



Verkehrs- und Schadstoffmessungen 2008 im Gubristtunnel

Update 25. Mai 2010

Auftraggeber: OSTLUFT
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich
(AWEL)

Auftragsnummer: US 89 - 16

Bericht: US 89 - 16 - 13

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

Verkehrs- und Schadstoffmessungen 2008 im Gubristtunnel

1. Fassung des Schlussberichts: 13. Juli 2009

Update: 25. Mai 2010

Gubrist Messungen 2008_update20100525.doc

US+FZ

Haustechnik · Tunnellüftung · Energie · Umwelt

Beratende Ingenieure

Urs Steinemann

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

Franz Zumsteg

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

ZUSAMMENFASSUNG

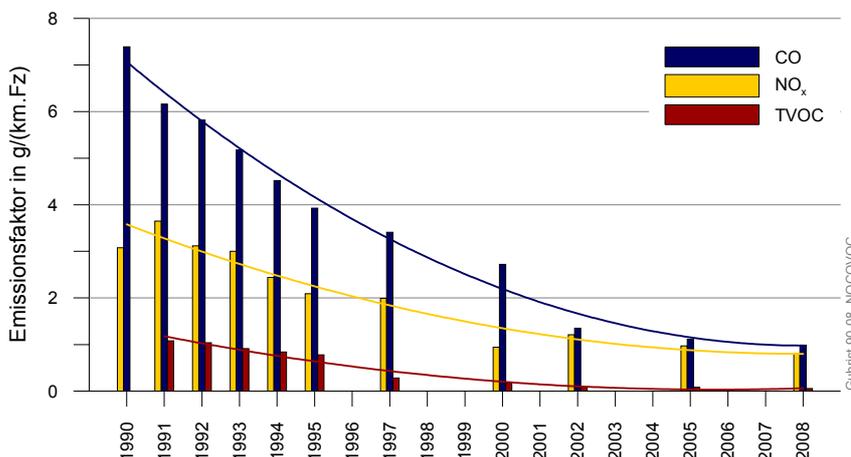
Seit 1990 führt das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) im Gubristtunnel regelmässig Messungen durch. Die Messungen dienen der Bestimmung der realen Emissionsfaktoren der Motorfahrzeuge in einer bestimmten Verkehrssituation und zeigen deren zeitliche Entwicklung auf. Seit dem Jahr 2002 werden die Gubrist-Messkampagnen als Projekt in der Zusammenarbeit mit OSTLUFT (www.ostluft.ch) realisiert.

Die Messungen im Jahr 2008 erfolgten zwischen dem 19. April und dem 30. Juni 2008 in der in Richtung St.Gallen steigenden Südröhre. Gemessen wurden die gasförmigen Schadstoffkonzentrationen von Stickstoffmonoxid NO, Stickstoffdioxid NO₂, Stickoxid NO_x, Kohlenmonoxid CO, die flüchtigen organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen als TVOC, die Feinstaubfraktion PM10 und die Sichttrübung ST. Der in PM10 enthaltene gesamte Kohlenstoffanteil (TC) wurde als Summe von elementarem Kohlenstoff (EC) und organischem Kohlenstoff (OC) ermittelt.

Die Auswertung erfolgte aus der Differenz der Messungen an den Standorten Regensdorf (Ausfahrtsportal) und Weiningen (Einfahrtsportal). 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, die leichten Nutzfahrzeuge LNF und die Motorräder mit einer Länge kleiner 7 m, die als *lange Fahrzeuge* bezeichnete Gruppe die schweren Nutzfahrzeugen 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.



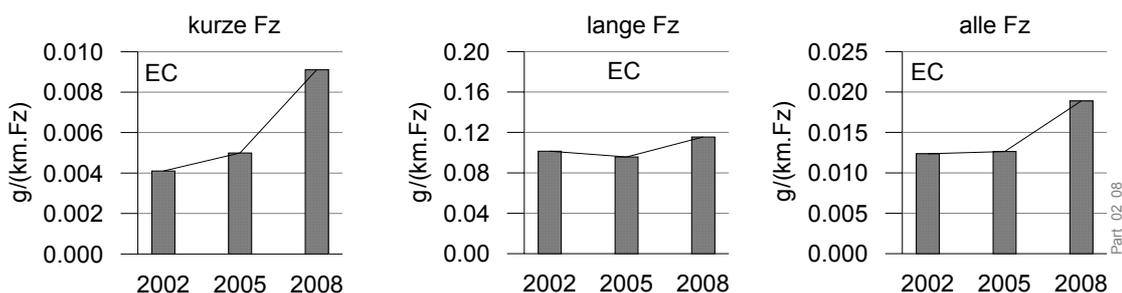
Figur 1: Entwicklung der mittleren Emissionsfaktoren pro Fahrzeug seit 1990 für NO_x, CO und TVOC in der Südröhre des Gubristtunnels in Fahrtrichtung St.Gallen, mit einer Steigung von 1.3 %

Es zeigt sich, dass die NO_x-, CO- und TVOC-Emissionen der Motorfahrzeuge seit Beginn der Messungen im Jahr 1990 deutlich zurückgegangen sind. 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. Mit zunehmender Strenge der Abgasvorschriften nimmt 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.

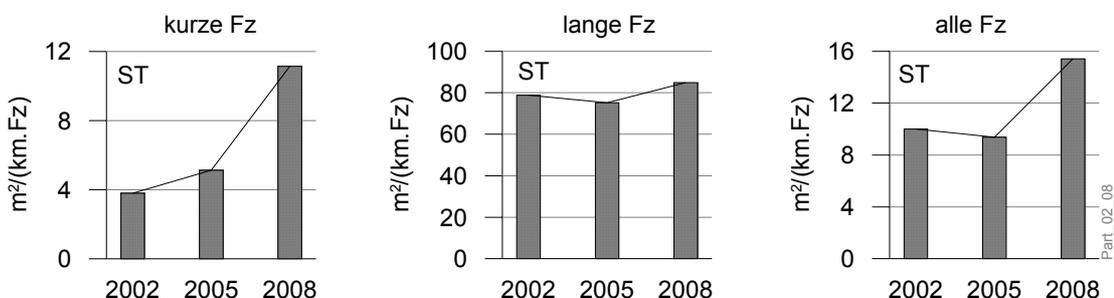
Von den am 30. September 2008 in der Schweiz immatrikulierten Personenwagen waren 15.0 % mit Dieselmotoren ausgerüstet, bei den Lieferwagen waren es 64.4 %. Diese Werte haben in den letzten Jahren stark zugenommen und beim Verkauf von Neuwagen besteht weiterhin ein starker Trend zu Fahrzeugen mit Dieselmotor. So waren die Diesel-Anteile im Jahr 2009 bei Personenwagen bereits 16.6 % und bei Lieferwagen 67.1 %.

Seit den Messungen im Jahr 2002 wird die Russ-Analyse der Feinstaubfraktion PM10 durchgeführt. 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 in diesem Bericht dargestellten EC- und TC-Werte beziehen sich auf das TOT-Analyseverfahren. Die Ergebnisse der Russ-Analyse (EC) zeigen eine deutliche Zunahme bei den kurzen Fahrzeugen (Figur 2).



Figur 2: Vergleich der EC-Emissionsmessungen von 2002 bis 2008 im Gubristtunnel, links: kurze Fahrzeuge, Mitte: lange Fahrzeuge, rechts: Mittelwert aller Fahrzeuge

Der überproportionale Anstieg der Sichttrübung (ST), die hauptsächlich durch kleinste Partikel beeinflusst wird, gibt einen weiteren Hinweis, dass bei den kurzen Fahrzeugen insbesondere die kleinsten (Russ-)Partikel stark zugenommen haben (Figur 3).



Figur 3 Vergleich der ST-(Sichttrübungs-)Emissionsmessungen von 2002 bis 2008 im Gubristtunnel, 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 Südröhre des Gubristtunnels. Die Berechnungen nach dem Handbuch Emissionsfaktoren wurden für die Verkehrssituation *CH/AB/100/flüssig* und das Verkehrsszenario "BAU" bei einer Steigung von 1.292 % und mit der Option *Klimaanlage Frühling* durchgeführt. Die angegebenen Abweichungen beziehen sich jeweils auf die Emissionswerte des Handbuchs.

- Bei den NO_x-Emissionsfaktoren ergeben die Messungen für die kurzen Fahrzeuge eine um 33 % tiefere und für die langen Fahrzeuge um 17 % höhere Emission als nach der Angabe des Handbuchs. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge von rund 6 % ergeben die Messungen 10 % tiefere NO_x-Emissionen als gemäss Handbuch.
- Die Messwerte der CO-Emissionsfaktoren liegen für kurze Fahrzeuge 8 % unter der Angabe im Handbuch. Die Extrapolation für lange Fahrzeuge ergibt eine unrealistische (negative) CO-Emission. Die Streuung der über 10'000 ausgewerteten 5-Minuten-Sequenzen ist sehr gross. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge ergeben die Messungen 15 % tiefere CO-Emissionen als gemäss Handbuch.
- Die Streuung der ermittelten TVOC-Emissionsfaktoren ist ebenfalls gross. Die Emission für die kurzen Fahrzeuge liegt sehr nahe (-2 %) bei der Angabe im Handbuch. Bei den langen Fahrzeugen ergeben die Messwerte um 66 % tiefere Emissionen als im Handbuch. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge ergeben die Messungen 14 % tiefere TVOC-Emissionen als gemäss Handbuch.
- Der ermittelte PM10-Emissionsfaktor für die kurzen Fahrzeuge ist gemäss den Messungen im Gubristtunnel um 32 % tiefer, jener für die langen Fahrzeuge um 53 % höher als die entsprechende Angabe für PM im Handbuch. Es wurden 84 Sequenzen (Filter) zu 2 Stunden gemessen. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge ergeben die Messungen 8 % tiefere PM10-Emissionen als die PM-Werte gemäss Handbuch. Bemerkenswert ist, dass bei diesem Vergleich keine Beiträge für Abrieb und Aufwirbelung eingerechnet sind¹.
- Für 12 Sequenzen wurde der Anteil von elementarem Kohlenstoff EC analysiert. Die Ergebnisse von sechs dieser Sequenzen, in Situationen mit sehr geringem Anteil an langen Fahrzeugen, ergeben für die kurzen Fahrzeuge um 56 % tiefere Messwerte als nach den Angaben für PM im Handbuch. Die ermittelte EC-Emission für die langen Fahrzeuge stimmt mit dem Wert im Handbuch gut überein (+2 %).
- 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 Gubristtunnel gemessenen Sichttrübungs-Emissionsfaktoren sind für die kurzen Fahrzeuge 8 % tiefer und für lange Fahrzeuge 31 % tiefer als die heute gültigen Dimensionierungswerte in der ASTRA-Richtlinie Lüftung der Strassentunnel.

¹ Verschiedene Studien, u. a. vom ASTRA und BAFU (Projekt 2005/007) aber auch vom Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik der FH Wiesbaden weisen darauf hin, dass der Reifenabrieb in der PM10-Fraktion zu vernachlässigen (<1%) und der Abrieb von Partikeln von der Strassenoberfläche von untergeordneter Bedeutung ist, sofern die Beläge intakt sind. Modellversuche mit Verkehrslastsimulatoren jedoch zeigen, dass ein bedeutender Beitrag der PM10-Emission der Wiederaufwirbelung anzurechnen ist.

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|---|--------------|
| Zusammenfassung | I |
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Tunneldaten | 2 |
| 3. Tunnellüftungssystem | 3 |
| 4. Lage der Messgeräte im Tunnel | 3 |
| 5. Verkehrszählungen | 6 |
| 5.1 Automatische Verkehrsdatenerfassung | 6 |
| 5.2 Eichzählungen | 6 |
| 5.3 Angaben zum Verkehr während der Messung | 8 |
| 6. Ergebnisse der Messungen | 10 |
| 6.1 Allgemeines Prinzip von Messung und Auswertung | 10 |
| 6.2 NO_x-, CO- und TVOC-Messungen | 10 |
| 6.3 Feinstaub PM₁₀- Messungen (HiVol) und Kohlenstoff - Analyse | 14 |
| 6.4 Messungen der Sichttrübung ST | 17 |
| 7. Beurteilung | 20 |
| 7.1 Vergleich mit früheren Messkampagnen | 20 |
| 7.2 Vergleich mit den Angaben im Handbuch Emissionsfaktoren | 24 |
| 8. Glossar | 27 |
| 9. Literaturverzeichnis | 29 |
| 10. Anhang: Darstellung von Rohdaten | 30 |

1. EINLEITUNG

Seit 1988 führt das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) im Gubristtunnel regelmässig Messungen durch. Die Messungen dienen der Bestimmung der realen Emissionsfaktoren der Motorfahrzeuge in der Verkehrssituation im Gubristtunnel und zeigen deren zeitliche Entwicklung auf.

Die Messungen im Jahr 2008 erfolgten zwischen dem 19. April und dem 30. Juni 2008 in der Südröhre (Fahrt in steigender Richtung St. Gallen). Gemessen wurden die gasförmigen Schadstoffkonzentrationen von Stickstoffmonoxid NO, Stickstoffdioxid NO₂, Stickoxiden NO_x, Kohlenmonoxid CO, die flüchtigen organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen als TVOC, zudem die Feinstaubfraktion PM10 und der darin enthaltene gesamte Kohlenstoffanteil TC als Summe von elementarem (EC) und organischem Kohlenstoff (OC) sowie die Sichttrübung. Ergänzend zu den Schadstoffmessungen erfasste man die Strömungsgeschwindigkeit, die Temperatur, den Druck und die relative Feuchte im Tunnel. Vom Gesamtverkehr wurden die Fahrzeuganzahl, differenziert in den 10 Klassen gemäss Swiss10, sowie die Fahrgeschwindigkeit im 5-Minuten-Intervall aufgezeichnet.

Der vorliegende Bericht enthält neben der detaillierten Analyse der Messungen 2008 auch die Zusammenstellung der Messergebnisse seit dem Jahr 1990 in der Südröhre. Die Ergebnisse der Messungen in der Nordröhre, die letztmals im Jahr 1995 durchgeführt wurden, sind im Bericht über die Messungen 2002 [1] angeführt.

Im vorliegenden Bericht-Update sind detailliertere Angaben für den Anteil an elementarem Kohlenstoff EC enthalten, und die im Tunnel ermittelten Emissionswerte wurden mit den Angaben im neu publizierten Handbuch-Emissionsfaktoren Version 3.1 [6] verglichen.

3. TUNNELLÜFTUNGSSYSTEM

Der Gubristtunnel besitzt eine Halbquer-Querlüftung. Zur Vermeidung von Portalabluft besteht zudem die Möglichkeit, die Tunnelluft kurz vor den Ausfahrtsportalen über grosse Deckenöffnungen abzusaugen und über den Abluftkamin zu leiten.

Bei ungestört fliessendem Richtungsverkehr ist kein Betrieb der Tunnellüftung erforderlich, da durch die Kolbenwirkung der durchfahrenden Fahrzeuge eine genügend starke Längsströmung verursacht wird. Die Inbetriebnahme der Tunnelventilation erfolgt automatisch aufgrund kontinuierlicher Messungen der Sichttrübung im Tunnel. Die Überwachung der CO-Konzentration im Tunnel ist heute für die Lüftungssteuerung nicht mehr relevant und wurde ausser Betrieb genommen.

Während der Schadstoffmessungen des AWEL waren die Abluftklappen in der Zwischendecke durchgehend geschlossen, so dass keine Tunnelluft über den Abluftkamin abströmte. Im vorliegenden Messbericht sind nur die Daten ausgewertet, die ohne Betrieb der Tunnellüftungsanlage (Zuluft und/oder Abluft) erhoben wurden.

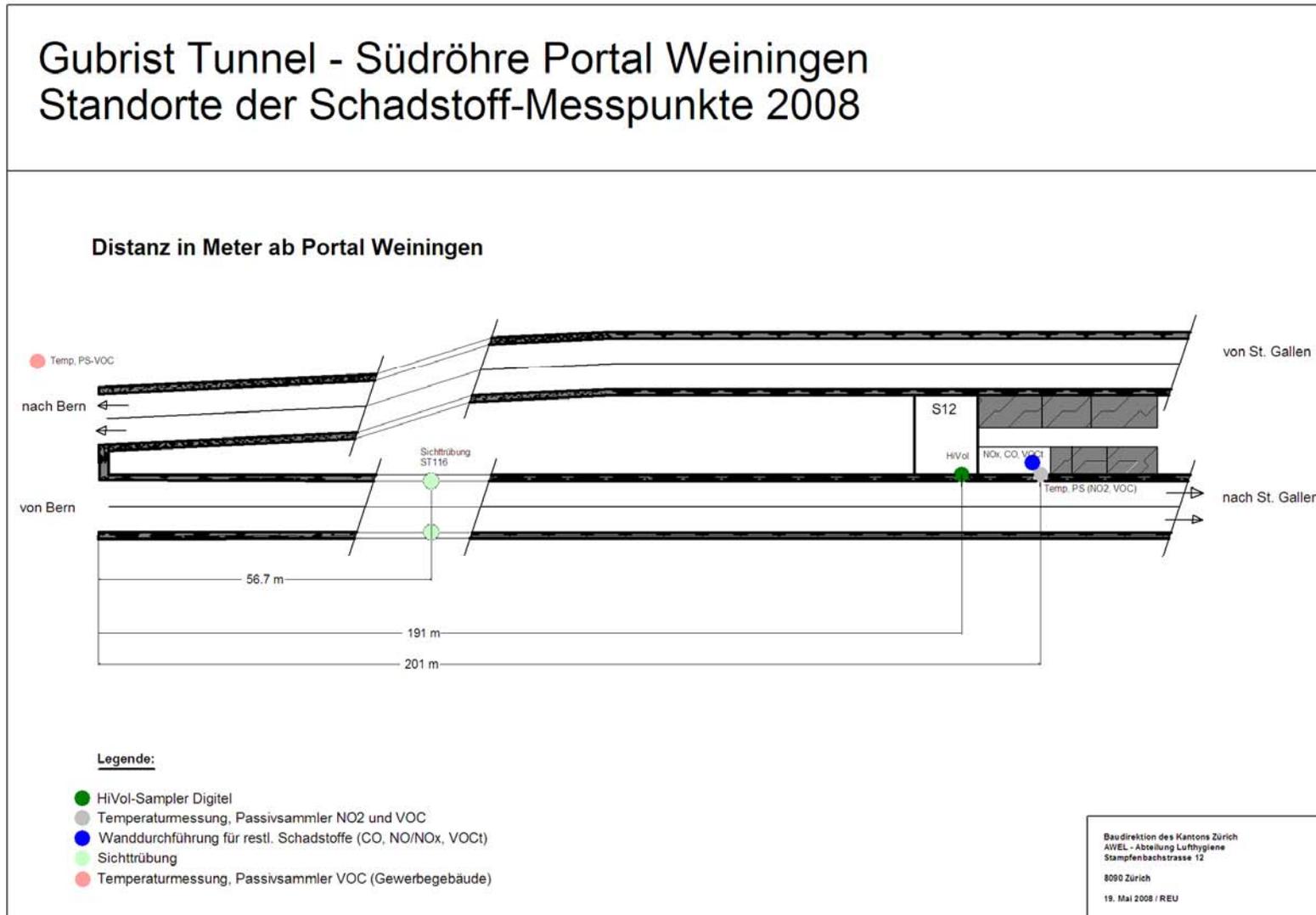
4. LAGE DER MESSGERÄTE IM TUNNEL

Die Messungen 2008 erfolgten ausschliesslich in der Südröhre. Seit 1997 werden die Emissionen im Tunnel als Differenzmessung zwischen Einfahrtsportal und Ausfahrtsportal ermittelt.

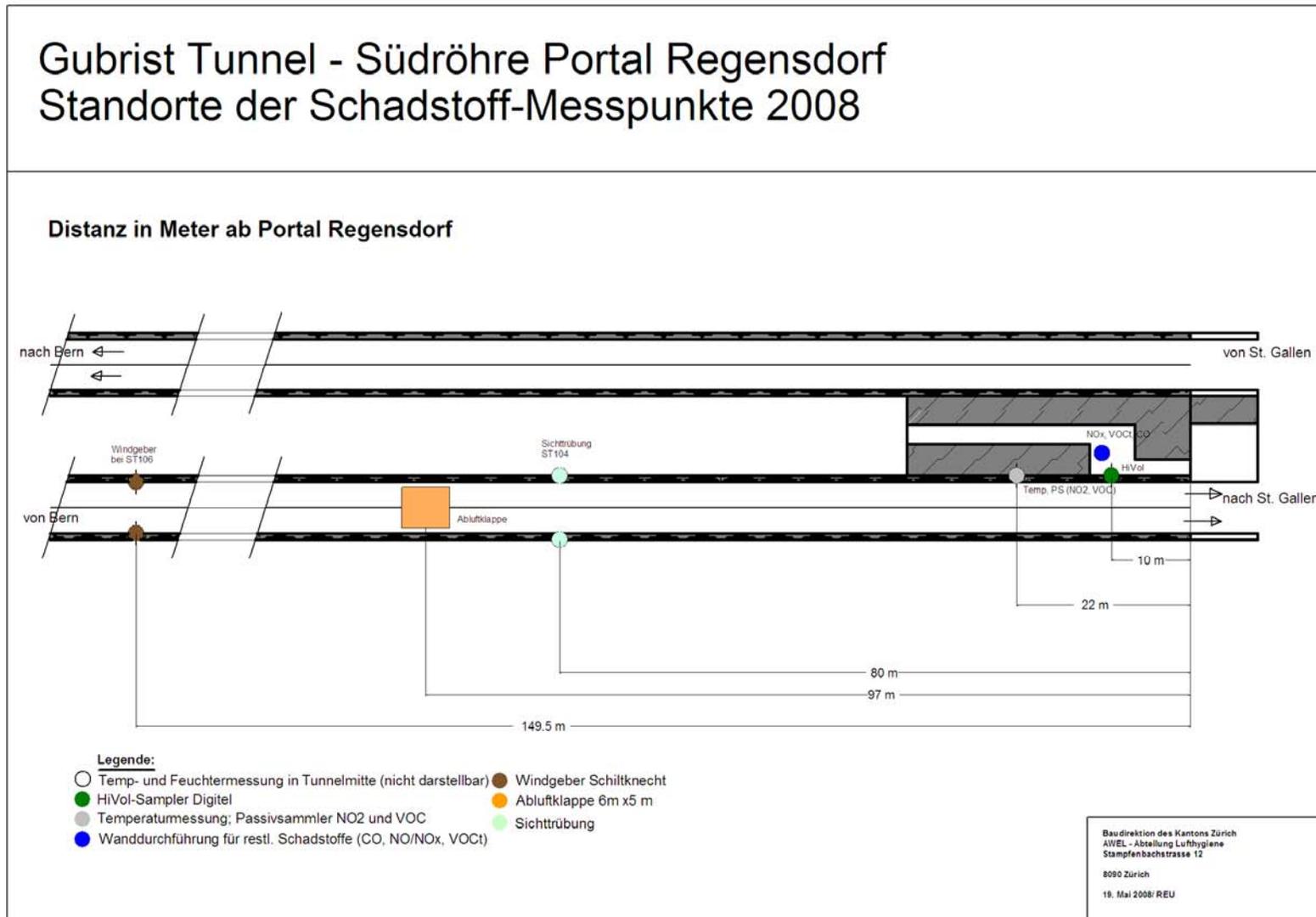
Die Distanzen zwischen den Messorten am Einfahrts- und Ausfahrtsportal waren:

| | |
|-----------------------------------|---------|
| für NO _x , CO und TVOC | 3'057 m |
| für PM10 | 3'067 m |
| für die Sichttrübung | 3'131 m |

Die Lage der Messgeräte im Tunnel ist aus den Figuren 4.1 und 4.2 ersichtlich.



Figur 4.1 Lage der Messgeräte beim Portal Weiningen (Einfahrtsportal) in der Südröhre des Gubristtunnels



Figur 4.2 Lage der Messgeräte beim Portal Regensdorf (Ausfahrtsportal) in der Südröhre des Gubristtunnels

5. VERKEHRSZÄHLUNGEN

5.1 Automatische Verkehrsdatenerfassung

Wie bereits für die Messkampagne 2002 [1] und 2005 [2] wurden die Daten der Verkehrszählung ca. 150 m ausserhalb des Portals Regensdorf (unter der Brücke Affolternstrasse) für die Messungen 2008 verwendet.



Figur 5.1 Zählstelle bei der Brücke Affolternstrasse

Die Verkehrszählung nach dem Ausfahrtsportal liefert für beide Fahrspuren die 5-Minuten-Mittelwerte der Fahrzeuganzahl, aufgeteilt in die 10 Klassen von Swiss10 und in 14 Geschwindigkeitsklassen.

5.2 Eichzählungen

Vom Planungsbüro Jud sind im Hinblick auf die Messkampagne des Jahres 2008, wie schon früher mehrmals, Eichzählungen zur Überprüfung der 1-h-Werte der automatischen Registrierungen vorgenommen worden. Für die Einteilung in aggregierte Klassen nach Swiss10 wurden Eichfaktoren ermittelt [3]. Die Erhebungen erfolgten auf der Basis von Videoaufzeichnungen beim Portal Regensdorf von der Brücke Affolternstrasse aus.

Erfasst wurde der Querschnitt der Fahrtrichtung St. Gallen zu folgenden Zeiten:

Sonntag, 29. Juni 2008, 08.00 bis 16.00 Uhr

Montag, 30. Juni 2008, 05.00 bis 13.00 Uhr

Bei der Videoerhebung wurden die Motorfahrzeuge nach den folgenden Fahrzeugklassen entsprechend Swiss10 unterschieden:

| | |
|---------|------------------------------------|
| BUS | Reisebus |
| MR | Motorrad |
| PW | Personenwagen |
| PW ANH | Personenwagen mit Anhänger |
| LI | Lieferwagen, Kleinbus |
| LI ANH | Lieferwagen/Kleinbus mit Anhänger |
| LI AUFL | Lieferwagen mit Auflieger |
| LW | Lastwagen (>3.5 Tonnen) |
| LZ | Lastenzug (Lastwagen mit Anhänger) |
| SZ | Sattelzug (Sattelschlepper) |

Für die Klassen nach Swiss10 ergaben sich die Eichfaktoren:

| Klasse | Mo – Sa | So |
|--------------------------------|---------|--------|
| PW / LI / MR / PW ANH / LI ANH | 1.006 | 1.0005 |
| LI AUFL / LW / BUS / LZ / SZ | 0.9657 | 0.8215 |

Tabelle 5.1 Eichfaktoren aus den Zählungen für die Klassen nach Swiss10

Auch nach der Zählmethode Swiss10 bestehen unvermeidbare Unsicherheiten, namentlich bei der Zuordnung von Personenwagen mit Anhängern und Lieferwagen mit Anhängern oder Aufliegern (für weiterführende Literatur siehe ASTRA [4]).

Neben den Swiss10-Zählwerten standen von derselben Zählstelle auch die Daten in der Einteilung in 4 Längenklassen (<2.7 m, 2.7 bis 7 m, 7 bis 13 m, 13 bis 25 m) zur Verfügung. Die beiden Auswertungen ergeben insgesamt die gleichen Verkehrsmengen, innerhalb der Klassen und auch in der Zuordnung zu kurzen bzw. langen Fahrzeugen jedoch unterschiedliche Werte. Für die Auswertung der Schadstoffmessungen wurde die Auswertung nach Swiss10 mit den entsprechenden Eichfaktoren verwendet.

5.3 Angaben zum Verkehr während der Messung

Im Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs Version 3.1 stehen die Emissionsfaktoren für die folgenden Fahrzeugkategorien zur Verfügung:

PW: Personenwagen (im Handbuch bezeichnet als PKW)

LNF: Leichte Nutzfahrzeuge (Lieferwagen < 3.5 t)

SNF: Schwere Nutzfahrzeuge (LW + LZ + SZ)

- LW: Lastwagen
- LZ: Lastzug, Anhängerzug
- SZ: Sattelzug

R Bus: Reisebus

L Bus: Linienbus (= ÖV-Bus)

MR: Motorrad

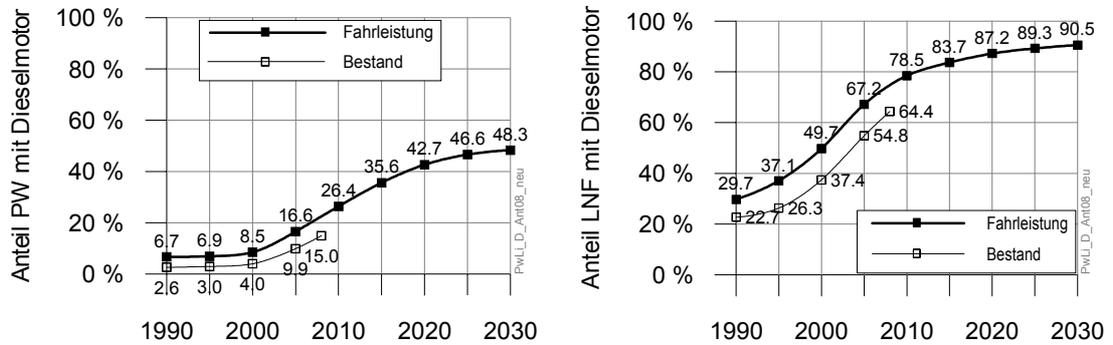
Bei den im vorliegenden Bericht beschriebenen Messungen im Gubristtunnel werden die beiden Hauptkategorien kurze Fahrzeuge und lange Fahrzeuge unterschieden. Diese Hauptkategorien und deren Anteile bei den vollständigen Verkehrsdatensätzen der 5-Minuten-Sequenzen sind gemäss der folgenden Tabelle zusammengesetzt.

| Hauptkategorie | Swiss10 | Anteile | | | | HBEFA |
|-------------------|---------|-----------|-----------|---------|---------|-------|
| | | Mo-So | Mo-Fr | Sa | So | |
| Anzahl 5-Min-Seq. | | 19'479 | 13'167 | 3'144 | 3'168 | |
| Gesamt Fz | | 3'084'914 | 2'133'261 | 497'834 | 453'819 | |
| Kurze Fahrzeuge | PW | 84.6 % | 81.3 % | 90.9 % | 93.3 % | PKW |
| | PW ANH | 1.0 % | 1.0 % | 1.2 % | 0.8 % | PKW |
| | LI | 6.2 % | 7.4 % | 4.2 % | 2.8 % | LNF |
| | LI ANH | 0.2 % | 0.2 % | 0.3 % | 0.1 % | LNF |
| | LI AUFL | 0.4 % | 0.5 % | 0.2 % | 0.1 % | LNF |
| | MR | 1.5 % | 1.3 % | 1.7 % | 2.2 % | MR |
| Gesamt kurze Fz | | 93.9 % | 91.7 % | 98.5 % | 99.2 % | |
| Lange Fahrzeuge | LW | 2.6 % | 3.6 % | 0.4 % | 0.3 % | SNF |
| | LZ | 1.3 % | 1.8 % | 0.3 % | 0.0 % | SNF |
| | SZ | 2.0 % | 2.7 % | 0.7 % | 0.2 % | SNF |
| | BUS | 0.2 % | 0.2 % | 0.1 % | 0.3 % | R Bus |
| Gesamt lange Fz | | 6.1 % | 8.3 % | 1.5 % | 0.8 % | |

Tabelle 5.2 *Anteile der Motorfahrzeugkategorien aller vollständigen Verkehrsdatensätze in der Messperiode vom 19. April 2008 bis am 30. Juni 2008*

Von den am 30. September 2008 in der Schweiz immatrikulierten Personenwagen waren 15.0 % mit Dieselmotoren ausgerüstet, bei den Lieferwagen waren es 64.4 %. Diese Werte haben in den letzten Jahren stark zugenommen und beim Verkauf von Neuwagen besteht weiterhin ein starker Trend zu Fahrzeugen mit Dieselmotor. So waren die Diesel-Anteile im Jahr 2009 bei Personenwagen bereits 16.6 % und bei Lieferwagen 67.1 %.

Die Emissionsangaben im Handbuch Emissionsfaktoren sind fahrleistungsbezogen. Die im Handbuch enthaltene Entwicklung der Fahrleistung der Personenwagen und Lieferwagen mit Dieselmotor ist nachfolgend dargestellt. Die Bestandsanteile stammen vom Superweb des Bundesamtes für Statistik [5].



Figur 5.2 Bestand nach BfS [5] und Fahrleistungen nach dem Handbuch [6] der Personenwagen und Lieferwagen mit Dieselmotor in der Schweiz

Diese Angaben zeigen, dass die mittlere Fahrleistung der Fahrzeuge mit Dieselmotor deutlich höher ist als der prozentuale Fahrzeugbestand.

6. ERGEBNISSE DER MESSUNGEN

6.1 Allgemeines Prinzip von Messung und Auswertung

- Mechanische Tunnellüftung vollständig ausser Betrieb (Abluftklappen geschlossen), natürliche Längslüftung durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge. Zeiten mit Lüftungsbetrieb werden in der Auswertung nicht berücksichtigt.
- Messung der Tunnelluftkonzentrationen kurz nach dem Einfahrtsportal und vor dem Ausfahrtsportal der Südröhre (Differenzmessung). Die Tunnelluft enthält alle bis zur Messstelle im Tunnel angefallenen Abgasemissionen.
- Berechnung des Luftvolumenstroms aus der Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel. Für Zeiten mit fehlender Messung wird dieser Wert aus den Verkehrsmengen und den Fahrgeschwindigkeiten berechnet.
- Bestimmung der massgebenden Verkehrsdaten. Die Zeitverzögerung durch die ausserhalb des Tunnels liegende Verkehrszählstelle wird berücksichtigt.
- Berechnung der mittleren Emissionsfaktoren pro Fahrzeug. Die Daten der Schadstoffkonzentration werden aufgrund der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel und der gefahrenen Fahrzeuggeschwindigkeit durch bestmögliche Annäherung den Verkehrsdaten zugeordnet.
- 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) |

6.2 NO_x-, CO- und TVOC-Messungen

6.2.1 Einleitung

Die Figuren 6.1 bis 6.3 zeigen die gemessenen und die berechneten Emissionsfaktoren in Abhängigkeit vom Anteil der langen Fahrzeuge. Die Resultate der Messkampagne 2008 sind jeweils mit einer grauen Linie und die Emissionsfaktoren gemäss dem Handbuch Version 3.1 mit einer roten Linie dargestellt. Die Zuordnung zu den Gruppen bezeichnet als kurze Fahrzeuge bzw. lange Fahrzeuge ist in Tabelle 5.2 ersichtlich.

6.2.2 Auswertung

Die Auswertung der NO_x-, CO- und TVOC-Messungen erfolgte für 5-Minuten-Mittelwerte. Fehlende Daten für die Luftströmung durch den Tunnelfahrraum wurden anhand eines strömungstechnischen Ansatzes aus der Anzahl kurzer und langer Fahrzeuge und ihrer Fahrgeschwindigkeit abgeschätzt und ergänzt.

- Einlesen der Parameter
 - Mittelungszeit in Anzahl Mess-Sequenzen (für Auswertung 1 → 300 s)
 - Untere und obere Grenze der betrachteten Fahrgeschwindigkeit (für Auswertung 85 - 115 km/h)
 - Minimaler Volumenstrom (für Auswertung 250 m³/s, entsprechend einer minimalen Strömungsgeschwindigkeit von 5.2 m/s beim Fahrraumquerschnitt von 48 m²)
- Skalieren der Verkehrsdaten nach den Angaben in Tabelle 5.1
- Suchen der ersten gültigen Mess-Sequenz am Messort Regensdorf
- Suchen der korrespondierenden Verkehrsdaten
- Bestimmen der mittleren Strömungsgeschwindigkeit
- Kontrolle der Gültigkeit der Daten (Vollständigkeit, Geschwindigkeitsbereiche)
- Suchen der korrespondierenden Messdaten am Messort Weiningen
- Bestimmen des Anteils der langen Fahrzeuge
- Berechnen des mittleren Emissionsfaktors

$$EFA = \frac{V_L \cdot \Delta t \cdot (c_{\text{Regensdorf}} - c_{\text{Weiningen}}) \cdot \rho_{\text{Stoff}}}{n_{\text{Fz}} \cdot L_{\text{Mess}}} \quad \text{in g/(km:Fz)}$$

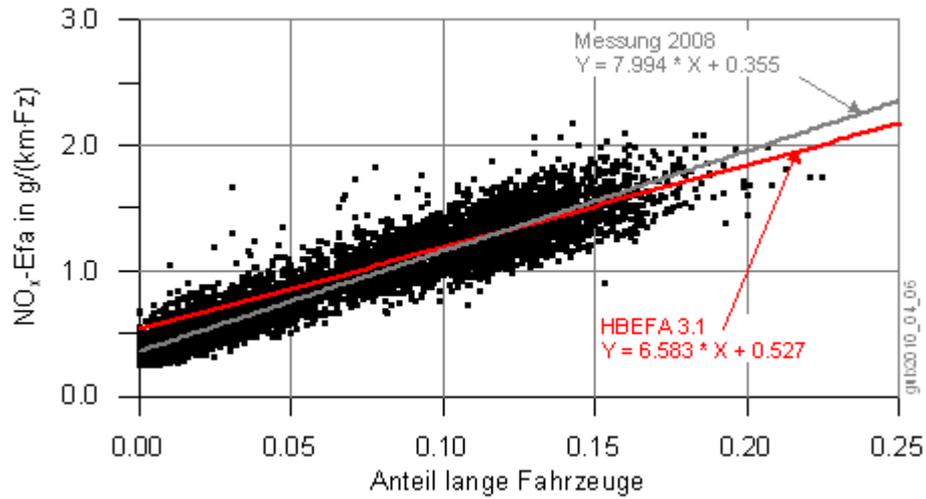
| | |
|-------------------------|--|
| V _L | Mittlerer Volumenstrom in m ³ /s durch den Fahrraum über die Mittelungszeit |
| Δt | Mittelungszeit |
| c _{Regensdorf} | Konzentration in ppm vor Ausfahrtsportal |
| c _{Weiningen} | Konzentration in ppm nach Einfahrtsportal |
| ρ _{Stoff} | Dichte in kg/m ³ (siehe Kapitel 6.1) |
| n _{Fz} | Anzahl Fahrzeuge über Mittelungszeit |
| L _{Mess} | Abstand der Messorte Weiningen und Regensdorf in m (3.057 km) |

6.2.3 Ergebnisse

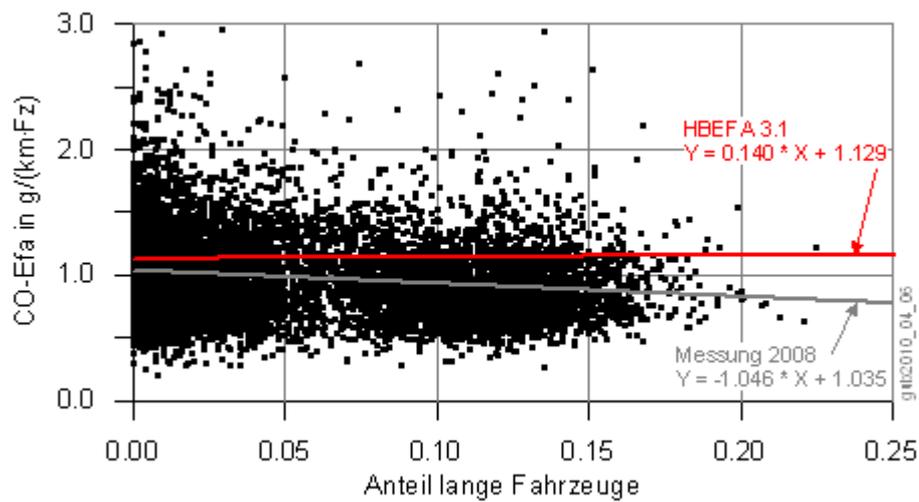
| NO_x ($\rho = 2.052 \text{ kg/m}^3$) | |
|---|-------------------------------------|
| Auswertezeitraum der gültigen Sequenzen | 30.4.2008 14:15 bis 30.6.2008 10:35 |
| Anzahl gültiger 5-Minuten-Sequenzen | 9'749 |
| Anzahl Fahrzeuge in gültigen Sequenzen | |
| gesamt | 2'021'651 |
| kurze Fahrzeuge nach Swiss10 | 1'905'092 |
| lange Fahrzeuge nach Swiss10 | 116'559 (= 5.77 %) |
| Mittlere Fahrgeschwindigkeit (Standardabw.) | 95.4 km/h (3.8 km/h) |
| Mittlere Geschwindigkeit der Luft (Standardabw.) | 7.3 m/s (1.35 m/s) |
| Mittlerer NO _x -Emissionsfaktor | 0.790 g/(km·Fz) |

| CO ($\rho = 1.249 \text{ kg/m}^3$) | |
|--|-------------------------------------|
| Auswertezeitraum der gültigen Sequenzen | 30.4.2008 12:20 bis 30.6.2008 12:50 |
| Anzahl gültiger 5-Minuten-Sequenzen | 10'073 |
| Anzahl Fahrzeuge in gültigen Sequenzen | |
| gesamt | 2'031'302 |
| kurze Fahrzeuge nach Swiss10 | 1'967'336 |
| lange Fahrzeuge nach Swiss10 | 122'571 (= 6.03 %) |
| Mittlere Fahrgeschwindigkeit (Standardabw.) | 95.4 km/h (3.8 km/h) |
| Mittlere Geschwindigkeit der Luft (Standardabw.) | 7.4 m/s (1.4 m/s) |
| Mittlerer CO-Emissionsfaktor | 0.976 g/(km·Fz) |

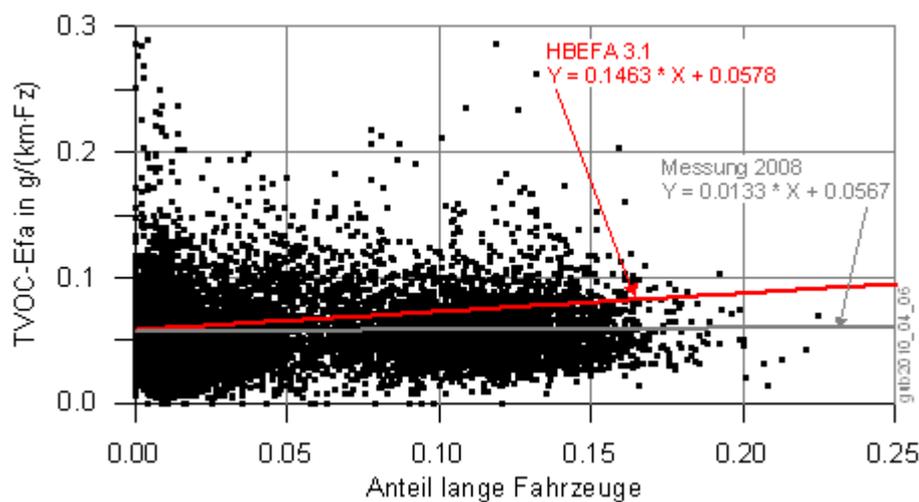
| TVOC ($\rho = 1.860 \text{ kg/m}^3$) | |
|--|-------------------------------------|
| Auswertezeitraum der gültigen Sequenzen | 30.4.2008 12:20 bis 30.6.2008 14:00 |
| Anzahl gültiger 5-Minuten-Sequenzen | 10'089 |
| Anzahl Fahrzeuge in gültigen Sequenzen | |
| gesamt | 2'033'368 |
| kurze Fahrzeuge nach Swiss10 | 1'910'614 |
| lange Fahrzeuge nach Swiss10 | 122'754 (= 6.04 %) |
| Mittlere Fahrgeschwindigkeit (Standardabw.) | 95.3 km/h (3.8 km/h) |
| Mittlere Geschwindigkeit der Luft (Standardabw.) | 7.4 m/s (1.4 m/s) |
| Mittlerer TVOC-Emissionsfaktor | 0.0574 g/(km·Fz) |



Figur 6.1 NO_x-Emissionsfaktoren



Figur 6.2 CO-Emissionsfaktoren



Figur 6.3 TVOC-Emissionsfaktoren

6.3 Feinstaub PM10- Messungen (HiVol) und Kohlenstoff -Analyse

6.3.1 Einleitung

Die PM10-Messungen wurden an 7 Tagen (Montag bis Sonntag) während 24 Stunden mit High-Volume-Samplern DHA-80 durchgeführt. Die Glasfaser-Filter (Ederol/227/1/60) wurden sowohl nach dem Einfahrtsportal Weiningen wie auch vor dem Ausfahrtsportal Regensdorf je 2 Stunden exponiert. Aus den Messergebnissen von 2 zusätzlichen Tagen, einem Sonntag und einem Dienstag, wurde der Gesamtkohlenstoffanteil TC als Summe aus elementarem (EC) und organischem Kohlenstoff (OC) ermittelt. Die Analyse von EC und OC erfolgte in Anlehnung an VDI 2465 Blatt 2 thermographisch und durch IR-Detektion beim Landesamt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW).

Für diese TC-Messungen verwendete man pro Messstandort 6 Quarzfilter (QF20 / Schleicher & Schuell), die von 2 Uhr bis 14 Uhr während jeweils 2 Stunden exponiert wurden. Die Messergebnisse beziehen sich somit auf die Gesamtheit der Fahrzeuge, die den Tunnel in Richtung St. Gallen passiert haben. Eine Filterung der Daten nach Mindestgeschwindigkeiten der Fahrzeuge und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Fahrraum, wie dies bei den Messungen der gasförmigen Komponenten gemacht wurde, um Stausituationen auszuschliessen, war bei der Auswertung dieser Messdaten nicht möglich.

Die Auswertung der PM10- sowie der EC- und OC-Messungen erfolgte für 2-Stunden-Mittelwerte. Die Aufbereitung der Daten für den Verkehr und die Luftströmung durch die Tunnelröhre wurde manuell durchgeführt. Nur an 2 der 7 Tage der HiVol-Messungen wurde die Messung der Luftströmung im Tunnel aufgezeichnet. Fehlende Daten für die Luftströmung durch den Tunnelfahrraum wurden anhand eines strömungstechnischen Ansatzes aus der Anzahl kurzer und langer Fahrzeuge berechnet und ergänzt.

- Skalieren der Verkehrsdaten der gültigen Messesequenzen nach den Angaben in Tabelle 5.1
- Bestimmen des Anteils der langen Fahrzeuge (als Schwerverkehrsanteil betrachtet)
- Berechnen des mittleren Emissionsfaktors

$$\text{EFA} = \frac{V_L \cdot \Delta t \cdot (c_{\text{Regensdorf}} - c_{\text{Weiningen}})}{n_{\text{Fz}} \cdot L_{\text{Mess}}} \quad \text{in g/(km Fz)}$$

V_L Mittlerer Volumenstrom in m^3/s durch den Fahrraum über die Mittelungszeit

Δt Mittelungszeit in s (2 Stunden)

$c_{\text{Regensdorf}}$ Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vor dem Ausfahrtsportal

$c_{\text{Weiningen}}$ Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nach dem Einfahrtsportal

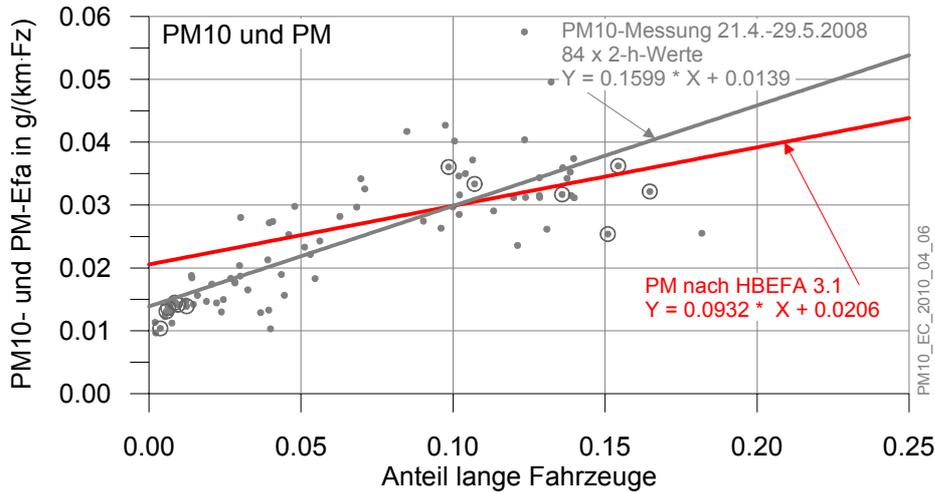
n_{Fz} Anzahl Fahrzeuge über Mittelungszeit

L_{Mess} Abstand der Messorte Weiningen und Regensdorf in km (3.067 km)

6.3.2 Ergebnisse

6.3.2.1 Feinstaub PM10

Die gemessenen PM10-Emissionen in Abhängigkeit vom Anteil der langen Fahrzeuge sind in der Figur 6.4 grau dargestellt. HBEFA bezeichnet die Angaben für PM gemäss dem Handbuch Emissionsfaktoren Version 3.1 [6].



Figur 6.4 *PM10-Emissionsfaktoren und Vergleich mit den Werten für PM aus dem Handbuch Emissionsfaktoren Version 3.1*
Die grau umrandeten Punkte bezeichnen die Intervalle mit Kohlenstoff-Analyse gemäss Figur 6.5.

Die im Bericht BAFU 355 [7] in Annex A4.2 angeführten PM10-Werte für Abrieb und Aufwirbelung auf Autobahnen von 0.047 g/(km·Fz) für PW und 0.074 g/(km·Fz) für SNF sind hier nicht berücksichtigt.

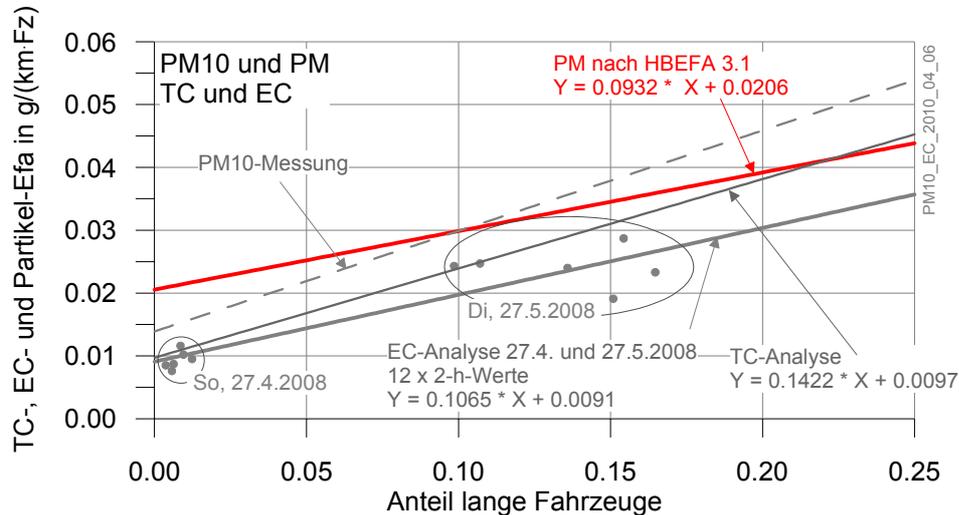
| | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Feinstaub PM10 | |
| Anzahl gültige Messungen | 84 (2-h-Mittelwerte von 7 Tagen) |
| Mittlerer PM10-Emissionsfaktor | 0.0265 g/(km·Fz) |

| Messtag im April und Mai 2008 | Anzahl Fz | Anteil lange Fz % | V _{F,mittel} km/h | V _{L,mittel} m/s | EFA-PM10 g/(km·Fz) |
|----------------------------------|--------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Mo 21.04.2008, 24 h | 47'673 | 9.0 | 91 | 7.0 | 0.0343 |
| Di 27.05.2008, 24 h | 49'713 | 10.0 | 94 | 6.7 | 0.0269 |
| Mi 23.04.2008, 24 h | 50'148 | 9.2 | 92 | 7.3 | 0.0301 |
| Do 29.05.2008, 24 h | 52'293 | 9.5 | 90 | 6.8 | 0.0275 |
| Fr 25.04.2008, 24 h | 55'343 | 7.8 | 95 | 7.7 | 0.0242 |
| Sa 26.04.2008, 24 h | 45'969 | 1.6 | 97 | 6.9 | 0.0153 |
| So 27.04.2008, 24 h | 40'273 | 0.66 | 98 | 6.5 | 0.0135 |
| Gesamt 168 h | 341'412 | 6.7 | 94 | 7.0 | 0.0265 |

Tabelle 6.1 *Ergebnisse der PM10-Messungen*

6.3.2.2 Gesamtkohlenstoff TC und elementarer Kohlenstoff EC im PM10

Die Emissionsfaktoren des TC- und EC-Anteils in PM10 sind in Abhängigkeit vom Anteil der langen Fahrzeuge in der Figur 6.5 grau aufgezeichnet. Zum Vergleich bezeichnet HBEFA die Angaben für PM gemäss dem Handbuch Emissionsfaktoren Version 3.1 [6] (CH/AB/100/flüssig, Steigung 1.292 %, Option Klimaanlage Frühling).



Figur 6.5 TC- und EC-Emissionsfaktoren (Kohlenstoffanteil in PM10) und Vergleich mit den Werten für PM aus dem Handbuch

| Kohlenstoff in PM10 | |
|------------------------------|----------------------------------|
| Anzahl gültige Messungen | 12 (2-h-Mittelwerte von 2 Tagen) |
| Mittlerer TC-Emissionsfaktor | 0.0221 g/(km·Fz) |
| Mittlerer EC-Emissionsfaktor | 0.0189 g/(km·Fz) |

Im Mittel beträgt der TC-Anteil an den PM10-Emissionsfaktoren rund 83 %; bei den kurzen Fahrzeugen sind es 70 %, bei den langen Fahrzeugen 88 %.

Der EC-Anteil an TC ist im Mittel 86 %; bei den kurzen Fahrzeugen ergibt sich 94 % und bei den langen Fahrzeugen 76 %. Alle Angaben sind massebezogen.

| Messzeit | Anzahl Fz | Anteil lange Fz % | V _{F, mittel} km/h | V _{L, mittel} m/s | EFA-TC g/(km·Fz) | EFA-EC g/(km·Fz) |
|----------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|------------------|
| Di 27.05.2008 | | | | | | |
| 02:00 – 14:00 | 26'316 | 12.3 | | | 0.0297 | 0.0249 |
| 02:00 – 04:00 | 255 | 16.5 | 95 | 2.64 | 0.0308 | 0.0233 |
| 04:00 – 06:00 | 1'723 | 15.1 | 99 | 5.75 | 0.0251 | 0.0191 |
| 06:00 – 08:00 | 7'601 | 9.9 | 88 | 8.17 | 0.0286 | 0.0243 |
| 08:00 – 10:00 | 6'417 | 10.7 | 90 | 8.27 | 0.0292 | 0.0247 |
| 10:00 – 12:00 | 5'249 | 15.4 | 94 | 9.30 | 0.0341 | 0.0287 |
| 12:00 – 14:00 | 5'071 | 13.6 | 94 | 8.91 | 0.0289 | 0.0240 |
| So 27.04.2008 | | | | | | |
| 02:00 – 14:00 | 15'657 | 0.75 | | | 0.0094 | 0.0088 |
| 02:00 – 04:00 | 819 | 0.9 | 98 | 4.15 | 0.0126 | 0.0116 |
| 04:00 – 06:00 | 1'081 | 0.4 | 100 | 4.57 | 0.0095 | 0.0085 |
| 06:00 – 08:00 | 1'261 | 1.0 | 100 | 4.88 | 0.0121 | 0.0102 |
| 08:00 – 10:00 | 2'996 | 1.2 | 99 | 6.65 | 0.0105 | 0.0095 |
| 10:00 – 12:00 | 4'783 | 0.6 | 97 | 7.71 | 0.0095 | 0.0087 |
| 12:00 – 14:00 | 4'717 | 0.6 | 98 | 7.66 | 0.0073 | (0.0076)* |

* Im Grundlagedatei ist die OC-Differenz Regensdorf - Weiningen < 0.

Tabelle 6.2 Ergebnisse der TC- und EC-Analysen

6.4 Messungen der Sichttrübung ST

6.4.1 Einleitung

Die Sichttrübung der Luft im Fahrraum von Strassentunneln stellt heute das Hauptkriterium für die Auslegung der Lüftungen bei Normalbetrieb, d.h. frei fliessendem Verkehr, stockender Verkehr und Verkehrsstau, dar. Die Messung der Sichttrübung dient als hauptsächliche Regelgrösse für den Betrieb der Fahrraumlüftung bei diesen Verkehrszuständen. Die Sichttrübung setzt sich aus Partikeln des motorischen Verbrennungsprozesses und aus weiteren Partikeln zusammen. Die nicht-motorischen Partikel stammen von Abrieb (Bremsen, Reifen) und Resuspension (wieder aufgewirbelten Feinstaubteilchen). Durch die vor einigen Jahren begonnene und für die kommenden Jahre weiter vorausgesagte Verminderung der motorischen Partikel erlangt der nicht motorische Anteil ab dem Jahr 2010 eine zentrale Bedeutung. Von den Prüfstandmessungen ist über die Sichttrübungs-Emission der Motoren mehr bekannt als über die Anteile aus Abrieb und Resuspension. Bezüglich des Zusammenhangs zwischen den gravimetrischen Werten aus den Prüfstandsergebnissen und der opazitiven Wirkung im Tunnel ist heute noch einiges unklar. Aus diesen Gründen ist es von Interesse, aus Vergleichen von Tunnelmessungen mit den Prüfstandmessungen Hinweise auf die nicht-motorischen Anteile an der Sichttrübung in Tunneln zu erhalten.

Zur Definition der Sichttrübung wird in [8] Folgendes angeführt: Ein Lichtstrahl durch trübe Luft verliert über seine Lauflänge an Intensität.

$$I = I_0 \cdot e^{-KL} \quad \text{und} \quad K = -\frac{1}{L} \cdot \ln \frac{I}{I_0}$$

wobei

- I Lichtintensität nach einer Lauflänge L
- I₀ Lichtintensität an der Quelle
- K Extinktionskoeffizient in m⁻¹
- L Lauflänge in m

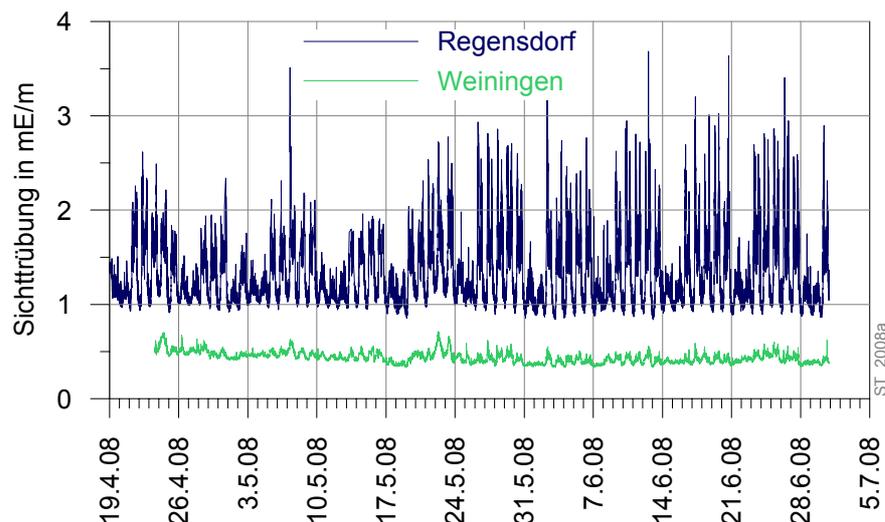
Bei der Tunnellüftung hat sich der Extinktionskoeffizient K als Mass für die Sichttrübung eingebürgert. Die entsprechende Richtlinie des Bundesamtes für Strassen [9] gibt für die Auslegung der Fahrraumlüftung bei Normalbetrieb einen Wert K_{lim} = 0.005 m⁻¹ oder 5 mE/m (Milli-Extinktion pro Meter) vor. Bei einer Sichttrübung von 12 mE/m muss der Tunnel für den Verkehr geschlossen werden. Die heute in den Tunneln eingebauten Geräte geben die Sichttrübung in % an. 100 % entsprechen im Gubristtunnel 15 mE/m.

Für die Auslegung der Fahrraumlüftungen wird die Sichttrübungs-Emission (E_{ST}) in m²/(h·Fz) angegeben. Der erforderliche Frischluftbedarf (FLB) für die Einhaltung des Dimensionierungswertes (K_{lim}) ist:

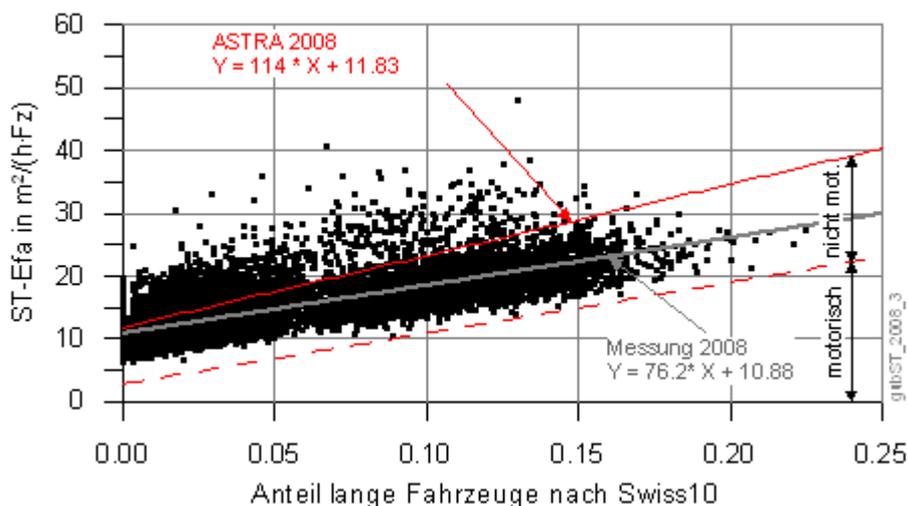
$$\text{FLB} = \frac{n_{\text{FZ}} \cdot E_{\text{ST}}}{K_{\text{lim}}} \quad \text{in m}^3/\text{s}$$

wobei n_{FZ} die durchschnittliche Anzahl der Fahrzeuge im betrachteten Abschnitt bedeutet.

6.4.2 Ergebnisse



Figur 6.6 *Gesamtheit der Daten der Sichttrübungsmessung am Einfahrtsportal Weiningen und am Ausfahrtsportal Regensdorf. Die bezeichneten Daten stehen jeweils für Samstag 00:00.*



Figur 6.7 Gültige Messwerte der Sichttrübung und abgeleitete Emissionsfaktoren und Vergleich mit den Werten in der ASTRA-Richtlinie [9], die für PW und LW angegeben sind.

| Sichttrübung | |
|--|-------------------------------------|
| Auswertezeitraum (gültige Sequenzen) | 30.4.2008 12:20 bis 30.6.2008 20:15 |
| Anzahl gültiger 5-Minuten-Sequenzen | 10'328 |
| Anzahl Fahrzeuge in gültigen Sequenzen | |
| gesamt | 2'026'502 |
| kurze Fahrzeuge nach Swiss10 | 1'023'403 |
| lange Fahrzeuge nach Swiss10 | 131'589 (6.1 %) |
| Mittlere Fahrgeschwindigkeit (Standardabw.) | 95.3 km/h (3.8 km/h) |
| Mittlere Geschwindigkeit der Luft (Standardabw.) | 7.4 m/s (1.38 m/s) |
| Mittlerer Sichttrübungs-Emissionsfaktor | 15.3 m²/(h·Fz) |

7. BEURTEILUNG

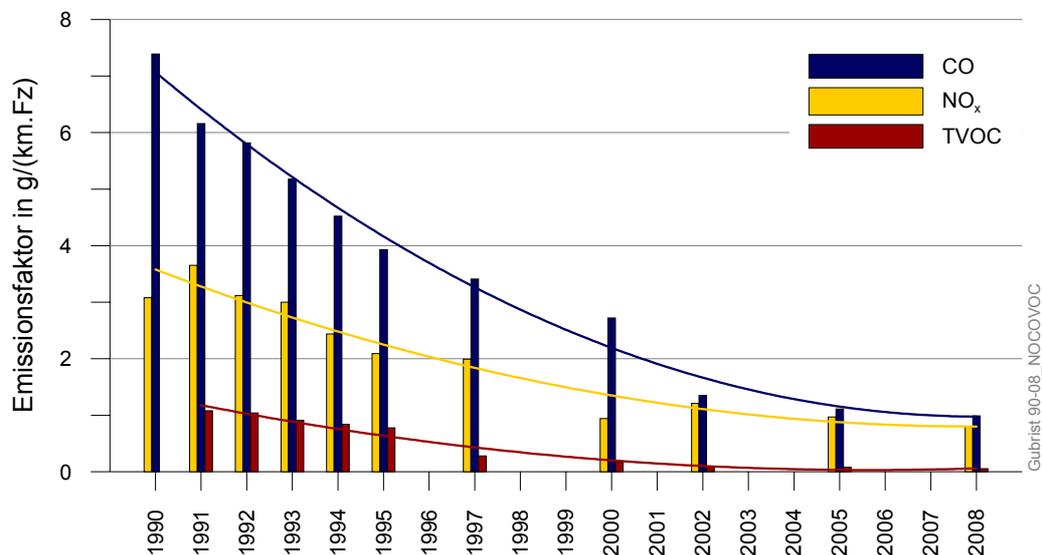
7.1 Vergleich mit früheren Messkampagnen

Die Resultate der Messungen von 2008 im Gubristtunnel sind in Kapitel 6 beschrieben. Aus der Darstellung des Emissionsfaktors in Abhängigkeit des Anteils der langen Fahrzeuge lässt sich der aggregierte Emissionsfaktor für kurze Fahrzeuge (Personenwagen, Lieferwagen und Motorräder) und der langen Fahrzeuge (Lastwagen, Sattelzüge, Sattelschlepper und Reisebusse) ableiten. Die Werte aus dem Handbuch gelten für die Verkehrssituation CH/AB/100/flüssig, das Verkehrsszenario „BAU“ und der Steigung von 1.292 %; zudem wurde die Optionen 'Klimaanlage, Frühling' gewählt.

Es ist zu bedenken, dass mit zunehmender Strenge der Abgasvorschriften der Einfluss des individuellen Fahrzeugzustandes zunimmt und einzelne Fahrzeuge in schlechtem Zustand sehr dominant werden können. 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.

In den folgenden Tabellen und Figuren sind die Hauptergebnisse der Messungen 2008 zusammengestellt und mit jenen der früheren Messkampagnen verglichen.

Es zeigt sich, dass die NO_x-, CO- und TVOC-Emissionsfaktoren der Motorfahrzeuge seit Beginn der Messungen deutlich zurückgegangen sind. Besonders markant ist der Rückgang bei den Personenwagen als Folge der Katalysatortechnik (Figur 7.2). Seit 2002 ist der Rückgang der Gesamtemissionen absolut wie anteilmässig verlangsamt.



Figur 7.1 Entwicklung der Emissionsfaktoren pro Fahrzeug seit 1990 für NO_x, CO und TVOC in der Südröhre des Gubristtunnels in Fahrtrichtung St.Gallen, mit einer Steigung von 1.3 %

Tabelle 7.1 fasst die bisherigen Messergebnisse für die gasförmigen Stoffe zusammen, und in Figur 7.2 sind die Werte für NO_x, CO und TVOC grafisch dargestellt.

| Kenngrösse | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 ²⁾ | 1994 ²⁾ | 1995 ²⁾ | 1997 ^{2,3)} | 2000 ^{2,3,4)} | 2002 ^{2,3,5)} | 2005 ⁶⁾ | 2008 ⁶⁾ |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| Anzahl gültig erfasster Fahrzeuge | | | | | | | | | | | |
| - für NO _x -Messung | 403'071 | 556'110 | 802'563 | 1'047'696 | 944'974 | 1'119'958 | 678'568 | 371'406 | 1'534'146 | 1'213'718 | 2'015'401 |
| - für CO-Messung | 403'071 | 677'033 | 799'935 | 1'045'273 | 944'974 | 1'125'240 | 703'443 | 371'406 | 1'541'456 | 1'167'032 | 2'088'934 |
| - für TVOC-Messung | - | 677'033 | 806'275 | 1'047'696 | 944'974 | 1'126'350 | 708'534 | 369'728 | 1'552'074 | 1'143'188 | 2'095'050 |
| - für PAH-Messung | - | - | - | - | 627'420 | 1'127'791 | 705'717 | - | - | - | - |
| - für NH ₃ -Messung | - | - | - | - | - | - | - | - | 759'975 | - | - |
| Lastwagenanteil [%] | | | | | | | | | | | |
| - bei gültigen NO _x -Messungen | 7.3 | 8.6 | 7.8 | 8.9 ¹⁾ | 7.3 | 7.3 ¹⁾ | 7.4 ¹⁾ | 3.7 | 8.0 | 6.2 | 5.6 |
| - bei gültigen CO-Messungen | 7.3 | 8.2 | 7.7 | 8.9 ¹⁾ | 7.3 | 7.3 ¹⁾ | 7.8 ¹⁾ | 3.7 | 8.0 | 6.1 | 5.8 |
| - bei gültigen TVOC-Messungen | - | 8.2 | 7.8 | 8.9 ¹⁾ | 7.3 | 7.3 ¹⁾ | 7.8 ¹⁾ | 3.7 | 8.0 | 6.0 | 5.8 |
| - bei gültigen PAH-Messungen | - | - | - | - | 7.7 | 7.3 ¹⁾ | 7.7 ¹⁾ | - | - | - | - |
| - bei gültigen NH ₃ -Messungen | - | - | - | - | - | - | - | - | 8.2 | - | - |
| NO _x -Emissionsfaktor [g/(km·Fz)] | | | | | | | | | | | |
| - pro Fahrzeug | 3.08 | 3.65 | 3.12 | 3.00 | 2.44 | 2.09 | 1.99 | 0.94 | 1.21 | 0.97 | 0.80 |
| - pro Personenwagen | 2.0 – 2.5 | 1.8 – 3.3 | 1.6 – 2.9 | 1.2 – 2.5 | 1.0 – 2.0 | 0.8 – 1.6 | 0.6 – 1.8 | 0.3 – 1.0 | 0.2 – 0.45 | 0.25 - 0.45 | 0.2 – 0.5 |
| - pro Lastwagen | 14 - 18 | 12 - 21 | 12 - 21 | 12 - 18 | 12 – 18 | 10 - 18 | 10 - 18 | 10 - 14 | 8 - 15 | 8 - 15 | 7 - 11 |
| CO-Emissionsfaktor [g/(km·Fz)] | | | | | | | | | | | |
| - pro Fahrzeug | 7.39 | 6.16 | 5.82 | 5.18 | 4.52 | 3.93 | 3.41 | 2.72 | 1.35 | 1.11 | 0.99 |
| - pro Personenwagen | 6.7 – 8.9 | 5.0 – 8.7 | 5.0 – 8.7 | 4.4 – 7.5 | 3.7 – 6.9 | 2.5 – 6.2 | 1.9 – 4.4 | 1.6 – 4.0 | 0.8 – 2.0 | 0.6 - 1.9 | 0.5 – 1.9 |
| - pro Lastwagen | ca. 5.6 | unsicher | unsicher | < 3.7 | < 3.7 | < 3.7 | 1.9 – 7.5 | < 3.7 | 0.5 - 1.5 | 0.3 - 1.5 | 0.5 – 1.5 |
| TVOC-Emissionsfaktor [g/(km·Fz)] | | | | | | | | | | | |
| - pro Fahrzeug | - | 1.08 | 1.04 | 0.91 | 0.84 | 0.78 | 0.28 | 0.17 | 0.08 | 0.08 | 0.055 |
| - pro Personenwagen | - | 0.7 – 1.5 | 0.7 – 1.5 | 0.7 – 1.4 | 0.6 – 1.4 | 0.4 – 1.4 | 0.09 – 0.37 | 0.06 – 0.32 | 0.03 – 0.12 | 0.03 - 0.15 | 0.01 – 0.12 |
| - pro Lastwagen | - | unsicher | unsicher | 0.7 – 2.8 | 0.7 – 2.8 | 0.7 – 2.8 | 0.09 – 1.5 | < 0.4 | 0.06 - 0.16 | 0.03 - 0.1 | 0.03 – 0.09 |
| PAH-Emissionsfaktor [µg/(km·Fz)] | | | | | | | | | | | |
| - pro Fahrzeug | - | - | - | - | 732 | 480 | 577 | - | - | - | - |
| - pro Personenwagen | - | - | - | - | 150 - 550 | 100 - 400 | 100 - 500 | - | - | - | - |
| - pro Lastwagen | - | - | - | - | 4700-7300 | 3000-5000 | 3500-5000 | - | - | - | - |
| NH ₃ -Emissionsfaktor [g/(km·Fz)] | | | | | | | | | | | |
| - pro Fahrzeug | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.033 | - | - |
| - pro Personenwagen | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.02 – 0.05 | - | - |
| - pro Lastwagen | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.005-0.02 | - | - |

¹⁾ Eichzählungen des Vorjahres verwendet.

²⁾ Seit 1993 stehen die Rohdaten der Verkehrszählungen als Mittelwerte über 2½ Minuten zur Verfügung. Vor 1993 waren es lediglich 1-Stunden-Mittelwerte.

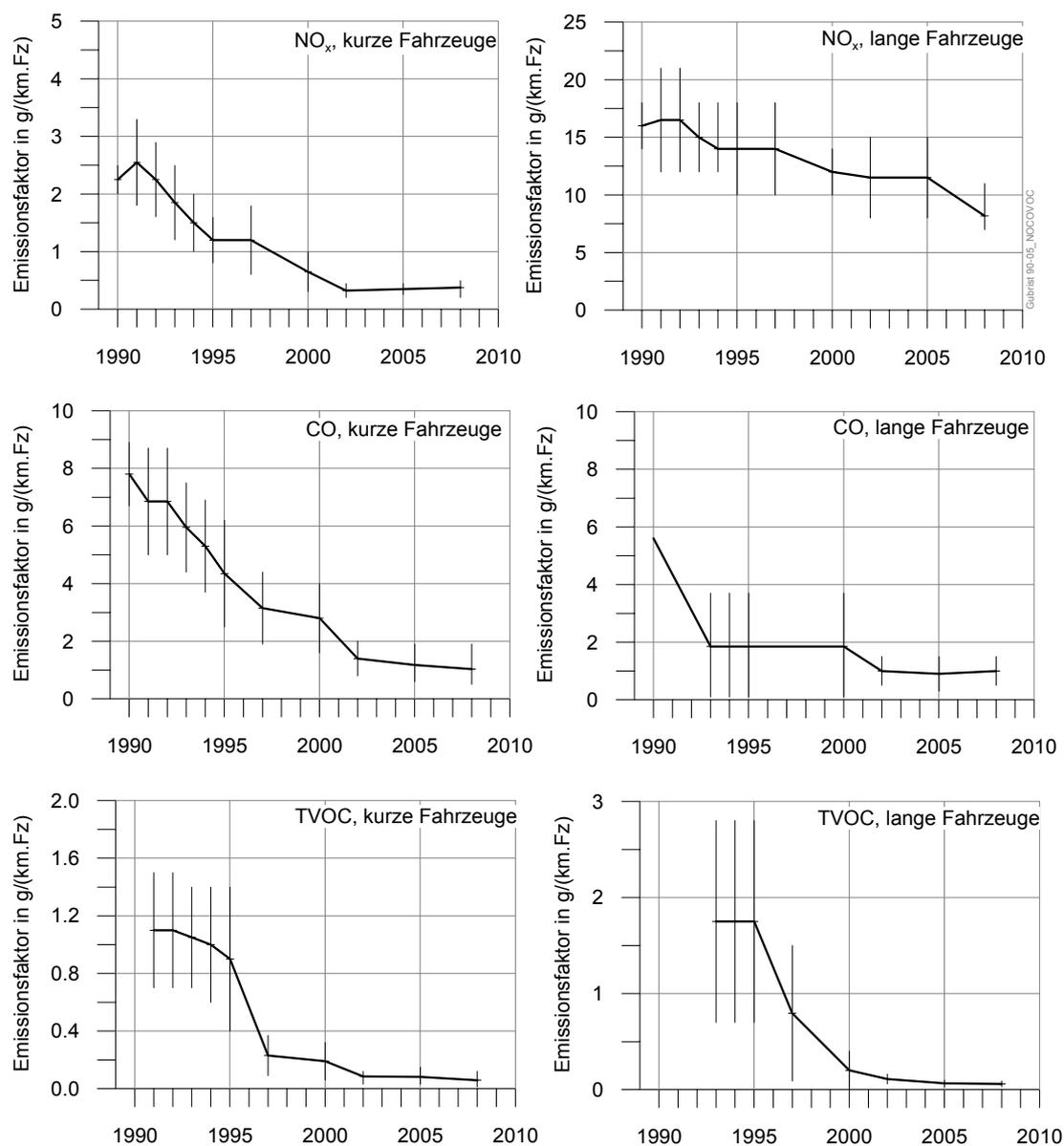
³⁾ Seit 1997 stehen neben den Schadstoffmessungen beim Ausfahrtsportal erstmals auch Messungen beim Einfahrtsportal zur Verfügung (Differenzmessung).

⁴⁾ Die Verkehrszählungen lieferten im Jahr 2000 unbrauchbare Werte für Zeiten mit grösserem Lastwagenverkehr. Die Aussagen zu den Emissionsfaktoren der Lastwagen sind darum sehr unsicher.

⁵⁾ Neue Verkehrszählungen ausserhalb des Portals Regensdorf

⁶⁾ Verkehrszählung und Auswertung gemäss Swiss10, der Begriff Personenwagen beinhaltet LI und MR, Lastwagen beinhaltet LZ, SZ und RBus

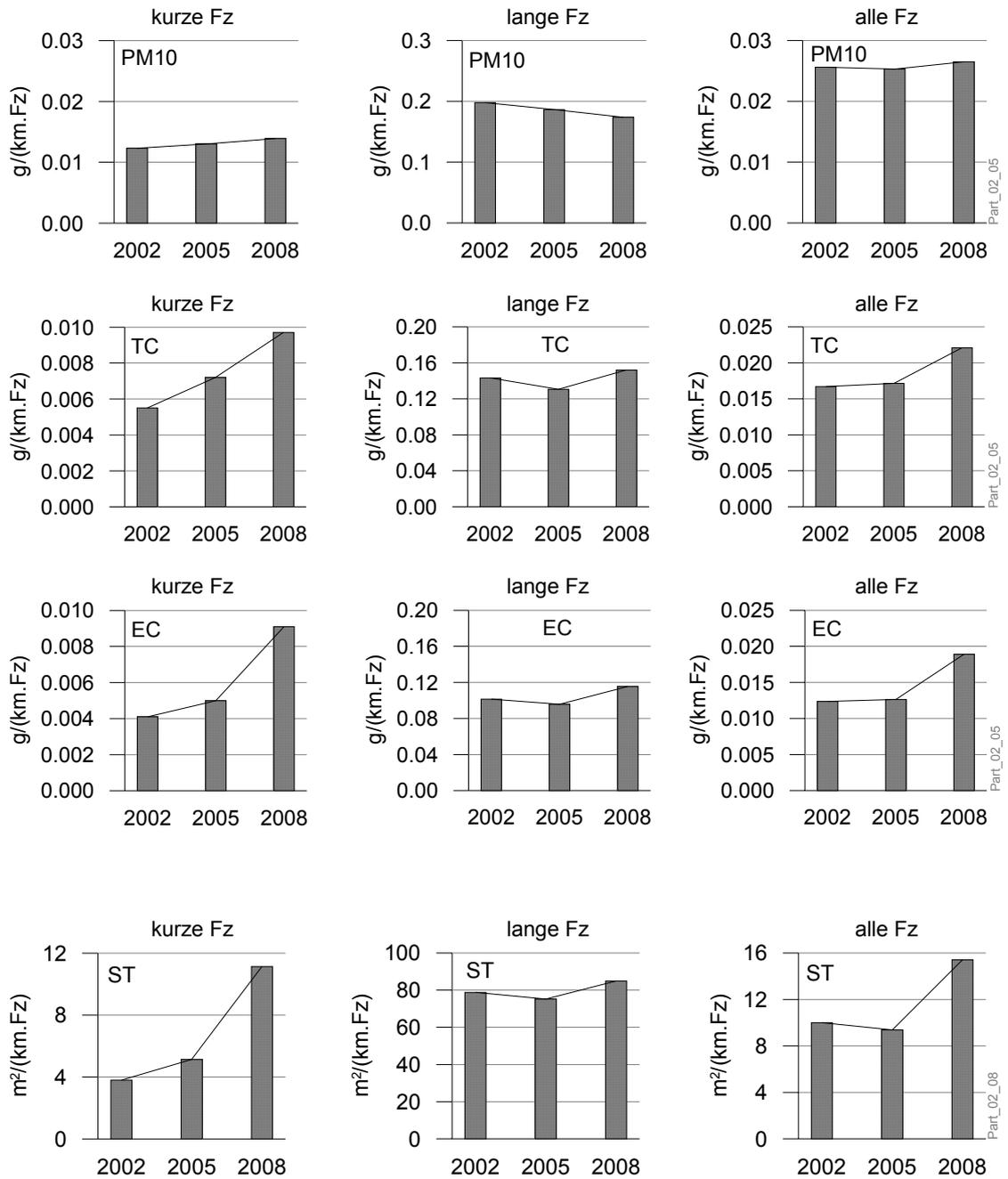
Tabelle 7.1: Kennwerte der Messungen gasförmiger Stoffe in der Südröhre des Gubristtunnels (Fahrtrichtung in der Steigung)



Figur 7.2 *Entwicklung der Emissionsfaktoren für NO_x, CO und TVOC bei den Messungen in der Südröhre des Gubristtunnels seit 1990 mit Angabe der Streubreite und differenziert nach kurzen Fahrzeugen (links) und langen Fahrzeugen (rechts)*

Die partikelförmigen Stoffe wurden nach PM₁₀, Gesamt-Kohlenstoff TC und elementarer Kohlenstoff EC in PM₁₀ und Sichttrübung ST ausgewertet. Die Messungen ergeben, dass insbesondere die TC- und die ST-Emission seit dem Jahr 2005 deutlich zugenommen hat, während sich für PM₁₀ nur ein leichter Anstieg zeigt. Bei den TC-Emissionen der kurzen Fahrzeuge beträgt der Anstieg 35 %, bei den langen Fahrzeugen 16 %, insgesamt sind es 28 %. Sehr deutlich ist der Anstieg der EC-Werte zwischen 2005 und 2008 bei den kurzen Fahrzeugen; bei den Sichttrübungsemissionen der kurzen Fahrzeuge ergab sich mehr als eine Verdoppelung: Der Anstieg beträgt 117 %, bei den langen Fahrzeugen sind es 13 % und insgesamt 64 %. Man geht heute davon aus, dass insbesondere die kleinsten, frischen, noch wenig koagulierten Russpartikel opazitativ wirksam sind. Die Sichttrübungswerte weisen darauf hin, dass bei den kurzen Fahrzeugen insbesondere die Anzahl der kleinsten

Partikel stark zugenommen hat. Die auf die Masse bezogene Zunahme der PM10-Werte ist eher gering.



Figur 7.3 Vergleich der Messungen von 2002 bis 2008 der PM10-, TC-, EC- und Sichttrübungs-Emission im Gubristtunnel

Die Tabelle 7.2 enthält die Angaben für die partikelförmigen Stoffe, wie sie seit dem Jahr 2002 erfasst werden.

| Kenngrosse | 2002 | 2005 ¹⁾ | 2008 ¹⁾ |
|--|-------------|---------------------------|---------------------------|
| Anzahl gültig erfasster Fahrzeuge | | | |
| - für PM10-Messung | 280'881 | 322'352 | 341'412 |
| - für TC-Messung | 26'018 | 31'471 | 41'973 |
| - für ST-Messung | 1'586'663 | 1'214'414 | 2'151'269 |
| Lastwagenanteil [%] | | | |
| - bei gültigen PM10-Messungen | 7.2 | 6.2 | 6.7 |
| - bei gültigen TC-Messungen | 8.3 | 7.1 | 7.7 |
| - bei gültigen ST-Messungen | 8.2 | 6.2 | 5.9 |
| PM10-Emissionsfaktor [g/(km·Fz)] | | | |
| - pro Fahrzeug | 0.026 | 0.025 | 0.0265 |
| - pro Personenwagen | 0.08 | 0.013 | 0.0139 |
| - pro Lastwagen | 0.212 | 0.187 | 0.1738 |
| TC-Emissionsfaktor [g/(km·Fz)] | | | |
| - pro Fahrzeug | 0.0167 | 0.0172 | 0.0221 |
| - pro Personenwagen | 0.0055 | 0.0072 | 0.0097 |
| - pro Lastwagen | 0.1432 | 0.1306 | 0.1521 |
| EC-Emissionsfaktor [g/(km·Fz)] | | | |
| - pro Fahrzeug | 0.0124 | 0.0126 | 0.0189 |
| - pro Personenwagen | 0.0041 | 0.0050 | 0.0091 |
| - pro Lastwagen | 0.1015 | 0.0956 | 0.1155 |
| ST-Emissionsfaktor [m ² /(km·Fz)] | | | |
| - pro Fahrzeug | 10.0 | 9.4 | 15.4 |
| - pro Personenwagen | 3.8 | 5.1 | 11.1 |
| - pro Lastwagen | 78.8 | 75.2 | 84.9 |

¹⁾ Verkehrszählung und Auswertung gemäss Swiss10, die Klasse „Personenwagen“ beinhaltet Personenwagen, Lieferwagen und Motorräder, „Lastwagen“ steht für Lastenzüge, Sattelzüge und Reisebusse

Tabelle 7.2: Kennwerte der Messungen partikelförmiger Stoffe in der Südröhre des Gubristtunnels (Fahrtrichtung in der Steigung)

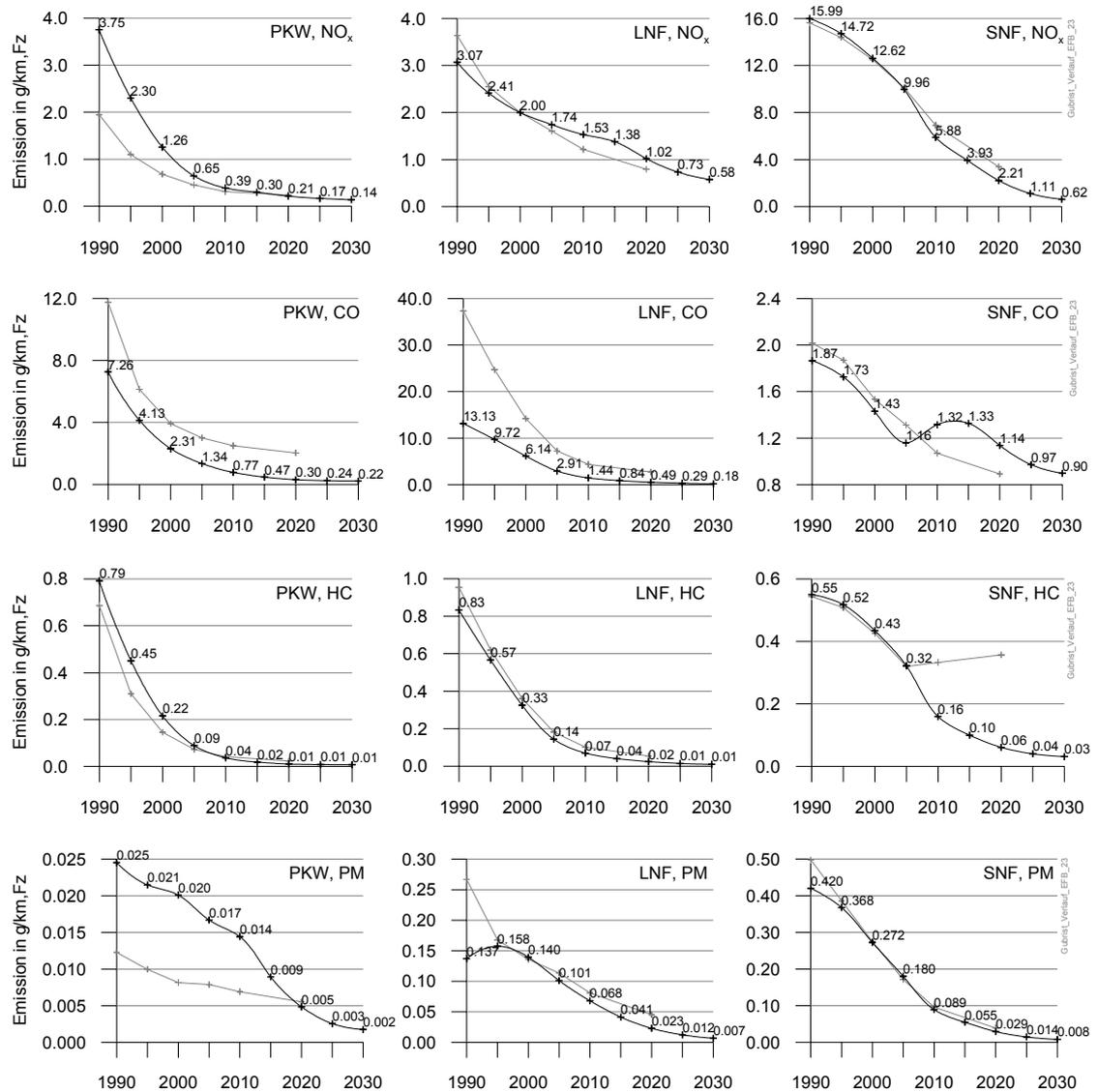
7.2 Vergleich mit den Angaben im Handbuch Emissionsfaktoren

Für das Bezugsjahr 2008 werden in den Figuren 6.1 bis 6.3 die NO_x-, CO- und TVOC-Emissionsfaktoren gemäss den Messungen im Gubristtunnel jenen des Handbuches Emissionsfaktoren Version 3.1 gegenübergestellt. Den Vergleich der Partikel-Emissionen, d. h. die Messungen von PM10 sowie die Analysen von TC und EC gegenüber PM aus dem Handbuch, zeigen die Figuren 6.4 und 6.5. Die Zuordnung zu den Gruppen bezeichnet als kurze Fahrzeuge bzw. lange Fahrzeuge erfolgte dabei gemäss den Angaben in Tabelle 5.2.

Der Zustand bei frei fliessendem Verkehr im Gubristtunnel ist im Sinn des Handbuches Emissionsfaktoren Version 3.1 als Verkehrssituation *CH/AB/100/flüssig* beim Verkehrsszenario „BAU“ zu betrachten. Die angegebenen Werte wurden zudem für die Steigung von 1.292 % und mit der Option *Klimaanlage Frühling* berechnet. Gemäss Handbuch beträgt eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von Personenwagen 102 km/h und jene von schweren Nutzfahrzeugen 86 km/h.

Wie die nachfolgenden Darstellungen der Emissionsverläufe gemäss Handbuch für die Verkehrssituation in der Südröhre des Gubristtunnels zeigen, wird auch für die kommenden Jahre ein weiterer Rückgang der Emissionen der Einzelfahrzeuge prog-

nostiziert. Zusammen mit der zeitlichen Unsicherheit der Prognose können die teilweise grossen Gradienten zu Abweichungen zwischen Messung und Prognosewert führen.



Figur 7.4 *Angaben zu den Emissionswerten von 1990 bis 2030 bei frei fliessendem Verkehr in der Südröhre des Gubristtunnels: schwarz: Handbuch Emissionsfaktoren Version 3.1, mit Verkehrssituation CH/AB/100/flüssig, Verkehrsszenario „BAU“, Steigung 1.292 %, Option Klimaanlage Frühling; grau (zum Vergleich): Handbuch Version 2.1, mit Verkehrssituation AB_100, Steigung 1.3 %, Option Klimaanlage und Partikelfilter*

Die anhand der Messungen ermittelten Emissionsfaktoren werden mit den Angaben im Handbuch Emissionsfaktoren Version 3.1 von 2010 verglichen. Die angegebenen Abweichungen beziehen sich auf die Emissionswerte des Handbuchs. Als Grundlage

für die Verkehrsdaten dient die Swiss10-Zählstelle unter der Affolternbrücke in Regensdorf.

Bei den NO_x-Emissionsfaktoren ergeben die Messungen für die kurzen Fahrzeuge eine um 33 % tiefere und für die langen Fahrzeuge um 17 % höhere Emission als nach der Angabe des Handbuchs. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge von rund 6 % ergeben die Messungen 10 % tiefere NO_x-Emissionen als gemäss Handbuch.

Die Messwerte der CO-Emissionsfaktoren liegen für kurze Fahrzeuge 8 % unter der Angabe im Handbuch. Die Extrapolation für lange Fahrzeuge ergibt eine unrealistische (knapp negative) CO-Emission. Die Streuung der über 10'000 ausgewerteten 5-Minuten-Sequenzen ist sehr gross. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge ergeben die Messungen 15 % tiefere CO-Emissionen als gemäss Handbuch.

Die Streuung der ermittelten TVOC-Emissionsfaktoren ist ebenfalls gross. Die Emission für die kurzen Fahrzeuge liegt sehr nahe (-2 %) bei der Angabe im Handbuch. Bei den langen Fahrzeugen ergeben die Messwerte um 66 % tiefere Emissionen als im Handbuch. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge ergeben die Messungen 14 % tiefere TVOC-Emissionen als gemäss Handbuch.

Der aus den Messungen im Gubristtunnel ermittelte PM10-Emissionsfaktor für die kurzen Fahrzeuge ist um 32 % tiefer, jener für die langen Fahrzeuge um 53 % höher als die entsprechende Angabe für PM im Handbuch. Es wurden 84 Sequenzen (Filter) zu 2 Stunden gemessen. Beim mittleren Anteil langer Fahrzeuge ergeben die Messungen 8 % tiefere PM10-Emissionen als die PM-Werte gemäss Handbuch. Bemerkenswert ist, dass bei diesem Vergleich keine Beiträge für Abrieb und Aufwirbelung eingerechnet sind.

Für 12 Sequenzen wurde der Anteil von elementarem Kohlenstoff EC analysiert. Die Ergebnisse von sechs dieser Sequenzen, in Situationen mit sehr geringem Anteil an langen Fahrzeugen, ergeben für die kurzen Fahrzeuge um 56 % tiefere Messwerte als nach den Angaben für PM im Handbuch. Die ermittelte EC-Emission für die langen Fahrzeuge stimmt mit dem Wert im Handbuch gut überein (+2 %).

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 Gubristtunnel gemessenen Sichttrübungs-Emissionsfaktoren sind für die kurzen Fahrzeuge 8 % und für lange Fahrzeuge 31 % tiefer als die heute gültigen Dimensionierungswerte in der ASTRA-Richtlinie Lüftung der Strassentunnel.

8. GLOSSAR

| Begriff | Bedeutung |
|---------------------------|---|
| BAFU | Bundesamt für Umwelt |
| Drei-Wege-Katalysator | Der Katalysator oxidiert im Auspuff Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid und baut Stickoxide zu Stickstoff und Sauerstoff ab. Nebenbei werden noch unverbrannte Kraftstoffreste zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt. |
| EC | Elementarer Kohlenstoff (EC) = Russ; oft wird dieser amorphe Kohlenstoff auch als Black Carbon (BC) bezeichnet. Ruß tritt bei Verbrennungsvorgängen als unerwünschtes Produkt auf und enthält an seiner Oberfläche adsorbierte Pyrolyseprodukte, je nach den Ausgangsstoffen auch ölige Bestandteile aus unvollständiger Verbrennung. Ruß besteht aus kleinsten, meist kugelförmigen Teilchen, die auch Primärpartikel genannt werden. Diese haben meist eine Größe zwischen 10 und 300 nm, daher spricht man auch von so genannten Nanoteilchen. |
| Emissionsfaktor | ist die Masse des emittierten Stoffes pro Fahrzeug und gefahrener Kilometer. |
| Extinktionskoeffizient | beschreibt in diesem Zusammenhang die Absorption des Lichts im Medium Luft. Je grösser der Koeffizient, desto stärker wird die einfallende Strahlung vom Medium absorbiert. |
| Fahrleistung | ist hier der prozentuale Anteil der von einer bestimmten Fahrzeuggruppe in einem Jahr zurückgelegten Kilometer. |
| Glasfaser-Filter | ermöglichen eine schnelle Filtration bei gleichzeitig hohem Rückhaltevermögen. Sie werden im High-Volume-Sampler verwendet. |
| Halbquer-Lüftung | Bei der Halbquerlüftung wird Frischluft über einen Zuluftkanal in den Fahrraum geblasen und die Abluft wird aus einem oder beiden Portalen ausgestossen. |
| HBEFA | ist das Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs und stellt Emissionsfaktoren für alle gängigen Fahrzeugkategorien jeweils in emissionsrelevanter Differenzierung für eine Vielzahl von Verkehrssituationen zur Verfügung. |
| High-Volume-Sampler (HVS) | Bei diesem gravimetrischen Feinstaub-Messsystem wird die Luft durch eine Turbine angesaugt und über einen Filter (meist Glasfaser- oder Quarz-Filter) geleitet. Das Modell DHA 80 verfügt über einen automatischen Filterwechsler, welcher nach Bedarf, zeitgesteuert einen neuen Filter in die Probenahme einsetzt. |
| Kurze Fahrzeuge | Gruppe, welche die nach Swiss10 definierten Fahrzeugkategorien: Personenwagen (PW), Lieferwagen (LI) und Motorräder (MR) umfasst. |

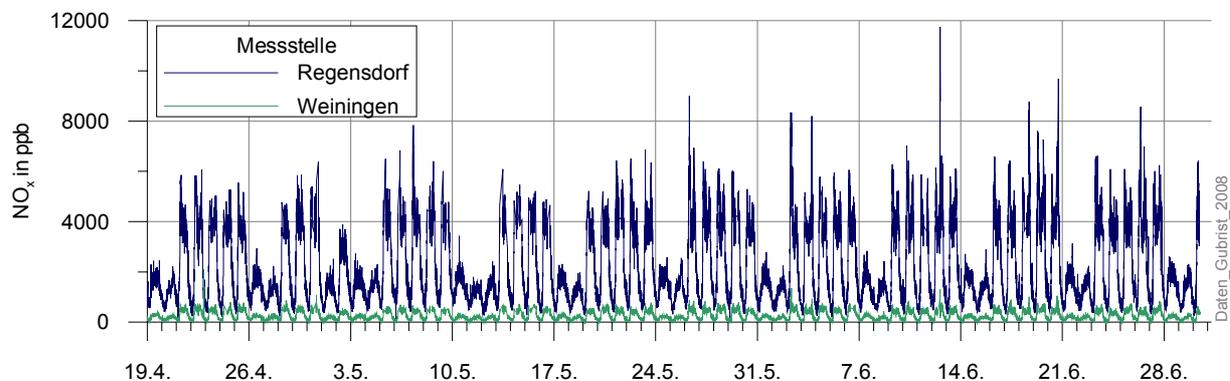
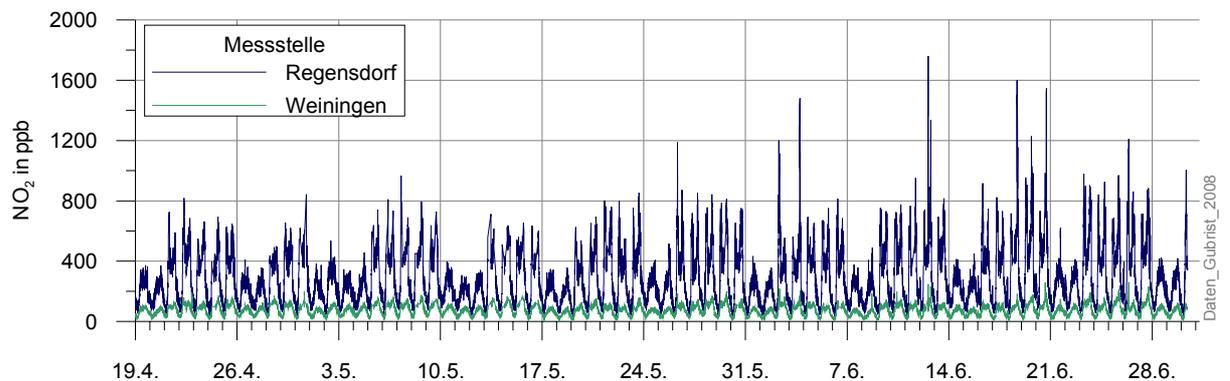
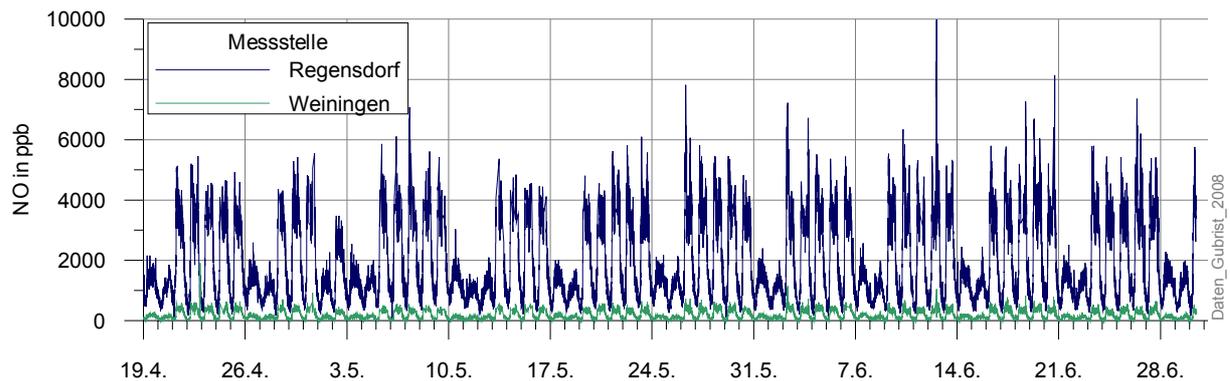
| | |
|---|---|
| Lange Fahrzeuge | Gruppe, welche die nach Swiss10 definierten Fahrzeugkategorien: Lastwagen (LW), Lastenzug (LZ), Sattelzug (SZ), Reisebus (RBus) umfasst. |
| Lichter Fahrraumquerschnitt | ist die freie Querschnittfläche des Fahrraums |
| Mechanische Tunnellüftung | Belüftung des Tunnelfahrraums mit Hilfe von Ventilatoren |
| Motorische Partikelemission | bezeichnet die Partikelemissionen, welche durch den Betrieb des Fahrzeugmotors verursacht und durch den Auspuff emittiert werden. Die nicht motorischen umfassen alle anderen Partikelemissionen, wie Reifenabrieb und Aufwirbelung. |
| Natürliche Längslüftung | Belüftung des Tunnelfahrraums von Portal zu Portal durch die Kolbenwirkung des Verkehrs und durch meteorologische Einflüsse vor den Portalen. |
| OC | steht für Organic Carbon und bezeichnet den organisch gebundenen Kohlenstoff (im hier beschriebenen Fall angelagert am Feinstaub PM10). |
| Propan | ist das farb- und geruchlose Gas C_3H_8 . |
| Quarzfilter | werden wie Glasfaserfilter in High-Volume-Samplern eingesetzt. Diese Filter enthalten im Gegensatz zu Glasfaserfilter keinen Kohlenstoff, weshalb mit Quarzfiltern der Kohlenstoffanteil bestimmt werden kann. Durch den hohen Anschaffungspreis, werden die Quarzfilter jedoch nicht kontinuierlich verwendet. |
| Strömungsgeschwindigkeit | ist hier die Geschwindigkeit der Luft durch den Fahrraum |
| Swiss10 | ist die nach ASTRA [4] definierte Einteilung der Fahrzeuge in zehn Fahrzeugklassen (siehe Kap. 5.2) |
| TC | steht für Total Carbon und wird aus der Summe von EC und OC gebildet. Im hier beschriebenen Fall ist es der gesamte am PM10 angelagerte Kohlenstoff. |
| Thermographische Analyse VDI 2465 / Blatt 2 | dient zur Bestimmung des OC- und EC-Anteils; definiert elementaren Kohlenstoff als den Anteil des Gesamtkohlenstoffes, der nach der Vorbehandlung der Proben durch thermische Desorption gemessen wird. |
| TOT mit EUSAAR2-Protokoll | Thermo-Optische Analyse von EC und OC in Abhängigkeit der Messwerte vom verwendeten Temperatur-Protokoll |
| TVOC | steht für Total Volatile Organic Compounds. Dies beschreibt die Summe aller Kohlenwasserstoffverbindungen, welche leicht verdampfen oder bereits als Gas bei niederen Temperaturen vorliegen. |

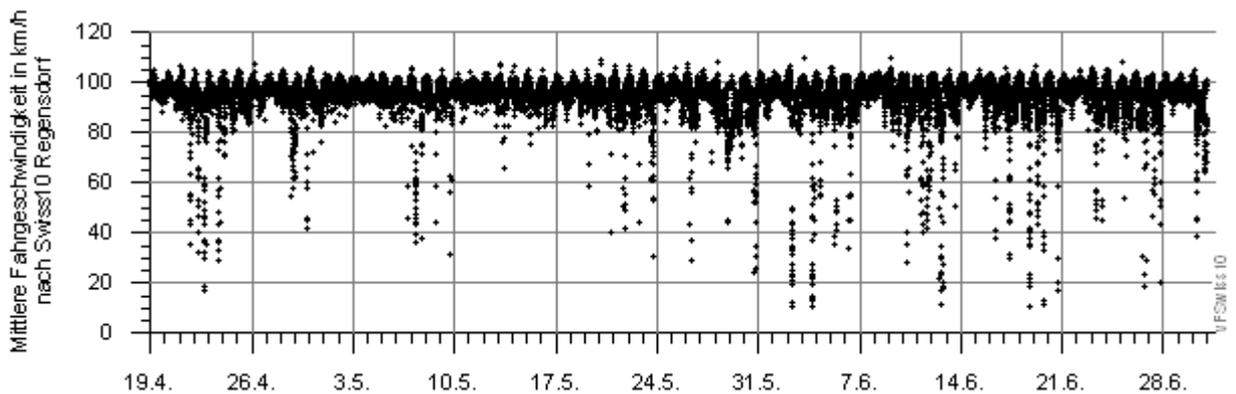
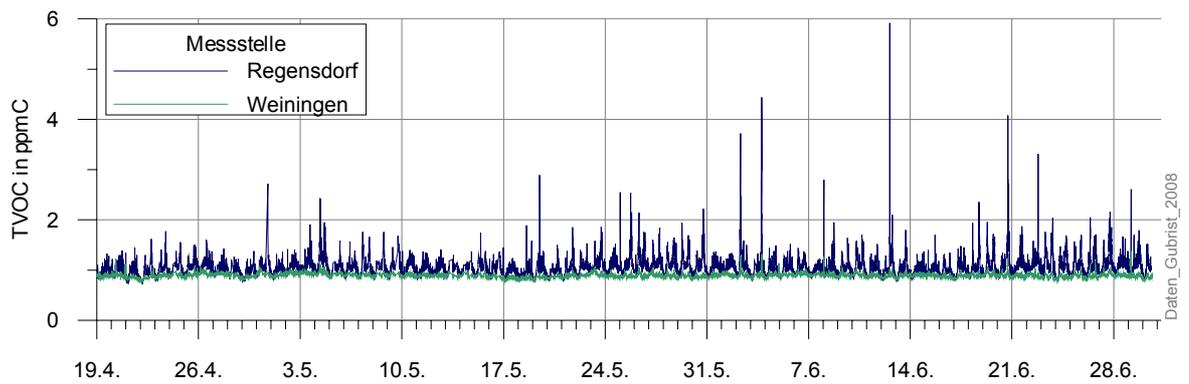
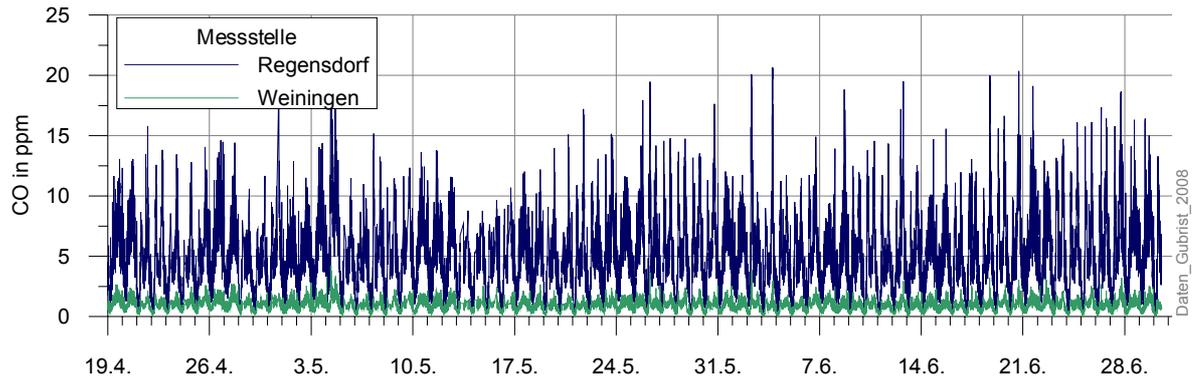
9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AWEL, Ostluft: 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] AWEL, Ostluft: Verkehrs- und Schadstoffmessungen im Gubristtunnel, Bericht US 89-16-12 von US + FZ Beratende Ingenieure, 23. März 2006
- [3] Eichzählungen Gubrist 2008
Bericht Planungsbüro Jud, 27. August 2008
- [4] Bundesamt für Strassen ASTRA: Automatische Fahrzeugklassierung, Gerätetests Reiden und Biasca, 2003
- [5] Bundesamt für Statistik: Superweb, Bestand der Strassenfahrzeuge in der Schweiz, Stand am 25. März 2010
- [6] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BAFU: Handbuch Emissionsfaktoren, Version 3.1, 30. Januar 2010
- [7] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BAFU: Schriftenreihe Umwelt Nr. 355, Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1980 - 2030, 2004
- [8] Weltstrassen-Verband (AIPCR), Strassentunnel-Komitee: Emissionen, Lüftung, Umwelt, 1995
- [9] Bundesamt für Strassen ASTRA: Richtlinie Lüftung der Strassentunnel, 2008

10. ANHANG: DARSTELLUNG VON ROHDATEN

Die folgenden Diagramme zeigen die vollständigen Datensätze während der gesamten Messperiode. Es sind im 5-Minuten-Intervall erfasste Daten für NO, NO₂, NO_x, CO, TVOC, jeweils beim Einfahrtsportal Weiningen und beim Ausfahrtsportal Regensdorf, sowie die Fahrgeschwindigkeit. Zur Ermittlung der Emissionsfaktoren wurden weitere Kriterien gemäss Kapitel 6.1 berücksichtigt – insbesondere bezüglich Fahrgeschwindigkeit –, was die Anzahl der ausgewerteten Sequenzen reduzierte.





In der Darstellung der mittleren Fahrgeschwindigkeit sind die Situationen mit gehemmtem Verkehrsfluss ersichtlich.