



## **Verkehrs- und Schadstoffmessungen 2005 im Gubristtunnel**

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

Auftragsnummer: US 89 - 16

Bericht: US 89 - 16 – 12

Bezug: Download oder E-Mail-Bestellung unter [www.ostluft.ch](http://www.ostluft.ch)  
oder  
OSTLUFT, Geschäftsleitung, Postfach, 8090 Zürich  
Tel. 043 259 30 18  
Fax. 043 259 51 78  
E-Mail: [bestellungen@ostluft.ch](mailto:bestellungen@ostluft.ch)

## Verkehrs- und Schadstoffmessungen 2005 im Gubristtunnel

Gubrist Messungen 2005.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

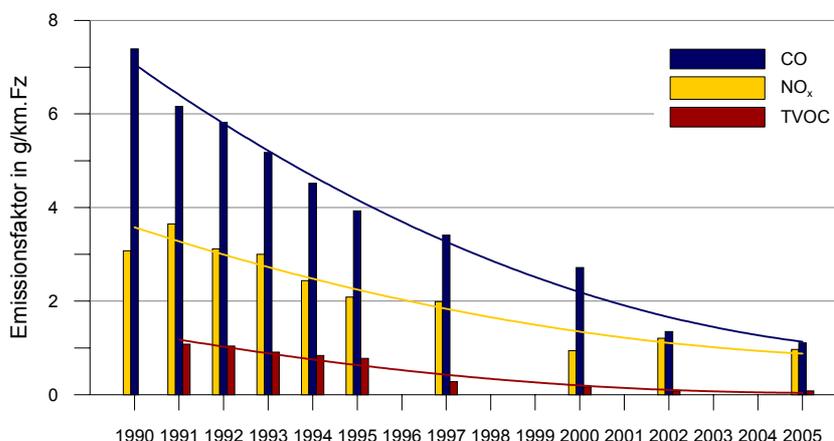
Seit 1988 werden vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) im Gubristtunnel regelmässig Messungen durchgeführt. Die Messkampagne 2005 wurde als Projekt in der Zusammenarbeit mit OSTLUFT ([www.ostluft.ch](http://www.ostluft.ch)) realisiert. Die Messungen dienen zur Bestimmung der realen Emissionsfaktoren der Motorfahrzeuge und zeigen deren zeitliche Entwicklung auf.

Die Messungen im Jahr 2005 erfolgten vom 20. April bis 31. Mai 2005 in der Südröhre (steigende Röhre, Fahrrichtung St. Gallen) bei den Portalen Weiningen und Regensdorf. Gemessen wurden die gasförmigen Schadstoffkonzentrationen von Stickstoffmonoxid NO, Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>, Stickoxiden NO<sub>x</sub>, Kohlenmonoxid CO, die flüchtigen organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen als TVOC sowie die Feinstaubkonzentration PM10 und die Sichttrübung ST. Die Auswertung erfolgte aus der Differenz der Messungen an den Standorten Regensdorf und Weiningen. Ergänzend zu den Schadstoffmessungen erfasste man die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel. Vom Gesamtverkehr wurden die mittlere Fahrgeschwindigkeit sowie die Fahrzeuganzahl, erstmals differenziert in die 10 Klassen nach Swiss10, aufgezeichnet.

In jedem Zeitschritt lässt sich mit diesen Daten der mittlere Emissionsfaktor der Fahrzeuge und, aus der Darstellung des Emissionsfaktors in Abhängigkeit des Anteils der langen Fahrzeuge, der Emissionsfaktor für kurze Fahrzeuge (Summe von PW, LI und MR) und langen Fahrzeuge (Summe von LW, LZ, SZ, R Bus) ableiten.

Während die Bestimmung des mittleren Emissionsfaktors der Motorfahrzeuge sehr zuverlässig möglich ist, ist die Zuordnung der Emissionsfaktoren für kurze Fahrzeuge und für lange Fahrzeuge mit grösseren Unsicherheiten verbunden. 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.

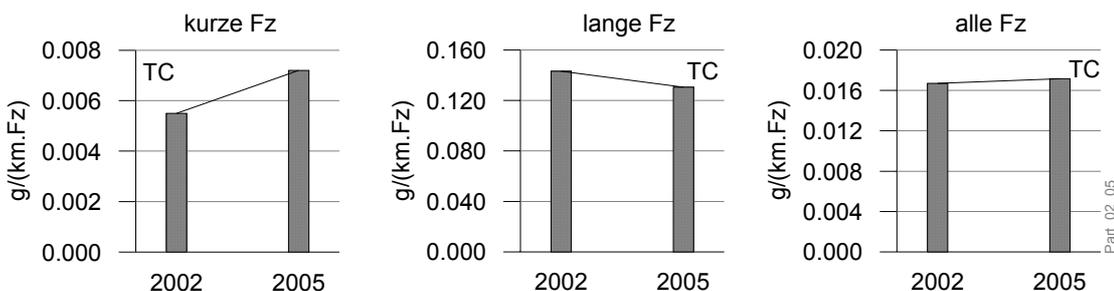
Es zeigt sich, dass die NO<sub>x</sub>-, CO- und TVOC-Emissionsfaktoren der Motorfahrzeuge seit Beginn der Messungen deutlich zurückgegangen sind. Besonders markant ist der Rückgang bei den Personenwagen als Folge der Katalysatorerntechnik.



**Figur 1:** *Entwicklung der Emissionsfaktoren pro Fahrzeug seit 1990 für NO<sub>x</sub>, CO und TVOC in der Südröhre des Gubristtunnels in Fahrrichtung St.Gallen, mit einer Steigung von 1.3 %*

Der Fahrzeugbestand im Kanton Zürich entspricht 16 % des gesamtschweizerischen Bestandes. Von den am 30. September 2004 in der Schweiz immatrikulierten Personenwagen waren 8.4 % (Kanton Zürich 7.7 %) mit Dieselmotoren ausgerüstet, bei den Lieferwagen waren es 51.5 % (Kanton Zürich 51.9 %). Diese Werte haben in den letzten Jahren stark zugenommen und beim Verkauf von Neuwagen (Personenwagen und Lieferwagen) besteht weiterhin ein starker Trend zu Fahrzeugen mit Dieselmotor, derzeit noch oft ohne Partikelfilter.

Die Ergebnisse der Messung der partikelförmigen Stoffe, die seit dem Jahr 2002 durchgeführt wird, zeigen diese Entwicklung bei den kurzen Fahrzeugen deutlich.



**Figur 2:** Vergleich der Messungen der Russ-Emission TC von 2002 und 2005 im Gubristtunnel, links: kurze Fahrzeuge, Mitte: lange Fahrzeuge, rechts: Mittelwert aller Fahrzeuge

Für die Kategorien kurze Fahrzeuge (Personenwagen mit Lieferwagen) und lange Fahrzeuge (schwere Nutzfahrzeuge SNF nach HBEFA) ergibt der Vergleich der Ergebnisse aus den Messungen 2005 im Gubristtunnel mit den Angaben im BUWAL-Handbuch für Autobahn mit 100 km/h und 1.3 % Steigung folgendes:

- Bei den NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren ergeben die Messungen für die kurzen Fahrzeuge rund 40 bis 50 % tiefere Werte als nach den Angaben des BUWAL. Für die langen Fahrzeuge sind die Resultate der Messungen im Gubristtunnel etwa 10 % höher als die Angaben des BUWAL.
- Die Messwerte der CO-Emissionsfaktoren liegen für kurze Fahrzeuge um einen Faktor 3 und für lange Fahrzeuge um mindestens einen Faktor 3 unter den Angaben im BUWAL-Handbuch.
- Bei den TVOC-Emissionsfaktoren liegen die Messergebnisse im Gubristtunnel für die kurzen Fahrzeuge rund 20 % über den Angaben des BUWAL. Bei den langen Fahrzeugen sind die Angaben des BUWAL um mehrere Faktoren über den im Gubristtunnel gemessenen Werten.
- Die Werte der PM10-Emissionsfaktoren für die kurzen Fahrzeuge sind gemäss den Messungen im Gubristtunnel um 15 % tiefer, die Werte der langen Fahrzeuge um 8 % höher als die Angaben im BUWAL-Handbuch. Es liegen allerdings nur wenige Messwerte mit grossem Anteil langer Fahrzeuge vor, und der Streubereich dieser Ergebnisse ist gross. Bei diesem Vergleich sind die im BUWAL-Bericht 355 angeführten Werte für die PM10-Fraktion von Abrieb und Aufwirbelung nicht eingerechnet. Die 5 Messwerte mit sehr geringem Anteil an langen Fahrzeugen weisen darauf hin, dass mit dem Emissionswerten nach dem BUWAL-Handbuch, welche ausschliesslich die motorischen Partikel umfassen, die Gesamtkohlenstoff-Emission TC der kurzen Fahrzeuge

---

bei der Verkehrssituation im Gubristunnel um den Faktor 2 überschätzt werden. Der gemessene TC-Emissionsfaktor für die langen Fahrzeuge liegt bei 70 % des entsprechenden Wertes im BUWAL-Handbuch.

- Die Sichttrübungswerte sind vor allem für die Auslegung und den Betrieb der Tunnellüftung von Interesse. Die im Gubristunnel gemessenen Sichttrübungs-Emissionsfaktoren sind für die kurzen Fahrzeuge 50 % tiefer und für lange Fahrzeuge 55 % tiefer als die heute gültigen Dimensionierungswerte in der ASTRA-Richtlinie.
- Die PM10-Werte, die TC-Werte und die Sichttrübungswerte zeigen übereinstimmend eine Zunahme bei den kurzen Fahrzeugen, was den klaren Trend zu Personen- und Lieferwagen mit Dieselmotoren ohne Partikelfilter belegt.

Alle Angaben beziehen sich auf die Situation im Gubristunnel, welche im Sinne der BUWAL-Unterlagen als Autobahn-Regelsituation mit Tempo 100 (AB\_100) zu betrachten ist.

---

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Zusammenfassung</b>	<b>I</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Tunneldaten</b>	<b>2</b>
<b>3. Tunnellüftungssystem</b>	<b>3</b>
<b>4. Lage der Messgeräte im Tunnel</b>	<b>3</b>
<b>5. Verkehrszählungen</b>	<b>6</b>
<b>5.1 Automatische Verkehrsdatenerfassung</b>	<b>6</b>
<b>5.2 Eichzählungen</b>	<b>6</b>
<b>5.3 Angaben zum Verkehr während der Messung</b>	<b>8</b>
<b>6. Ergebnisse der Messungen</b>	<b>10</b>
<b>6.1 Allgemeines Prinzip von Messung und Auswertung</b>	<b>10</b>
<b>6.2 NO<sub>x</sub>-, CO- und TVOC-Messungen</b>	<b>10</b>
<b>6.3 Feinstaub PM10- und Gesamtkohlenstoff TC-Messungen (HiVol)</b>	<b>13</b>
<b>6.4 Messungen der Sichttrübung ST</b>	<b>16</b>
<b>7. Beurteilung</b>	<b>19</b>
<b>7.1 Vergleich mit früheren Messkampagnen</b>	<b>19</b>
<b>7.2 Vergleich mit den Unterlagen des BUWAL</b>	<b>23</b>
<b>8. Literaturverzeichnis</b>	<b>26</b>
<b>9. ANHANG</b>	<b>27</b>
<b>9.1 Detailangaben zur Auswertung der NO<sub>x</sub>-, CO- und TVOC-Messungen</b>	<b>27</b>
<b>9.2 Detailangaben zur Auswertung der Sichttrübungsmessung</b>	<b>29</b>

## 1. EINLEITUNG

Seit 1988 werden vom Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) im Gubristtunnel regelmässig Messungen durchgeführt, die zur Bestimmung der realen Emissionsfaktoren der Motorfahrzeuge dienen und deren zeitliche Entwicklung aufzeigen.

Die Messungen im Jahr 2005 erfolgten vom 20. April bis 31. Mai 2005 in der Südröhre (steigende Röhre, Fahrrichtung St. Gallen). Gemessen wurden die gasförmigen Schadstoffkonzentrationen von Stickstoffmonoxid NO, Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>, Stickoxiden NO<sub>x</sub>, Kohlenmonoxid CO, die flüchtigen organischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen als TVOC, die Feinstaubkonzentration PM10 und die Sichttrübung. Ergänzend zu den Schadstoffmessungen erfasste man die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel. Vom Gesamtverkehr wurden die mittlere Fahrgeschwindigkeit sowie die Fahrzeuganzahl, differenziert in den 10 Klassen gemäss Swiss10, aufgezeichnet.



**Figur 1.1** *HiVol-Sampler und Ansaugfilter für NO<sub>x</sub>, CO und TVOC  
10 m vor dem Ausfahrtsportal Regensdorf*

Der vorliegende Bericht enthält neben der detaillierten Analyse der Messungen 2005 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 der Messungen aus dem Jahr 2002 [1] angeführt.



### **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 das Abluftkamin zu leiten.

Bei flüssigem Richtungsverkehr ist aus Lüftungstechnischer Sicht nur in Ausnahmefällen ein Betrieb der Tunnelventilation erforderlich, da durch die Kolbenwirkung der durchfahrenden Fahrzeuge meist eine genügend starke Längsströmung verursacht wird. Die Inbetriebnahme der Tunnelventilation erfolgt automatisch aufgrund kontinuierlicher Messungen der Sichttrübung im Tunnel. Die ebenfalls installierte Überwachung der CO-Konzentration im Tunnel ist heute für die Lüftungssteuerung nicht mehr relevant.

Während der Schadstoffmessungen des AWEL war die grosse Deckenöffnung 97 m vor dem Ausfahrtsportal Regensdorf durchgehend geöffnet. Ohne Betrieb der Tunnellüftung waren die Abschlussklappen bei den Abluftventilatoren jedoch geschlossen, so dass keine Rückströmung über den Abluftkamin möglich war.

Im vorliegenden Messbericht sind nur die Daten aufgeführt, die in Zeiten ohne Betrieb der Tunnellüftungsanlage erhoben wurden.

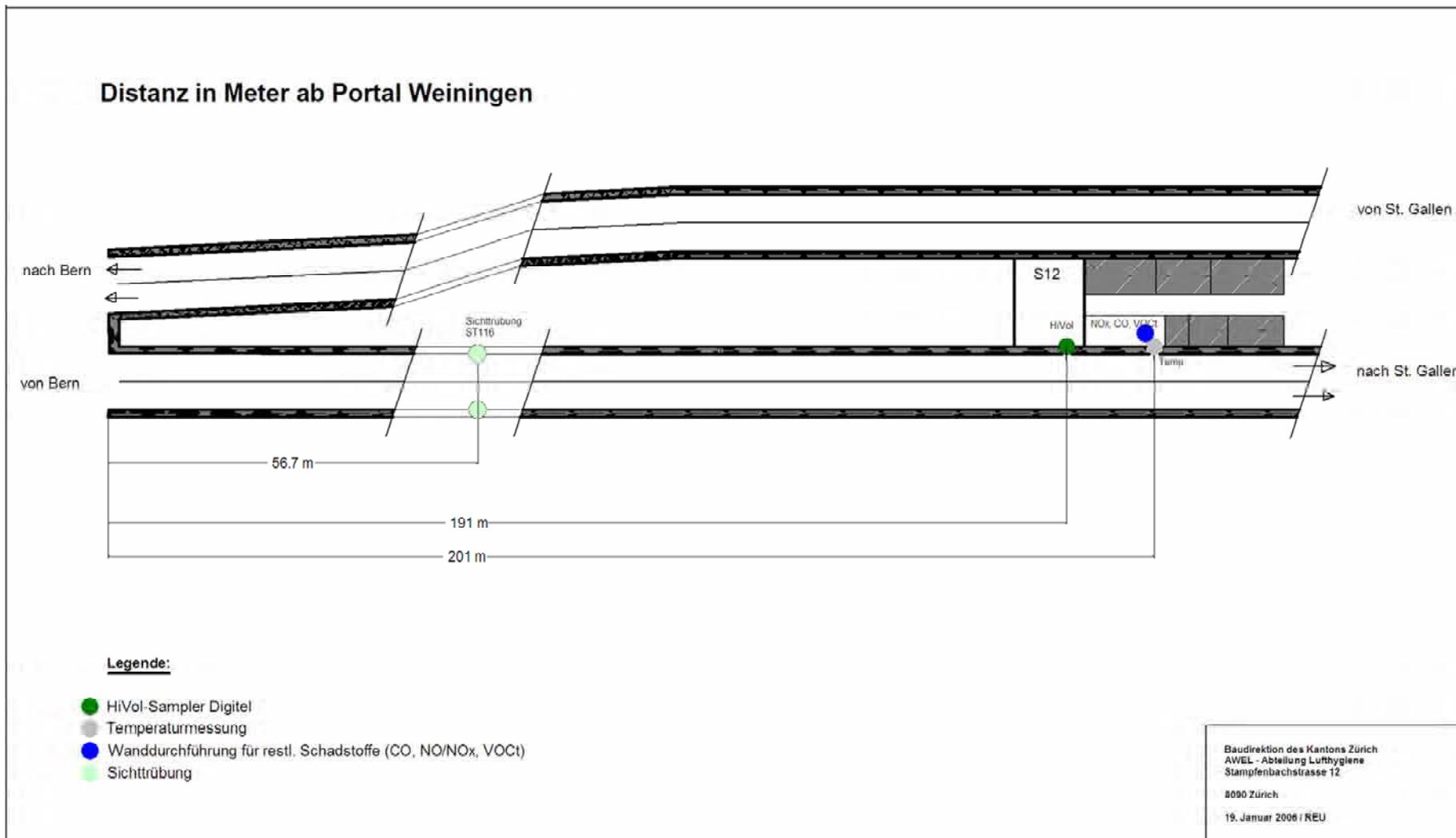
### **4. LAGE DER MESSGERÄTE IM TUNNEL**

Die Messungen 2005 erfolgten ausschliesslich in der Südröhre. Seit 1997 werden die Emissionen im Tunnel als Differenzmessung zwischen Einfahrtsportal und Ausfahrtsportal ermittelt.

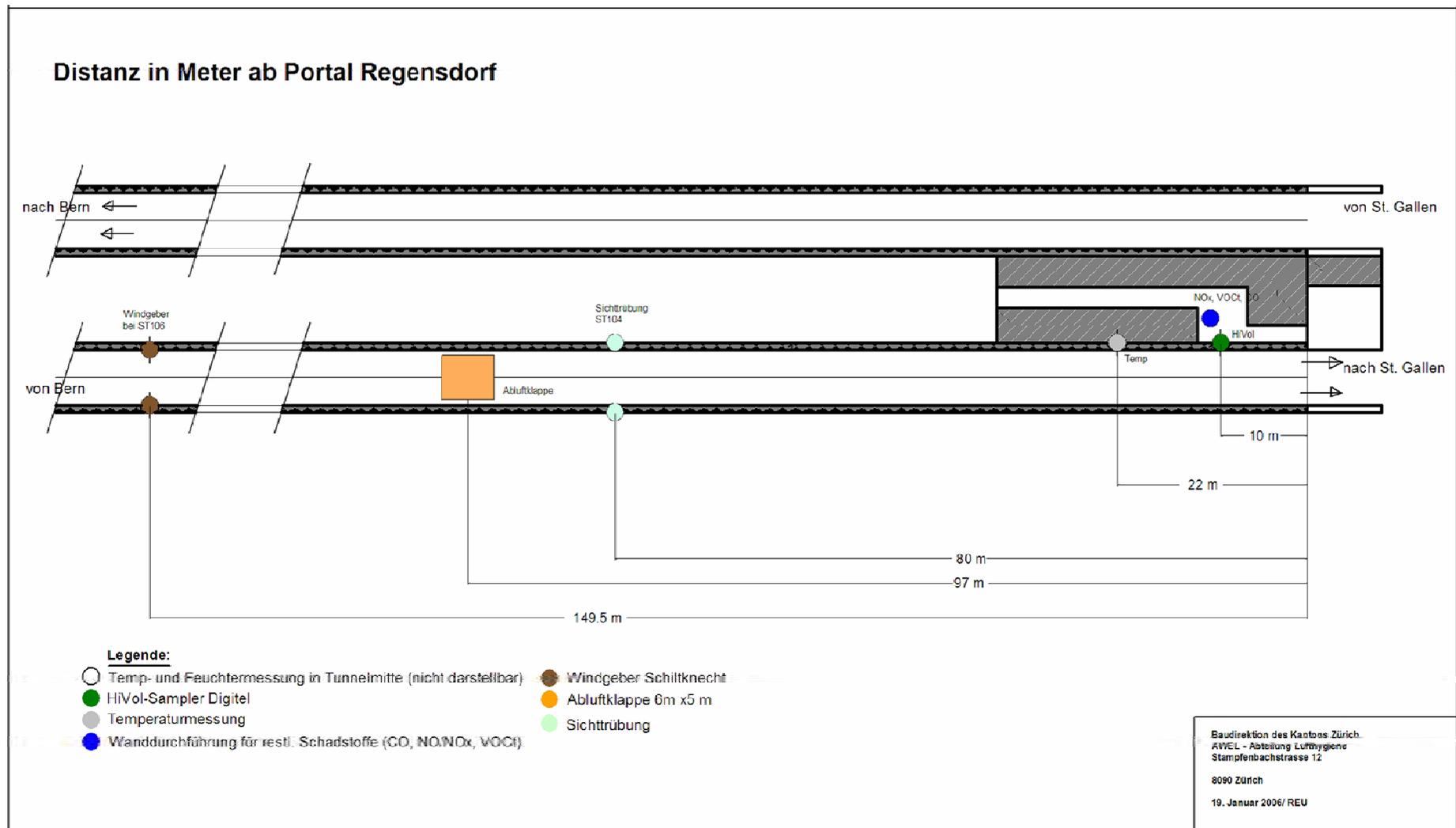
Die Distanzen zwischen den Messorten am Einfahrts- und Ausfahrtsportal waren:

für NO <sub>x</sub> , CO und TVOC	3'057 m
für PM10 bzw. HiVol	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 Gubristunnels

## 5. VERKEHRSZÄHLUNGEN

### 5.1 Automatische Verkehrsdatenerfassung

Im Bereich des Gubristtunnels befinden sich zur Erfassung der Verkehrsdaten verschiedene Messstellen, welche von der Kantonspolizei betrieben und ausgewertet werden. Bei den früheren Messkampagnen wurden diese Rohdaten verwendet. Da sich verschiedene Probleme mit diesen Zählungen ergeben hatten, wurde vom AWEL für die Messkampagne 2002 eine eigene Verkehrszählung ca. 150 m ausserhalb des Portals Regensdorf (unter der Brücke Affolternstrasse) eingerichtet. Die Daten dieser Zählstelle wurden auch für die Messung 2005 verwendet.



**Figur 5.1** Zählstelle bei der Brücke Affolternstrasse  
(links im Bild eine NO<sub>2</sub>-Passivsammler-Messung)

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 2005, wie schon früher mehrmals, Eichzählungen zur Überprüfung der 1 h-Werte der automatischen Registrierungen vorgenommen worden. Sowohl für die Einteilung in die 3 Längenklassen wie auch in aggregierte Klassen nach Swiss10 wurden Eichfaktoren ermittelt [2]. Die Erhebungen erfolgten auf der Basis von Videoaufzeichnungen beim

Portal Regensdorf von der Brücke Affolternstrasse aus. Erfasst wurde der Querschnitt der Fahrrichtung St. Gallen zu folgenden Zeiten:

Donnerstag, 29. Juli 2004, 05.00 bis 13.00 Uhr

Sonntag, 8. August 2004, 08.00 bis 16.00 Uhr

Bei der Videoerhebung wurden die Motorfahrzeuge nach den folgenden Fahrzeugkategorien 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)

Die automatische Verkehrsanalyse unterscheidet im traditionellen Verfahren 3 Längenklassen. Seit Juli 2004 steht auch das automatische Analyseverfahren nach Swiss10 zur Verfügung. Für die Auswertung der Schadstoffmessungen wurde die Auswertung nach Swiss10 mit den entsprechenden Eichfaktoren verwendet.

Aus den Eichzählungen ergaben sich für die 3 Längenklassen die folgenden Eichfaktoren:

Typ	Längenkategorie	Hauptkategorie	Mo – Sa	So
PW + LI + MR	< 6 m	PW	1.013	0.988
PW/LI Anh + LW	6 - 12.5 m	LW (SNF)	0.8768	0.933
LZ/SZ	>12.5 m		0.9006	1.0 (Sonntagsfahrverbot)

**Tabelle 5.1 Eichfaktoren aus den Eichzählungen für die 3 Längenklassen**

Für die aggregierten Klassen nach Swiss10 ergaben sich die Eichfaktoren:

Typ	Bezeichnung	Mo – Sa	So
PW / LI / MR / PW ANH / LI ANH / LI AUFL	kurze Fz	0.9969	0.9963
LW / BUS / LZ / SZ	lange Fz	1.0086	0.933

**Tabelle 5.2 Eichfaktoren aus den Eichzählungen für die aggregierten Klassen nach Swiss10**

Es sei hier erwähnt, dass auch nach der Zählmethode Swiss10 erhebliche Unsicherheiten bestehen, namentlich bei der Zuordnung von Personenwagen mit Anhängern und Lieferwagen mit Anhängern oder Aufliegern (für weiterführende Literatur siehe ASTRA [3]).

### 5.3 Angaben zum Verkehr während der Messung

Im Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA Version 2.1) stehen die Emissionsfaktoren für die folgenden Fahrzeugkategorien zur Verfügung:

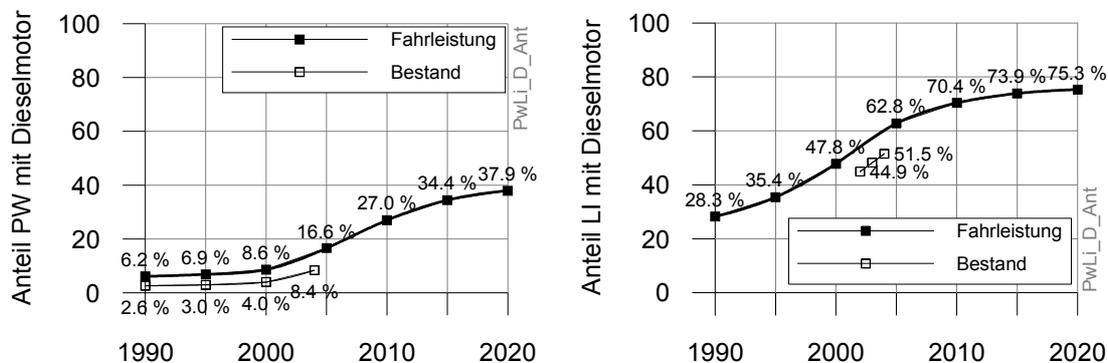
- PW: Personenwagen  
 LNF: Lieferwagen (< 3.5 t), leichtes Nutzfahrzeug  
 SNF: Schwere Nutzfahrzeuge (LW + LZ + SZ)  
     - LW: Lastwagen  
     - LZ: Lastzug, Anhängerzug  
     - SZ: Sattelzug  
 R Bus: Reisebus  
 L Bus: Linienbus (= ÖV-Bus)  
 MR: Motorrad

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 auswertbaren Messungen sind gemäss der folgenden Tabelle zusammengesetzt.

Hauptkategorie	Swiss10	Anteile				HBEFA
		Mo-So	Mo-Fr	Sa	So	
Anzahl Tage		47	33	7	7	
Gesamt Fz		2'164'365	1'583'950	303'217	277'198	
Kurze Fahrzeuge	PW	85.2 %	82.5 %	91.8 %	93.8 %	PW
	PW ANH	0.9 %	0.9 %	0.9 %	0.7 %	PW
	LI	6.1 %	7.1 %	4.0 %	2.8 %	LNF
	LI ANH	0.1 %	0.2 %	0.1 %	0.0 %	LNF
	LI AUFL	0.4 %	0.5 %	0.1 %	0.0 %	LNF
	MR	1.5 %	1.4 %	1.7 %	2.0 %	MR
Lange Fahrzeuge	LW	2.5 %	3.3 %	0.6 %	0.2 %	SNF
	LZ	1.4 %	1.8 %	0.2 %	0.0 %	SNF
	SZ	1.7 %	2.3 %	0.4 %	0.1 %	SNF
	BUS	0.2 %	0.2 %	0.2 %	0.3 %	R Bus

**Tabelle 5.3** Anteile der Motorfahrzeugkategorien in der Messperiode vom 15. April 2005 bis am 31. Mai 2005

Die im HBEFA enthaltene Entwicklung der Fahrleistung der PW und der Lieferwagen mit Dieselmotor ist nachfolgend dargestellt. Die Bestandsanteile der PW und der Lieferwagen mit Dieselmotor stammen aus dem Bericht des Bundesamtes für Statistik [4].



**Figur 5.2 Bestand nach BfS [4] und Fahrleistungen nach BUWAL [5] der Personenwagen und der Lieferwagen mit Dieselmotor**

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

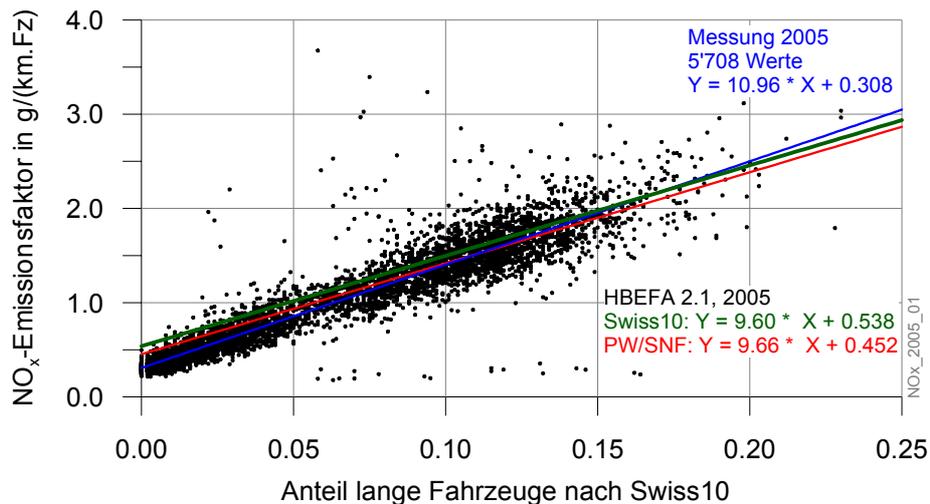
- Mechanische Tunnelventilation vollständig ausser Betrieb (Abschlussklappen der Ventilatoren geschlossen), natürliche Längslüftung durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge. Zeiten mit Ventilationsbetrieb werden in der Auswertung nicht berücksichtigt.
- Messung der Tunnelluftkonzentrationen kurz nach dem Einfahrtsportal und vor dem Ausfahrtsportal der Südröhre (Differenzmessung). Die Tunnelluft enthält alle im Tunnel angefallenen Abgasemissionen.
- Berechnung des Luftvolumenstroms aus der Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel.
- Bestimmung der massgebenden Verkehrsdaten, dabei wird die Zeitverzögerung durch die ausserhalb des Tunnels liegende Verkehrszählstelle 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 (siehe das Ort-Zeit-Diagramm im Anhang Seite 28).
- 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 BUWAL (HBEFA Version 2.1). Für die Kalibrierung der Kohlenwasserstoffmessgeräte im Gubristtunnel wurde Propan verwendet, in der Auswertung wurde deshalb äquivalent die Normdichte für Propan berücksichtigt. Die TVOC\*-Emissionsfaktoren des BUWAL sind entsprechend der Zusammensetzung des Treibstoffes als C<sub>1</sub>H<sub>1.85</sub>-Äquivalent definiert. Für die in diesem Bericht ausgewerteten Schadstoffe wurden folgende Normdichten ( $\rho$  bei 0°C/1013.25 hPa) verwendet:

$\rho_{\text{CO}}$	1.249 kg/m <sup>3</sup>	
$\rho_{\text{NO}_x}$	2.052 kg/m <sup>3</sup>	(NO <sub>2</sub> -Äquivalent)
$\rho_{\text{TVOC}}$	1.860 kg/m <sup>3</sup>	(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> -Äquivalent)
$\rho_{\text{TVOC}^*}$	0.619 kg/m <sup>3</sup>	(C <sub>1</sub> H <sub>1.85</sub> -Äquivalent)

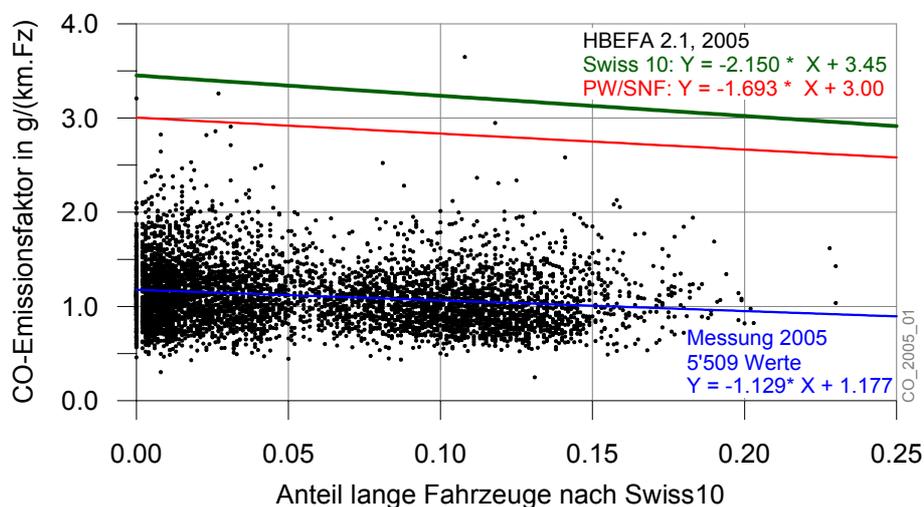
Details zum Vorgehen bei der Auswertung sind in Kapitel 9 angeführt.

### 6.2 NO<sub>x</sub>-, CO- und TVOC-Messungen

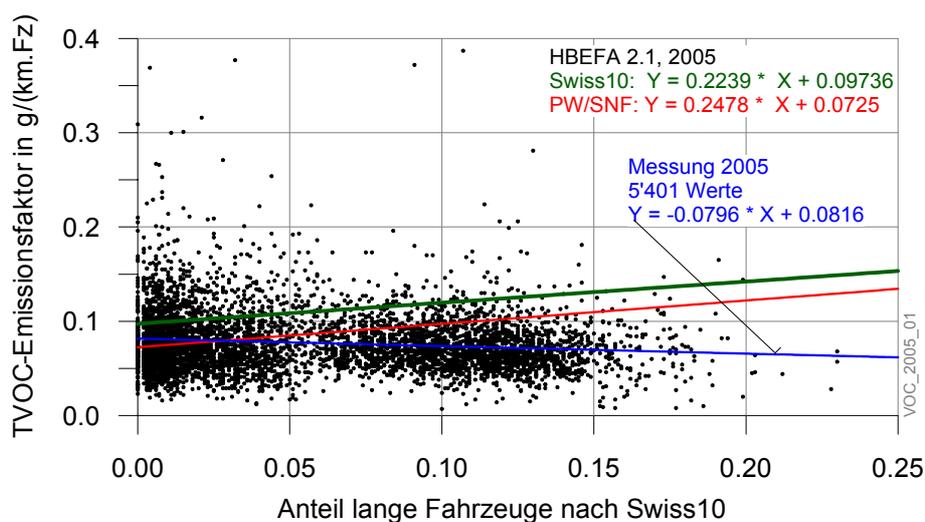
Die Emissionsfaktoren in Abhängigkeit vom Anteil der langen Fahrzeuge gemäss SWISS10 sind in den Figuren 6.1 bis 6.3 dargestellt. HBEFA bezeichnet die Angaben gemäss dem BUWAL Handbuch Emissionsfaktoren Version 2.1 [5] einerseits für die aggregierten Klassen nach Swiss10 (siehe Tab. 5.3) und andererseits wie bei den früheren Auswertungen für die Kategorien PW und SNF. Mit der erstmals differenzierten Erfassung der Fahrzeugkategorien, sind die mit Swiss10 bezeichneten Kurven für den Vergleich massgebend. Die Kurven aufgrund der Werte für PW und SNF sind als Bezug zu den Ergebnissen bis zu den Messungen 2002 zu verstehen.



**Figur 6.1** NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor



**Figur 6.2** CO-Emissionsfaktor



**Figur 6.3** TVOC-Emissionsfaktor

<b>NO<sub>x</sub></b> ( $\rho = 2.052 \text{ kg/m}^3$ )	
Auswertezeitraum der gültigen Sequenzen	20.4.2005 15:30 bis 31.5.2005 21:40
Anzahl gültiger 5 Minuten-Sequenzen	5'708
Anzahl Fahrzeuge in gültigen Sequenzen	
gesamt	1'213'837
kurze Fahrzeuge nach Swiss10	1'138'107
lange Fahrzeuge nach Swiss10	75'730 (= 6.24 %)
Mittlere Fahrgeschwindigkeit (Standardabw.)	95.0 km/h (3.8 km/h)
Mittlere Geschwindigkeit der Luft (Standardabw.)	7.0 m/s (1.09 m/s)
Mittlerer NO <sub>x</sub> -Emissionsfaktor	0.982 g/(km.Fz)

<b>CO</b> ( $\rho = 1.249 \text{ kg/m}^3$ )	
Auswertezeitraum der gültigen Sequenzen	20.4.2005 15:30 bis 31.5.2005 21:40
Anzahl gültiger 5 Minuten-Sequenzen	5'509
Anzahl Fahrzeuge in gültigen Sequenzen	
gesamt	1'167'150
kurze Fahrzeuge nach Swiss10	1'096'071
lange Fahrzeuge nach Swiss10	71'079 (= 6.09 %)
Mittlere Fahrgeschwindigkeit (Standardabw.)	95.0 km/h (3.8 km/h)
Mittlere Geschwindigkeit der Luft (Standardabw.)	7.0 m/s (1.09 m/s)
Mittlerer CO-Emissionsfaktor	1.12 g/(km.Fz)

<b>TVOC</b> ( $\rho = 1.860 \text{ kg/m}^3$ )	
Auswertezeitraum der gültigen Sequenzen	20.4.2005 15:30 bis 31.5.2005 21:40
Anzahl gültiger 5 Minuten-Sequenzen	5'401
Anzahl Fahrzeuge in gültigen Sequenzen	
gesamt	1'143'306
kurze Fahrzeuge nach Swiss10	1'074'244
lange Fahrzeuge nach Swiss10	69'062 (= 6.04 %)
Mittlere Fahrgeschwindigkeit (Standardabw.)	95.1 km/h (3.8 km/h)
Mittlere Geschwindigkeit der Luft (Standardabw.)	7.0 m/s (1.09 m/s)
Mittlerer TVOC-Emissionsfaktor	0.0772 g/(km.Fz)

Der differenzierte Einbezug der Lieferwagen in die Auswertung, ihr Anteil betrug im Mittel 6.6 %, ergibt für CO (Figur 6.2) und TVOC (Figur 6.3) deutliche Unterschiede für die Vergleichswerte gemäss Handbuch.

## 6.3 Feinstaub PM10- und Gesamtkohlenstoff TC-Messungen (HiVol)

### 6.3.1 Einleitung

Die PM10-Messungen wurden an 7 Tagen während 24 Stunden durchgeführt. Sowohl die Filter nach dem Einfahrtsportal Weiningen wie auch jene am Ausfahrtsportal Regensdorf wurden 3 Stunden exponiert. Aus den Messergebnissen von zwei weiteren Tagen, einem Sonntag und einem Dienstag, wurde der Gesamtkohlenstoffanteil TC (Summe aus elementarem und organischem Kohlenstoff EC+OC) analysiert. Bei diesen Messungen waren die Filter von 3 Uhr bis 13 Uhr während jeweils 2 Stunden exponiert. 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 Luft im Fahrraum, wie dies bei den Messungen der übrigen Komponenten gemacht wurde (siehe Kapitel 9), ist deshalb nicht zulässig.

### 6.3.2 Auswertung der Messdaten

Die Auswertung der PM10-Messungen erfolgte für 3 Stunden Mittelwerte, jene für TC für 2 Stunden-Mittelwerte. Die Aufbereitung der Daten für den Verkehr und die Luftströmung durch die Tunnelröhre wurde manuell durchgeführt. Fehlende Daten für die Luftströmung durch den Tunnelfahrraum wurden anhand eines strömungstechnischen Ansatzes aus der Anzahl kurzer und der Anzahl langer Fahrzeuge abgeschätzt und ergänzt.

- Skalieren der Verkehrsdaten nach den Angaben in Tabelle 5.2
- Bestimmen des Anteils der langen Fahrzeuge (als Schwerverkehrsanteil betrachtet)
- Berechnen des mittleren Emissionsfaktors

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

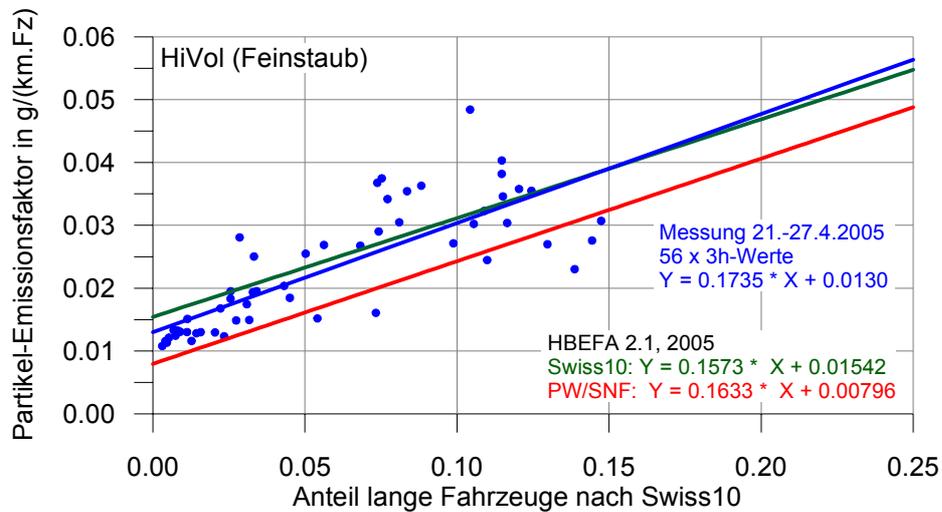
$V_L$	Mittlerer Volumenstrom in $\text{m}^3/\text{s}$ durch den Fahrraum über die Mittelungszeit
$\Delta t$	Mittelungszeit in s (für PM10: 3 Stunden, für TC: 2 Stunden)
$c_{\text{Regensdorf}}$	Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vor dem Ausfahrtsportal
$c_{\text{Weiningen}}$	Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nach dem Einfahrtsportal
$n_{\text{Fz}}$	Anzahl Fahrzeuge über Mittelungszeit
$L_{\text{Mess}}$	Abstand der Messorte Weiningen und Regensdorf in m (3'067 m)

### 6.3.3 Ergebnisse

#### 6.3.3.1 Feinstaub PM10

Die PM10-Emissionsfaktoren in Abhängigkeit vom Anteil der langen Fahrzeuge sind in der Figur 6.4 dargestellt. HBEFA bezeichnet die Angaben für Partikel gemäss dem BUWAL Handbuch Emissionsfaktoren Version 2.1 [5] (AB\_100 bei 1.3 % Steigung; Werte für PW mit Option Klimaanlage und Partikelfilter). Es sind sowohl die Kurven

für die Emissionsfaktoren PW und SNF (rot) wie für die aggregierten Klassen nach Swiss10 (grün) dargestellt.



**Figur 6.4** *PM10-Emissionsfaktoren und Vergleich mit den Werten für Partikel aus dem Handbuch Emissionsfaktoren*

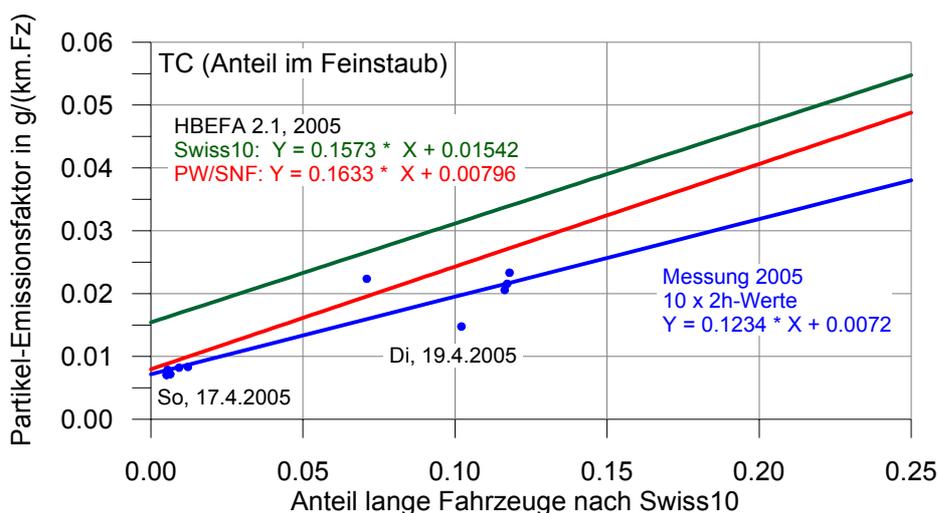
Die im Bericht BUWAL 355 [6] in Annex A4.2 angeführten PM10-Werte für Abrieb und Aufwirbelung auf Autobahnen von 0.047 g/(km.Fz) für PW und 0.074 g/(km.Fz) für SNF sind hier nicht berücksichtigt.

Feinstaub PM10	
Auswertezeitraum	Do, 21.4.2005 bis Mi, 27.4.2005
Anzahl gültige Messungen	56 (3 h-Mittelwerte von 7 Tagen)
Mittlerer PM10-Emissionsfaktor	0.0253 g/(km.Fz)

Messtag	Anzahl Fz Fz/24 h	Anteil lange Fz %	V <sub>F,mittel</sub> km/h	V <sub>L,mittel</sub> m/s	EFA-PM10 g/(km.Fz)
Do 21.04.2005	50'889	7.81	95	6.18	0.0232
Fr 22.04.2005	51'066	7.56	89	5.83	0.0251
Sa 23.04.2005	43'637	1.36	97	5.33	0.0121
So 24.04.2005	38'010	0.59	98	4.96	0.0116
Mo 25.04.2005	46'447	8.16	93	5.66	0.0237
Di 26.04.2005	47'343	8.39	93	6.02	0.0261
Mi 27.04.2005	44'960	7.85	84	5.52	0.0308
Gesamt	322'352	6.19			0.0253

### 6.3.3.2 Gesamtkohlenstoff TC (Summe von EC und OC)

Die Emissionsfaktoren in Abhängigkeit vom Anteil der langen Fahrzeuge sind in der Figur 6.5 aufgezeichnet. Zum Vergleich bezeichnet HBEFA die Angaben für Partikel gemäss dem BUWAL Handbuch Emissionsfaktoren Version 2.1 [5] (AB\_100 bei 1.3 % Steigung; PW mit Option Klimaanlage und Partikelfilter). Es sind sowohl die Kurve für die Emissionsfaktoren PW und SNF (rot) wie auch jene gemäss Swiss10 (grün) dargestellt.



**Figur 6.5 TC-Emissionsfaktoren (Gesamtkohlenstoffanteil im Feinstaub) und Vergleich mit den Werten für Partikel aus dem Handbuch Emissionsfaktoren**

TC	
Auswertezeitraum	So, 17.4.2005 und Di, 19.4.2005
Anzahl gültige Messungen	10 (2 h-Mittelwerte von 2 Tagen)
Mittlerer TC-Emissionsfaktor	0.0172 g/(km.Fz)

Im Mittel beträgt der TC-Anteil an den PM10-Emissionsfaktoren rund 68 %. Bei den kurzen Fahrzeugen sind es 55 %, bei den langen Fahrzeugen 70 %.

Messzeit	Anzahl Fz Fz/24 h	Anteil lange Fz %	V <sub>F, mittel</sub> km/h	V <sub>L, mittel</sub> m/s	EFA-TC g/(km.Fz)
<b>So 17.04.2005</b>	<b>11'108</b>	<b>0.6</b>			
03:01 - 05:00	661	0.6	95	1.73	0.006716
05:01 - 07:00	970	1.1	97	2.59	0.00832
07:01 - 09:00	1'814	0.9	100	3.70	0.00821
09:01 - 11:00	3'443	0.5	99	4.82	0.00787
11:01 - 13:00	4'259	0.5	99	5.20	0.00703
<b>Di 19.04.2005</b>	<b>20'363</b>	<b>10.3</b>			
03:01 - 05:00	342	10.3	97	1.51	0.01476
05:01 - 07:00	4'191	11.9	94	6.16	0.02332
07:01 - 09:00	7'021	7.2	90	6.72	0.02235
09:01 - 11:00	4'606	11.8	93	6.33	0.02156
11:01 - 13:00	4'203	11.8	95	6.16	0.02057

## 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 Feinststaubteilchen). 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 [7] folgendes angeführt: Ein Lichtstrahl durchtrübe 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
- I<sub>0</sub> Lichtintensität an der Quelle
- K Extinktionskoeffizient in m<sup>-1</sup>
- L Lauflänge in m

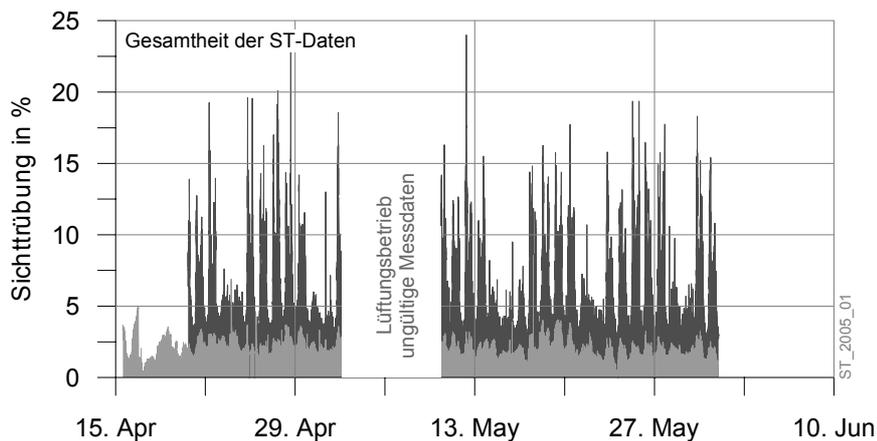
Bei der Tunnellüftung hat sich der Extinktionskoeffizient  $K$  als Mass für die Sichttrübung eingebürgert. Die entsprechende Richtlinie des Bundesamtes für Strassen [8] gibt für die Auslegung der Fahrraumlüftung bei Normalbetrieb einen Wert  $K_{lim} = 0.005 \text{ m}^{-1}$  oder  $5 \text{ mE/m}$  (Milli-Extinktion pro Meter) vor. Bei einer Sichttrübung von  $12 \text{ mE/m}$  muss der Tunnel für den Verkehr geschlossen werden. Die heute in den Tunneln eingebauten Geräte geben die Sichttrübung in % an. 100 % entsprechen im Gubristunnel  $15 \text{ mE/m}$ .

Für die Auslegung der Fahrraumlüftungen wird die Sichttrübungs-Emission ( $E_{ST}$ ) in  $\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{Fz})$  angegeben. Der erforderliche Frischluftbedarf (FLB) für die Einhaltung des Dimensionierungswertes ( $K_{lim}$ ) ist:

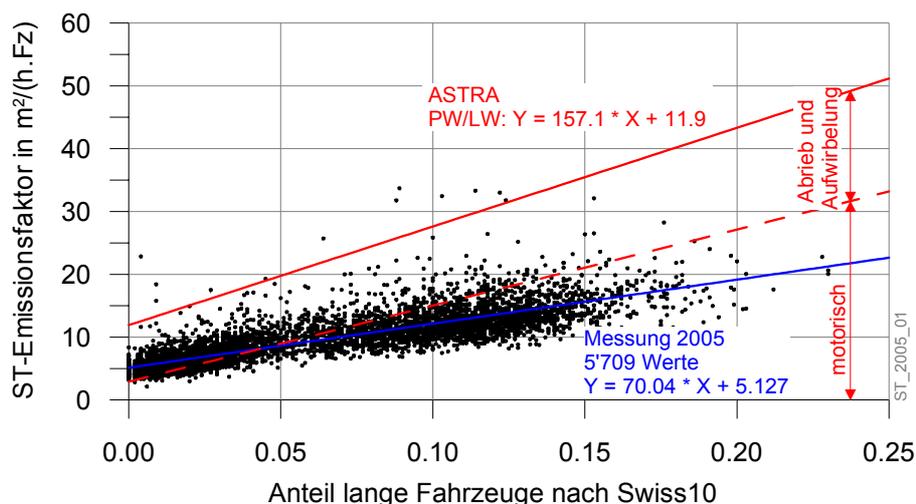
$$\text{FLB} = \frac{n_{FZ} \cdot E_{ST}}{K_{lim}} \quad \text{in } \text{m}^3/\text{s}$$

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 (hellgrau) und am Ausfahrtsportal (dunkelgrau)



**Figur 6.7** Gültige Messwerte der Sichttrübung und abgeleitete Emissionsfaktoren, Vergleich mit den Angaben in der ASTRA-Richtlinie [8]

Sichttrübung	
Auswertezeitraum (gültige Sequenzen)	20.4.2005 15:30 bis 31.5.2005 21:40
Anzahl gültiger 5 Minuten-Sequenzen	5'709
Anzahl Fahrzeuge in gültigen Sequenzen	
gesamt	1'214'414
kurze Fahrzeuge nach Swiss10	1'138'669
lange Fahrzeuge nach Swiss10	75'744 (6.24 %)
Mittlere Fahrgeschwindigkeit (Standardabw.)	94.9 km/h (3.8 km/h)
Mittlere Geschwindigkeit der Luft (Standardabw.)	7.0 m/s (1.09 m/s)
Mittlerer Sichttrübungs-Emissionsfaktor	9.38 m <sup>2</sup> /(h.Fz)

## 7. BEURTEILUNG

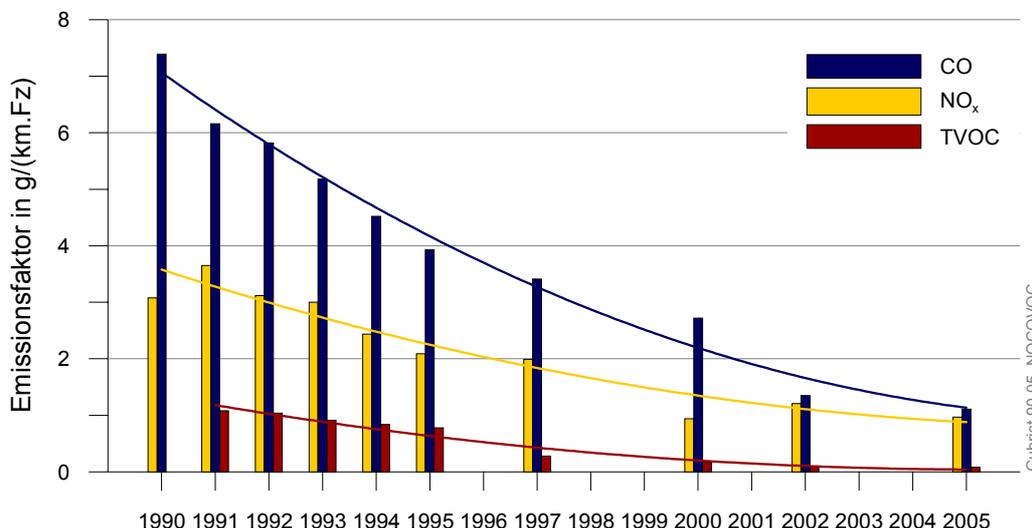
### 7.1 Vergleich mit früheren Messkampagnen

Die Resultate der Messungen von 2005 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 Darstellungen in Kapitel 6 zeigen zudem die früher verwendeten Vergleichskurven gemäss Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA [5], gebildet mit den Emissionswerten für PW und SNF allein. Alle Berechnungen nach HBEFA wurden mit den Optionen 'Klimaanlage' und 'Partikelfilter' durchgeführt.

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 2005 zusammengestellt und mit jenen der früheren Messkampagnen verglichen.

Es zeigt sich, dass die NO<sub>x</sub>-, 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).



**Figur 7.1** Entwicklung der Emissionsfaktoren pro Fahrzeug seit 1990 für NO<sub>x</sub>, CO und TVOC in der Südröhre des Gubristtunnels in Fahr- richtung 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<sub>x</sub>, CO und TVOC grafisch dargestellt.

Kenngrösse	1990	1991	1992	1993 <sup>2)</sup>	1994 <sup>2)</sup>	1995 <sup>2)</sup>	1997 <sup>2,3)</sup>	2000 <sup>2,3,4)</sup>	2002 <sup>2,3,5)</sup>	2005 <sup>6)</sup>
Anzahl gültig erfasster Fahrzeuge										
- für NO <sub>x</sub> -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
- 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
- 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
- für PAH-Messung	-	-	-	-	627'420	1'127'791	705'717	-	-	-
- für NH <sub>3</sub> -Messung	-	-	-	-	-	-	-	-	759'975	-
Lastwagenanteil [%]										
- bei gültigen NO <sub>x</sub> -Messungen	7.3	8.6	7.8	8.9 <sup>1)</sup>	7.3	7.3 <sup>1)</sup>	7.4 <sup>1)</sup>	3.7	8.0	6.2
- bei gültigen CO-Messungen	7.3	8.2	7.7	8.9 <sup>1)</sup>	7.3	7.3 <sup>1)</sup>	7.8 <sup>1)</sup>	3.7	8.0	6.1
- bei gültigen TVOC-Messungen	-	8.2	7.8	8.9 <sup>1)</sup>	7.3	7.3 <sup>1)</sup>	7.8 <sup>1)</sup>	3.7	8.0	6.0
- bei gültigen PAH-Messungen	-	-	-	-	7.7	7.3 <sup>1)</sup>	7.7 <sup>1)</sup>	-	-	-
- bei gültigen NH <sub>3</sub> -Messungen	-	-	-	-	-	-	-	-	8.2	-
NO <sub>x</sub> -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
- 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
- pro Lastwagen	14 - 18	12 - 21	12 - 21	12 - 18	12 - 18	10 - 18	10 - 18	10 - 14	8 - 15	8 - 15
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
- 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
- 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
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
- 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
- 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
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 <sub>3</sub> -Emissionsfaktor [g/(km.Fz)]										
- pro Fahrzeug	-	-	-	-	-	-	-	-	0.033	-
- pro Personenwagen	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02 – 0.05	-
- pro Lastwagen	-	-	-	-	-	-	-	-	0.005-0.02	-

<sup>1)</sup> Eichzählungen des Vorjahres verwendet.

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

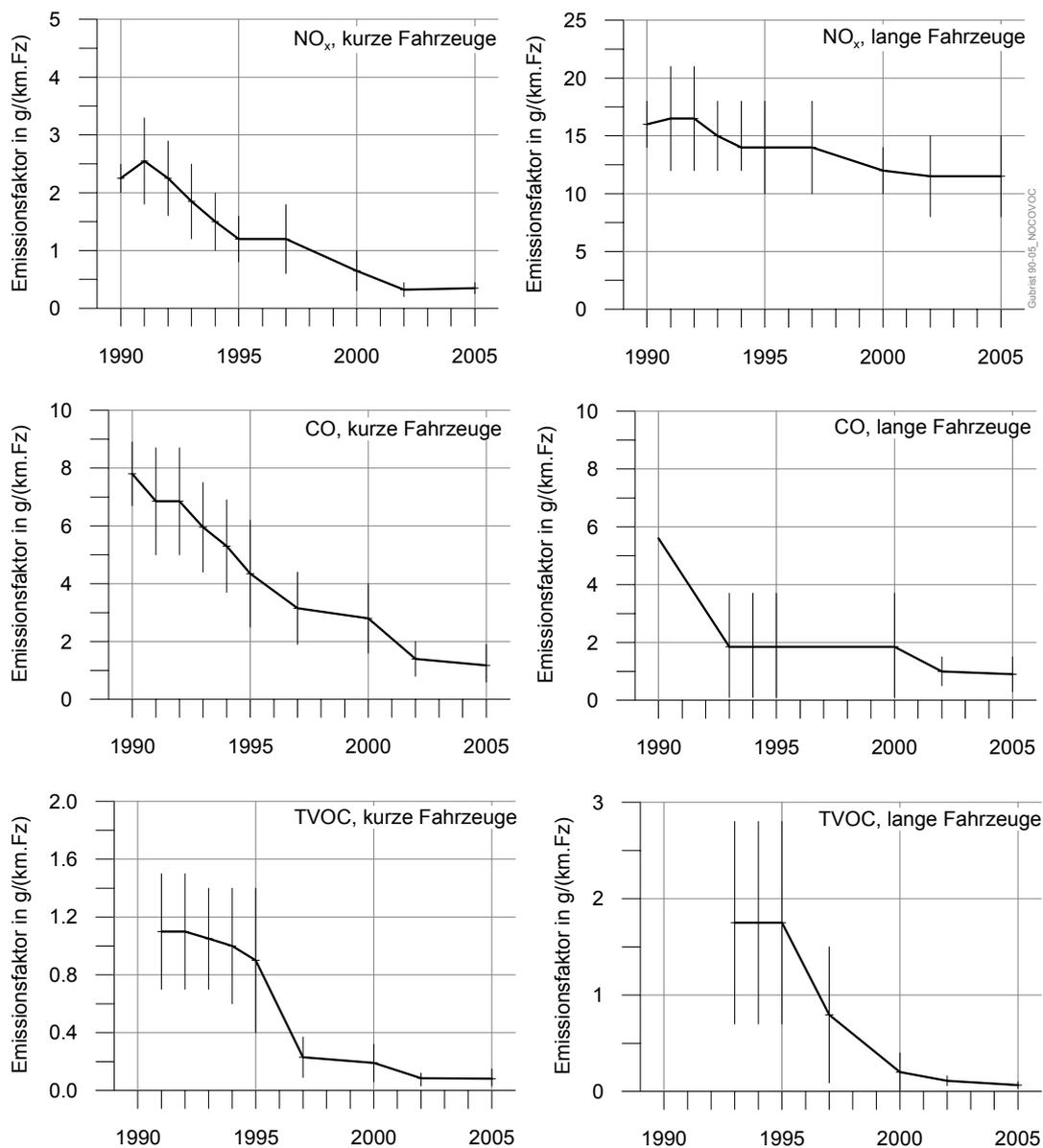
<sup>3)</sup> Seit 1997 stehen neben den Schadstoffmessungen beim Ausfahrtportal erstmals auch Messungen beim Einfahrtportal zur Verfügung (Differenzmessung).

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

<sup>5)</sup> Neue Verkehrszählungen ausserhalb des Portals Regensdorf

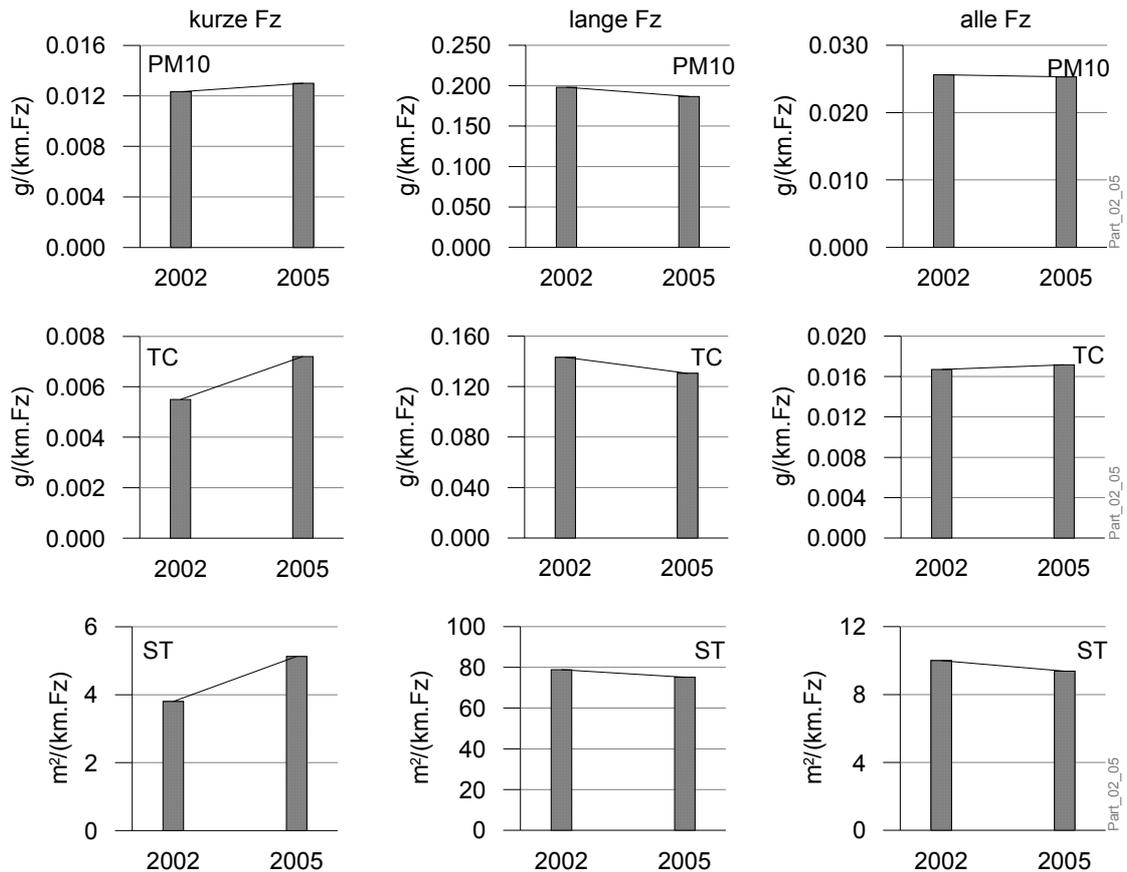
<sup>6)</sup> Verkehrszählung und Auswertung gemäss Swiss10, Personenwagen beinhaltet Lieferwagen und Motorräder, Lastwagen beinhaltet Lastenzüge, Sattelzüge und Reisebusse

**Tabelle 7.1: Kennwerte der Messungen gasförmiger Stoffe in der Südöhre des Gubristtunnels (Fahrrichtung in der Steigung)**



**Figur 7.2** *Entwicklung der Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>, 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, Russ TC und Sichttrübung ST ausgewertet. Die Messungen ergeben übereinstimmend, dass zum einen die Partikel-Emission zwischen den Jahren 2002 und 2005 gesamthaft abgenommen hat, zum anderen aber, dass die Partikel-Emission der kurzen Fahrzeuge klar zugenommen hat. Bei den PM10-Emissionen der kurzen Fahrzeuge beträgt der Anstieg 5 %, bei TC 31 % und bei der Sichttrübung 35 %. Man geht heute davon aus, dass insbesondere die kleinsten, frischen, noch wenig koagulierten Russpartikel opazitiv wirksam sind. Die Sichttrübungs- und TC-Werte weisen darauf hin, dass bei den kurzen Fahrzeugen insbesondere die kleinsten Partikel, zwar auch massebezogen, aber umso mehr anzahlbezogen stark zugenommen haben.



**Figur 7.3** Vergleich der Messungen von 2002 und 2005 der PM10-, TC- und Sichttrübungs-Emission im Gubristtunnel, links: kurze Fahrzeuge; Mitte: lange Fahrzeuge; rechts: Mittelwert aller Fahrzeuge

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

Kenngrösse	2002	2005 <sup>1)</sup>
Anzahl gültig erfasster Fahrzeuge		
- für PM10-Messung	280'881	322'352
- für TC-Messung	26'018	31'471
- für ST-Messung	1'586'663	1'214'414
Lastwagenanteil [%]		
- bei gültigen PM10-Messungen	7.2	6.2
- bei gültigen TC-Messungen	8.3	7.1
- bei gültigen ST-Messungen	8.2	6.2
PM10-Emissionsfaktor [g/(km.Fz)]		
- pro Fahrzeug	0.026	0.025
- pro Personenwagen	0.08	0.013
- pro Lastwagen	0.212	0.187
TC-Emissionsfaktor [g/(km.Fz)]		
- pro Fahrzeug	0.0167	0.0172
- pro Personenwagen	0.0055	0.0072
- pro Lastwagen	0.1432	0.1306
ST-Emissionsfaktor [m <sup>2</sup> /(km.Fz)]		
- pro Fahrzeug	10.0	9.4
- pro Personenwagen	3.8	5.1
- pro Lastwagen	78.8	75.2

<sup>1)</sup> Verkehrszählung und Auswertung gemäss Swiss10, Personenwagen beinhaltet Lieferwagen und Motorräder, Lastwagen beinhaltet Lastenzüge, Sattelzüge und Reisebusse

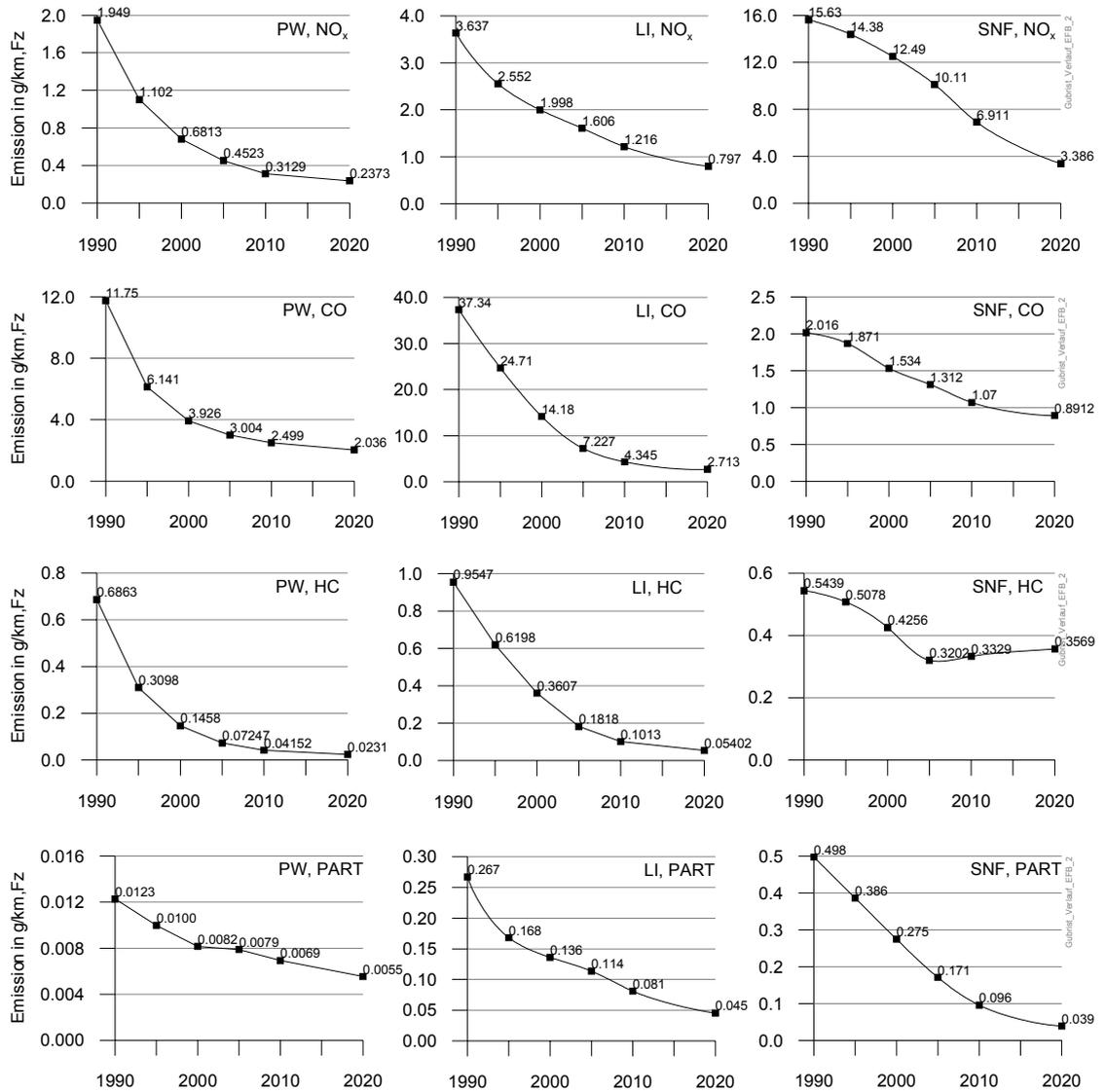
**Tabelle 7.2: Kennwerte der Messungen partikelförmiger Stoffe in der Südröhre des Gubristtunnels (Fahrrichtung mit 1.3 % Steigung)**

## 7.2 Vergleich mit den Unterlagen des BUWAL

Für das Bezugsjahr 2005 werden in den Figuren 6.1 bis 6.3 die NO<sub>x</sub>-, CO- und TVOC-Emissionsfaktoren des BUWAL-Handbuches Version 2.1 mit jenen gemäss den Messungen im Gubristtunnel verglichen. Die mit Swiss10 bezeichneten Kurven sind für den Vergleich massgebend. Die Kurven aufgrund der Werte für PW und SNF sind als Bezug zu den früheren Ergebnissen zu verstehen.

Die Verkehrssituation im Gubristtunnel ist im Sinn der BUWAL-Unterlagen als Autobahn-Regelsituation mit Tempo 100 zu betrachten (AB\_100). Die durchschnittliche Verkehrssituation in der Südröhre des Gubristtunnels geht gemäss Handbuch Emissionsfaktoren bei der Steigung von 1.3 % davon aus, dass Personenwagen eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 103 km/h aufweisen, während schwere Nutzfahrzeuge durchschnittlich mit 86 km/h unterwegs sind. Die Beobachtung legt allerdings eine Fahrgeschwindigkeit der schweren Nutzfahrzeuge von gegen 100 km/h nahe.

Wie die nachfolgenden Darstellungen der Emissionsverläufe gemäss HBEFA für die Verkehrssituation in der Südröhre des Gubristtunnels (AB\_100, +1.3 %) zeigen, wird auch für die kommenden Jahre ein erheblicher Rückgang der Emissionen der Einzelfahrzeuge prognostiziert. Zusammen mit der zeitlichen Unsicherheit der Prognose können die steilen Gradienten zu grösseren Abweichungen zwischen Messung und Prognosewert führen.



**Figur 7.4** Angaben zu den Emissionswerten aus HBEFA bei AB<sub>100</sub> und +1.3 % Steigung

Bei den NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren ergeben die Messungen für die kurzen Fahrzeuge rund 40 bis 50 % tiefere Werte als nach den Angaben des BUWAL. Für die langen Fahrzeuge sind die Resultate der Messungen im Gubristtunnel etwa 10 % höher als die Angaben des BUWAL.

Die Messwerte der CO-Emissionsfaktoren liegen sowohl für kurze Fahrzeuge um einen Faktor 3 und für lange Fahrzeuge um mindestens einen Faktor 3 unter den Angaben im BUWAL-Handbuch.

Bei den TVOC-Emissionsfaktoren liegen die Messergebnisse im Gubristtunnel für die kurzen Fahrzeuge rund 20 % über den Angaben des BUWAL. Bei den langen Fahrzeugen sind die Angaben des BUWAL um mehrere Faktoren über den im Gubristtunnel gemessenen Werten.

Die Werte der PM10-Emissionsfaktoren für die kurzen Fahrzeuge sind gemäss den Messungen im Gubristtunnel um etwa 15 % tiefer, die Werte der langen Fahrzeuge um 8 % höher als die Angaben im BUWAL-Handbuch. Es liegen allerdings nur wenige Messwerte mit grossem Anteil langer Fahrzeuge vor, und der Streubereich dieser Ergebnisse ist gross. Bei diesem Vergleich sind die im BUWAL-Bericht 355 angeführten Werte für die PM10-Fraktion von Abrieb und Aufwirbelung jedoch nicht eingerechnet. Erstaunlich ist, dass trotz der geringen Anzahl Messwerte und der erheblichen Streuung der Punkte sich sehr gut vergleichbare Werte mit den Angaben im BUWAL-Handbuch ergeben.

Die 5 Messwerte mit sehr geringem Anteil an langen Fahrzeugen weisen darauf hin, dass mit dem Emissionswerten nach dem BUWAL-Handbuch, welche ausschliesslich die motorischen Partikel umfassen, die Gesamtkohlenstoff-Emission TC der kurzen Fahrzeuge bei der Verkehrssituation im Gubristtunnel um den Faktor 2 überschätzt werden. Der gemessene TC-Emissionsfaktor für die langen Fahrzeuge liegt bei 70 % des entsprechenden Wertes im BUWAL-Handbuch.

Die Sichttrübungswerte sind vor allem für die Auslegung und den Betrieb der Tunnellüftung von Interesse. Die im Gubristtunnel gemessenen Sichttrübungs-Emissionsfaktoren sind für die kurzen Fahrzeuge 50 % tiefer und für lange Fahrzeuge 55 % tiefer als die heute gültigen Dimensionierungswerte in der ASTRA-Richtlinie.

## 8. 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] Eichzählungen Gubrist 2004  
Bericht Planungsbüro Jud, Januar 2005
- [3] Bundesamt für Strassen ASTRA: Automatische Fahrzeugklassierung -  
Gerätetests Reiden und Biasca, 2003
- [4] Bundesamt für Statistik: Band 11, Verkehr und Nachrichtenwesen,  
Strassenfahrzeuge in der Schweiz, Bestand am 30. September 2004
- [5] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL: Handbuch Emissions-  
faktoren, Version 2.1, Februar 2004
- [6] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL: Schriftenreihe Umwelt  
Nr. 355, Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1980 - 2030, 2004
- [7] Weltstrassen-Verband (AIPCR), Strassentunnel - Komitee: Emissionen,  
Lüftung, Umwelt, 1995
- [8] Bundesamt für Strassen ASTRA: Richtlinie Lüftung der Strassentunnel,  
Ausgabe 2004

## 9. ANHANG

### 9.1 Detailangaben zur Auswertung der NO<sub>x</sub>-, CO- und TVOC-Messungen

#### 9.1.1 Auswertungsprogramm

- 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 m<sup>3</sup>/s, → minimale Strömungsgeschwindigkeit: 5.2 m/s beim Fahrraumquerschnitt von 48 m<sup>2</sup>)
- Skalieren der Verkehrsdaten nach den Angaben in Tabelle 5.2
- 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

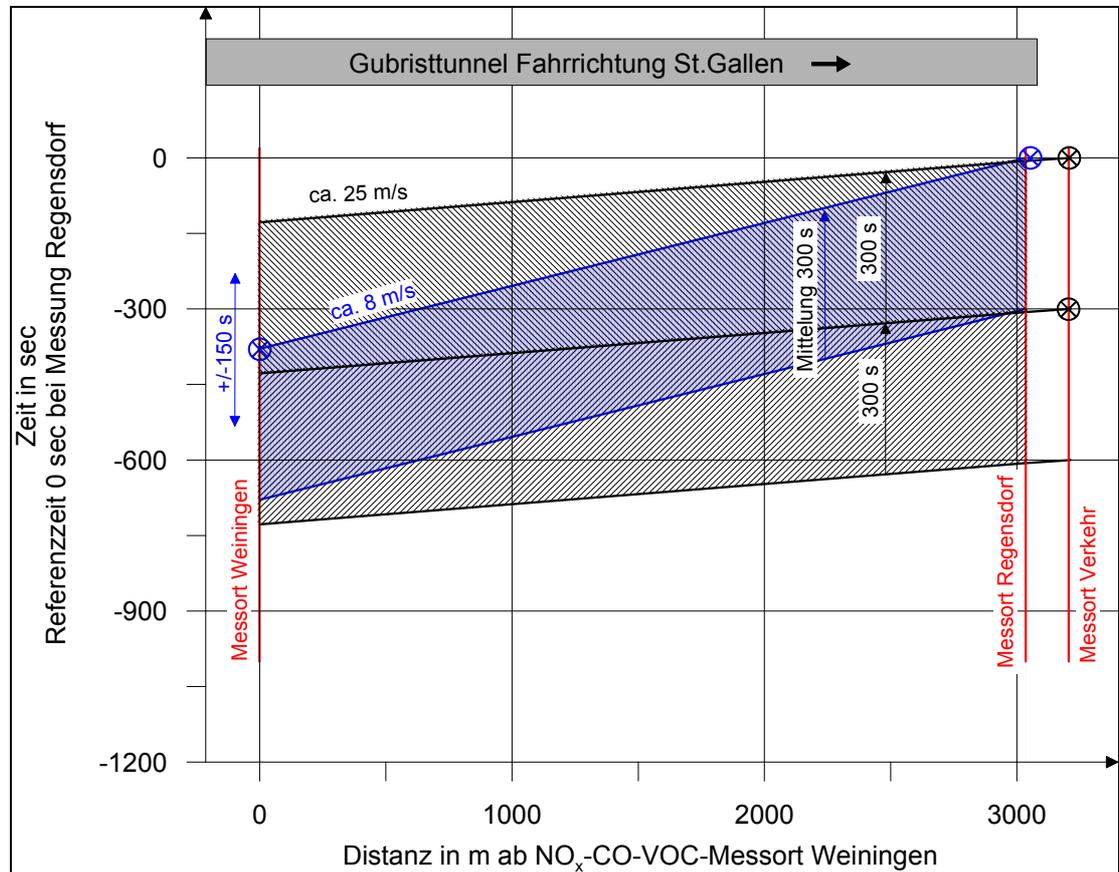
$$\text{EFA} = \frac{V_L \cdot \Delta t \cdot (c_{\text{Regensdorf}} - c_{\text{Weiningen}}) \cdot \rho_{\text{Stoff}}}{n_{\text{Fz}} \cdot L_{\text{Mess}}} \quad \text{in g/(km.Fz)}$$

$V_L$	Mittlerer Volumenstrom in m <sup>3</sup> /s durch den Fahrraum über die Mittelungszeit
$\Delta t$	Mittelungszeit (ganzzahliges Vielfaches der Konzentrationsmessdauer von 5 Minuten)
$c_{\text{Regensdorf}}$	Konzentration in ppm vor Ausfahrtsportal
$c_{\text{Weiningen}}$	Konzentration in ppm nach Einfahrtsportal
$\rho_{\text{Stoff}}$	Dichte in kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{NOx}}$	2.052 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{CO}}$	1.249 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{TVOC}}$	1.860 kg/m <sup>3</sup>
$n_{\text{Fz}}$	Anzahl Fahrzeuge über Mittelungszeit
$L_{\text{Mess}}$	Abstand der Messorte Weiningen und Regensdorf in m (3'057 m)

- Ausgabe der Ergebnisse

### 9.1.2 Ort-Zeit-Diagramm

Das Ort-Zeit-Diagramm für die NO<sub>x</sub>-, CO- und TVOC-Messungen ist in Figur 9.1 dargestellt. Dem blau hinterlegten Messbereich der Konzentration wird der Mittelwert der schraffierten Messbereiche der Verkehrsdaten zugeordnet.



**Figur 9.1 Ort-Zeit-Diagramm**

Masstäbliche Darstellung für Strömungsgeschwindigkeit 8 m/s (Volumenstrom durch den Fahrraum 384 m<sup>3</sup>/s) und Fahrgeschwindigkeit 90 km/h (25 m/s) als Beispiel eines momentanen Zustandes

Auswertung über jede Mess-Sequenz einzeln (Mittelungszeit 5 Minuten), Mess-Sequenz: 5 Minuten → blau hinterlegt

Verkehrs-Sequenzen: Mittelwert aus 2 sich folgenden Sequenzen von 5 Minuten → schraffiert

## 9.2 Detailangaben zur Auswertung der Sichttrübungsmessung

### 9.2.1 Auswertungsprogramm

- 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 m<sup>3</sup>/s, → minimale Strömungsgeschwindigkeit mit Fahrraumquerschnitt von 48 m<sup>2</sup>)
- Skalieren der Verkehrsdaten nach den Angaben in Tabelle 5.2
- 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
- Kontrolle der Gültigkeit der Daten (Vollständigkeit)
- Bestimmen des Anteils langer Fahrzeuge
- Berechnen des mittleren Emissionsfaktors

$$\text{EFA} = \frac{V_L \cdot \Delta t \cdot \frac{C_{\text{Regensdorf}} - C_{\text{Weiningen}}}{100} \cdot v_F \cdot ST_{100} \cdot 1000}{n_{\text{Fz}} \cdot L_{\text{Mess}}} \quad \text{in } \text{m}^2/(\text{h} \cdot \text{Fz})$$

$V_L$	Mittlerer Volumenstrom in m <sup>3</sup> /s durch den Fahrraum über die Mittelungszeit
$\Delta t$	Mittelungszeit (ganzzahliges Vielfaches der Messdauer von 5 Minuten)
$C_{\text{Regensdorf}}$	Sichttrübung in % vor Ausfahrtsportal
$C_{\text{Weiningen}}$	Sichttrübung in % nach Einfahrtsportal
$v_F$	Mittlere Fahrgeschwindigkeit über Mittelungszeit
$ST_{100}$	100%-Wert der Sichttrübung (= 0.015 E/m = 15 mE/m)
$n_{\text{Fz}}$	Anzahl Fahrzeuge über Mittelungszeit
$L_{\text{Mess}}$	Abstand der Messorte Weiningen und Regensdorf in m (3'131 m)

- Ausgabe der Ergebnisse