im Gubristtunnel in Fahrrichtung St. Gallen und für 2011 im Isisbergtunnel in der Oströhre in Fahrrichtung Nord mit einer Steigung von 1.3 % bzw. 1.2 %.

Es zeigt sich, dass die NO_x -, CO- und TVOC-Emissionen der Motorfahrzeuge seit Beginn der Messungen im Jahr 1990 deutlich zurückgegangen sind. Auch zwischen den Jahren 2002 und 2011 konnte noch ein Rückgang dieser drei Schadstoffe von jeweils gut 40 % ermittelt werden. Besonders markant ist der Rückgang bei den Personenwagen als Folge der Katalysatortechnik.

Während die Bestimmung des mittleren Emissionsfaktors der Gesamtheit der durch den Tunnel fahrenden Motorfahrzeuge sehr zuverlässig möglich ist, ist die Zuordnung der Emissionsfaktoren für kurze und für lange Fahrzeuge mit grösseren Unsicherheiten verbunden: Zum einen steigt der Anteil der leichten Nutzfahrzeuge, die zur Klasse der kurzen Fahrzeuge gezählt werden, jedoch deutlich höhere Emissionsfaktoren als die Personenwagen aufweisen. Zum andern nimmt mit zunehmender Strenge der Abgasvorschriften der Einfluss des individuellen Fahrzeugzustandes zu, und einzelne Fahrzeuge in schlechtem Zustand können sehr dominant werden. So bewirkt z. B. der Ausfall des Dreiwegkatalysators bei einem Personenwagen mit Benzinmotor einen Anstieg des Schadstoffausstosses je nach Abgaskomponente um einen Faktor 100 bis 400.

Von den am 30. September 2010 in der Schweiz immatrikulierten Personenwagen waren 18.1 % mit Dieselmotoren ausgerüstet, bei den Lieferwagen waren es 69.5 %. Diese Werte haben in den letzten Jahren stark zugenommen und beim Verkauf von Neuwagen besteht weiterhin ein starker Trend zu Fahrzeugen mit Dieselmotor.

Seit den Messungen im Jahr 2002 wird die Russ-Analyse der Feinstaubfraktion PM10 durchgeführt. Die in diesem Bericht dargestellten EC- und TC-Werte beziehen sich auf das TOT-Analyseverfahren. Die Ergebnisse der Russ-Analyse (EC) zeigen nach dem Anstieg seit 2002 einen markanten Rückgang besonders bei den kurzen Fahrzeugen (Abbildung 1.2).

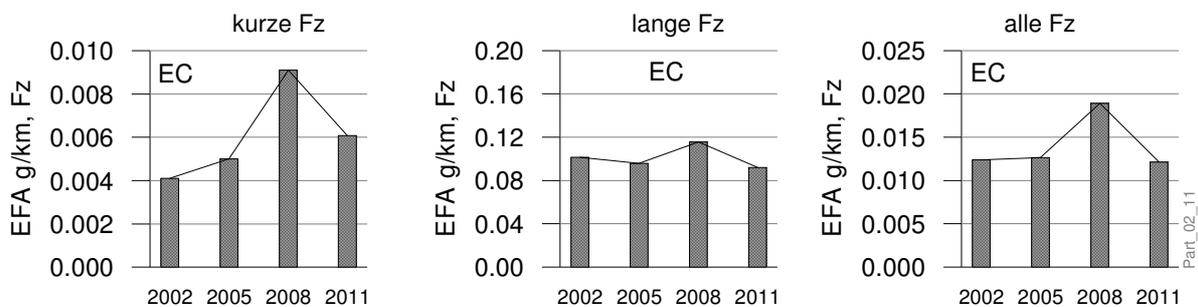


Abbildung 1.2: Vergleich der EC-Emissionsmessungen von 2002 bis 2008 im Gubristtunnel sowie 2011 im Islisbergtunnel, links: kurze Fahrzeuge, Mitte: lange Fahrzeuge, rechts: Mittelwert aller Fahrzeuge

Der Vergleich der anhand der Messungen ermittelten Emissionsfaktoren für kurze Fahrzeuge und für lange Fahrzeuge mit den Angaben im Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) Version 3.1 von 2010 ist nachfolgend zusammengefasst. Die Angaben beziehen sich auf frei fließenden Verkehr in der Oströhre des Islisbergtunnels. Die Berechnungen nach dem Handbuch Emissionsfaktoren wurden für die Verkehrssituation CH/AB/100/flüssig und das Verkehrsszenario "BAU" bei der durchschnittlichen Steigung von 1.187 % und mit der Option

Klimaanlage Frühling durchgeführt. Die angegebenen Abweichungen beziehen sich jeweils auf die Emissionswerte des Handbuchs als 100 %.

- Bei den NO_x-Emissionsfaktoren ergeben die Messungen für die kurzen Fahrzeuge eine um 35 % tiefere und für die langen Fahrzeuge um 49 % höhere Emission als nach der Angabe des Handbuchs. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge von 4.85 % ergeben die Messungen 7 % tiefere NO_x-Emissionen als gemäss Handbuch.
- Aus der Messung von NO und NO_x konnte der Oxidationsgrad für kurze Fahrzeuge bestimmt werden. Der abgeschätzte Wert von 24 % entspricht exakt der Angabe im Handbuch, der den NO-Oxidationsgrad direkt am Auspuff bezeichnet.
- Die Messwerte der CO-Emissionsfaktoren liegen für kurze Fahrzeuge 3 % über der Angabe im Handbuch. Die Extrapolation für lange Fahrzeuge ergibt eine unrealistische (negative) CO-Emission. Die Streuung der über 12'000 ausgewerteten 3-Minuten-Sequenzen ist sehr gross.
- Die Streuung der ermittelten TVOC-Emissionsfaktoren ist ebenfalls gross. Die Emission für die kurzen Fahrzeuge liegt 28 % über der Angabe im Handbuch. Bei den langen Fahrzeugen ergeben die Messwerte um 44 % tiefere Emissionen als im Handbuch. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge von 4.76 % ergeben die Messungen 15 % höhere TVOC-Emissionen als gemäss Handbuch.
- Es wurden 84 Sequenzen (Filter) zu 2 Stunden gemessen. Der ermittelte PM10-Emissionsfaktor für die kurzen Fahrzeuge ist gemäss den Messungen im Isisbergtunnel um 47 % tiefer, jener für die langen Fahrzeuge um 28 % höher als die Angabe für PM im Handbuch. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge von 4.63 % ergeben die Messungen 45 % tiefere PM10-Emissionen als die PM-Werte gemäss Handbuch. Bemerkenswert ist, dass in den Handbuch-Werten keine Beiträge für Abrieb und Aufwirbelung eingerechnet sind, diese jedoch bei den Messungen enthalten sind.
- Für 12 Sequenzen wurde der Anteil von elementarem Kohlenstoff EC analysiert. Die Auswertung ergibt für die kurzen Fahrzeuge einen um 60 % tieferen Wert als nach den Angaben für PM im Handbuch. Die ermittelte EC-Emission für die langen Fahrzeuge stimmt sehr gut mit dem PM-Wert im Handbuch überein. Im Mittel über alle erfassten Fahrzeuge ist der EC-Emissionswert aus den Messungen bei 45 % des Wertes berechnet nach dem Handbuch.
- Die Sichttrübungswerte werden stark durch die kleinsten Partikel in der Luft geprägt und sind vor allem für die Auslegung und den Betrieb der Tunnellüftung von Interesse. Die im Isisbergtunnel für die Steuerung der Fahrraumlüftung gemessenen Sichttrübungswerte lagen um einen Faktor von 3.5 und mehr unter den theoretisch erwarteten Werten. Allerdings deuten Messungen der Sichttrübung im Gubristunnel aus dem Jahr 2011, die mit dem gleichen Messverfahren wie im Isisberg erhoben wurden, ebenfalls auf einen Rückgang seit der Kampagne 2008 hin.

Bei künftigen Messkampagnen sollten insbesondere folgende Erfahrungen berücksichtigt werden:

Für eine zuverlässige Analyse sind ausreichend spezifizierte und verifizierte Verkehrsdaten erforderlich. Dieser Bedarf ergibt sich insbesondere durch den steigenden Anteil der Lieferwagen, LNF, wie auch deren Abgrenzung gegen grosse Personenwagen, PW, und gegen Lastwagen, LW. Bei der hier beschriebenen Kampagne hat sich die SWISS10-Klassierung aufgrund von Schlaufenzählungen als problematisch erwiesen. Zählsysteme, die eine zuverlässigere SWISS10-Klassierung erlauben, existieren (Radar, Nummernschild-Analyse).

Neben den Verkehrsdaten stammten die grundlegenden Messwerte der Luftströmung durch den Tunnel wie auch die Messwerte der Sichttrübung aus tunneleigenen Installationen. Die für die Messungen im Islisbergtunnel erhobenen Strömungswerte mussten nachträglich rechnerisch korrigiert werden. Die Sichttrübungswerte sind mit ungeklärt grossen Unsicherheiten behaftet. Die Unsicherheiten wirken sich direkt auf die Genauigkeit der Ergebnisse aus. Es sollte geprüft werden, ob eigens für die Messkampagne eingesetzte Geräte verwendet werden können.

Die Ergebnisse der Messreihe zeigen, dass die Kenntnis der Partikelemission an Bedeutung zunimmt. Um einen besseren Bezug zwischen den Messungen und den Angaben im Handbuch Emissionsfaktoren sowie den Fraktionen aus der C-Analyse schaffen zu können, sollte die Anzahl der auf Kohlenstoff analysierten Filter erhöht und die PM1-Fraktion am Schwebestaub bestimmt werden.

Durch den steigenden Anteil der Lieferwagen muss die Auswertung allein nach kurzen und nach langen Fahrzeugen in Frage gestellt werden. Zu prüfen sind statistische Methoden zur Aufteilung der Emissionsfaktoren für die drei Fahrzeugkategorien PW, LNF und SNF, die in Relation zu den entsprechenden Angaben im Handbuch Emissionsfaktoren gestellt werden können.

1 Einleitung

Seit 1988 führt das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) im 1- bis 3-Jahresabstand Schadstoffmessungen in Tunneln durch. Die Messungen dienen der Bestimmung der realen Emissionsfaktoren der Motorfahrzeuge in der Verkehrssituation Autobahn mit 100 km/h und zeigen deren zeitliche Entwicklung auf. Seit dem Jahr 2002 werden die Messkampagnen als Projekt in der Zusammenarbeit mit OSTLUFT (www.ostluft.ch) realisiert.

Die Messungen im Jahr 2011 wurden erstmals im neu eröffneten Isisbergtunnel durchgeführt, nachdem alle früheren Messkampagnen im Gubristtunnel stattfanden. Der Wechsel vom Gubristtunnel zum Isisbergtunnel war bedingt durch die Sanierungsarbeiten im Gubristtunnel, welche die Messkampagne gestört hätten. Zudem ergeben sich im Gubristtunnel auch vermehrt Einschränkungen durch häufige Situationen mit gestörtem Verkehrsfluss, die nicht in die Auswertung einbezogen werden können oder eine grössere Datenstreuung ergeben.

Die Datenerhebung im Isisbergtunnel erfolgte zwischen dem 29. April und dem 21. Juni 2011 in der Oströhre in Richtung Zürich. In dieser Röhre erfolgt die Fahrt in der Steigung, gut vergleichbar mit der Steigung in der Südröhre des Gubristtunnels Fahrrichtung St. Gallen, in der die vorhergehenden Messkampagnen stattgefunden hatten. Die Kontinuität der Messreihe, dargestellt in Abbildung 1.1, ist somit gut gegeben.

In der hier beschriebenen Kampagne 2011 wurden die gasförmigen Schadstoffkonzentrationen von Stickstoffmonoxid NO, Stickstoffdioxid NO₂, Stickoxiden NO_x, Kohlenmonoxid CO, die Gesamtheit der flüchtigen organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen TVOC und Methan CH₄ gemessen. Zudem wurden die Feinstaubfraktion PM₁₀ und der darin enthaltene gesamte Kohlenstoffanteil (TC) als Summe von elementarem (EC) und organischem Kohlenstoff (OC) ermittelt. Ebenfalls erfasst wurden die Daten der tunneleigenen Sichttrübungsmesseinrichtung. Für die Bestimmung der Emissionsfaktoren muss für jede ausgewertete Sequenz der Volumenstrom der Luft durch den Fahrraum bekannt sein. Dieser wurde aus den Strömungsmessungen im Tunnel abgeleitet. Ergänzend erfasste man zudem die Temperatur, den Druck und die relative Feuchte im Tunnel. Die Verkehrserfassung erfolgt an drei Stellen im Tunnel: nach der Einfahrt, in der Tunnelmitte und vor der Ausfahrt. Die detaillierten Aufzeichnungen für jedes einzelne Fahrzeug nach Swiss10 wurden vom ASTRA zur Verfügung gestellt. Grundlage für die Auswertung bilden 3-Minuten-Mittelwerte.

Der vorliegende Bericht enthält neben der detaillierten Analyse der Messungen 2011 aus dem Isisbergtunnel auch die Zusammenstellung der Messergebnisse seit dem Jahr 1990 in der Südröhre des Gubristtunnels.

2 Grundlagen

2.1 Tunneldaten

2.1.1 Geometrie

Der Islisbergtunnel auf der A4 schliesst im Norden bei Wettswil am Albis an die Westumfahrung A20 an und führt im Süden in den Raum Affoltern. Die Strecke bildet somit den nördlichsten Abschnitt der Verbindung zwischen der Agglomeration Zürich und der Innerschweiz. Der Tunnel ist als vierstreifige Nationalstrasse 1. Klasse ausgebaut und weist zwei zweistreifige, im Richtungsverkehr befahrene Tunnelröhren auf.

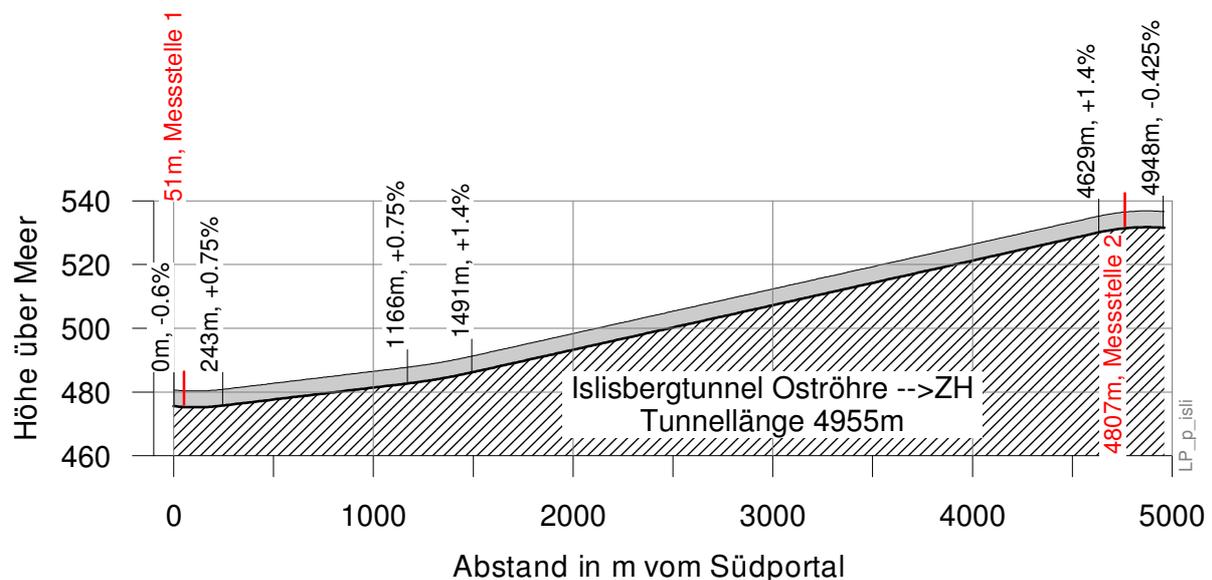


Abbildung 2 Längsprofil in der Oströhre des Islisbergtunnels Fahrrichtung Zürich

Im Bereich der Messstrecke von 4'756 m Länge sind die Längsneigungen

auf 1'278 m	0.69 %
auf 3'478 m	1.37 %
im Mittel auf 4'756 m	1.187 %

Im Gubristtunnel betrug die Längsneigung im gesamten Messbereich durchgehend 1.292 %.

Die Daten der Tunnelröhre des Islisbergtunnels, in denen die Messungen durchgeführt wurden, sind aus der folgenden Tabelle ersichtlich. Zum Vergleich sind die entsprechenden Daten des Gubristtunnels gegenübergestellt.

	Islisbergtunnel Oströhre	Gubristtunnel Südröhre
Länge	4'955 m	3'268 m
Fahrraumquerschnitt	47.6 m ²	48 m ²
Längsneigung	+1.187 %	+ 1.292 %

2.1.2 Lüftung

Der Isisbergtunnel ist mit einer Längslüftung mit Rauchabsaugung durch steuerbare Abluftklappen ausgerüstet. Bei flüssigem Richtungsverkehr, d.h. im Regelfall, erfolgt die Belüftung der Tunnelröhren durch die Schubwirkung des Verkehrs. Die mechanische Lüftung ist nur im Fall von Gegenverkehr infolge unzureichender Sicht im Fahrraum oder im Ereignisfall erforderlich. Zur Verminderung der Emissionsfreisetzung durch das Nordportal besteht zudem die Möglichkeit, die Tunnelluft kurz vor dem Ausfahrtsportal Nord durch Klappen in der Tunneldecke abzusaugen und über den Abluftkamin mit hoher Strahlggeschwindigkeit vertikal in die Umgebung auszustossen. Diese energieintensive Massnahme wurde bisher nie als erforderlich erachtet und wurde somit nie ergriffen.

Im vorliegenden Bericht sind nur Messwerte beschrieben, die bei reiner Längslüftung erfasst wurden. Störungen durch einen Lüftungsbetrieb, insbesondere durch Luftabsaugung, wurden ausgeschlossen. Die Sequenzen mit Gegenverkehr und mit Betrieb von Strahlventilatoren wurden für die Auswertung ebenfalls nicht verwendet.

2.1.3 Strassenbelag

Im Tunnel besteht der Strassenbelag aus einem nicht offenporigen Splitmastix-Asphalt.

2.2 Messungen

2.2.1 Verkehr

Als Grundlage für die Auswertungen dienen die Verkehrsdaten, erhoben an der Induktionsschlaufen-Zählstelle VZ-ZH2103, die 300 m innerhalb des Südportals (Einfahrtsportal) installiert ist. Die Zählstelle liefert Zahlen gemäss der SWISS10-Klassierung separat für jeden der beiden Fahrstreifen.

Die Videoeichungen haben gezeigt, dass die Zählungen für Motorräder nicht verwendbar sind. Es ist zu vermuten, dass die zum Teil krasse Überschätzung der ausgewiesenen MR-Zahlen durch Fahrstreifenwechsel zustande kommt. Dabei entstehen auch Doppelerfassungen. Dies führte dazu, dass die MR-Werte in der Auswertung vernachlässigt werden mussten (MR=0). Für die aggregierten Kategorien Personenwagen und Lieferwagen PW+LNF sowie schwere Nutzfahrzeuge SNF konnten differenzierte Eichfaktoren ermittelt werden (Details siehe Anhang A).

Fahrzeug- kategorie	Sonn- und Feiertage sowie werktags 17-05 Uhr	übrige Zeiten
PW+LNF	0.99	0.99
SNF	0.72	0.90

Die folgende Tabelle weist die mit diesen Faktoren kalibrierten Verkehrszahlen über die Auswertedauer vom 29. April 2011 um 11:09 bis am 21. Juni 2011 um 23:09 aus. Die Farbcodierung entspricht den Klassenzuweisungen PW+LNF (grün, in früheren Berichten als kurze Fahrzeuge bezeichnet) und SNF (blau, in früheren Berichten als lange Fahrzeuge bezeichnet).

Klasse	Fahrzeugtyp	Anzahl	Anteil	
1	Bus	4'999	0.38%	zu SNF
2	MR	??	??	
3	PW	1'057'858	80.93%	PW+LNF
4	PW+Anh	4'557	0.35%	
5	LNF	178'788	13.67%	
6	LNF+Anh	5'414	0.41%	
7	LNF+Aufl	3'396	0.26%	
8	LW	23'394	1.79%	SNF
9	LZ	10'441	0.80%	
10	SZ	18'364	1.40%	
Gesamt	-	1'307'154	100 %	

Abbildung 3 Anzahl Fahrzeuge und Anteile im Auswertezeitraum
Die Zählwerte für Motorräder sind nicht verwendbar (siehe Anhang A)

Der Anteil LNF an der Summe PW+LNF beträgt 15 %. Im Vergleich zur Zählung 2008 im Gubristtunnel (6.8 %) ist der Anteil aller LNF mit 14.35 % sehr hoch. Demgegenüber ist der Anteil der SNF mit 4.38 % eher gering (Gubrist 2008: 6.1 %).

Von den am 30. September 2010 in der Schweiz immatrikulierten Personenwagen waren 18.1 % mit Dieselmotoren ausgerüstet, bei den Lieferwagen waren es 69.5 %. Diese Werte haben in den letzten Jahren stark zugenommen und beim Verkauf von Neuwagen besteht weiterhin ein starker Trend zu Fahrzeugen mit Dieselmotor.

Die Bestandsanteile stammen vom Superweb des Bundesamtes für Statistik [3]. Die Emissionsangaben im Handbuch Emissionsfaktoren des Bundesamtes für Umwelt, HBEFA Version 3.1 [4], sind fahrleistungsbezogen. Die im Handbuch enthaltene Entwicklung der Fahrleistung der Personenwagen und Lieferwagen mit Dieselmotor ist nachfolgend dargestellt.

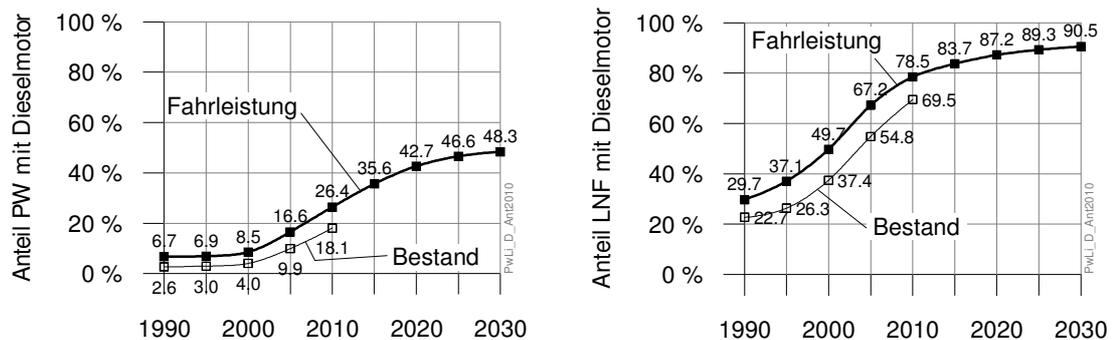


Abbildung 4 Bestand nach Bundesamt für Statistik [3] und Fahrleistungen nach dem Handbuch [4] der Personenwagen und Lieferwagen mit Dieselmotor in der Schweiz

Abbildung 4 zeigt, dass die mittlere Fahrleistung der Fahrzeuge mit Dieselmotor deutlich höher ist als der prozentuale Fahrzeugbestand.

2.2.2 Luftströmung

Die Luftströmung durch den Fahrraum wird an insgesamt 6 Fahrraumquerschnitten gemessen. Die verwendeten Instrumente sind lokal messende Ultraschallgeräte, die jeweils paarweise in zwei Dreiergruppen angeordnet sind. Die eine Dreiergruppe befindet sich im Bereich der Tunneleinfahrt, die zweite vor der Tunnelausfahrt.

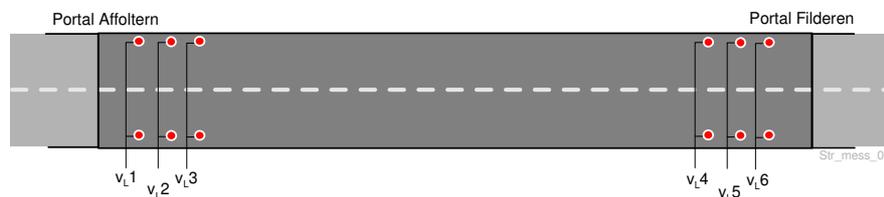


Abbildung 5 Anordnung der Strömungsmessgeräte im Fahrraum (schematisch)
Massstäbliche Darstellung siehe Abbildung 17

Die Daten der zwei Geräte pro Messquerschnitt werden zu einem Ausgabedatum gemittelt, womit pro 10 Sekunden 6 Messwerte zur Verfügung stehen. Der repräsentative Volumenstrom entspricht der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Messquerschnitt. Angaben zur Umrechnung der ermittelten Messwerte sind in Anhang B enthalten.

Der in Abbildung 6 gezeigte Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit ist der hochgerechnete 3-Minuten-Mittelwert der Messquerschnitte 1 bis 4 sowie 6. Die Daten des permanent tiefer anzeigenden Gebers 5 wurden als nicht korrekt beurteilt und nicht verwendet.

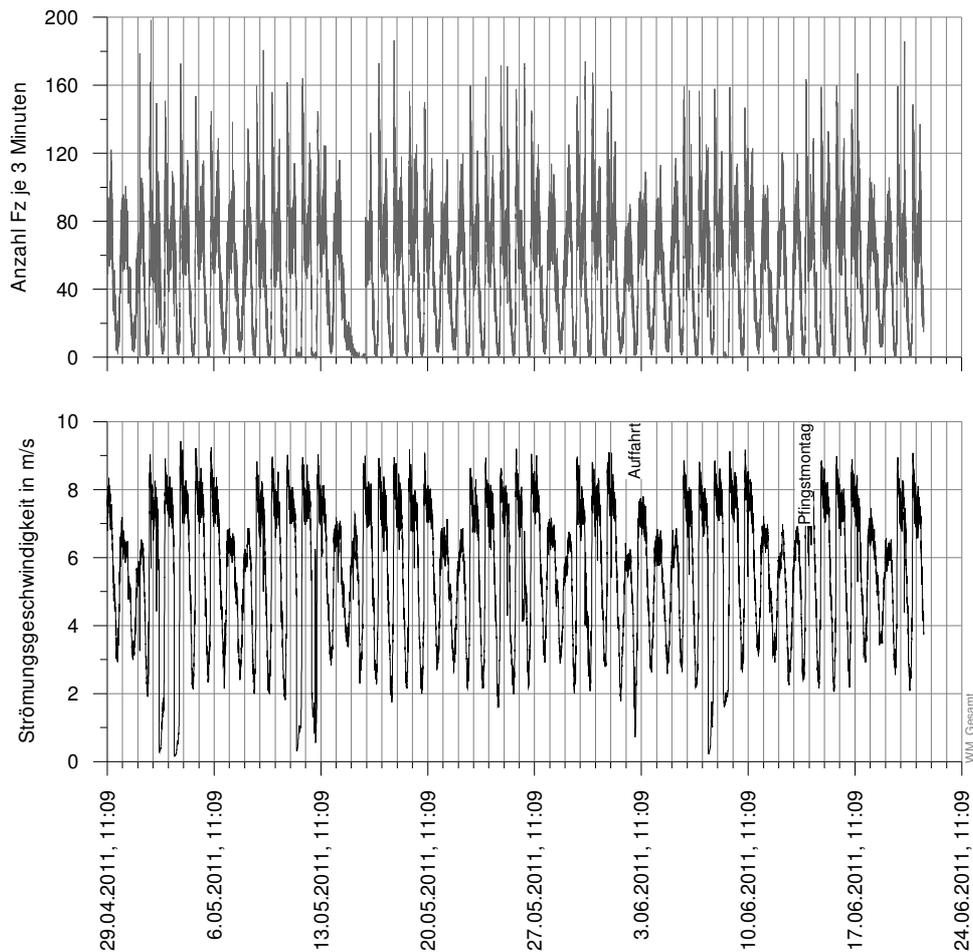


Abbildung 6 Oben: Mit den ermittelten Eichfaktoren korrigierte Gesamtzahl der Fahrzeuge als 3-Minuten-Mittelwerte in der Messröhre. Ersichtlich ist der Zählerfehler am 15.5.2011, der alle drei Zählstellen in den Tunnelröhren gleichermassen betrifft.
Unten: Für den mittleren Volumenstrom skalierte Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrraum über die Messdauer, 3-Minuten-Mittelwerte
(Daten aus WM_Mittel_20110429_20110621.txt)

2.2.3 Schadstoffe

Die Emissionen im Tunnel wurden als Differenzmessung zwischen Einfahrtsportal und Ausfahrtsportal ermittelt. Die Distanz zwischen den Messorten am Einfahrts- und Ausfahrtsportal war 4'756 m.

Die Sichttrübung wird als Regelgröße für den Betrieb der Tunnellüftung über die Tunnellänge verteilt an 12 Stellen gemessen.

Die Lage der Messgeräte im Tunnel ist aus Abbildung 7 und Abbildung 8 ersichtlich. Die für die Auswertung verwendeten Verkehrsdaten stammen von der Zählstelle ZH2103 bei km 45'963, dargestellt in Abbildung 7.

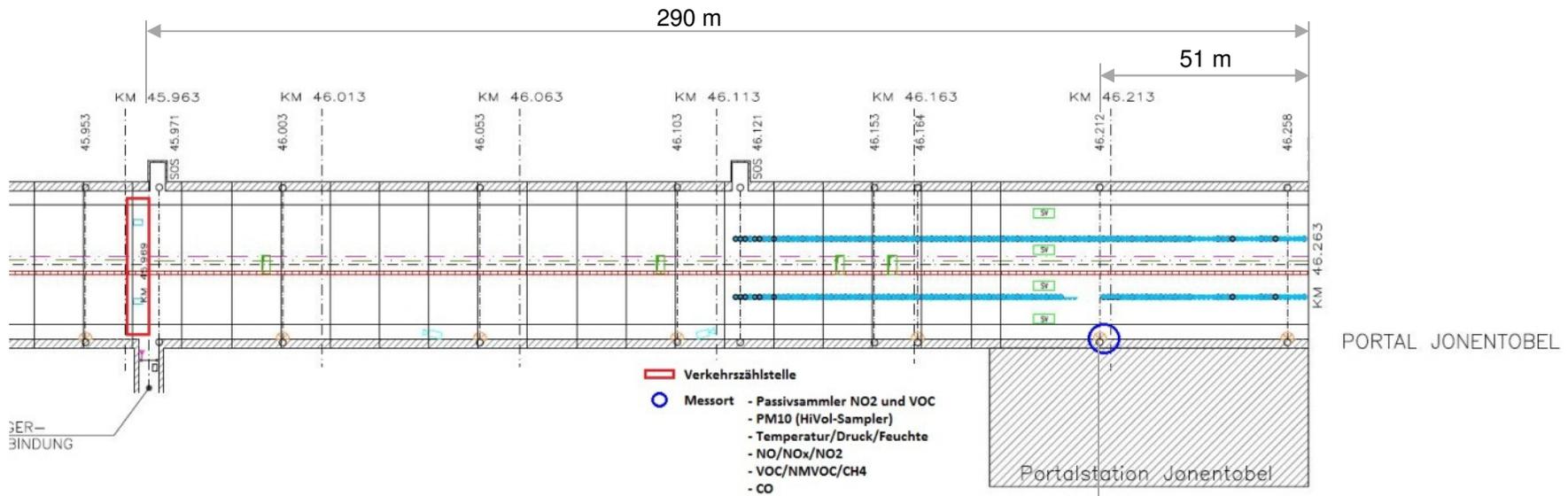


Abbildung 7 Lage der Messstellen im Bereich des Südportals des Islisbergtunnels sowie die verwendete Verkehrszählstelle ZH2103

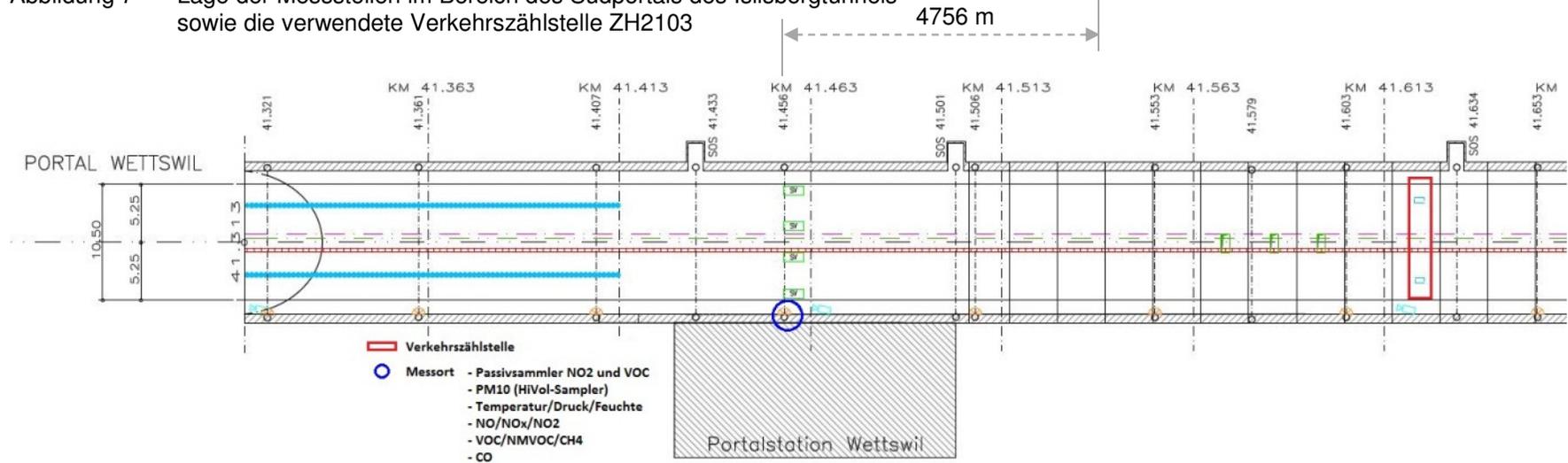


Abbildung 8 Lage der Messstellen im Bereich des Nordportals des Islisbergtunnels



Abbildung 9 HiVol-Samplers und Passivsammler im Fahrraum des Islisbergtunnels beim Ausfahrtsportal in Wettswil a. A.



Abbildung 10 Messeinrichtung unter der Fahrbahn beim Ausfahrtsportal in Wettswil a. A.

3 Messungen

3.1 Messprinzip und Schritte zur Auswertung

- Mechanische Tunnellüftung vollständig ausser Betrieb (Abluftklappen geschlossen), natürliche Längslüftung durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge. Zeiten mit Lüftungsbetrieb, z. B. während Staulagen, werden in der Auswertung nicht berücksichtigt.
- Messung der Tunnelluftkonzentrationen kurz nach dem Einfahrtsportal und vor dem Ausfahrtsportal der Oströhre (Differenzmessung). Die Tunnelluft enthält alle bis zur Messstelle im Tunnel angefallenen Abgasemissionen.
- Berechnung des Luftvolumenstroms aus der Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel.
- Berechnung der Laufzeit des betrachteten Luftvolumens von der ersten zur zweiten Messstelle.
- Bestimmung der Anzahl Fahrzeuge, unterschieden zwischen PW+LNF und SNF, die das betrachtete Luftvolumen in seiner Laufzeit von der ersten zur zweiten Messstelle durchfahren haben.
- Berechnung der mittleren Emissionsfaktoren pro Fahrzeug.
- Die Umrechnung von volumen- auf massenbezogene Einheiten erfolgt bei Emissionsmessungen an Fahrzeugen nach der Verordnung über die Abgasemissionen leichter Motorwagen (741.435.1 / FAV 1 vom 22. Oktober 1986, Stand am 4. August 1998) auf den Normzustand bei 0°C/1013.25 hPa. Diese Umrechnung ist auch Basis für die Emissionsfaktoren des Handbuches. Für die Kalibrierung der Kohlenwasserstoffmessgeräte im Gubristtunnel wurde Propan verwendet, in der Auswertung wurde deshalb äquivalent die Normdichte für Propan berücksichtigt. Die TVOC*-Emissionsfaktoren im Handbuch (als HC bezeichnet), sind entsprechend der Zusammensetzung des Treibstoffes als C₁H_{1.85}-Äquivalent definiert. Für die in diesem Bericht ausgewerteten Schadstoffe wurden folgende Normdichten (ρ bei 0°C/1013.25 hPa) verwendet:

ρ_{CO}	1.249 kg/m ³	
ρ_{NO_x}	2.052 kg/m ³	(NO ₂ -Äquivalent)
[ρ_{TVOC}	1.860 kg/m ³	(C ₃ H ₈ -Äquivalent)]
ρ_{TVOC^*}	0.619 kg/m ³	(C ₁ H _{1.85} -Äquivalent)

Die Messwerte für Schadstoffe und Verkehr standen als 3-Minuten-Mittelwerte zur Verfügung, die Strömungswerte der Luft als 10-Sekunden-Mittelwert. Für jede 3-Minuten-Sequenz wurde die Laufzeit der Luft durch den Tunnel berechnet und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit zwischen den Messorten bestimmt. Anschliessend wurde die Anzahl Fahrzeuge, die in dieser Zeit durch das Messvolumen gefahren waren, ermittelt. Durch die veränderliche Überschneidung der Mittelungszeitbereiche von Messvolumen und Verkehrsdaten ergibt sich am Ende der Messstrecke eine Unschärfe der Verkehrszuordnung.

Es gilt:

$$EFA = \frac{A_T \cdot (c_2 - c_1) \cdot \rho_{Stoff}}{n_{Fz}}$$

- mit
- EFA Emissionsfaktor in g/km,Fz
 - A_T Fahrraumquerschnitt in m²
 - c_2 Konzentrationsmesswert an der Messstelle 2 (Ausfahrtsportal) in µg/m³
 - c_1 Konzentrationsmesswert an der Messstelle 1 (Einfahrtsportal) in µg/m³
 - ρ_{Stoff} Dichte des Schadstoffs, siehe oben
 - n_{Fz} Anzahl der Fahrzeuge, die durch das Luftvolumen fahren

c_2 und n_{Fz} werden als Funktion der Laufzeit bestimmt.

3.2 NO_x-, CO- und TVOC-Messergebnisse

Die auswertbaren Messungen liegen im Zeitfenster zwischen dem 29. April 2011, 11:00 Uhr, und dem 21. Juni 2011, 15:00 Uhr.

Die lineare Funktion (grün) durch die nach dem Handbuch berechneten Werte für die Schwerverkehrsanteile 0 % und 100 % ist in den Grafiken mit EFA_HB bezeichnet. Sie enthält in der aggregierten Klasse PW+LNF den LNF-Anteil von 15 % (siehe Kapitel 2.2.1).

3.2.1 NO_x

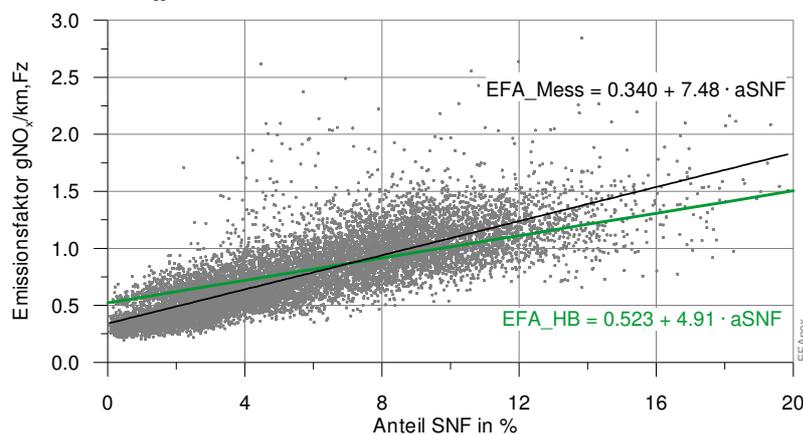


Abbildung 11 Ergebnisse der NO_x-Berechnung

12'281 Sequenzen gerechnet, linearer Fit mit 12'165 Sequenzen bis 3.0 g/km,Fz
erfasst: PW+LNF: 2'583'647; SNF: 131'725 entsprechend 4.85 %

Die Emissionsfaktoren in g/NO_x/km,Fz sind:

	Messung	HBEFA	
PW	--	0.357	PW
PW+LNF	0.340	0.523	PW mit LNF
LNF	--	1.47	LNF
SNF	7.82	5.26	SNF

3.2.2 Oxidationsgrad NO₂/NO_x

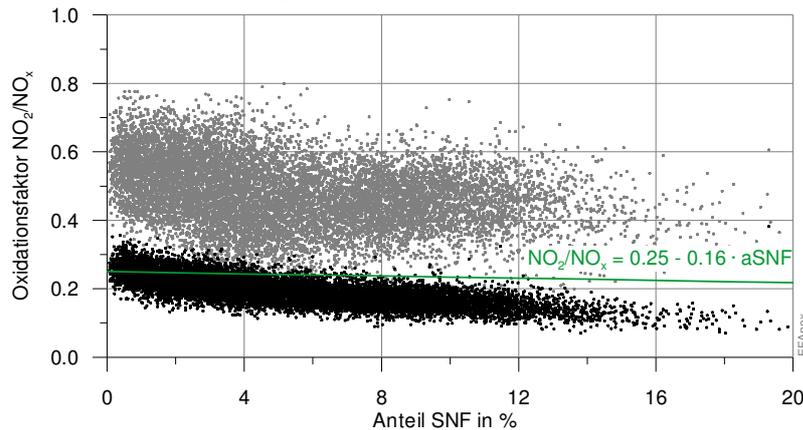


Abbildung 12 Oxidationsgrad bei der Messstelle am Einfahrtportal (Aussenluft: obere Schar) und an der Messstelle vor dem Ausfahrtportal (untere Schar)

Die Angaben im Handbuch beziehen sich auf die Oxidationswerte am Auspuff. Der Rückgang von NO war in den letzten 20 Jahren deutlich höher als der Rückgang von NO₂ am Auspuff. Damit ergeben sich deutlich höhere initiale Oxidationsgrade. Die Messungen geben den Hinweis, dass die Oxidation im Tunnel sehr gering sein dürfte.

3.2.3 CO

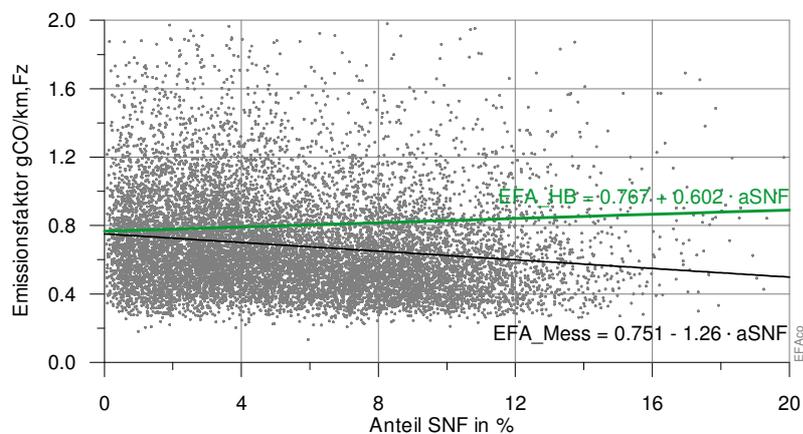


Abbildung 13 Ergebnisse der CO-Berechnung

12'579 Sequenzen gerechnet, linearer Fit mit 12'417 Sequenzen bis 2.0 g/km,Fz
erfasst: PW+LNF: 2'632'557; SNF: 136'132 entsprechend 4.92 %

Die Emissionsfaktoren sind:

	Messung	HBEFA	
PW	--	0.684	PW
PW+LNF	0.751	0.767	PW mit LNF
LNF	--	1.23	LNF
SNF	(<0 ??)	1.30	SNF

3.2.4 TVOC

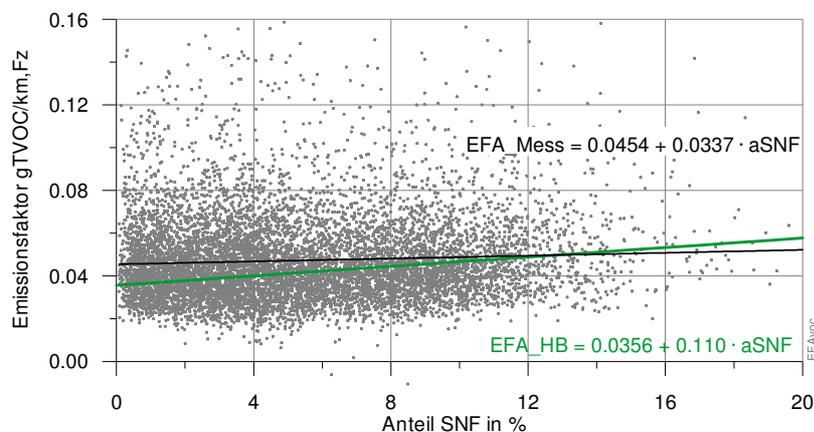


Abbildung 14 Ergebnisse der TVOC- (HC-)Berechnung

9'312 Sequenzen gerechnet, linearer Fit mit 9'260 Sequenzen bis 0.16 g/km,Fz
erfasst: PW+LNF: 1'987'147; SNF: 99'412 entsprechend 4.76 %

Die Emissionsfaktoren sind:

	Messung	HBEFA	
PW	--	0.0312	PW
PW+LNF	0.0454	0.0356	PW mit LNF
LNF	--	0.0606	LNF
SNF	0.0791	0.142	SNF

3.2.5 Methan CH₄ und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe NMVOC

Der CH₄-Anteil in der Umgebung ist hoch. Aufgrund der Messgenauigkeit konnten aus der Messdifferenz zwischen Tunnelausfahrt und Tunneleinfahrt keine sinnvollen Emissionsfaktoren ermittelt werden.

3.3 HiVol-Messungen mit PM10- und C-Analyse

Die HiVol-Messungen wurden vom 14.5.2011 um 00:00 bis am 20.5.2011 um 24:00 durchgeführt. Die Filter wurden jeweils 2 Stunden an den Messorten Tunnelleinfahrt sowie Tunnelausfahrt exponiert. Die sich daraus ergebenden 84 Messpaare à 2 Stunden wurden zu Emissionsfaktoren umgerechnet und sind in Abbildung 15 dargestellt.

Die fehlerhaften Verkehrsdaten vom Sonntag, 15.5.2011, 02:00, bis am Montag, 16.5.2011, 10:00, wurden mit den Verkehrsdaten vom Sonntag, 22.5., und Montag, 23.5.2011, ersetzt.

Über die 84 2-Stunden-Sequenzen betrug der mittlere SNF-Anteil 4.63 %.

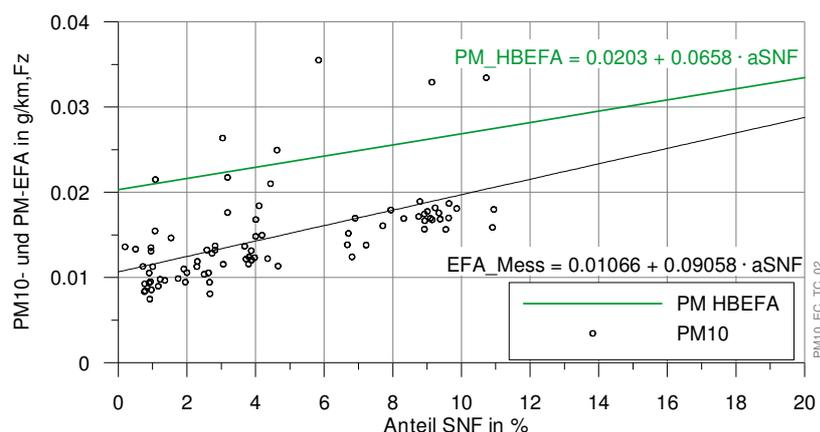


Abbildung 15 PM10-Emissionsfaktoren aus den HiVol-Messungen und Vergleich mit den PM-Werten aus HBEFA

Die PM-Werte nach Handbuch umfassen die Partikel am Auspuff ohne Abrieb und Aufwirbelung, die PM10-Werte der HiVol-Messungen enthalten die Anteile aus Abrieb und Aufwirbelung. Allerdings spielen Reifenabrieb und Abrieb von intakten Strassenbelägen wie im Isisbergtunnel nur eine untergeordnete Rolle (<0.5 bis 1 %), weil Partikel überwiegend in der Staubfraktion grösser 10 µm auftreten [8].

In den HiVol-Filtern vom Sonntag, 15.5 und Dienstag, 17.5.2011, jeweils von 02:00 bis 14:00, wurde der Kohlenstoffanteil analysiert. Der in PM10 enthaltene gesamte Kohlenstoffanteil (TC) als Summe von elementarem Kohlenstoff (EC) und organischem Kohlenstoff (OC) wurde in Anlehnung an VDI 2465 Blatt 2 durch thermographische Analyse und IR-Detektion bestimmt. Parallel dazu wurden die Filterproben mit dem Thermo-Optischen-Verfahren (TOT mit Temperaturprotokoll EUSAAR2) auf EC und OC analysiert.

Die Auswertung des ersten Filters, dargestellt in Abbildung 16, ausserhalb des Sonntag-Bereichs wurde zur Bestimmung der Emissionsfaktoren nicht verwendet, da damit unplausible Werte entstehen würden.

Für die 5 2-Stunden-Sequenzen am Sonntag, 15. Mai, und die 6 2-Stunden-Sequenzen am Dienstag, 17. Mai 2011, mit C-Analyse betrug der mittlere SNF-Anteil 4.8 % (am Sonntag 1 % und am Dienstag 6.7 %).

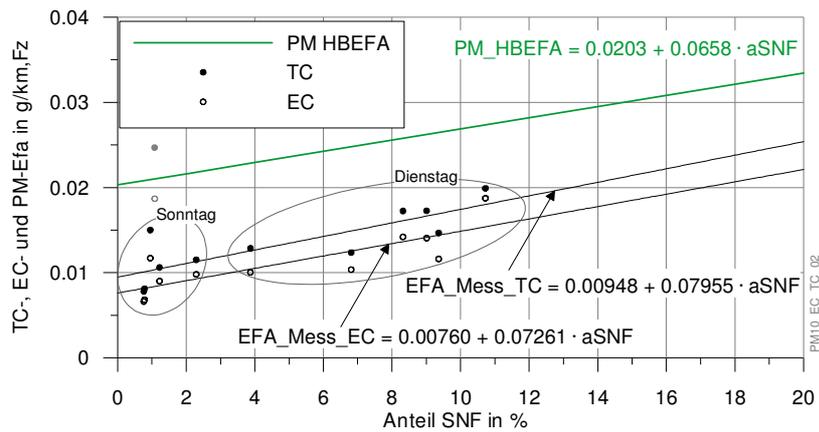


Abbildung 16 TC- und EC-Emissionsdaten aus den HiVol-Messungen und Vergleich mit den PM-Werten aus HBEFA

Die Bestimmung der Emissionsfaktoren anhand von 11 Datenpunkten und insbesondere die dazu erforderliche Extrapolation für die SNF-Faktoren sind sehr gewagt.

3.4 Messungen der Sichttrübung

Die Messungen der Sichttrübung (ST) weist grosse, nicht erklärbare Abweichungen zu den erwarteten Werten auf. Details dazu sind im Anhang C enthalten.

3.4.1 Messeinrichtung

Im Islisbergtunnel sind über die Tunnellänge pro Röhre 16 ST-Messgeräte angeordnet mit einem Abstand zwischen zwei Geräten von 300 m. Die Datenfiles enthalten die ST-Werte in mE/m (Milliextinktion pro Meter), gleichbedeutend mit E/km. Die Extinktion E ist der Lichtverminderungsfaktor.

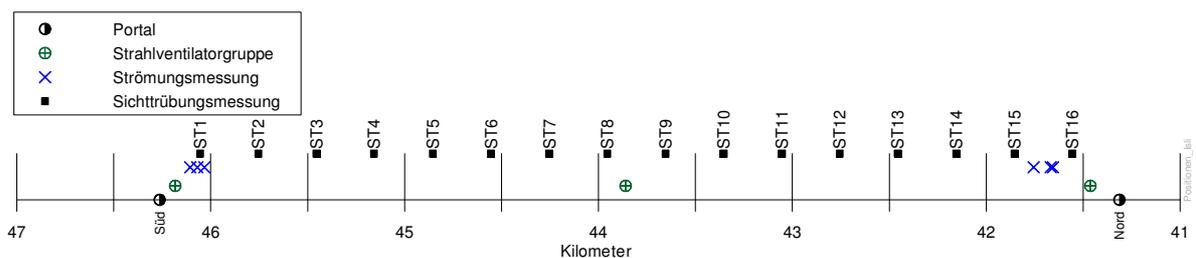


Abbildung 17 Massstäbliche Darstellung der Positionen der Portale, der Strahlventilatorgruppen, der Strömungsmessquerschnitte und der ST-Messungen in der Röhre Fahrrichtung ZH; Fahrrichtung von links nach rechts.

3.4.2 Messwerte Isisbergtunnel

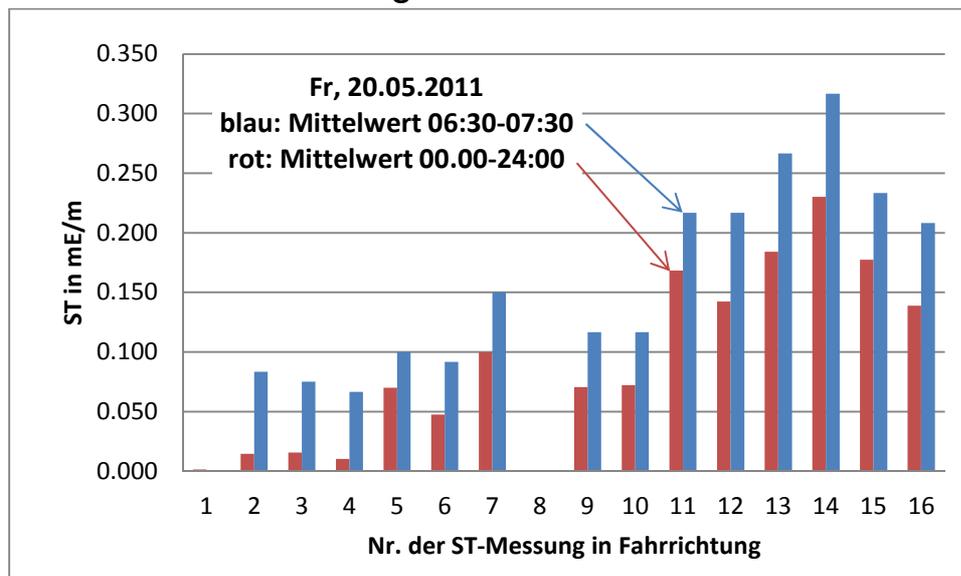


Abbildung 18 Gemessene ST-Werte über die Länge des Isisbergtunnels in der Röhre in Fahrrichtung Zürich am Fr, 20.5.2011; links: Einfahrtsportal Süd

Die Werte zeigen weder am genauer analysierten Tag (20.5.2011) noch im Mittel über 25 Tage den erwarteten stetigen Anstieg der Sichttrübung in Fahrrichtung von links nach rechts. Ein Rückgang der ST-Werte (bez. der Schadstoffkonzentration im Allgemeinen) ist mit einem Betrieb der im Tunnel vorhandenen Lüftung nicht erklärbar und auch mit Leckage oder Strömungskurzschlüssen mit der Gegenröhre nicht plausibel.

3.4.3 Vergleich von Berechnung und Messergebnissen

Wird mit den detailliert vorliegenden Verkehrsdaten für den 20.5.2011 die Zunahme der ST-Werte über die Tunnellänge nach [6] berechnet, ergibt sich

für den Tagesmittelwert: 0.88 mE/m

für das Mittel von 06:30 bis 07:30: 1.35 mE/m.

Diese Werte enthalten keine Vorbelastung in der Aussenluft am Einfahrtsportal (vgl. Anhang C, Abbildung 32: Messwerte Weiningen beim Gubristtunnel).

Unter der Annahme einer Vorbelastung am Einfahrtsportal des Isisbergtunnels von 0.01 mE/m im Tagesmittel und 0.05 mE/m für die Stunde von 06:30 bis 07:30 ergibt sich mit Bezug auf den maximal gemessenen Wert am Messort 14, der 817 m vor dem Ausfahrtsportal liegt, eine Zunahme der Sichttrübung über die Tunnellänge von 4955 m von

für den Tagesmittelwert: 0.257 mE/m

für den Mittelwert von 06:30 bis 07:30: 0.317 mE/m.

Die Verhältnisse zum Rechenwert sind damit 3.4 für den Tagesmittelwert und 4.3 für den Stundenmittelwert. Für die grosse Differenz gibt es zur Zeit der Dokumentation keine Ergebnisse. Weitere Details siehe Anhang C.

4 Beurteilung

4.1 Entwicklung der Emissionsfaktoren von NO_x, CO und TVOC

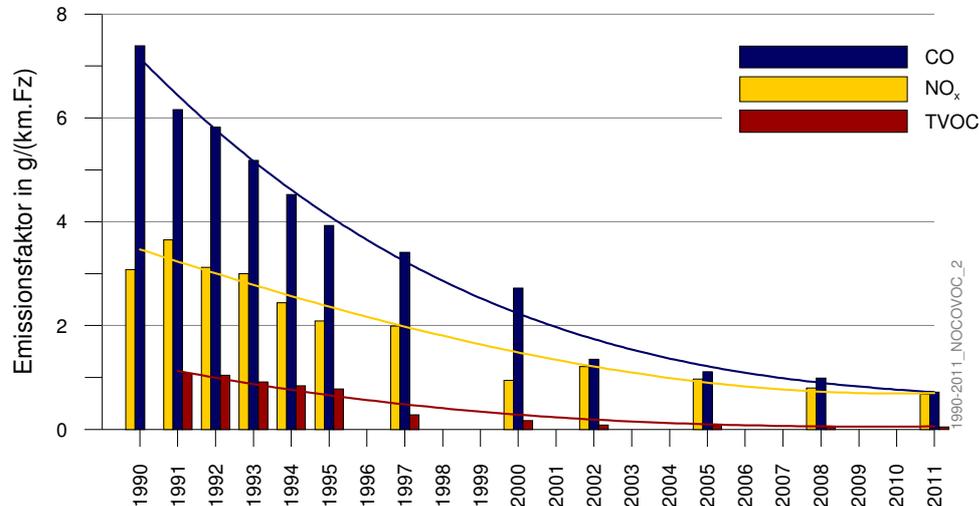


Abbildung 19 Messreihen der mittleren Emissionsfaktoren von CO, NO_x und TVOC, 1990 bis 2011

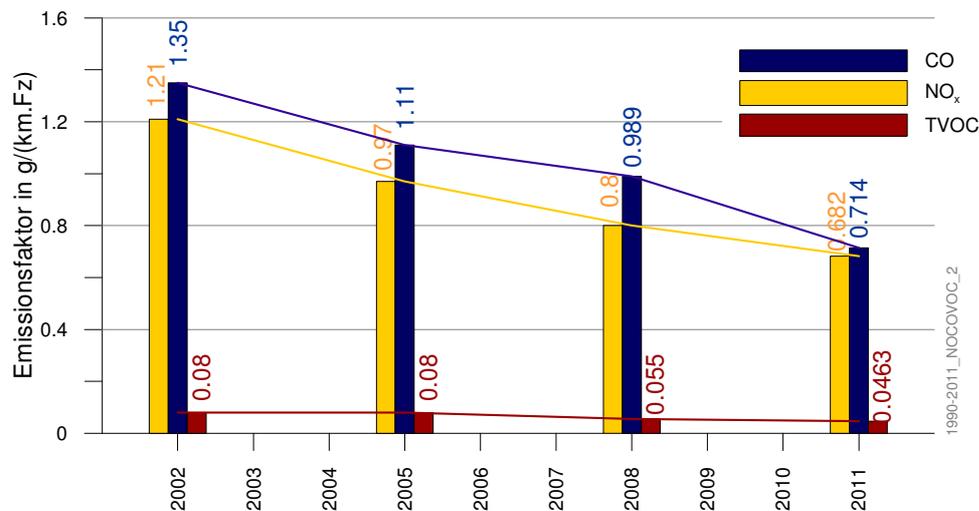


Abbildung 20 Messreihen der mittleren Emissionsfaktoren von CO, NO_x und TVOC, 2002 bis 2011 (Ausschnitt aus Abbildung 19)

Aus Abbildung 19 und Abbildung 20 ist der starke Rückgang der mittleren Emissionsfaktoren der gasförmigen Schadstoffe NO_x, CO und TVOC seit dem Jahr 1990 ersichtlich. Selbst zwischen den Jahren 2002 und 2011 betrug die Reduktion bei diesen Schadstoffen mindestens 40 %, was aus der unteren Grafik ersichtlich wird. Die Angaben beziehen sich ausschliesslich auf den Fahrzustand Autobahn mit 100 km/h in der Steigung von 1.3 %. Die Messung 2011 im Islisbergtunnel passt sehr gut in die Reihe der früheren Messungen im Gubristtunnel.

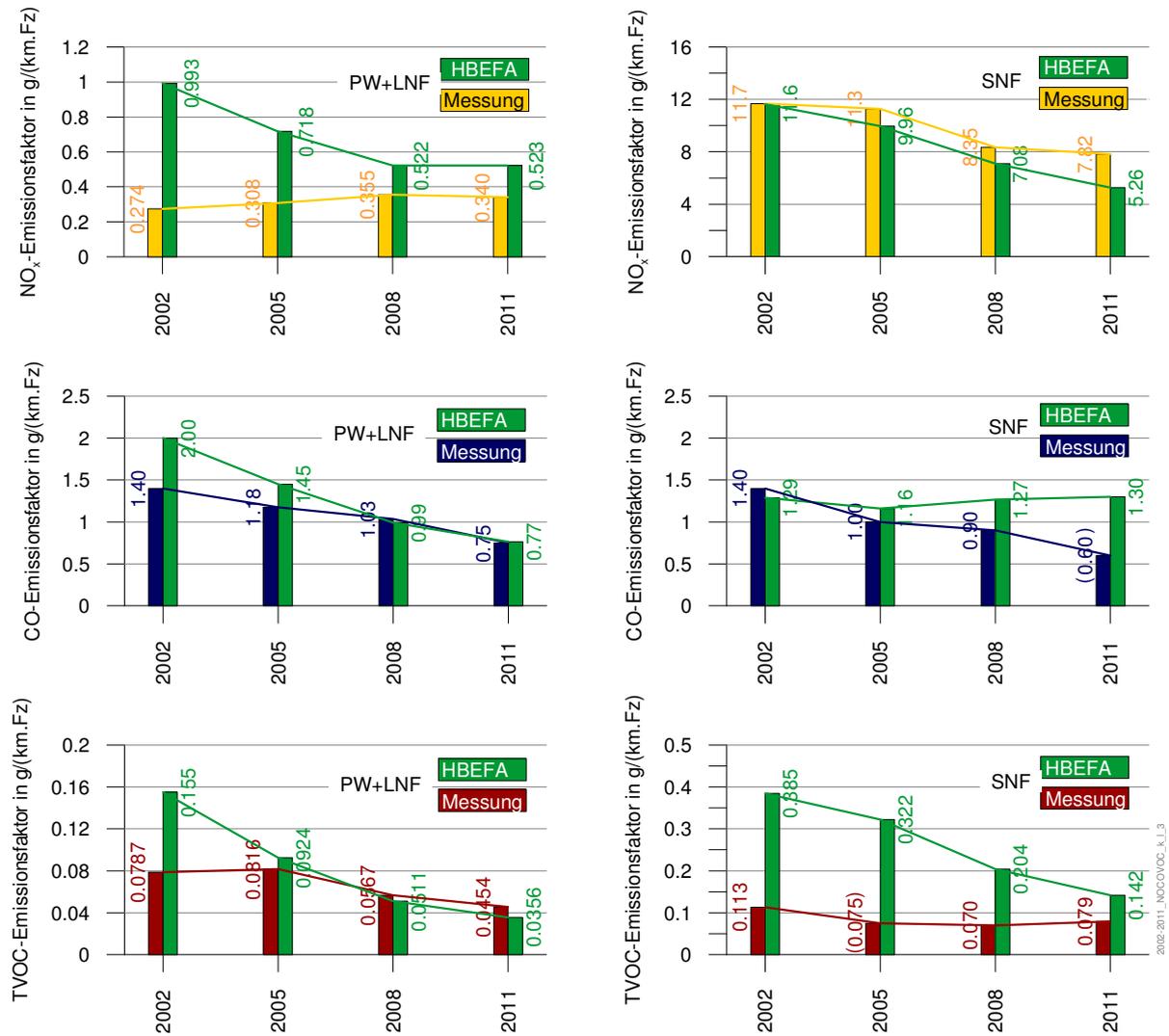


Abbildung 21 Messreihen der Emissionen von CO, NO_x und TVOC, von 2002 bis 2008 im Gubristunnel und 2011 im Isisbergtunnel, differenziert nach PW+LNF und SNF, sowie Emissionswerte nach dem Handbuch, Version 3.1 [4]. Die beiden Angaben in Klammern (SNF, CO, 2011 und SNF, TVOC, 2005) sind statistisch nicht begründet, sondern stammen aus einer optischen Interpretation eines Teils der Punkteschar (für SNF, CO, 2011 siehe Abbildung 13).

Zu Abbildung 21 ist zu bemerken, dass die Angaben des Verkehrs erst ab 2005 nach SWISS10 vorliegen. Die Emissionswerte nach HBEFA 3.1 enthalten für 2002 einen geschätzten LNF-Anteil von 6 %. Im Gubristunnel wurde für 2005 ein LNF-Anteil von 6.6 % und für 2008 ein Anteil von 6.8 % gezählt. Die Zählung im Isisbergtunnel 2011 ergab den LNF-Anteil von 15 % (vgl. Abbildung 3).

4.2 Entwicklung der Emissionsfaktoren von PM10, TC, EC und ST

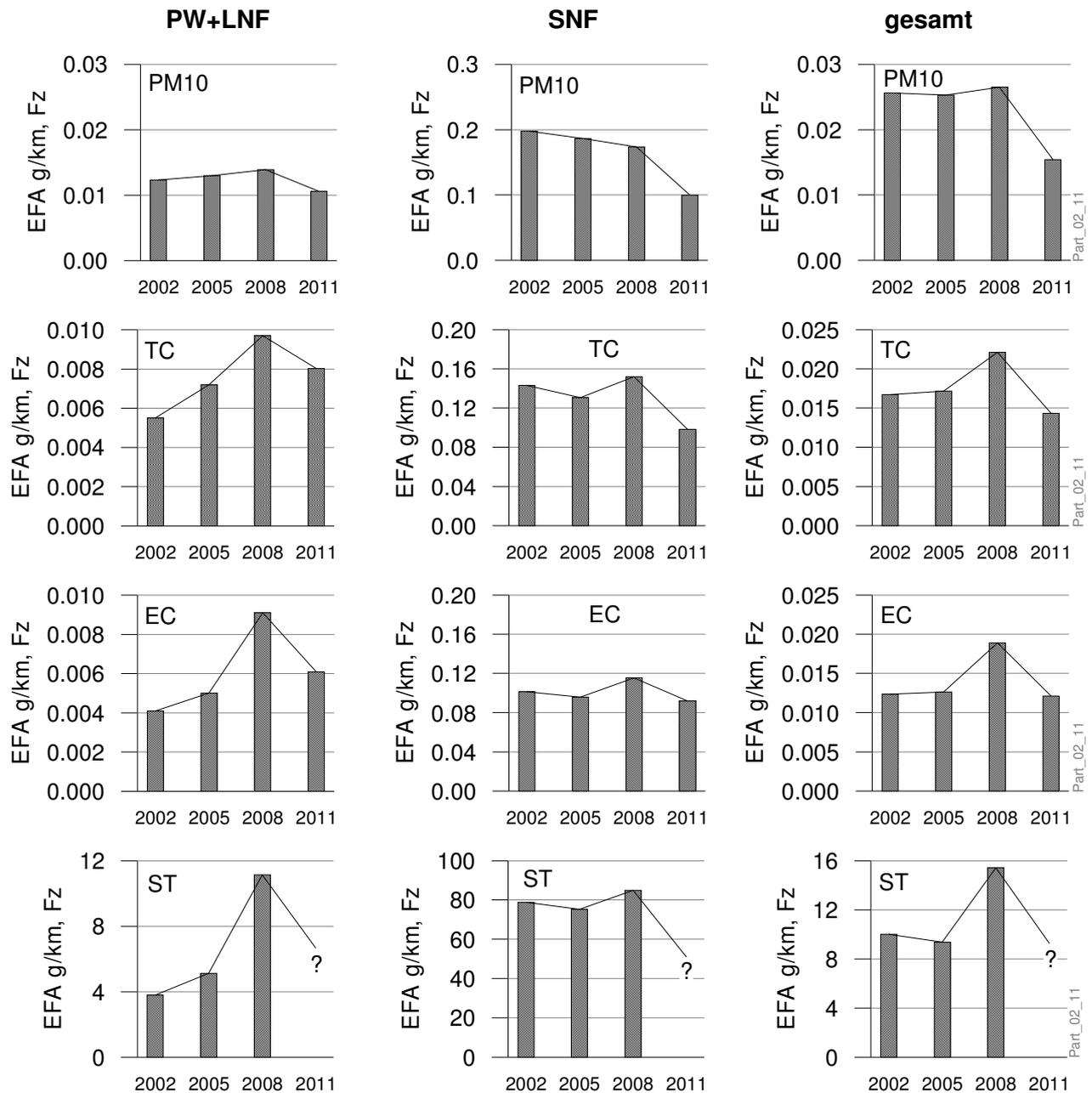


Abbildung 22 Ergebnisse für die Emissionsfaktoren von PM10, TC, EC und ST aus den Messungen von 2002 bis 2011. links: PW+LNF, Mitte: SNF, rechts: Mittel entsprechend Verkehrszusammensetzung. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinaten.

Die ST-Messungen von 2011 konnten nicht quantitativ ausgewertet werden. Ein Vergleich der Daten der Jahre 2008 und 2011 aus dem Gubristunnel weisen auf eine gesamthafte Reduktion von 40 % hin (siehe Anhang C, Abbildung 32).

Markant ist der Rückgang bei PM10, TC und EC zwischen den Messungen 2008 und 2011. Die Messwerte der Sichttrübung liegen mit grosser Streuung weit unter den prognostizierten Werten. Weitere Angaben dazu sind in Anhang C zu finden.

4.3 HBEFA-Vergleich

Das folgende Kapitel zeigt den Vergleich der Ergebnisse der Messkampagne mit den entsprechenden Werten gemäss Handbuch Emissionsfaktoren V3.1. Bei den Messungen kann zwischen den Kategorien PW+LNF und SNF unterscheiden werden. Über die gesamte Messkampagne beträgt der Anteil Lieferwagen an der Summe von Personenwagen und Lieferwagen 15.0 %, der für die Berechnung der Emissionsfaktoren PW+LNF verwendet wird. Zudem wird ein Mittelwert ausgewiesen, der dem SNF-Anteil über die Summe der jeweiligen Messsequenzen entspricht. Dieser Anteil ist je nach Verfügbarkeit der Datensätze unterschiedlich.

4.3.1 Stickoxide NO_x und Oxidationsgrad NO₂/NO_x

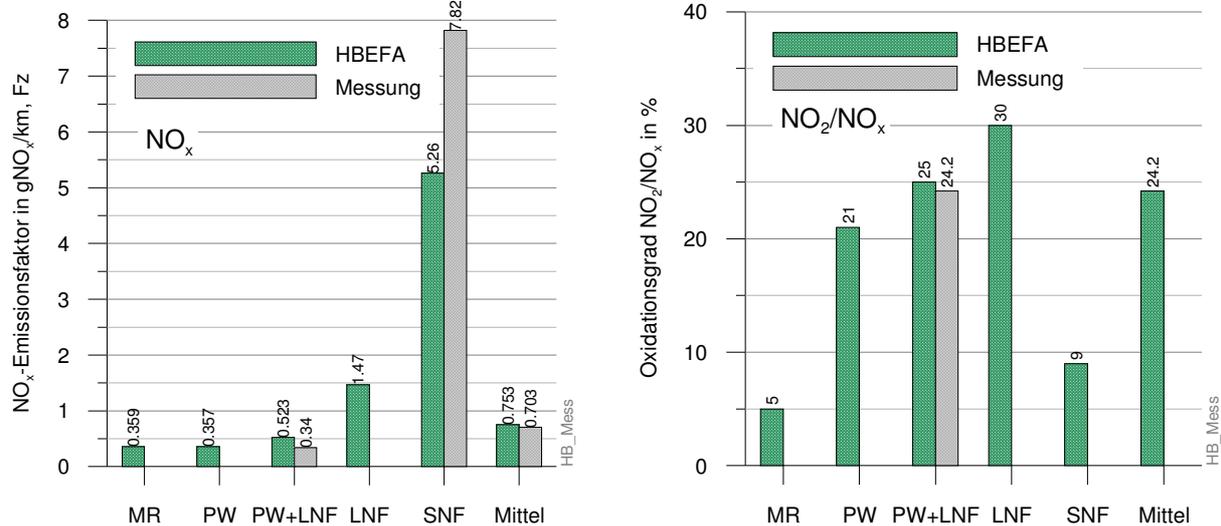


Abbildung 23 links: NO_x-Emissionsfaktoren; rechts: Oxidationsgrad

Der mittlere SNF-Anteil über die gültigen Sequenzen betrug 4.85 %. Während die Messungen für die Klasse PW+LNF deutlich geringere NO_x-Emissionen nach Handbuch ergaben (-35 %), waren die Messwerte für die SNF deutlich höher (+49 %). Im Mittel über alle Fahrzeuge beträgt die Differenz zum Handbuch -7 %.

Die erhobenen Messwerte lassen eine Abschätzung des Oxidationsgrades für die Klasse PW+LNF zu. Am Ausfahrtsportal beträgt dieser 24 %. Unter Einbezug der Stickoxidanteile am Einfahrtsportal ist der Oxidationsgrad zwischen den Messstellen maximal 23 %. Es wird hier davon ausgegangen, dass bei den gemessenen geringen NO-Konzentrationen im Tunnel die molekulare NO-Oxidation keine Rolle spielt. Wäre diese Annahme falsch, läge der Oxidationsgrad am Auspuff bei etwas geringeren Werten. Der Oxidationswert von 23 % ist deutlich höher als bei früheren Emissionsstandards; dies entspricht den Erwartungen.

4.3.2 Kohlenmonoxid CO

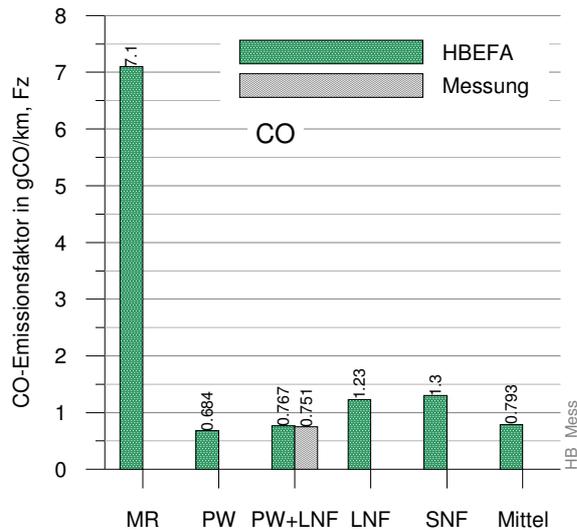


Abbildung 24 CO-Emissionsfaktoren

Der mittlere SNF-Anteil über die gültigen Sequenzen betrug 4,92 %. Die Messungen für die Klasse PW+LNF deckt sich mit den Handbuch-Werten (+3 %). Die lineare Regression über den Anteil der SNF lässt keine Bestimmung des CO-Emissionsfaktors für SNF zu (negativer Wert, vgl. Abbildung 13).

4.3.3 Kohlenwasserstoff TVOC

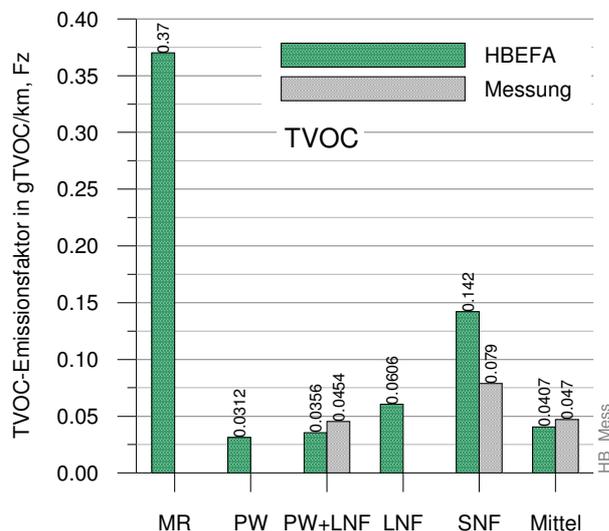


Abbildung 25 TVOC-Emissionsfaktoren

Der mittlere SNF-Anteil über die gültigen Sequenzen betrug 4,76 %. Die Messungen für die Klasse PW+LNF ergaben um 28 % höhere Emissionen als die Handbuch-Werte, die Messwerte für die SNF liegen bei 56 % der Handbuch-Werte. Im Mittel über alle Fahrzeuge beträgt die Differenz zum Handbuch +15 %.

4.3.4 PM10, totaler (TC) und elementarer Kohlenstoff (EC)

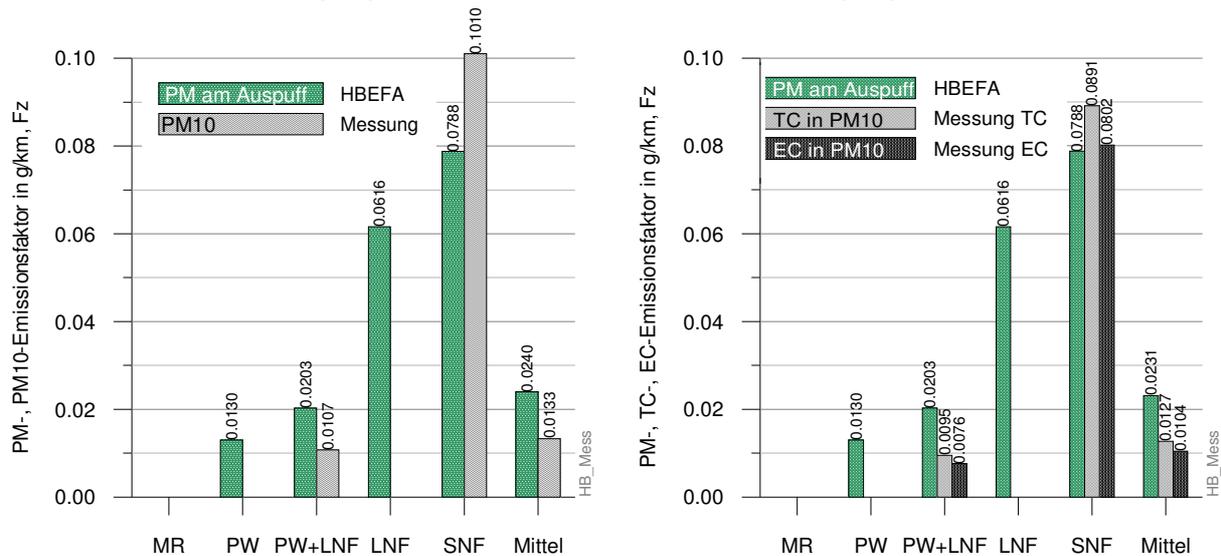


Abbildung 26 Vergleich der Emissionsfaktoren nach Handbuch HBEFA und aus Messungen
links: Partikel am Auspuff (HBEFA) und PM10 (Messung);
rechts: Partikel am Auspuff (HBEFA) und TC sowie EC (Messung)

Die PM10-Messungen stammen aus 84 2-Stunden-Sequenzen. Für die Klasse PW+LNF sind die aus den Messungen ermittelten PM10-Emissionsfaktoren bei der Hälfte der Handbuch-Werte für Partikel, die Messwerte für die SNF sind rund 20 % höher als die Handbuch-Werte. Im Mittel über alle 176'465 erfassten Fahrzeuge beträgt die Differenz zum Handbuch -45 %.

Die Werte für TC und EC ergeben sich aus 11 der 12 analysierten HiVol-Filtern der PM10-Messung. Der EC-Wert für PW+LNF ist rund 60 % tiefer als die Handbuch-Werte für Partikel, die EC-Messwerte für die SNF sind in Übereinstimmung mit den Angaben im Handbuch. In den 11 für die Auswertung erfassten 2-Stunden-Sequenzen wurden 21'850 Fahrzeuge erfasst. Der Mittelwert des EC-Faktors über alle Fahrzeuge liegt bei 45 % der Handbuch-Werte für Partikel. Aufgrund der geringen Anzahl von ausgewerteten Filtern und der Probleme bei der Verkehrszählung sind die Ergebnisse für TC und EC sehr unsicher (Details siehe Kapitel 3.3).

Die Vergleichbarkeit von PM10, EC und TC mit der Fraktion Partikel aus dem Handbuch ist fraglich. Der beste direkte Bezug dürfte zwischen EC und den Angaben im Handbuch für Partikel bestehen.

5 Ausblick

Die Ergebnisse der Messreihe in den Tunneln Gubrist und Islisberg, aber auch die Probleme, die sich insbesondere bei der Auswertung der Messungen von 2011 im Islisbergtunnel stellten, führen zu folgenden Empfehlungen im Hinblick auf weitere Messkampagnen:

Intervall der Kampagnen

Aufgrund des bisherigen Verlaufs der Ergebnisse für die Schadstoffe NO_x , CO und TVOC ist das seit 2002 eingehaltene Intervall von 3 Jahren plausibel. Um jedoch zeitnahe Kenntnis von grösseren Abweichungen zwischen Prognosen und Realwerten zu erhalten, wurde entschieden, ein Messintervall von 2 Jahren einzuhalten.

Die nächste Messung soll im Jahr 2014 durchgeführt werden, damit ausreichend Zeit für die Erfassung der erforderlichen Grundlagedaten gegeben ist.

Wahl des Tunnels

Für künftige Messkampagnen in der Messreihe eignen sich sowohl der Gubristtunnel wie auch der Islisbergtunnel. Massgebend sind die Dauer ungestörten Verkehrsflusses, die Verfügbarkeit zuverlässiger Daten aus dem Tunnel und der Zugang zu den Anlagen.

Derzeit wird davon ausgegangen, dass die Messungen im Islisbergtunnel durchgeführt werden.

Fahrzeugdaten

Für eine zuverlässige Analyse künftiger Messungen sind ausreichend spezifizierte und verifizierte Verkehrsdaten erforderlich. Dieser Bedarf ergibt sich insbesondere durch den steigenden Anteil der Lieferwagen, LNF, wie auch deren Abgrenzung gegen grosse Personenwagen, PW, und gegen Lastwagen, LW. Bei der hier beschriebenen Kampagne hat sich die SWISS10-Klassierung aufgrund von Induktionsschlaufenzählungen als problematisch erwiesen.

Zählssysteme, die eine zuverlässigere SWISS10-Klassierung erlauben, sind verfügbar. Im Gubristtunnel sind Staudetektoren (Radar) installiert, die mit entsprechender Auswertung die gewünschten Fahrzeugdaten liefern könnten. Als weitere Möglichkeit kann für in der Schweiz immatrikulierte Fahrzeuge die Nummernschild-Analyse in Betracht gezogen werden, wie sie bereits im Projekt Genemis eingesetzt wurde.

Tunnelinterne Messungen

Neben den Verkehrsdaten stammten die Messwerte der Luftströmung durch den Tunnel wie auch die Messwerte der Sichttrübung aus tunneleigenen Installationen. Die für die Messungen im Islisbergtunnel erhobenen Strömungswerte mussten nachträglich rechnerisch korrigiert werden. Die Sichttrübungswerte sind mit ungeklärt grossen Unsicherheiten behaftet. Die Unsicherheiten führten zu einem beträchtlichen Zusatzaufwand bei der Auswertung und schlugen direkt auf die Genauigkeit der Ergebnisse durch. Es sollte geprüft werden, ob eigens für die Messkampagne eingesetzte Geräte zu verwenden sind.

Partikel

Die Ergebnisse der Messreihe zeigen, dass die Kenntnis der Partikelemission vorrangig wird. Um einen besseren Bezug zwischen den Messungen und den Angaben im Handbuch Emissionsfaktoren sowie den Fraktionen aus der C-Analyse schaffen zu können, ist zusätzlich die Bestimmung der PM1-Fraktion am Schwebestaub zu wünschen.

Auswertung

Durch den steigenden Anteil der Lieferwagen muss die Auswertung allein nach kurzen und nach langen Fahrzeugen in Frage gestellt werden. Zu prüfen sind statistische Methoden zur Aufteilung in die drei Fahrzeugkategorien PW, LNF und SNF, die in Relation zu den entsprechenden Angaben im Handbuch Emissionsfaktoren gestellt werden können.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Ostluft, AWEL: Verkehrs- und Schadstoffmessungen 2002 im Gubristtunnel, Update mit Vergleich der Emissionsfaktoren mit HBEFA 2.1 vom Februar 2004
Bericht US 89-16-11a von US + FZ Beratende Ingenieure, 24. Mai 2005
- [2] Ostluft, AWEL: Verkehrs- und Schadstoffmessungen im Gubristtunnel 2008,
Bericht US + FZ Beratende Ingenieure, Update 25. Mai 2010
- [3] Bundesamt für Statistik: Superweb, Bestand der Strassenfahrzeuge in der Schweiz,
Stand am 30. Juni 2012
- [4] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BAFU: Handbuch Emissionsfaktoren,
Version 3.1, 30. Januar 2010
- [5] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BAFU: Schriftenreihe Umwelt Nr. 355,
Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1980 - 2030, 2004
- [6] Weltstrassen-Verband AIPCR, Strassentunnel-Komitee: Emissionen,
Lüftung, Umwelt, 1995
- [7] Bundesamt für Strassen ASTRA: Richtlinie Lüftung der Strassentunnel,
2008
- [8] PM10-Emissionsfaktoren von Abriebpartikeln des Strassenverkehrs (APART),
Forschungsauftrag auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA 2005/007,
August 2009

Anhang

- A Kalibrierung der automatischen Verkehrszählung
- B Strömungsmessungen und Transportzeit
- C Messungen der Sichttrübung
- D Messwerte der gasförmigen Emissionen

A. Kalibrierung der automatischen Verkehrszählung

Die automatische Verkehrserfassung nach SWISS10 erfolgt im Islisbergtunnel an drei Stellen. In der Röhre Richtung Norden, in der die Messungen durchgeführt wurden, sind dies

<u>Ort</u>	<u>Bezeichnung</u>
Einfahrtsportal Süd	ZH2103
Tunnelmitte	ZH2102
Ausfahrtsportal Nord	ZH2101

Aus den SWISS10-Protokollen wurden mit einem Programm des AWEL die Anzahl der Fahrzeuge der einzelnen Klassen und pro Fahrstreifen in 3-Minuten-Intervalle zusammengefasst.

Videozählungen

Der Vergleich mit den Videozählungen erfolgte jeweils für die gesamte Betrachtungsdauer von 2 bzw. 3 Stunden.

Die Videoablesung wurde von Praktikanten beim AWEL durchgeführt. Unterschieden wurden 3 Klassen: PW+LNF, MR sowie SNF. Die Validierung durch zwei verschiedene Personen zeigte eine sehr gute Übereinstimmung der Ablesung.

In Anlehnung an die Eichzählungen früherer Jahre wurden zunächst 2 Perioden zu 2 Stunden ausgezählt:

Dienstag, 14. Juni 2011, 18:00 – 20:00

Sonntag, 19. Juni 2011, 13:00 – 15:00.

Der Vergleich von Videoablesung und automatischer Zählung ergab

PW + LNF	sehr gut	0.99 und 0.98
MR	sehr schwach	0.29 und 0.38
SNF	schwach	0.72 und 0.71 (geringer SNF-Verkehr).

Die automatische Zählung ergab immer höhere Werte als die Videozählung.

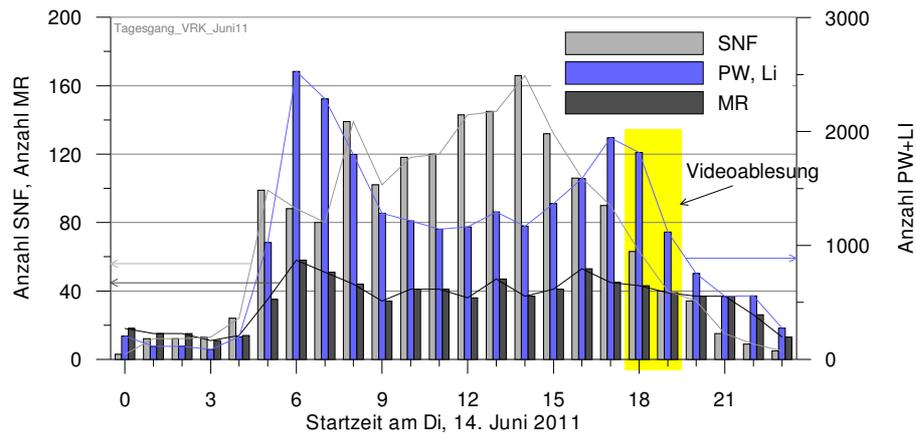


Abbildung 27 Aggregierte Tagesganglinie am Dienstag, 14.6.2011, der automatischen Zählung ZH2103

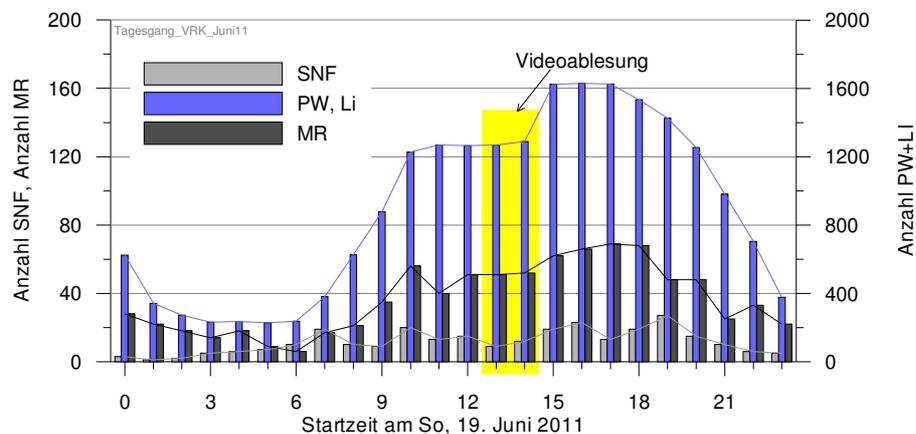


Abbildung 28 Aggregierte Tagesganglinie am Sonntag, 19.6.2011, der automatischen Zählung ZH2103

Aus Abbildung 27 und Abbildung 28 wird ersichtlich, dass die Videozählungen nicht die Zeiten mit sehr grossem Schwerverkehr abdecken. Aus diesem Grund wurden weitere Videoaufnahmen analysiert:

Dienstag, 22. November 2011, 05:00 – 08:00

Dienstag, 31. Januar 2012, 08:00 – 11:00

Dienstag, 31. Januar 2012, 14:00 – 17:00.

Der Vergleich von Videoablesung und automatischer Zählung ergab hier

PW + LNF sehr gut 0.995 und 0.988

MR sehr schwach 0.31 und 0.01 (?)

SNF mässig 0.92 und 0.87 (starker SNF-Verkehr).

Die automatische Zählung der MR ist nicht brauchbar.

Korrektur für PW+LNF

Die Tagesganglinien geben aufgrund der Ähnlichkeit der Verläufe von PW+LNF und MR einen Hinweis darauf, dass die Überschätzung der MR-Werte hauptsächlich durch Fahrstreifenwechsel zustande kommt.

Allerdings ist eine Korrektur der MR-Werte nicht möglich. Für die Berechnungen werden die MR vernachlässigt.

$$n_{MR_korr} = 0$$

Zu beachten ist dabei, dass die Anzahl der MR im Vergleich zum Gesamtverkehr klein ist. Bei gewissen Schadstoffen ist der Beitrag der MR zwar überproportional. Die aerodynamische Wirkung der MR zur Bewegung der Luft durch den Tunnelfahrraum ist sehr gering.

Die korrigierte Anzahl PW + LNF ist:

$$n_{PW+LI_korr} = n_{PW+LI} \times f_{PW+LI}$$

mit $f_{PW+LI} = 0.99$ sowohl für Werktage wie für Sonntage.

Korrektur für SNF

Die Videoablesungen zeigen, dass die Korrekturfaktoren der SNF von der Höhe der stündlichen SNF-Werte abhängen.

Die korrigierte Anzahl SNF ist:

$$n_{SNF_korr} = n_{SNF} \times f_{SNF}$$

mit $f_{SNF_1} = 0.90$ gültig für die Stunden an Werktagen von 05:00 bis 17:00 und aus den gewichteten Werten für die Videozählung vom Dienstag, 14. Juni 2011, und Sonntag, 19. Juni 2011, mit geringem SNF-Verkehr

mit $f_{SNF_2} = 0.72$ gültig für die Stunden an Werktagen von 17:00 bis 05:00 und für Sonn- und allgemeine Feiertage.

File: Validierung Zählsystem Islisbergtunnel, AWEL, August 2011

B. Strömungsmessungen und Transportzeit

Strömungsmessung

Die Luftströmung im Fahrraum wird im Bereich des Einfahrtsportals sowie des Ausfahrtsportals an jeweils 3 Messquerschnitten gemessen. Die Messgeber sind 2 lokale Ultraschallsonden pro Messquerschnitt. Die Messung erfolgt rund 20 cm von der Tunnelwand entfernt. Zur Zeit der Schadstoffmessungen wurde kein Korrekturfaktor für die Umrechnung auf den mittleren Volumenstrom verwendet. Aus Gittermessungen im Gubristtunnel mit vergleichbarer Konfiguration kann auf einen Korrekturfaktor von 1.14 geschlossen werden.

Die Daten für die insgesamt 6 Messquerschnitte – die Messwerte links und rechts der Fahrbahn werden bereits vor der Datenspeicherung gemittelt – liegen in der Zeitspanne vom 26. April 2011 bis am 8. Juli 2011 als 10-Sekunden- sowie als 5-Minuten-Mittel vor. Die Datensätze sind vollständig.

Transportzeit

Um die korrespondierenden Datensätze der Schadstoffmessungen am Einfahrts- und am Ausfahrtsportal zu ermitteln, muss die Transportzeit der Luft durch den Tunnel bekannt sein. Zu diesem Zweck gehen wir von den Strömungswerten im 10-Sekunden-Takt aus.

Vorgehen:

- Zusammenfügen der 10-Sekunden-Strömungsdaten in 1 File im txt-Format: Manuell formatieren in Excel, abspeichern in txt, verbinden mit Fortran.
- Mittelung der Messstellen zur repräsentativen Strömungsgeschwindigkeit durch den Tunnel: Die generell zu tiefe Messung an der Messstelle 5 wird nicht verwendet. Die übrigen 5 Messwerte werden arithmetisch gemittelt.
- Skalierung des Mittelwertes mit Faktor 1.14 für den mittleren Volumenstrom.
- Bestimmen der Laufzeit der Luft zwischen den beiden Schadstoff-Messstellen. Als Startzeit wird die Zeit in der Mitte der Schadstoff-Mittelung von 3 Minuten verwendet, also 01:30, 4:30, 7:30 usw.

C. Messungen der Sichttrübung

Messeinrichtung

Im Islisbergtunnel sind über die Tunnellänge pro Röhre 16 ST-Messgeräte angeordnet mit einem Abstand zwischen 2 Geräten von 300 m. Die Datenfiles enthalten die ST-Werte in mE/m (Milliextinktion pro Meter), gleichbedeutend mit E/km. Die Extinktion E ist der Lichtverminderungsfaktor.

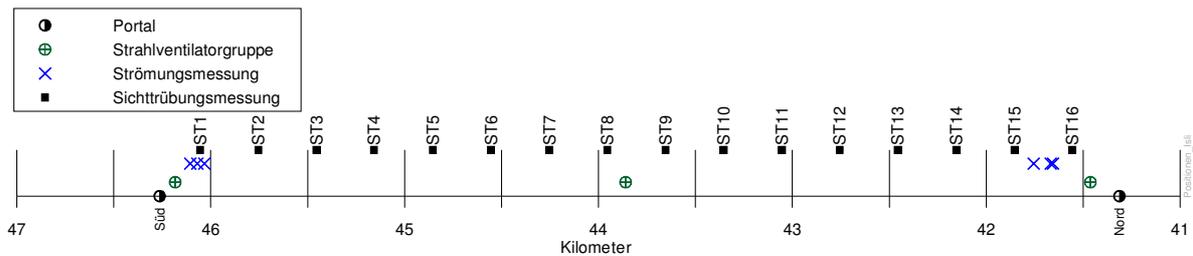


Abbildung 29 Masstabliche Darstellung der Positionen der Portale, der Strahlventilatorgruppen, der Strömungsmessquerschnitte und der ST-Messungen in der Röhre Fahrrichtung ZH; Fahrrichtung von links nach rechts.

Messwerte Islisbergtunnel

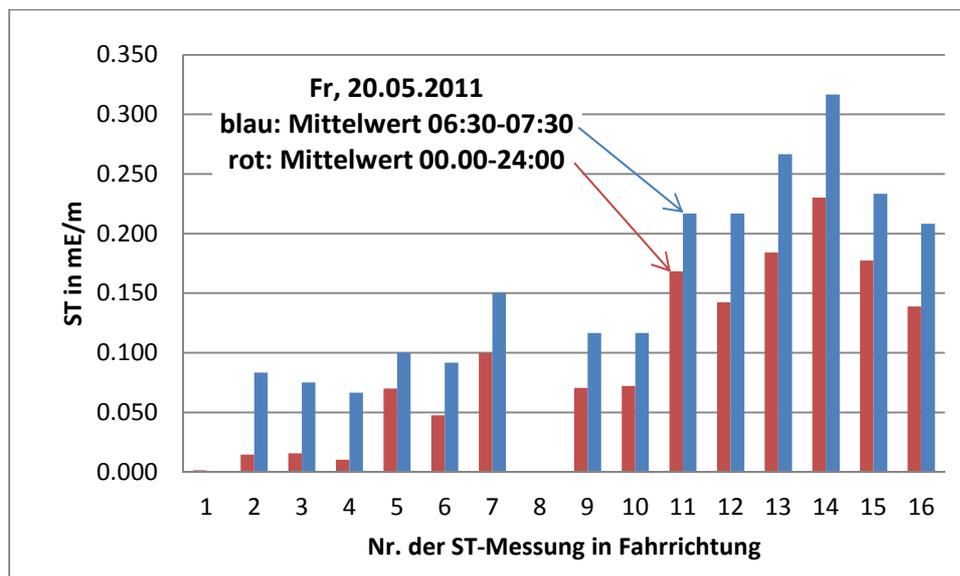


Abbildung 30 Gemessene ST-Werte über die Länge des Islisbergtunnels in der Röhre in Fahrrichtung Zürich am Fr, 20.5.2011; links: Einfahrtsportal Süd

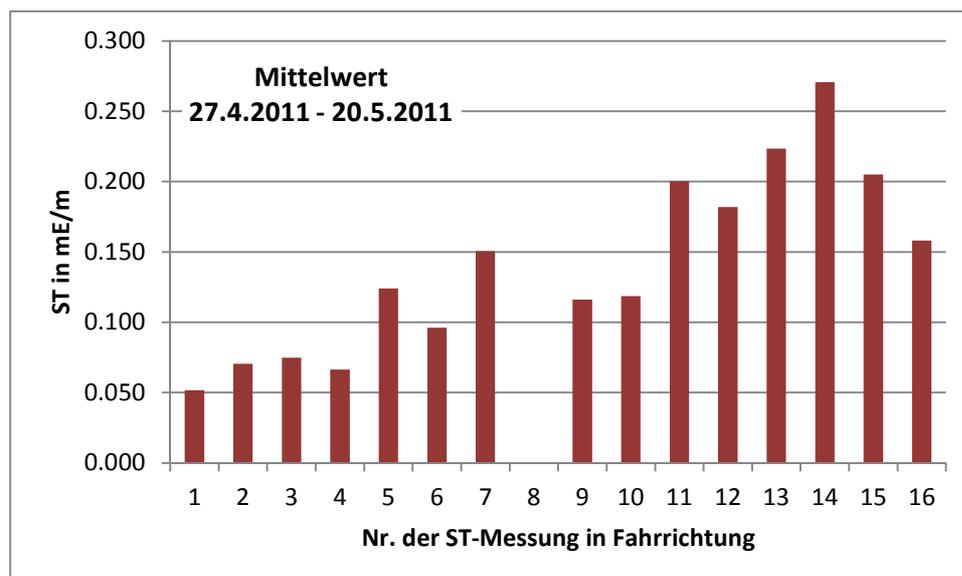


Abbildung 31 Gemessene ST-Werte über die Länge des Isisbergtunnels in der Röhre in Fahrrichtung Zürich, Mittelwert vom 27.4.2011 bis 20.5.2011; links: Einfahrtsportal Süd

Die Werte zeigen weder am genauer analysierten Tag (20.5.2011) noch im Mittel über 25 Tage den erwarteten stetigen Anstieg der Sichttrübung in Fahrrichtung von links nach rechts. Ein Rückgang der ST-Werte (bez. der Schadstoffkonzentration im Allgemeinen) ist mit einem Betrieb der im Tunnel vorhandenen Lüftung nicht erklärbar und auch mit Leckage oder Strömungskurzschlüssen mit der Gegenröhre nicht plausibel.

Berechnungsergebnisse für den Isisbergtunnel 2011

Wird mit den detailliert vorliegenden Verkehrsdaten für den 20.5.2011 die Zunahme der ST-Werte über die Tunnellänge berechnet, ergibt sich

für den Tagesmittelwert: 0.88 mE/m

für das Mittel von 06:30 bis 07:30: 1.35 mE/m.

Diese Werte schliessen keine Vorbelastung in der Aussenluft am Einfahrtsportal ein (vgl. Abbildung 32, Messwerte Weiningen beim Gubristtunnel).

Entwicklung der ST-Emissionsfaktoren

Das Programm FLB61RL berechnet die ST-Emissionen nach den Angaben der PIARC-Publikation [6]. Für die Verkehrszustände und Verkehrszusammensetzung wie im Gubristtunnel oder Isisbergtunnel ergibt sich danach zwischen den Jahren 2008 und 2011 eine Verminderung der ST-Emission von gut 10 %. Dies ist bei den Berechnungen für den Isisbergtunnel 2011 berücksichtigt.

Unsicherheiten der ST-Emissions-Grundlagedaten für die Berechnung

1.) Aufgrund der neuen Emissionswerte im PIARC-Bericht 2010/11 ergeben sich nach Anpassung der entsprechenden Faktoren in der ASTRA-Richtlinie für die Situation Isisberg 35 % höhere ST-Emissionen (Berechnung mit FLB62_beta2 vom 27.10.2010).

2.) Der Vergleich von Messung und Rechnung ergab für die Gubrist-2008-ST-Werte für kurze Fahrzeuge 9 % zu hohe und für lange Fahrzeuge 45 % zu hohe Rechenwerte. Werden diese Faktoren auf die ST-Emissionen Isisberg 2011 direkt übertragen, entsteht eine Gesamtkorrektur von -24 %

Diese Unsicherheiten sind zwar mit +35 % und -24 % beträchtlich, liegen jedoch weit ausserhalb der Diskrepanz zwischen den aktuellen Messwerten im Isisbergtunnel und den rechnerischen Abschätzungen.

Messungen und Berechnungsergebnisse für den Gubristunnel 2008

Zur Prüfung der Berechnung wird ein Vergleich mit den Messungen im Gubrist gemacht (vgl. Bericht Ostluft-Messungen 2008 im Gubristtunnel).

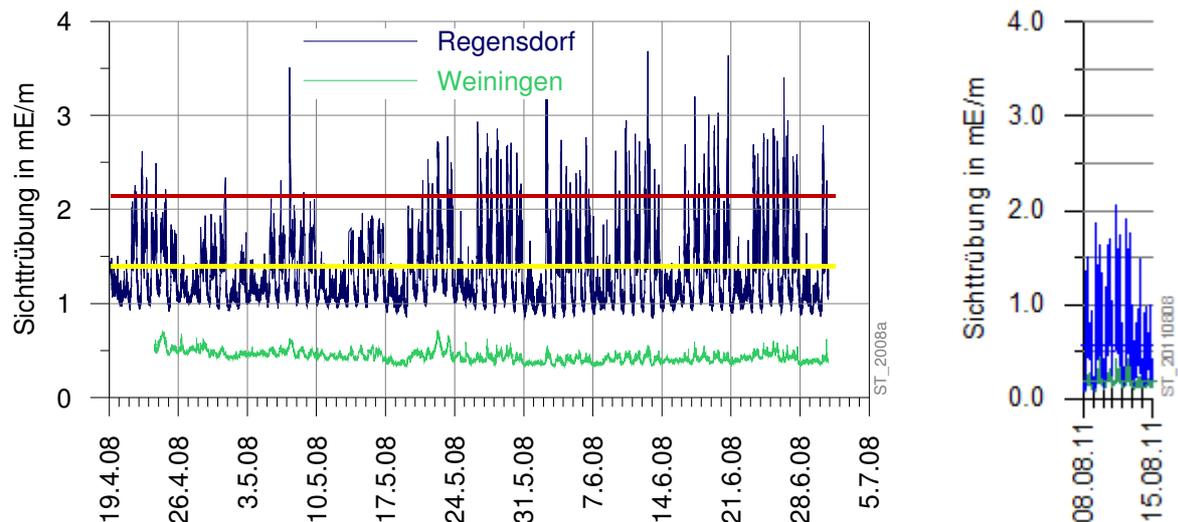


Abbildung 32 Gesamtheit der Daten der Sichttrübungsmessung Gubrist 2008 am Einfahrtsportal Weiningen (grün) und am Ausfahrtsportal Regensdorf (blau). Die bezeichneten Datumsangaben stehen jeweils für Samstag 00:00. Die Messwerte sind Mittelwerte über 5 Minuten.

Die rote Linie entspricht der nach den Vorgaben des ASTRA berechneten Sichttrübung beim Ausfahrtsportal Regensdorf für den massgebenden stündlichen Verkehr, MSV, mit 5 % SNF, die gelbe Linie für den mittleren Verkehr mit 6.1 % SNF, jeweils einschliesslich der Sichttrübung am Einfahrtsportal Weiningen.

Die Grafik rechts in Abbildung 32 zeigt eine Messsequenz aus dem Gubristtunnel vom August 2011. Die Werte wurden mit dem neuen Messgerät erfasst, das auch im Isisbergtunnel installiert ist. Auch diese tiefen Werte sind nicht erklärbar.

Ergebnisse

Unter der Annahme einer Vorbelastung am Einfahrtsportal des Isisbergtunnels von 0.01 mE/m im Tagesmittel und 0.05 mE/m für die Stunde von 06:30 bis 07:30 ergibt sich mit Bezug auf den maximal gemessenen Wert am Messort 14, der 817 m vor dem Ausfahrtsportal liegt, eine Zunahme der Sichttrübung über die Tunnellänge von 4955 m von

für den Tagesmittelwert: 0.257 mE/m

für den Mittelwert von 06:30 bis 07:30: 0.317 mE/m.

Die Verhältnisse zum Rechenwert sind damit 3.4 für den Tagesmittelwert und 4.3 für den Stundenmittelwert. Für die grosse Differenz gibt es zur Zeit der Dokumentation keine Ergebnisse.

D. Messwerte der gasförmigen Emissionen

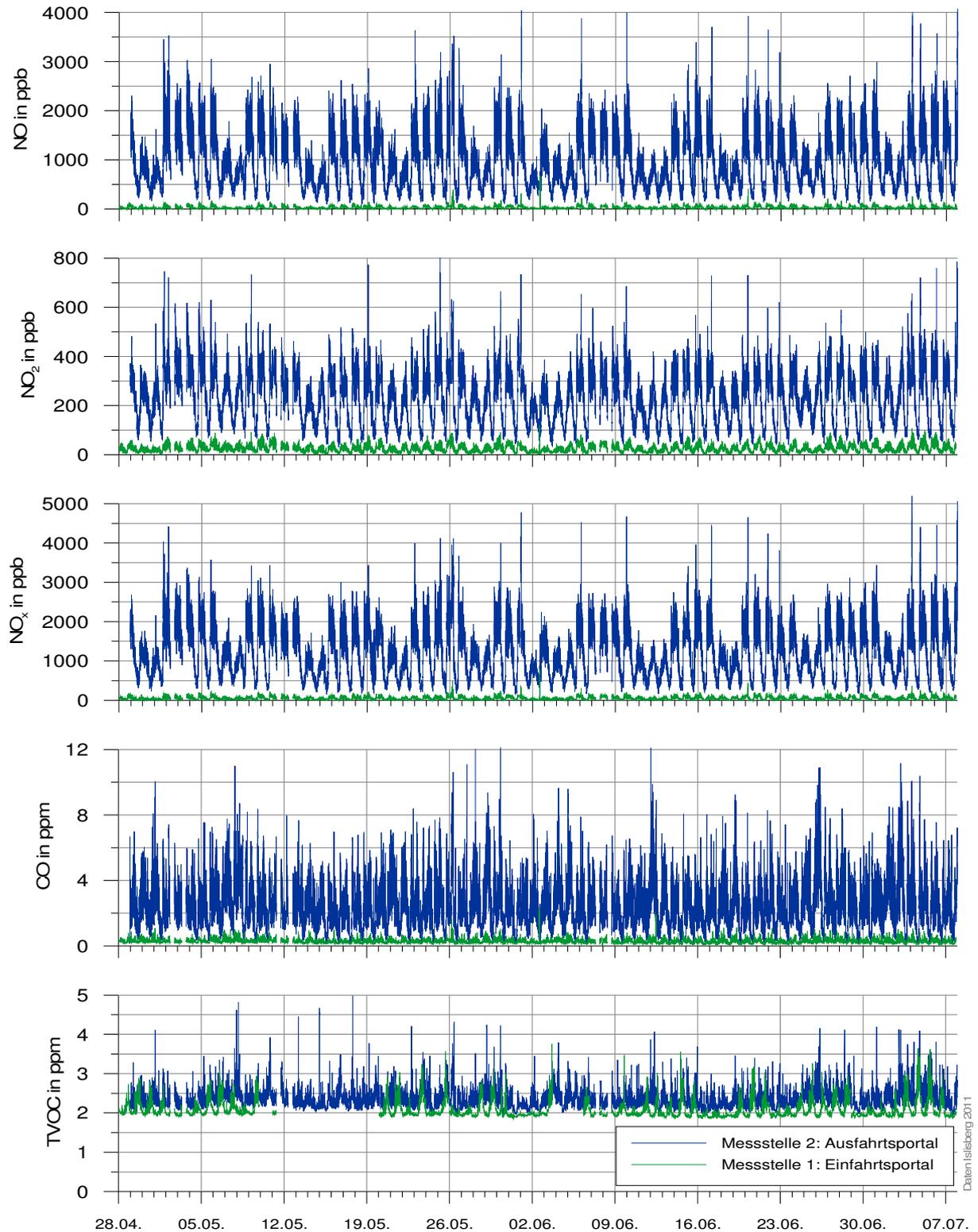


Abbildung 33 Validierte Messwerte der gasförmigen Emissionen
beginnend am Donnerstag, 28.4.2011, 12:03
Lage der Messstellen siehe Abbildung 2