



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Luftströmungsmessung in Strassentunneln

**Mesure de la vitesse du courant longitudinal d'air dans
des tunnels routiers**

Airflow measurement in road tunnels

Lombardi AG
Urs Grässlin
Gianpaolo Nodiroli
Uwe Drost

**Forschungsauftrag ASTRA 2010/025_OBF auf Antrag des
Bundesamt für Strassen (ASTRA)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Luftströmungsmessung in Strassentunneln

**Mesure de la vitesse du courant longitudinal d'air dans
des tunnels routiers**

Airflow measurement in road tunnels

**Lombardi AG
Urs Grässlin
Gianpaolo Nodiroli
Uwe Drost**

**Forschungsauftrag ASTRA 2010/025_OBF auf Antrag des
Bundesamt für Strassen (ASTRA)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Urs Grässlin

Mitglieder

Gianpaolo Nodiroli

Uwe Drost

Begleitkommission

Präsident

Urs Steinemann

Mitglieder

Christian Gammeter

Heinz Jauch

Hans Meier

Peter Wildi

Stefan Wenger

Reto Buchmann

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	9
	Résumé	11
	Summary	13
	Kurzfassung	15
1	Ausgangslage	27
1.1	Einleitung.....	27
1.2	Anforderungen an das Forschungsprojekt.....	27
1.3	Strömungsmessgeräte	27
1.4	Ziele des FOP	28
1.4.1	Ziele des Forschungsprojektes	28
1.4.2	Änderungen im Forschungsprojekt.....	29
1.5	Richtlinien und Merkblätter.....	30
1.5.1	Richtlinie Lüftung.....	30
1.5.2	Technisches Merkblatt Sensorik	31
2	Grundlagen	34
2.1	Übersicht über die Verfahren	34
2.1.1	Staudruckmessung	34
2.1.2	Ultraschallmessung.....	34
2.2	Übersicht über die Messtypologien.....	34
2.2.1	Linienmessung	34
2.2.2	Punktmessung	34
2.3	Physikalische Grundlagen.....	35
2.3.1	Einfluss von Temperatur, Druck und Luftfeuchte.....	35
2.3.2	Strömungsprofile	35
2.3.3	Bestimmung Volumenstrom	37
2.4	Auswahl der Tunnel	38
2.5	Lüftungsinstallationen in den Tunneln	40
2.5.1	Tunnel Bözberg (RV)	40
2.5.2	Tunnel Flüelen (GV).....	40
2.6	Wahl der Messgeräte	41
2.7	Abklärungen für die Messinstallation	42
2.7.1	Tunnel Bözberg (RV)	42
2.7.2	Tunnel Flüelen (GV).....	43
2.8	Vorbereitung der Messinstallation.....	43
2.9	Referenzmessung	44
2.10	Messinstallationen und Messwertaufzeichnungen.....	44
3	Testaufbau	46
3.1	Aufbau der Messinstallationen.....	46
3.1.1	ACP – ACP Environment AG	47
3.1.2	COD - Codel International Ltd.....	49
3.1.3	DUR - Durag GmbH	51
3.1.4	FIV - Fives Pillard	53
3.1.5	SIC - Sick AG	56
3.1.6	SKN - Schiltknecht Messtechnik AG.....	59

3.1.7	Zusätzliche Messeinrichtungen.....	61
3.2	Verkehrsdaten.....	61
3.3	Aufbau der Messschranke	63
3.4	Montagen und Inbetriebnahmen	63
3.5	Aufzeichnung der Messwerte.....	64
3.6	Messperiode	65
4	Auswertungen der Messresultate	66
4.1	Einleitung	66
4.1.1	Auswertungskonzept.....	66
4.1.2	Messwertglättung und Ansprechverhalten.....	66
4.1.3	Korrekturfaktoren	68
4.2	Konsistenz der Messwerte.....	68
4.2.1	Tunnel Bözberg.....	68
4.2.2	Tunnel Flüelen	69
4.3	Geometrische Bestimmung der Tunnelprofile	69
4.3.1	Tunnel Bözberg (Richtungsverkehr).....	70
4.3.2	Tunnel Flüelen (Gegenverkehr).....	70
4.4	Strömungsverhältnisse im Tunnel	70
4.4.1	Luftströmung und Verkehrsaufkommen.....	70
4.4.2	Luftströmung im Tunnel	73
4.5	Funktionsverhalten der Strömungsmessgeräte.....	74
4.5.1	Chronologie einschliesslich aussergewöhnlicher Vorkommnisse	74
4.5.2	ACP TK 300	76
4.5.3	COD TunnelCraft 3	78
4.5.4	DUR D-FL 200T	80
4.5.5	FIV Windcheck.....	81
4.5.6	SIC Flowsic200	84
4.5.7	SKN TMS 3000	87
4.6	Meteorologische und andere Einflüsse.....	88
4.6.1	Luftdruck	88
4.6.2	Luftfeuchtigkeit.....	89
4.6.3	Temperatur.....	89
4.6.4	Verschmutzung und Korrosion	90
4.7	Weitere Beobachtungen und Vorkommnisse	92
4.7.1	Tunnel Flüelen – Föhnsturm Kanton Uri 28/29.04.2012.....	92
4.7.2	Tunnel Bözberg – Spurabbau für Unterhalt.....	93
4.7.3	Tunnel Bözberg – Sperrnächte	93
4.7.4	Tunnel Bözberg – Brandalarm durch Turboschaden.....	94
4.7.5	Tunnel Bözberg – Stockender Verkehr.....	95
4.7.6	Tunnel Bözberg, Tunnel Flüelen – Tunnelreinigung.....	96
5	Tracergas-Messungen.....	98
5.1	Ziel der Referenz-Messungen.....	98
5.2	Installationen	98
5.3	Zeitkorrektur	98
5.4	Messkampagne Januar 2012.....	99
5.4.1	Tunnel Bözberg (RV)	99
5.4.2	Tunnel Flüelen (GV).....	101
5.5	Messkampagne September 2012	103
5.5.1	Tunnel Flüelen (GV).....	104
5.6	Resultate und Interpretation.....	105

5.6.1	Schlussbericht HSLU	105
5.6.2	Vergleich Tracergasmessung - Strömungsmessgeräte.....	105
5.7	Schlussfolgerungen Tracergas-Messungen	105
6	Statistische Auswertungen	107
6.1	Allgemein.....	107
6.1.1	Tagesverläufe Tunnel Bözberg	107
6.1.2	Tagesverläufe Tunnel Flüelen.....	108
6.1.3	Graphische Auswertungen.....	109
6.2	Tunnel Bözberg	110
6.2.1	Hufeisenprofil M1 08.02.2012	110
6.2.2	Hufeisenprofil M1 05.09.2012	111
6.2.3	Rechteckprofil M2 08.02.2012	112
6.2.4	Rechteckprofil M2 05.09.2012	113
6.3	Tunnel Flüelen	114
6.3.1	Hufeisenprofil M1 08.02.2012	114
6.3.2	Hufeisenprofil M1 05.09.2012	115
6.3.3	Rechteckprofil M2 08.02.2012	116
6.3.4	Rechteckprofil M2 05.09.2012	117
7	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	118
7.1	Ziele und Erkenntnisse FOP	118
7.1.1	Kalibrierungen / Inbetriebsetzung	118
7.1.2	Einfluss von Störgrössen	119
7.1.3	Mittelwertbildung bei Punktmessungen	120
7.1.4	Integrationszeiten und Messwertglättung	120
7.1.5	Messwertfehler.....	120
7.1.6	Bestimmung des Volumenstroms / Messgenauigkeit.....	121
7.1.7	Fernkontrolle der Messwerte.....	121
7.1.8	Fernparametrierbarkeit.....	123
7.1.9	Langzeitverhalten der Anlage	123
7.1.10	Unterhalt der Strömungsmessgeräte	124
7.1.11	Kosten der Strömungsmessgeräte	124
7.2	Zusammenfassung der Auswertungen	124
7.3	Empfehlungen	124
7.3.1	Empfehlungen an Hersteller - Konstrukteure.....	124
7.3.2	Empfehlungen an Planer.....	125
7.3.3	Empfehlungen an Betreiber	125
7.3.4	Empfehlungen ASTRA	125
7.4	Schlussbemerkungen.....	126
	Anhänge	128
	Abkürzungen	219
	Literaturverzeichnis	221
	Projektabschluss	223
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	226

Zusammenfassung

In Strassentunneln mit Abluftklappen zur konzentrierten Rauchabsaugung im Ereignisfall und in längsgelüfteten Tunneln, bei welchen sich Tunnelbenutzer beidseitig des Ereignisortes befinden können (Gegenverkehr oder Stausituationen), ist eine zuverlässige und genaue Kontrolle und Regelung der Längsgeschwindigkeit der Luft im Fahrraum notwendig. Damit werden eine unkontrollierte Rauchausbreitung verhindert und die Selbstretungsbedingungen der Tunnelbenutzer verbessert.

Zuverlässige Messdaten der Strömung im Fahrraum sind erforderlich, damit im Ereignisfall Strömungszustände in einem engen Toleranzband eingestellt werden können. Ein entsprechender Regelkreis steuert dafür die Ventilatoren mittels eines Soll-Ist-Vergleichs der Strömungsgeschwindigkeit am Ereignisort.

Ziel des FOP war die heute gebräuchlichen unterschiedliche Messtechniken für die Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum zu vergleichen. Es handelt sich dabei um die Staudruckmessung, Ultraschalllinienmessung und Ultraschallpunktmessung.

Die Wahl der Messgeräte für das FOP wurde aufgrund einer Gerätematrix vorgenommen, welche die in den Schweizerischen Tunneln und dem umliegenden Ausland vorwiegend installierten Geräte berücksichtigte.

Die Tunnelauswahl für das FOP erfolgte auf Basis einer Tunnelmatrix. Das wichtigste Kriterium für die Tunnelauswahl war, dass die Tunnel ein richtlinienkonformes Normalprofil aufweisen. Zudem musste sowohl ein Hufeisenprofil (HU) in Portalnähe wie auch ein Rechteckprofil mit Zwischendecke (ZD) im Innenbereich vorhanden sein. Weiterhin sollten Situationen mit Gegenverkehr (GV) und Richtungsverkehr (RV) berücksichtigt werden. Ausgewählt wurden der zweiröhrige Bözbergtunnel und der einröhrige Umfahrungstunnel Flüelen.

Die vergleichende Messkampagne mit sechs unterschiedlichen Messgeräten in vier Messprofilen dauerte 10 Monate von Januar bis Oktober 2012. Die Messwerte wurden im 10 Sekundenzyklus aufgezeichnet und ausgewertet. Um neutrale Referenzwerte zu erhalten, wurden zu Beginn und Ende der Messperiode Tracergasmessungen durchgeführt.

Im Rahmen der Datenanalyse wurden die Konsistenz der Messwerte, das Ansprechverhalten der Strömungsmessgeräte, das Verhalten der Messgeräte bei verschiedenen Verkehrsverhältnissen sowie spezielle Vorkommnisse untersucht und eine statistische Auswertung der Messwerte durchgeführt.

Die Ergebnisse des FOP zeigen, dass zwischen den an eine genaue und zuverlässige Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit gesetzten Erwartungen und dem konkreten Verhalten der Messgeräte im Tunnel noch immer gewisse Diskrepanzen bestehen.

Das Projekt wurde mit unerwarteten, funktionellen Störungen der Messgeräte konfrontiert, welche das Endergebnis nicht unwesentlich beeinflussten. Die daraus gezogenen Lehren müssen künftig berücksichtigt werden müssen, um die Zuverlässigkeit und Stabilität der Messgeräte hinsichtlich des Langzeitverhaltens zu verbessern.

Die Messwerte der Strömungsmessgeräte wurden detailliert analysiert, auf Plausibilität geprüft und dokumentiert. Aus den Untersuchungen ergeben sich Empfehlungen zur Verbesserung und Optimierung der Thematik "Luftströmungsmessungen in Strassentunneln" an die Hersteller, Planer und Betreiber sowie Ergänzungen für die Richtlinie Lüftung und das technische Merkblatt Sensorik des ASTRA.

Generell ergibt sich aus dem FOP, dass die heute installierten Messgeräte den gestellten Anforderungen unter üblichen Randbedingungen genügen, wenn die aufgeführten Empfehlungen an Hersteller, Planer und Betreiber Berücksichtigung finden. Das gilt insbesondere für die regelmässige und automatisierte Plausibilisierung der Messwerte.

Résumé

Dans les tunnels routiers équipés de trappes de désenfumage, pour l'extraction concentrée des fumées ainsi que dans ceux ventilés longitudinalement, où les usagers pourraient se trouver des deux côtés du lieu de l'incident (trafic bidirectionnelle ou congestionné), il est nécessaire d'effectuer un contrôle fiable et précis de la vitesse longitudinale de l'air dans l'espace trafic. Ainsi on évitera la propagation incontrôlée de la fumée et les conditions d'auto-sauvetage des usagers du tunnel seront améliorées.

Des mesures fiables du courant d'air dans l'espace trafic sont nécessaires afin de pouvoir ajuster, en cas d'événement, l'écoulement d'air dans une plage de tolérance étroite. Une boucle de commande régule les ventilateurs en faisant la comparaison entre le débit de consigne et la vitesse longitudinale de l'air au lieu de l'événement.

L'objectif du projet de recherche (FOP) est de comparer les différentes technologies de mesure pour la vitesse d'air dans l'espace trafic dans les tunnels usuelles de nos jours. Il s'agit du tube de Pitot, mesures linéaires et ponctuelles à ultrasons.

Le choix des instruments de mesure pour le FOP a été fait en raison des équipements surtout installés dans la majorité des tunnels suisses et dans les pays environnant. La sélection du tunnel a été faite sur la base d'une matrice comparative des tunnels. Le critère le plus important de sélection était d'avoir un profil conforme aux directives.

Il faut avoir un profil en fer à cheval au niveau des portails ainsi qu'un profil rectangulaire avec dalle intermédiaire au centre. Enfin, il faut prendre en compte les situations avec trafic bidirectionnelle et unidirectionnelle. Les deux tunnels choisis sont le tunnel du Bözberg à deux tubes et le tunnel du Flüelen à un tube.

La campagne des mesures comparatives avec six dispositifs différents et 4 profils de mesure a duré environ 10 mois, de janvier à octobre 2012. Les mesures ont été enregistrées et analysées cyclique tous les 10 secondes. Afin de recevoir des valeurs de références neutres, des mesures de gaz traceurs ont été effectuées au début et à la fin de la période de mesure.

Dans le cadre de l'analyse des données, la cohérence des mesures, la réponse des appareils, leur comportement en fonction des différents cas de circulation ainsi que les incidents spécifiques ont été analysés. On a ainsi procédé à une statistique des valeurs mesurées.

Les résultats du FOP montrent qu'il y a encore certaines divergences entre les mesures précises et fiables de la vitesse d'écoulement d'air moyennes attendus et le comportement réel des instruments dans le tunnel.

Le projet a été confronté à des problèmes fonctionnels inattendus des instruments de mesure, qui ont eu des influences non négligeables sur le résultat final et les relatifs enseignements doivent être pris en compte à l'avenir pour améliorer leurs fiabilités et les stabilités dans le comportement à long terme.

Les mesures des appareils ont été analysées en détail, examinées et documentées. Les recommandations qui résultent de cette enquête visent à améliorer et optimiser les mesures d'air. Celles-ci sont adressées à l'attention des fabricants, des auteurs de projet et des exploitants ainsi que pour compléter les directives et les fiches techniques de l'OFROU dans le domaine de la ventilation des tunnels.

En général, les résultats du FOP démontrent que les instruments actuellement installés pour répondre aux exigences requises sont suffisants dans des conditions normales, si les recommandations du FOP sont prises en compte par les fabricants, les auteurs de projet et l'exploitant en particulier le contrôle régulière et automatique de la cohérence des valeurs mesurées.

Summary

A reliable and accurate monitoring and control of the longitudinal air velocity in tunnel is necessary for road tunnels equipped with exhaust dampers, used for concentrated smoke extraction, in case of an incident that causes fire and where drivers can be located on both sides of the event location. The system will prevent an uncontrolled propagation of smoke and will improve the self-rescue conditions for the tunnel users.

In order to allow an airflow regulation within narrow tolerances inside the tunnel, it is necessary to provide reliable and accurate measurements of the air speed, used as inputs for the closed-loop control system of the ventilation equipment that regulates the air speed at the incident location in both directions.

The objective of the FOP was to compare different measurement techniques, consisting of a dynamic pressure measuring system, two ultrasonic line measurement systems and three ultrasonic point measurement systems.

The airflow measuring systems were chosen on the basis of an equipment matrix that took into account the predominant technologies and devices installed in tunnels in Switzerland and in the surrounding countries.

The tunnels selection for the FOP was based on a tunnel matrix. The most important selection criteria were that the chosen sections had to be compliant to the standard profiles of the Swiss directives and guide lines. The profiles were also chosen with different tunnel vault construction, with "horseshoe" at the portal (HU) and internal rectangular profile (ZD, with air duct in the ceiling).

The two chosen tunnels have also different traffic configurations, the first has bi-directional traffic (GV) and the second has mono directional traffic (RV) with two traffic lanes. The chosen locations were the single-tube bypass Flüelen tunnel and the twin-tube Bözberg highway tunnel.

The comparative measurement campaign, with six different equipment in four cross profiles, lasted approximately 10 months, from January to October 2012. The measurement readings were recorded and analysed with a 10 seconds cycle.

To get neutral reference values, tracer-gas measurements were performed at the beginning and end of the measurements campaign.

The data analysis investigated over consistency of the measurements, response of the air flow devices, behaviour of the instruments in various traffic conditions, including incident scenarios. A statistical analysis of the measurements was also covered.

The results of the FOP reveal that there are still some discrepancies regarding accuracy and reliability of the measurements between the expectations and the actual performance of the air flow monitors in the tunnel.

The project faced unexpected functional problems, which did not affect the final result but must be solved in order to improve the reliability and stability in the long term operation.

The measurements of the airflow meters were documented and analysed in detail. The recommendations emerged from these investigations are aimed to improve and optimize the general concept of "air flow measurement inside tunnels" addressed to manufacturers, engineers and operators and can contribute to the ventilation guidelines and the technical data sheets issued by FEDRO.

In general, it results from the FOP that the currently installed instruments can meet the necessary requirements under normal conditions when the recommendations to manufacturers, designers and operators are taken into account, in particular the regular and automated plausibility surveillance of the measured values.

Kurzfassung

Einleitung

In Strassentunneln mit Abluftklappen zur konzentrierten Rauchabsaugung im Ereignisfall und in längsgelüfteten Tunneln, bei welchen sich Tunnelbenutzer beidseitig des Ereignisortes befinden können (Gegenverkehr oder Stausituationen), ist eine zuverlässige und genaue Kontrolle und Regelung der Längsgeschwindigkeit der Luft im Fahrraum notwendig. Damit werden eine unkontrollierte Rauchausbreitung verhindert und die Selbstretungsbedingungen der Tunnelbenutzer verbessert.

Zuverlässige Messdaten der Strömung im Fahrraum sind erforderlich, damit im Ereignisfall Strömungszustände in einem engen Toleranzband eingestellt werden können. Ein entsprechender Regelkreis steuert dafür die Ventilatoren mittels eines Soll-Ist-Vergleichs der Strömungsgeschwindigkeit am Ereignisort.

Da Strömungsmessgeräte im Ereignisfall in der Regel steuerungstechnisch eingebunden sind, ist es von grosser Wichtigkeit, dass diese immer korrekt funktionieren und dementsprechend überwacht werden.

Messverfahren und Messtypologie

Das Ziel des Forschungsprojekts ist es Messprinzipien, Staudruck und Ultraschallmessung, sowie die Anordnung als Punkt- oder Linienmessung zu vergleichen.

Staudruckprinzip

Die Messung beruht auf dem Staudruckprinzip, das heisst der Bestimmung der Differenz des Totaldrucks zum statischen Druck an der Messstelle. Für eine inkompressible Gasströmung mit einer Machzahl < 0.3 ist der Staudruck proportional zum Quadrat der den Sensor frontal anströmenden Geschwindigkeit eines Gases mit definierter Dichte. Über einen Druckmessumformer wird der Staudruck ermittelt. Die Dichte der Luft im Fahrraum ist abhängig vom Umgebungsdruck und der Lufttemperatur, welche ebenfalls beide gemessen und bei der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Bei einem bidirektionalen Differenzstaudruckrohr wird die Strömungsgeschwindigkeit aus der Differenz der beiden Druckwerte, positiv und negativ, abgeleitet.

Ein Nullabgleich-Verfahren schliesst periodisch die beiden pneumatischen Messkanäle. So kann der Differenzdruck auf null gesetzt werden, um ein Driften des Messwertes zu vermeiden.

Ultraschallmessung

Die Strömungsgeschwindigkeit wird nach dem Laufzeitverfahren ermittelt. Das Messsystem verfügt dafür über kombinierte Sender/Empfängereinheiten. Wenige Millisekunden lange Ultraschallimpulse werden abwechselnd von den Sender- zu den Empfängerteilen gesendet. Dabei sind je nach Richtung und Geschwindigkeit der Luftströmung im Tunnel die Laufzeiten aufgrund des Doppler-Effektes unterschiedlich lang. Aus den Laufzeitmodulierungen lassen sich die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung bestimmen. Messsysteme mit Laufzeitmessungen in beide Richtungen erlauben die Berechnung der Lufttemperatur, welche aufgrund dieser indirekten Bestimmung als „virtuelle Temperatur“ bezeichnet wird. Der Einfluss der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit auf den Messwert lässt sich dadurch ausschalten. Die Messungen sind nahezu unabhängig von der Luftdichte und Luftfeuchte.

Linienmessung

Bei dieser Messkonfiguration nach dem Ultraschallprinzip wird querend entlang einer Linie von Tunnelwand zu Tunnelwand gemessen. In der Regel befinden sich die beiden Messgeräte in einem Winkel von 45° bis 60° versetzt an den beiden Tunnelwänden.

Bei dieser Messanordnung wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit aus dem Messwert diagonal über das Tunnelprofil und unter Anwendung eines Umrechnungsfaktors zur Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofils in Abhängigkeit des Deckenabstandes ermittelt.

Punktmessung

Bei der Punktmessung werden jeweils zwei Strömungsmessgeräte (Staudruck oder Ultraschall) in einem Messquerschnitt beidseitig an den Tunnelwänden montiert. Gemäss dem Technischen Merkblatt Sensorik 23001-11320 [2] sind auch die Punktmessgeräte in einem Abstand von mindestens 30 cm unter der Tunneldecke in ca. 4.40 m Höhe anzuordnen.

Bei dieser Messanordnung wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit aus dem Mittelwert der beiden Einzelmessungen und unter Anwendung eines Umrechnungsfaktors zur Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofils in Abhängigkeit der Messorte ermittelt.

Wahl der Messgeräte

Die Wahl der Messgeräte für das FOP wurde aufgrund einer Gerätematrix vorgenommen, welche die in den Schweizerischen Tunneln vorwiegend installierten Geräte berücksichtigte. Die Auswahl wurde in der Folge auch auf das umliegende Ausland ausgeweitet. Folgende Lieferanten von Strömungsmessgeräten haben aktiv am FOP 2010/025, Luftströmungsmessungen in Strassentunneln, teilgenommen:

Staudruckmessung

- Schiltknecht Messtechnik AG, Gossau ZH

Ultraschall Punktmessung

- ACP AG, 2563 Ipsach
- Codel Ltd, vertreten durch J.con-GmbH, 77815 Buehl, Deutschland
- Fives Pillard, 13272 Marseille Cedex 8, Frankreich

Ultraschall Linienmessung

- Durag Group GmbH, 22453 Hamburg, Deutschland
- Sick AG, 6370 Stans

Auswahl der Tunnel

Die Tunnelauswahl für das FOP wurde aufgrund einer Tunnelmatrix vorgenommen. Nachfolgende Kriterien wurden berücksichtigt:

Als wichtigstes Kriterium für die Tunnelauswahl wurde festgelegt, dass der Tunnel ein richtlinienkonformes Normalprofil aufweisen muss, da dieses bei der Strömungsmessung einen massgeblichen Parameter darstellt.

Als zweiter Punkt wurde definiert, dass die Untersuchungen in Tunneln sowohl mit einem Hufeisenprofil (HU) in Portalnähe wie auch mit einem Rechteckprofil mit Zwischendecke (ZD) im Innenbereich durchzuführen sind. Da in der Regel beim Profilwechsel ein Querschlag vorhanden ist, lässt es diese Anordnung zu, von einem dort untergebrachten Messschrank die beiden Messquerschnitte (im Bereich HU und ZD) bedienen zu können. Weiterhin erlaubt es eine derartige Konfiguration den Installationsaufwand zu reduzieren.

Als dritten Punkt sollen Situationen mit Gegenverkehr (GV) und Richtungsverkehr (RV) berücksichtigt werden. Als besonders interessant wurden Tunnelobjekte mit zwei Röhren bewertet, bei welchen neben Richtungsverkehr zwischendurch auch einmal Situationen mit Gegenverkehr vorkommen.

Zusätzlichen Punkt positiv bewertet wurde, wenn der Querschlag von aussen oder über

einen Sicherheitsstollen zugänglich ist, da dies die Installation und den Unterhalt der Messeinrichtung vereinfacht.

Die Begleitkommission hat aufgrund der Auswahlkriterien die nachfolgenden beiden Tunnel ausgewählt:

Tunnel Bözberg (RV)

- DTV 46'400 (2011)
- 2 Röhren, Richtungsverkehr
- Gesamtlänge 3'700 m
- 2 x 2 Fahrbahnen, Gesamtbreite 7.75 m pro Röhre
- Fahrraum Profil Zwischendecke 47.0 m²
Fahrraum Hufeisenprofil 57.6 m²
- Nordportal 456 m ü.M.
Südportal 456 m ü.M.
Längsgefälle von Norden nach Süden 1.62%
- Eröffnet: 1996

Tunnel Flüelen (GV)

- DTV 14'400 (2011)
- 1 Röhre, Gegenverkehr
- Gesamtlänge 2600 m
- 2x1 Fahrbahn, Gesamtbreite 7.50 m
- Fahrraum Profil Zwischendecke 51.7 m²
Fahrraum Hufeisenprofil 64.6 m²
- Nordportal 465 m ü.M.
Südportal 436 m ü.M.
Längsgefälle von Norden nach Süden 1.12 %
- Eröffnet: 2005

Tracergasmessungen

Mit Referenz-Messungen sollten parallel zu den Messungen mit den verschiedenen Messsystemen neutrale Vergleichswerte der Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum unter Verkehr bestimmt werden.

In Abstimmung mit der Begleitkommission wurde hierzu die Tracergas-Methode gewählt. Die klassischen Netzmessungen wurden nicht in Betracht gezogen, da diese unerwünschte Vollsperrungen der Tunnel erforderlich gemacht hätten da nicht unter Verkehr durchführbar.

Es wurden zwei Messkampagnen durchgeführt, eine erste kurz nach der Installation der Strömungsmessgeräte und eine zweite unmittelbar vor deren Demontage ca. 9 Monate später. Durch den zeitlichen Versatz konnte die zeitliche Stabilität der Strömungsmesssysteme beurteilt werden.

Messkampagnen

Zeitlicher Ablauf

Tunnel Bözberg (RV)

- | | |
|---------------|---|
| 16/17.10.2011 | Installation Messschrank, Montage der KSR und Verkabelungen, Montagen der Strömungsmessgeräte |
| 13.12.2011 | Abschluss der Montagearbeiten der Strömungsmessgeräte |
| 11/12.01.2012 | Montage der Strömungsmessgeräte Codel |

18.01.2012	Tracergasmessung
10.04.2012	Demontagen, respektive Schutz der Strömungsmessgeräte wegen der Tunnelreinigung
12.04.2012	Wiedermontage der Strömungsmessgeräte und Funktionskontrolle
29.10.2012	Demontagen der Strömungsmessgeräte

Tunnel Flüelen (GV)

2/3.11.2011	Installation Messschrank, Montage der KSR und Verkabelungen
3/4.11.2011	Montage der Strömungsmessgeräte
15.11.2011	Erste Tracergasmessung
10/11.01.2012	Montage der Strömungsmessgeräte Codel
17.01.2012	Zweite, vollständige Tracergasmessung
10.04.2012	Demontagen, respektive Schutz der Strömungsmessgeräte wegen der Tunnelreinigung
12.04.2012	Wiedermontage der Strömungsmessgeräte und Funktionskontrolle
26.09.2012	Abschliessende Tracergasmessung
30.10.2012	Demontagen der Strömungsmessgeräte

Aufzeichnung der Messwerte

Die Messwerte und Daten wurden in Datenfiles im CSV Format unabhängig für jede der sechs Testinstallationen mit einem 10 Sekundenzyklus aufgezeichnet. Eine Synchronisierung der Systemzeit der Aufzeichnungen der Strömungsmessgeräte mit jener des Tunnelleitsystems wurde, da nicht relevant, nicht realisiert.

Besondere Vorkommnisse, welche die Betriebsart des Tunnels veränderten, mussten von den Tunnelbetreibern gemeldet werden, um diese in den Auswertungen entsprechend berücksichtigen zu können. Dies betraf konkret aussergewöhnliche Ereignisse wie Brand, Tunnelsperrungen und Verkehrsumleitungen.

Die Datenfiles aus den beiden Tunneln wurden täglich über GSM Router per E-Mail an die Projektleitung gesendet. Die Daten wurden ausgewertet und kontrolliert und zur weiteren Verarbeitung abgespeichert. Systematische Fehler konnten somit frühzeitig erkannt und der betreffende Lieferant benachrichtigt werden, um nicht das Endresultat der ganzen Messkampagne zu beeinträchtigen.

Auswertungskonzept

Die Auswertung der Messwerte erfolgte in verschiedenen Teilschritten:

- In einem ersten Schritt wurden die Konsistenz der Messwerte und das Ansprechverhalten der Strömungsmessgeräte untersucht.
- In einem zweiten Schritt wurde das Verhalten der Messgeräte bei verschiedenen Verkehrsverhältnissen bewertet sowie bei speziellen Vorkommnissen während der Dauer der Datenaufzeichnung. Ebenfalls berücksichtigt wurden die meteorologischen Randbedingungen in den beiden Tunneln.
- Als letzter Schritt erfolgte eine statistische Auswertung der Messwerte.

Messwertglättung und Ansprechverhalten

Alle Lieferanten hatten die Vorgabe einen 10 s Mittelwert zur Verfügung zu stellen und haben diese auf unterschiedliche Art erfüllt. Das Ansprechverhalten der Messgeräte steht in direktem Bezug zur Messwertglättung. Während der Tracergas-Messungen wurde das Aufzeichnungsintervall des 10 s Mittelwerts von 10 s auf 2 s verkürzt. Dies erlaubte einerseits das Ansprechverhalten und andererseits die Messwertglättung der einzelnen Strömungsmessgeräte zu vergleichen.

Über ein 5-Minuten-Fenster betrachtet, folgen die Messungen den Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit recht zuverlässig. Auch im 1-Minuten-Fenster werden die zeitlichen Änderungen noch relativ konsistent abgebildet. Schwankungen innerhalb einer Mi-

nute lassen jedoch kaum mehr einheitliche Trends nachvollziehen. Häufig lassen sich innerhalb dieses Zeitfensters gegensätzliche Abweichungen vom Mittelwert beobachten. Dies kann einerseits an vorbeifahrenden Fahrzeugen liegen, welche zeitlich versetzt die räumlich versetzten Strömungsmessgeräte beeinflussen, andererseits spielt auch die Messwertglättung hinein. Weiterhin können auch lokale Strömungsverhältnisse, welche sich aufgrund der geometrisch unterschiedlichen Anordnungen und der unterschiedlichen Messtechnik nicht einheitlich auf alle Messsysteme auswirken, einen Einfluss haben.

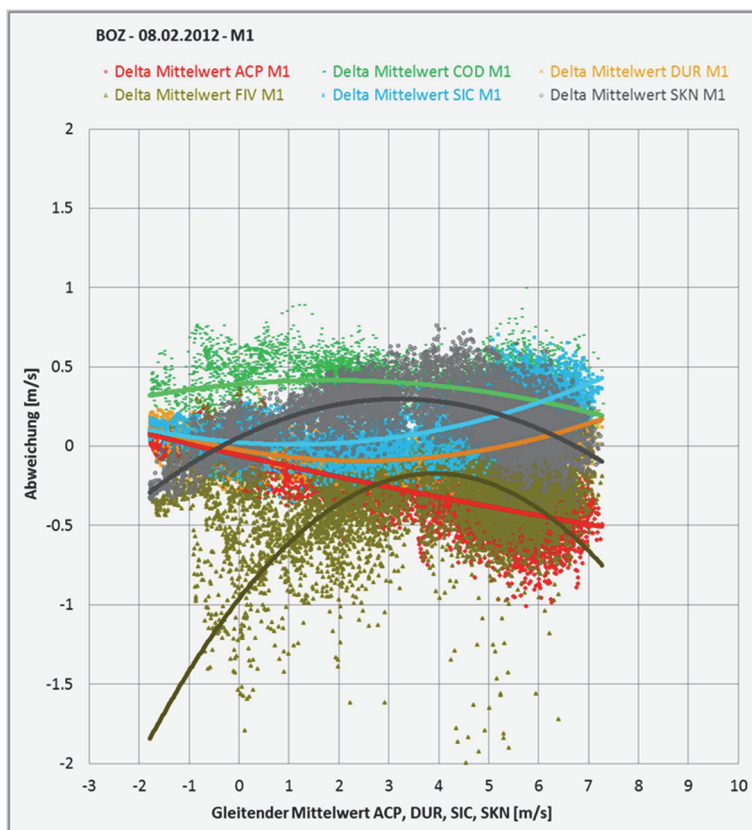
Statistische Auswertungen

Für eine vergleichende, statistische Auswertung der Strömungsmesswerte wurden die Messdaten von zwei typischen Wochentagen herangezogen. Es handelt sich dabei um einen Wintertag (Mittwoch, den 8.2.2012) und für den Langzeitvergleich 7 Monate später einen Sommertag (Mittwoch, den 05.09.2012).

Um die Messwerte begrenzt zu glätten, wurden die aufgezeichneten 10 s Mittelwerte aus 24h jeweils über 60 s gleitend gemittelt. Zur Konsistenzprüfung der Messungen untereinander wurde anschliessend aus diesen 60 s Werten ein Mittelwert über jene installierten Messgeräte gebildet, welche durchgehend plausible Messwerte abgaben.

Diese Mittelwertbildung ergibt daher einen Referenzwert auf Basis der, mit unterschiedlicher Messtechnik gemessenen, plausiblen, lokalen Strömungsgeschwindigkeiten. Auf die Anwendung von Korrekturfaktoren auf die Messwerte, z.B. für den Wandabstand oder auf Basis des ermittelten Volumenstromes der Tracergasmessung bzw. eines generellen Offsets der Messwerte, wurde verzichtet.

Nachfolgend ist beispielhaft ein graphischer Vergleich der Auswertungen der Ergebnisse der verschiedenen Strömungsmessgeräte zum Mittelwert aller plausiblen Messgeräte am 08.02.2012 für den Tunnel Bözberg im Hufeisen-Messprofil dargestellt. Mit Ausnahme von FIV liegen alle Ergebnisse im Bereich von etwa ± 0.5 m/s des Mittelwertes.



Ziele und Erkenntnisse FOP

Das Erfassen der Strömungsgeschwindigkeit und deren Einbindung in die Leittechnik kann mit erheblichen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden sein. Das Ziel des Forschungsprojekts war es, diese schon immer als wichtig angesehenen Aspekte zu untersuchen und die entsprechenden Fragen zu beantworten.

Das Projekt wurde mit unerwarteten, funktionellen Störungen der Messgeräte konfrontiert, welche das Endergebnis nicht unwesentlich beeinflussten. So mussten zwei von den sechs Strömungsmessgeräten wegen Messwertfehlern und Drift bei den vergleichenden, statistischen Auswertungen ausgeklammert werden. Auch die übrigen vier Messgeräte wiesen im Verlaufe des Projektes verschiedene, funktionelle Probleme auf.

Trotzdem konnten die wesentlichen Ziele des Forschungsprojektes erreicht werden. So konnten insbesondere das Langzeitverhalten der Strömungsmessgeräte und die Plausibilität der Messwerte detailliert untersucht und dokumentiert werden.

Die Referenzmessungen des Volumenstromes zu Beginn und am Ende der Messkampagne mit der Tracergas-Methode der konstanten Emission unter Verkehr haben es nicht vollumfänglich erlaubt einen neutralen, zuverlässigen Referenzwert gegenüber den Strömungsmessgeräten zu bestimmen. Die systembedingte Trägheit der Gasanalysatoren und die zeitliche Verzerrung der Messwerte infolge der räumlich versetzten Eindüsung des Tracergases zur Konzentrationsmessstelle waren gegenüber den sehr schnell reagierenden Strömungsmessgeräten der unter Verkehr stark variierenden Strömungsverhältnisse zu gross. Die Tracergasmessungen erlaubten es jedoch im Rahmen ihrer systemeigenen Messungenauigkeit die Genauigkeit der lokal gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten zu beurteilen.

Über den Zeitraum der Messkampagne zeigte sich, dass einige Messgeräte hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Stabilität noch Optimierungspotential aufweisen. Dieser Umstand wurde von mehreren Lieferanten in ihrer Stellungnahme nach Abschluss der Messkampagne auch bestätigt und dürfte zukünftigen Messgeräten zu Gute kommen.

Kalibrierungen / Inbetriebsetzung

Alle durch die Lieferanten eingesetzten Messgeräte wurden von diesen in Werktests funktionell geprüft und vor dem Einbau in die beiden Tunnel entsprechend eingestellt und kalibriert.

Eine Nachkalibrierung vor Ort wurde nur bei den Punktmessgeräten von ACP und COD mittels eines Nullpunktabgleichs durchgeführt. Zudem wurde die Plausibilität der Messwerte mit einem zertifizierten, mobilen Anemometer verifiziert.

Die beiden Linienmessgeräte von DUR und SIC erfordern keine Kalibrierung. Sie sind mit einem softwaremässigen, automatischen Nullpunktabgleich ausgerüstet. Auch das Messgerät von FIV, einmal im Werk kalibriert, erfordert keinen weiteren Nullpunktabgleich. Dasselbe trifft auch auf das Staudruckrohr von SKN zu, welches mit einem automatischen Nullpunktabgleich der Druckzellen ausgerüstet ist.

Einfluss von Störgrössen

Installationsort:

Die Positionswahl der Strömungsmessgeräte in den beiden Messprofilen, Hufeisen und Zwischendecke, wurde den Lieferanten freigestellt und von diesen auf Erfahrungsbasis vorgenommen.

Umgebungsdruck:

Alle Ultraschallmessgeräte zeigten sich unempfindlich gegenüber Änderungen des Umgebungsdruckes. In die Auswertung der Staurohre floss der Umgebungsdruck korrekt ein.

Temperatur:

Physikalisch gesehen beeinflusst die Lufttemperatur alle Strömungsmessgeräte. Ein Teil der Messgeräte ist daher mit einer Temperatursonde vom Typ PT100 ausgerüstet, deren Messwert direkt in die Strömungsberechnung einfließt. Dies ist der Fall bei ACP, COD, DUR, FIV und SKN.

Die beiden Linienmessgeräte von DUR und SIC berechnen hingegen eine virtuelle Temperatur. Das Gerät von DUR weist zusätzlich eine eingebaute Temperatursonde auf, welche zur Plausibilisierung der virtuellen Temperatur dient. Das Messgerät von SIC hat keine eigene Temperaturmessung.

Die Robustheit der PT100 Temperatursonden ist daher massgebend für stabile Strömungsmessungen. Die massive Drift bei allen Geräten von COD zeigte das diesbezügliche Fehlerpotential auf, welches nach wenigen Monaten einen systematischen Messwertfehler von zirka 2.0 m/s verursachte.

Feuchtigkeit:

Starke Änderungen der Luftfeuchtigkeit, wie sie z. B. bei den Tunnelreinigungen aufgetreten sind, haben keinen erkennbaren Einfluss auf die Messwerte ausgeübt.

Mittelwertbildung bei Punktmessungen

Bei den Ultraschall-Punktmessgeräten ACP und COD sowie bei den Staudruckrohren SKN wird ein arithmetischer Mittelwert aus den beiden Messwerten eines Messquerschnitts berechnet. Diese Mittelwertbildung ist sowohl bei Richtungsverkehr wie auch bei Gegenverkehr plausibel und erfolgte durchgehend korrekt.

Die statistischen Auswertungen haben gezeigt, dass zwischen dem Mittelwert aus zwei Punktmessungen seitlich an den Tunnelwänden und der Einzelpunktmessung von FIV im Deckenbereich keine wesentlichen Unterschiede auftreten. Im Tunnel Flüelen mit Gegenverkehr wurde das Messgerät in der Tunnelmitte im Gewölbe montiert. Im Tunnel Bözberg hingegen, wo das Gerät über der Normalspur angebracht war, kam es bei einem Spurbau zu einer verminderten Anzeige der Strömungsgeschwindigkeit gegenüber allen anderen Messsystemen.

Der Nachteil dieser Einzelpunktmessung liegt vor allem in der Einbauposition im Deckenbereich, welche für den Einbau und Unterhalt jeweils den Einsatz von Hebeeinrichtungen und die Sperrung von beiden Fahrbahnen erfordert.

Integrationszeiten und Messwertglättung

In den eingesetzten Messgeräten waren unterschiedliche Prinzipien der Messwertglättung wie linear gleitender Mittelwert, T90, sowie weitere systemeigene Filterfunktionen implementiert. Allen Messgeräten gemeinsam ist, dass die Integrationszeiten und Messwertglättungen einstellbar sind.

Die vom FOP vorgegebene Integrationszeit von 10 Sekunden, welche auch der Ereignisfallvorgabe des Merkblatts Sensorik 23001-11320 entspricht, erscheint angemessen für Tunnel mit Richtungs- und Gegenverkehr. Mit 10 Sekunden wird im Ereignisfall eine ausreichende Reaktionszeit sichergestellt, um Lüftungsanlagen dynamisch zu regeln.

Wird hingegen die Strömungsmessung auch im Normalbetrieb zur Lüftungsregelung genutzt, sind längere Mittelungszeiten zulässig. Diese sind gemäss Merkblatt Sensorik 23001-11320 direkt auf der Leitebene gemäss den Anforderungen der unterschiedlichen Betriebszustände zu realisieren.

Messwertfehler

Das hardwaremässige oder softwaremässige Erkennen und Ausscheiden von Messwertfehlern schon innerhalb eines Messsystems ist von hoher Bedeutung, denn es hat sich gezeigt, dass aufgetretene Hardwarefehler, wie z.B. der Ausfall einer PT100 Sonde bei SKN oder eines korrodierten Sensor bei FIV nicht detektiert und gemeldet worden sind.

Dasselbe betrifft auch die Auswertesoftware einiger Geräte, welche z. B. starke Ausreisser (Fehlmessungen bei ACP, SIC) oder Deadlocks (FIV) nicht als Fehler erkannten.

Nur aufgrund der kontinuierlichen visuellen, täglichen Kontrolle der aufgezeichneten Messwerte konnten derartige Fehler im Forschungsbericht detektiert werden. Unbedingt erstrebend ist, dass solche Fehler künftig automatisch erkannt werden.

Bestimmung des Volumenstroms / Messgenauigkeit

In keinem der eingesetzten Strömungsmesssysteme wurden durch die Lieferanten Korrekturfaktoren zur Umrechnung der lokalen Messwerte auf eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit bzw. den Volumenstrom hinterlegt. Die Genauigkeit der durchgeführten Tracergas-Referenzmessungen war nicht ausreichend, um bezüglich derartiger Faktoren konkrete, quantitative Aussagen machen zu können.

Qualitativ geht aus den Auswertungen und Vergleichen über die gesamte Messperiode hervor, dass insbesondere die automatisch Nullpunkt-abgleichenden Linienmessgeräte DUR und SIC und die Staudruckrohre SKN über den Messbereich unter sich konsistente Messwerte abgaben.

Tendenziell wichen die Punktmessungen von ACP und COD leicht und mit ansteigender Strömungsgeschwindigkeit zunehmend von den Mittelwerten aller stabilen Messungen (ACP, DUR, SIC, SKN) ab. Da sich die Punktmessungen von COD verhältnismässig nah an der Wand befanden, ist diese geschwindigkeitsabhängige Abweichung möglicherweise auf die im Kapitel 2.3.2 beschriebene Reynoldszahl-Abhängigkeit zurückzuführen. Die Punktmessungen von ACP und SKN hingegen wiesen einen grösseren Wandabstand auf und lagen dadurch näher am „neutralen“ Punkt, bei welchem die lokale Geschwindigkeit der mittleren entspricht. Dadurch waren sie weniger einer Reynoldszahl-Abhängigkeit ausgesetzt.

Aus heutiger Sicht und auf Basis des aktuellen Wissenstandes kann unter üblichen Tunnelbedingungen und bei Einhaltung der Montagehinweise im TM Lüftung „Sensorik“ bei Linienmessungen mit automatischer Nullpunkt-abgleichung auf eine Referenzmessung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit verzichtet werden, ohne Gefahr zu laufen die Vorgaben der Richtlinie 13001 bezüglich der Messgenauigkeit nicht einzuhalten.

Bei Punktmessungen hingegen kann zurzeit noch nicht pauschal auf Referenzmessungen verzichtet werden. Dieser Vorbehalt kann möglicherweise jedoch zukünftig durch die Anwendung von empirisch bestimmten Korrekturfaktoren gerätespezifisch wegfallen.

Fernkontrolle der Messwerte

Die tägliche, vergleichende Analyse der verschiedenen Messwerte hat gezeigt, dass regelmässige, automatisierte Plausibilitätskontrollen der Messwerte erforderlich sind, um die Zuverlässigkeit eines Strömungsmesssystems dauerhaft zu gewährleisten.

Dazu gibt es u.a. folgende drei Ansätze:

1. Verfügt ein Tunnel über ein Längslüftungssystem, werden periodisch reine Längsströmungen erzeugt. Besteht zusätzlich ein Halbquer- oder Querlüftungssystem, ist dieses während der Prüfung zumindest abschnittsweise ausser Betrieb zu nehmen. Die Prüfungen finden nach Möglichkeit bei geringem Verkehrsaufkommen statt und erlauben eine vergleichende Plausibilitätsprüfung aller Messgeräte im betroffenen Lüftungsabschnitt.
2. Steht kein Längslüftungssystem zur Verfügung, können bei vielen Anlagen abschnittsweise Längsströmungen mit Halbquer- oder Querlüftungssystemen gezielt induzieren werden.
3. Bei Tunnelobjekten mit Halbquer- oder Querlüftungssystemen kann über eine Volumenstrombilanz der Zu- und Abluftventilatoren eine „theoretische“ Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum erstellt werden, welche z. B. mit der Metho-

de der kleinsten Fehlerquadrate ständig eine vergleichende Plausibilisierung aller Strömungsgeräte in einer Tunnelröhre erlaubt. Weicht eine Strömungsmessung zu stark von dieser Kurve ab, ist die Plausibilität der Messung zu hinterfragen.

Derartige, automatisierte Plausibilitätskontrollen sollten in die Leittechnik implementiert werden, um Messwertfehler frühzeitig festzustellen.

Fernparametrierbarkeit

Die Testinstallationen des FOP haben nur einen sehr begrenzten bzw. keinen Fernzugriff auf die Messgeräte zugelassen. Die Parametrierungen wurden vor Ort im Fahrraum mit portablen Computern oder mittels einer Funkbedienung (FIV) durchgeführt. Alle während der gesamten Messkampagne an den Strömungsmessgeräten aufgetretenen, hard- wie auch softwareseitigen Probleme mussten vor Ort und daher im Fahrraum gelöst werden. Dafür waren Teil- oder Vollsperrungen der Tunnel notwendig. Idealerweise sollten erforderlichen Zugriffe zur Kalibrierung der Strömungsmessgeräte per Fernzugriff durchgeführt werden können.

Langzeitverhalten der Anlage

Im Rahmen des FOP wurden die Messwerte der sechs Strömungsmessgeräte über 9 Monate täglich visuell ausgewertet und verglichen. Es hat sich gezeigt, dass nicht alle Geräte ein gleichmässiges, stabiles Langzeitverhalten hatten. Diesbezüglich ist insbesondere die richtungsgleiche Drift aller COD Geräte zu erwähnen.

Während der Messkampagne des FOP wurde eine Ultraschall-Messsonde eines FIV Geräts durch Salzkorrosion zerstört. Bei allen anderen Geräten wurden zwar Flugrostspuren und Ablagerungen festgestellt, eigentliche Korrosionserscheinungen traten jedoch nicht auf.

Unterhalt der Strömungsmessgeräte

Die Lieferanten der Strömungsmessgeräte von ACP, COD, DUR und FIV geben ein Wartungsintervall von 6 Monaten an. SIC (Edelstahlausführung) und SKN nennen ein Wartungsintervall von maximal 5 Jahren.

Das FOP hat gezeigt, dass zwischen der eigentlichen Wartung vor Ort und der Kontrolle der Plausibilität der Messwerte unterschieden werden muss. Bei einer kontinuierlichen automatischen Überwachung und Plausibilisierung der Messwerte sollten die Wartungsintervalle grösser als 1 Jahr sein. Anzustreben sind Wartungsintervalle von 2 Jahren. Störungen sind unmittelbar zu beheben. Mitberücksichtigt werden müssen u.a. spezielle Gegebenheiten und Betriebsbedingungen.

Zusammenfassung der Auswertungen

In der nachfolgenden Tabelle werden die wesentlichen Ergebnisse des FOP zusammengefasst. Diese Zusammenstellung gilt für die im FOP eingesetzten Geräte und deren Auswertungen während der Messkampagne. Nicht berücksichtigt sind etwaige, zwischenzeitliche Weiterentwicklungen und Optimierungen durch die Hersteller.

Bemerkungen zu den Auswertungen der Messkampagne der einzelnen Lieferanten der Messgeräte befinden sich im Anhang VI.

Abb. 1.1 Zusammenfassung der Auswertungen

Argument	ACP	COD	FIV	DUR	SIC	SKN
Abweichung von den Mittelwerten	Mittel o	Mittel o	Mittel o	Gering ++	Gering ++	Mittel o
Zeitliche Stabilität (Drift)	Hoch ++	Schwach --	Mittel o	Hoch ++	Hoch ++	Hoch ++
Ausreisser / Fehlmessungen	Mittel o	Gering ++	Stark --	Gering ++	Mittel o	Gering ++
Reaktivität / Instationäres Verhalten	Hoch ++	Hoch ++	Hoch ++	Hoch ++	Reduziert -	Hoch ++
Störung durch Verkehrseinfluss	Mittel o	Mittel o	Sensibel -	Schwach +	Schwach +	Schwach +
Korrosionsschutz	Sehr gut ++	Sehr gut ++	Sensibel -	Sehr gut ++	Sehr gut ++	Sehr gut ++
GESAMT	+	+	-	++	+	++

Empfehlungen

Empfehlungen an Hersteller - Konstrukteure

Die Erfahrungen des FOP mit der Installation, Inbetriebnahme und detaillierten Analyse über neun Monate erlauben nachfolgende, synthetisch aufgeführten Empfehlungen zu formulieren:

- Korrosionsfreie Montageelemente, Geräte und Sonden;
- Korrosionsgarantie;
- Mechanische Stabilität der Geräte;
- 24V DC Stromversorgung;
- Stabile elektronische und elektrotechnische Komponenten;
- Ausschluss von Fehlmessungen durch bauliche Gegebenheiten (z.B. Zwischendecke) und Betriebszustände (Verkehr, Ereignisse);
- Verbesserte Störungs- und Alarmanalyse mit Rückmeldung an die Leittechnik;
- Fernzugriff auf die Geräte;
- Wartungsintervall 1 Jahr oder länger;
- Abspeicherung der Konfiguration auf Leitebene und Möglichkeit des Reload;
- Nach Bedarf Schutzvorrichtung für Tunnelwaschung.

Empfehlungen an Planer

Im Rahmen der Planung von Strömungsmesseinrichtungen wird empfohlen ein besonderes Augenmerk auf folgende Punkte zu legen, welche im Verlauf des FOP festgestellt wurden:

- Definition der Messprofile, Einbau- und Betriebsbedingungen des Tunnels;
- Klare Spezifikation der Strömungsmessgeräte;

- Lieferanten müssen alle Einstellungen und Parametrierungen bekannt geben (keine Black Box);
- Sicherstellen, dass die Messwerte mit einer minimalen Mittelwertbildungszeit von 10 Sekunden im Ereignisfall vom Gerät zur Verfügung gestellt werden;
- Galvanische Trennwandler und Überspannungsschutz vorsehen;
- Vorgaben für die Inbetriebsetzung der Anlage und zertifizierte Kontrolle der Inbetriebnahme der Messinstallationen;
- Prozeduren für regelmässigen Funktionstests der Geräte;
- Saubere Trennung zwischen der Messwerterfassung im Tunnel und der Messwertverarbeitung in der Anlagenleittechnik (Korrekturfaktoren, gleitende Mittelwertbildung);
- Fernzugriff ab Anlagenleitebene auf die Parametrisierung der Geräte;
- Regelmässige, automatische Plausibilitätskontrollen der Messwerte. Abweichungen sind als Störung in die Ereignisliste der Leittechnik einzutragen;
- Notwendigkeit einer Referenzmessung begründen.

Empfehlungen an Betreiber

Die Erfahrungen des FOP erlauben die nachfolgenden Empfehlungen an die Tunnelbetreiber festzuhalten:

- Regelmässige Wartung gemäss den Empfehlungen des Lieferanten;
- Betriebsstatistik jedes einzelnen Geräts (Journal);
- Regelmässige Funktionskontrollen, Messwert-Plausibilisierung mit Referenz-Anemometer;
- In die Auswertung von Ereignissen ist das Verhalten der Strömungsmessgeräte mit einbeziehen.

Empfehlungen ASTRA

Aufgrund der Erfahrungen des FOP mit den Strömungsmessgeräten und den Resultaten der Messkampagne sollten die folgenden Vorgaben in der Richtlinie Lüftung und dem Technische Merkblatt Sensorik die nachfolgenden Vorgaben zu überprüfen, respektive ergänzt werden.

Richtlinie ASTRA 13 001 „Lüftung der Strassentunnel“

- Automatische Plausibilitätskontrollen der Messwerte erforderlich, wenn diese in die Steuerung eingebunden sind;
- Resultate der Plausibilitätskontrolle sind zu archivieren;

Merkblatt 23001-11320 „Sensorik“

- Einbauhöhe: zwischen Linienmessgeräten und Punktmessgeräten unterscheiden;
- Minimale Einbauhöhe von Punktmessgeräte ab Gehweg ≥ 2.50 m
- Minimaler Wandabstand ≥ 30 cm
- Zu kleiner Deckenabstand kann bei Linienmessungen zu Fehlmessungen durch Reflexionen führen, als Hinweis aufnehmen;
- Korrekturfaktoren zur Volumenstrombestimmung in der Leittechnik hinterlegen;
- Abstand zu den Strahlventilatoren kann in Abhängigkeit ihrer Schubleistung bestimmt werden;

1 Ausgangslage

1.1 Einleitung

In Strassentunneln mit Abluftklappen zur konzentrierten Rauchabsaugung im Ereignisfall und in längsgelüfteten Tunneln, bei welchen sich Tunnelbenutzer beidseitig des Ereignisortes befinden können (Gegenverkehr oder Stausituationen), ist eine zuverlässige und genaue Kontrolle und Regelung der Längsgeschwindigkeit der Luft im Fahrraum notwendig. Damit wird eine unkontrollierte Rauchausbreitung verhindert und die Selbstrettungsbedingungen der Tunnelbenutzer verbessert.

Zuverlässige Messdaten der Strömung im Fahrraum sind erforderlich, damit im Ereignisfall Strömungszustände in einem engen Toleranzband eingestellt werden können. Ein entsprechender Regelkreis steuert dafür die Ventilatoren mittels eines Soll-Ist Vergleichs der Strömungsgeschwindigkeit am Ereignisort.

Da Strömungsmessgeräte (SMG) im Ereignisfall in der Regel steuerungstechnisch eingebunden sind, ist es von grosser Wichtigkeit, dass diese immer korrekt funktionieren und dementsprechend überwacht werden.

Die praktische Erfahrung zeigt jedoch, dass die zuverlässige Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit und deren Einbindung in die Steuerung auch heute noch mit erheblichen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden sein kann.

1.2 Anforderungen an das Forschungsprojekt

Im Rahmen des vom ASTRA finanzierten Forschungsprojektes 2010/025 (FOP) wird die Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit sowie die Messwertverarbeitung analysiert und bewertet. Die Rohdaten der Messwertgeber müssen so verarbeitet werden, dass sinnvoll gefilterte und gemittelte Messwerte den Steueralgorithmen zur Verfügung stehen.

Mit der Zielsetzung einen zuverlässigen und robusten Betrieb des Messsystems Strömungsmessung generell und gewerksübergreifend gewährleisten zu können, werden Vorschläge für eine einheitliche Festlegung der Anforderungen an die entsprechenden Komponenten und an die Auswertung der Messdaten ausgearbeitet.

Schwerpunkte des FOP

- Vergleichende Untersuchung verschiedener Messsysteme im Fahrraum,
- Messwertverarbeitung,
- Praktische Umsetzung.

Auf Basis der Ergebnisse des Forschungsprojektes werden die Inhalte der betroffenen Technischen Merkblätter des ASTRA geprüft und aktualisiert.

Nutznieser der Resultate des FOP sind

- das ASTRA,
- die Planer von Lüftungstechnischen und leittechnischen Anlagen,
- Eigentümer und Betreiber,
- die Unterhaltssdienste der Tunnelanlagen,
- die Hersteller der Messgeräte.

1.3 Strömungsmessgeräte

Von den unterschiedlichen Messtechniken und Messgeräten zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit wurden im Rahmen des FOP insbesondere die zurzeit in Schweizer Strassentunneln meist genutzten Messtechniken untersucht. So werden z.B. die bis

vor wenigen Jahren noch verbreiteten Flügelanemometer nicht mehr berücksichtigt, da sie aufgrund ihres Wartungsaufwandes heute nicht mehr eingesetzt werden. Das FOP beschränkt sich daher auf zwei Messprinzipien, welche im Detail untersucht werden:

- Staudruckrohre,
- Ultraschallmessgeräte.

Zudem werden bei den Ultraschallmessgeräten zwei Installationsanordnungen untersucht:

- Punktmessung,
- Linienmessung.

Das FOP zieht weiterhin nicht nur die vorwiegend in Schweizer Strassentunneln eingebauten Strömungsmessgeräte in Betracht, sondern auch Geräte, welche im umliegenden Ausland eingesetzt werden.

1.4 Ziele des FOP

1.4.1 Ziele des Forschungsprojektes

Die im Forschungsprojekt "Strömungsmessungen in Strassentunneln" definierten Ziele sind nachfolgend aufgeführt:

- Kalibrierung der Messgeräte im Labor und im Tunnel;
- Einfluss von Störgrössen wie lokale Strömungsphänomene (Ablösungen, Turbulenzen), Temperatur, Umgebungsdruck, Feuchtigkeit etc.;
- Mittelwertbildung bei Punktmessungen;
- Umrechnung der Messwerte auf eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit über den ganzen Fahrraumquerschnitt bzw. den Volumenstrom unter Berücksichtigung der Lage der Messsonden im Tunnelprofil und der massgebenden Verkehrszustände (ohne Verkehr, fliessender Richtungs- bzw. Gegenverkehr, stehender Verkehr);
- Optimale Integrationszeit der Messwerte zur Messwertglättung und Integrationsmethode im Messgerät oder in der Auswerteeinheit zur Bestimmung aussagekräftiger gleitender Mittelwerte;
- Erkennen und Ausscheiden von Messwertfehlern (Plausibilisierung der Einzelresultate und Vergleich mit weiteren Messungen, z. B. Luftmengenbilanz unter Einbezug von Volumenstrommessungen an den Abluftventilatoren);
- Messwertglättung und Glättungsmethode auf Leitebene nach den spezifischen Bedürfnisse;
- Nutzen und Notwendigkeit der Parametrierbarkeit ab Leitebene bei der Inbetriebnahme und Abgleichen an das Tunnelprofil;
- Kalibriermethodik während der Inbetriebsetzung einer neuen Anlage zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit ohne aufwendige Referenzmessung (z. B. Netzmessung, Tracergas-Messung, etc.);
- Langzeitverhalten der Anlage, Nachkontrolle der Plausibilität der Strömungsmessung, allgemeine und besondere Wartungserfordernisse (z. B. zusätzliche Reinigung bei hoher Schmutzbelastung oder Streusalzeinfluss);

Für die praktische Umsetzung werden Untersuchungen in zwei typischen Tunnelprofilen, Hufeisenprofil ohne Zwischendecke und Rechteckprofil in Tunneln mit Zwischendecke oder Tagbautunneln vorgesehen. Einbezogen wurden sowohl Tunneln mit Gegenverkehr sowie mit Richtungsverkehr.

Die Rohwerte der Strömungsmessgeräte werden mit Datenloggern aufgezeichnet und danach mit unterschiedlichen Methoden integriert, gemittelt und geglättet. Weiterhin ist vorgesehen parallel mit CFD-Berechnungen die Tunnelabschnitte zu modellieren und die Resultate mit den konsolidierten Messdaten zu vergleichen, wobei die Verkehrszustände, fliessender Verkehr, stehende Fahrzeuge und leerer Tunnel zu betrachten sind.

1.4.2 Änderungen im Forschungsprojekt

Die Begleitkommission hat während des Projektablaufs die nachfolgenden Änderungen beschlossen.

Als zusätzliche Ziele wurde aufgeführt:

- Rationalisierung des Unterhalts der Strömungsmessgeräte (z.B. bei Tunnelreinigung);
- Vergleichende Angaben zu den Kosten von Punkt- und Linienmessgeräte.

Aus logistischen Gründen wurde beschlossen anstatt von zwei kurzen Messkampagnen von jeweils 15 Tagen in drei Tunneln eine Langzeitmesskampagne in zwei Tunneln über mehrere Monate durchzuführen, welche die saisonalen, meteorologischen Bedingungen einschliesst.

Auf die ursprünglich vorgesehenen CFD-Berechnungen wurde verzichtet und es wurde beschlossen stattdessen Tracergasmessungen bei Beginn der Messkampagne und vor deren Abschluss mit dem Ziel durchzuführen jeweils einen neutralen Referenzwert zu erhalten. Um den bestmöglichen Vergleich mit den realen Betriebsbedingungen herzustellen, sollten diese unter Verkehr durchgeführt werden.

Kurz nach Beginn der Umsetzung des Forschungsprojektes im November 2011 hat die Firma Codel Ltd mit Verspätung Interesse bekundet mit ihren Strömungsmessgeräten ebenfalls teilzunehmen. Dadurch und durch die vorgegebenen Sperrnächte dauerte die eigentliche, vergleichende Messkampagne vom 18.01.2012 bis zum 29.10.2012.

1.5 Richtlinien und Merkblätter

1.5.1 Richtlinie Lüftung

Die Schweizer Richtlinie „Lüftung der Strassentunnel“ des Bundesamtes für Strassen ASTRA [1] definiert im Kapitel 8 „Ausstattungen“ unter anderem folgende Anforderungen an Strömungsmessungen:

Kapitel 8.2.1 Normalbetrieb

Strömungsmessung (siehe Kap. 8.2.2)

Die Messung der Luftströmung im Fahrraum dient zusammen mit den übrigen Messwerten zur Steuerung der Lüftungsanlage und als Kontrolle der Wirkung der Lüftung.

In jeder Tunnelröhre mit mechanischer Lüftung ist pro Lüftungsabschnitt mindestens in einem Fahrraumquerschnitt die Strömungsrichtung und der Volumenstrom bzw. die mittlere Strömungsgeschwindigkeit am Messquerschnitt im Fahrraum zu ermitteln.

Kapitel 8.2.2 Ereignisfall

Strömungsmessung

Entsprechend den Anforderungen in den Kap. 7.2.3.3 und 7.2.4.2 sind die Daten der Luftgeschwindigkeitsmessung in die Steuerung einzubeziehen, um im Ereignisfall die Strömung im Fahrraum regeln zu können. Wird ein Strömungsmesswert zur Steuerung im Ereignisfall verwendet, muss dessen Plausibilität mit 3 unabhängigen Messungen ermittelt werden können.

Kapitel 8.2.3 Anforderungen

Mindestanforderungen an Messbereich und -genauigkeit

Alle Messgeräte müssen für den Einsatz in einem Strassentunnel konzipiert sein und sie müssen die folgenden Mindestanforderungen erfüllen:

Abb. 8.1 Mindestanforderungen an die Messgeräte

Messgrösse	Messbereich	Messgenauigkeit (Gerätespezifikation)
Strömungsgeschwindigkeit		
- Fahrraum	-12 bis +12 m/s	± 0.2 m/s bei 3 m/s
- Kanäle, Schächte	entspr. Auslegung	± 5 % des Endwerts

1.5.2 Technisches Merkblatt Sensorik

Das Technische Merkblatt Bauteile Lüftung 23001-11320 betreffend der Sensorik [2] aus dem Fachhandbuch BSA des Bundesamtes für Strassen ASTRA spezifiziert im Kapitel 2.1 vertieft die Strömungsmessung:

2.1 Strömungsmessung

Das Ziel der Strömungsmessung ist die Bestimmung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit bzw. des Volumenstroms am Messquerschnitt.

2.1.1 Gerätewahl

Strömungsmessungen in Tunneln können entweder mit Punktmessgeräten oder mit Linienmessgeräten realisiert werden.

Der Strömungsmesswert eines Messquerschnittes ergibt sich entweder aus dem Messwert eines Linienmessgerätes oder von zwei gegenüberliegenden Punktmessgeräten (Mittelwert).

2.1.2 Anordnung

Die Anordnung von Strömungsmessgeräten erfolgt mindestens 30 cm unter der Decke in ca. 4.50 m Höhe, um Störungen durch den Schwerverkehr zu vermeiden.

Die Strömungsmessung hat an Orten zu erfolgen, wo auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden kann. In der Regel muss es möglich sein, Strömungen in beiden Richtungen messen zu können (z. B. ausnahmsweiser GV). Als Richtwerte für Mindestabstände zu Strömungsmessgeräten gelten:

- Nächster Abstand zu Ausstellbuchten, 100 m
- Abstand zu Strahlventilatoren, 100 m
- Abstand zu grossen Verkehrsschildern, Änderungen des Fahrraumquerschnitts oder ähnlichen Störstellen, 40 bis 70 m

Zur Steuerung im Ereignisfall sind nach der Richtlinie 13001 „Lüftung der Strassentunnel“ pro Strömungsmesswert 3 unabhängige Messungen zur Plausibilisierung erforderlich.

Längslüftung:

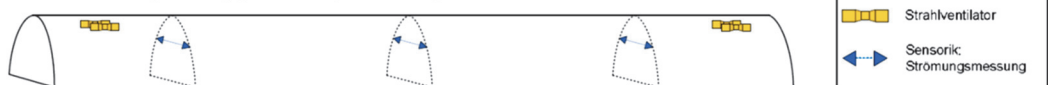
Drei Strömungsmessungen sind möglichst gleichverteilt über den Lüftungsabschnitt anzuordnen.

Lüftung mit Absaugung:

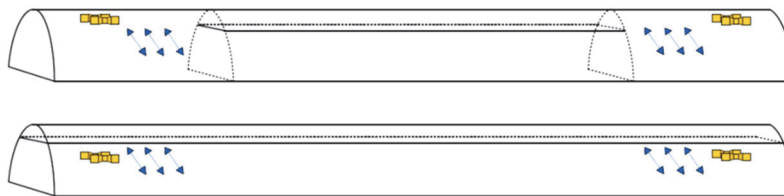
In jeder Portalnähe ist eine in sich plausibilisierbare Gruppe von 3 Strömungsmessungen anzuordnen, um die erforderliche Information über den Geschwindigkeitssprung an der Absaugstelle zu erhalten. Weist ein oder mehrere Abluftkanalabschnitt(e) eine Länge von mehr als 1000 m auf, so dass die Leckagen des Abluftkanals einen spürbaren Einfluss auf die Längsgeschwindigkeit der Luft im Fahrraum ausüben, ist eine weitere Gruppe von 3 Strömungsmessungen in der Mitte dieses Abschnittes anzuordnen. Die Anzahl der Strömungsmessungen bei Lüftung mit Absaugung ergibt sich daher wie folgt:

$$N_{\text{Strömungsmessungen}} = 2 \cdot 3 + N_{\text{Abluftkanalabschnitt} > 1000\text{m}} \cdot 3$$

Tunnel mit Längslüftung (ein Lüftungsabschnitt)



Tunnel mit Absaugung und Abluftkanalabschnitt ≤ 1000 m



Tunnel mit Absaugung und Abluftkanalabschnitt > 1000 m



Anordnung der Strömungsmessungen

2.1.3 Anforderungen

Jede Strömungsmessung muss über eine Lufttemperaturerfassung verfügen, um die Strömungsgeschwindigkeit Temperatur- bzw. Dichte-korrigieren zu können. Damit wird ein einheitlicher Referenzzustand in der Tunnelröhre zugrunde gelegt, welcher die Vergleichbarkeit und/oder Mittelung der Messwerte erlaubt.

Messwert	Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit als Mass für den Volumenstrom, Lufttemperatur
Mittelwertbildung im Normalbetrieb	30 s
Mittelwertbildung im Brandfall	10 s
Ansprechzeit T90	10 s (nach 10 s muss mindestens 90% des Endwertes erreicht sein)
Messbereich	siehe Richtlinie 13001 „Lüftung der Strassentunnel“
Messgenauigkeit	siehe Richtlinie 13001 „Lüftung der Strassentunnel“
Schutzart	IP65 im Fahrraum
Begleitheizung	nach Bedarf im Portalbereich zur Vermeidung von Vereisungen
Kalibrierung	Die Bestimmung/Festlegung von Korrekturfaktoren zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum ist zwingend.
Wartungsintervall	≥ 1 Jahr
Eingänge/Ausgänge	- Messwert (mit parametrierbarer Mittelwertbildung) - Strömungsrichtung - Sammelmeldung Störung
Ereignis	Strömungsmessungen in Ereignisnähe sind nicht zu berücksichtigen

2 Grundlagen

2.1 Übersicht über die Verfahren

Das Erfassen der Strömungsgeschwindigkeit und deren Einbindung in die Leittechnik kann mit erheblichen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden sein. Das Ziel des Forschungsprojekts ist es Messprinzipien, Staudruck und Ultraschallmessung sowie die Anordnung als Punkt- oder Linienmessung zu vergleichen.

2.1.1 Staudruckmessung

Die Messung beruht auf dem Staudruckprinzip, das heisst der Bestimmung der Differenz des Totaldrucks zum statischen Druck an der Messstelle. Für eine inkompressible Gasströmung mit einer Machzahl < 0.3 ist der Staudruck proportional zum Quadrat der den Sensor frontal anströmenden Geschwindigkeit eines Gases mit definierter Dichte. Über einen Druckmessumformer wird der Staudruck ermittelt. Die Dichte der Luft im Fahrraum ist abhängig vom Umgebungsdruck und der Lufttemperatur, welche ebenfalls beide gemessen und bei der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Bei einem bidirektionalen Differenzstaudruckrohr wird die Strömungsgeschwindigkeit aus der Differenz der beiden Druckwerte am Staupunkt und im Kielwasser abgeleitet.

Ein Nullabgleich-Verfahren schliesst periodisch die beiden pneumatischen Messkanäle kurz. So kann der Differenzdruck auf null gesetzt werden, um ein Driften des Messwertes zu vermeiden.

2.1.2 Ultraschallmessung

Die Strömungsgeschwindigkeit wird nach dem Laufzeitverfahren ermittelt. Das Messsystem verfügt dafür über kombinierte Sender/Empfängereinheiten. Wenige Millisekunden lange Ultraschallimpulse werden abwechselnd von den Sender- zu den Empfängerteilen gesendet. Dabei sind je nach Richtung und Geschwindigkeit der Luftströmung im Tunnel die Laufzeiten aufgrund des Doppler-Effektes unterschiedlich lang. Aus den Laufzeitmodulierungen lassen sich die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung bestimmen. Messsysteme mit Laufzeitmessungen in beide Richtungen erlauben die Berechnung der Lufttemperatur, welche aufgrund dieser indirekten Bestimmung als „virtuelle Temperatur“ bezeichnet wird. Der Einfluss der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit auf den Messwert lässt sich dadurch ausschalten. Die Messungen sind nahezu unabhängig von der Luftdichte und Luftfeuchte.

2.2 Übersicht über die Messtypologien

2.2.1 Linienmessung

Bei dieser Messkonfiguration nach dem Ultraschallprinzip wird querend entlang einer Linie von Tunnelwand zu Tunnelwand gemessen. In der Regel befinden sich die beiden Messgeräte in einem Winkel von 45° bis 60° versetzt an den beiden Tunnelwänden. Gemäss dem Technischen Merkblatt Sensorik 23001-11320 [2] sind die Messgeräte in einem Abstand von mindestens 30 cm unter der Tunneldecke anzuordnen. Um die Messungen nicht durch die durchfahrenden Fahrzeuge zu stören, sind die Messgeräte in ca. 4.50 m Höhe anzubringen.

Bei dieser Messanordnung wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit aus dem Messwert diagonal über das Tunnelprofil und unter Anwendung eines Umrechnungsfaktors zur Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofils in Abhängigkeit des Deckenabstandes ermittelt.

2.2.2 Punktmessung

Bei der Punktmessung werden jeweils zwei Strömungsmessgeräte (Staudruck oder Ultraschall) in einem Messquerschnitt beidseitig an den Tunnelwänden montiert. Gemäss

dem Technischen Merkblatt Sensorik 23001-11320 [2] sind auch die Punktmessgeräte in einem Abstand von mindestens 30 cm unter der Tunneldecke in ca. 4.40 m Höhe anzuordnen.

Bei dieser Messanordnung wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit aus dem Mittelwert der beiden Einzelmessungen und unter Anwendung eines Umrechnungsfaktors zur Berücksichtigung des Geschwindigkeitsprofils in Abhängigkeit der Messorte ermittelt.

2.3 Physikalische Grundlagen

2.3.1 Einfluss von Temperatur, Druck und Luftfeuchte

Grundsätzlich wird die Beeinflussung der Strömungsmessgeräte durch die Grössen Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck wie folgt bewertet:

- Die **Lufttemperatur** beeinflusst direkt die Schallgeschwindigkeit, wie die Isentropengleichung aufzeigt:

$$c = \sqrt{\kappa RT}$$

mit

c – Schallgeschwindigkeit

κ – Isentropenexponent (Luft 1.4)

R – spezifische Gaskonstante (Luft 287 J/kg/K)

T – absolute Temperatur in Kelvin

Sie ist daher für das Ultraschallverfahren eine Grösse (da sich der Ultraschallimpuls mit der Schallgeschwindigkeit und der überlagerten Strömungsgeschwindigkeit ausbreitet) und erfordert bidirektionale Laufzeitmessungen, um ihren Einfluss auszuschalten.

- Weiterhin hängt auch die Luftdichte umgekehrt proportional von der absoluten **Lufttemperatur** ab und ist proportional zum **Luftdruck**:

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

Die Luftdichte fliesst in die Bernoulli-Gleichung ein, welche für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit von Staurohren im inkompressiblen Bereich ($M < 0.3$) genutzt wird:

$$dp = \frac{\rho}{2} v^2 \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot dp}{\rho}}$$

- Der Einfluss der relativen **Luftfeuchte** auf die Strömungsmessgeräte ist in der Regel so klein, dass er vernachlässigt werden kann.

2.3.2 Strömungsprofile

Näherungsweise entspricht die Strömung in einem Strassentunnel einer turbulenten Rohrströmung, wenn man von den Störeinflüssen der Fahrzeuge absieht und einen leeren Tunnel betrachtet.

Der Umschlag von laminarer zu turbulenter Rohrströmung findet etwa bei folgender, kritischer Reynoldszahl statt:

$$Re_D^{krit} = \frac{u \cdot D}{\nu} = 2000$$

mit

u – Strömungsgeschwindigkeit

D – Durchmesser

ν – kinematische Viskosität

Aufgrund der grossen Durchmesser ist die Strömung in Strassentunneln immer turbulent.

Das turbulente Strömungsprofil einer Rohrströmung kann mit einer einfachen Potenzformel gut angenähert werden:

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{n}}$$

mit

u – Strömungsgeschwindigkeit

u_{\max} – Strömungsgeschwindigkeit in Tunnelmitte

R – Radius des Tunnel ($R=D/2$)

y – Wandabstand

$n = 1/6$ für $Re_D = 4 \times 10^3$ (ca. 0.10 m/s)

$n = 1/7$ für $Re_D = 10^5$ (ca. 0.25 m/s)

$n = 1/9$ für $Re_D = 10^6$ (ca. 3.00 m/s)

Das Profil der Strömungsgeschwindigkeit weist bis etwa $Re_D=106$ (ca. 3 m/s) eine Reynoldszahl-Abhängigkeit auf, wenn die Wandrauhigkeit die Viskosität nicht dominiert. Dieser Umstand kann mit folgender Ungleichung abgeschätzt werden:

$$u_* \frac{k}{\nu} \approx 15 < 70$$

mit

u_* – Schubspannungsgeschwindigkeit

k – Wandrauhigkeit (ca. 2 mm für Tunnelröhren)

ν – kinematische Viskosität

Für eine Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s ergibt sich ein Wert von ca. 15, womit sich die Tunnelströmung im Übergangsbereich zwischen einer hydraulisch glatten und einer rauen Oberfläche befindet und der Reynoldszahleinfluss in der Tat noch ausgeprägt ist.

Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit wird das Profil daher bauchiger. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2.1 graphisch dargestellt, in welcher die lokale Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Wandabstandes zur mittleren Geschwindigkeit aufgetragen ist.

Das Ziel der Strömungsmessung ist es eben diese mittlere Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen. Wie aus Abb. 2.1 hervorgeht, wäre es gemäss der Theorie der Rohrströmung ideal Punktmessungen im „neutralen Punkt“ in einem Wandabstand von ca. 80 cm anzuordnen, im welchem die lokale Strömungsgeschwindigkeit Reynoldszahl-unabhängig immer der mittleren Strömungsgeschwindigkeit entspricht. Dem stehen jedoch in der Regel die Anforderungen des Lichtraumprofils entgegen, welche es nicht erlauben BSA mit einem so grossen Wandabstand anzuordnen.

Abhängig von ihrem konstruktiven Aufbau weisen die Messköpfe der eingesetzten Punktmessgeräte in der Tat geringere Wandabstände von 14 bis 36 cm auf. Dies bedeutet, dass die Punktmessgeräte zur Berücksichtigung des Reynoldszahleffektes im Prinzip geschwindigkeitsabhängige Korrekturfaktoren in der Grössenordnung von 0.80 bis 0.90 hinterlegt haben müssten. Wie aus Abb. 2.2 hervorgeht, welche die Geschwindigkeitsprofile im wandnahen Bereich wiedergibt, wirkt sich der Reynoldszahleinfluss besonders stark bei geringen Abständen von ca. 10 bis 20 cm aus.

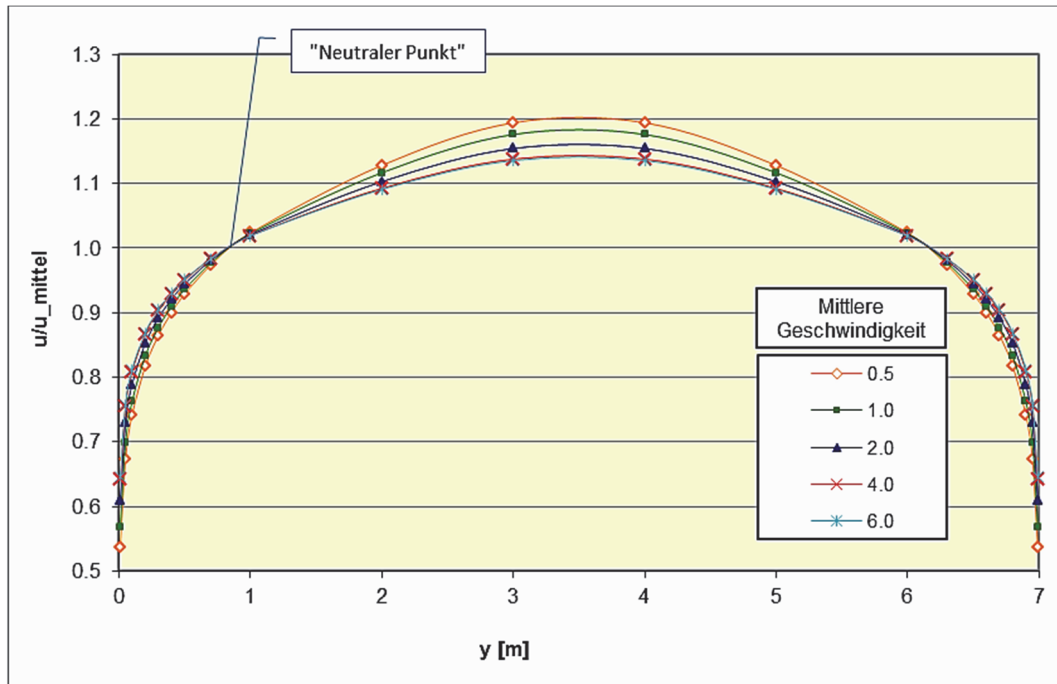


Abb. 2.1 Reynoldsabhängigkeit einer Rohrströmung (Durchmesser 7 m, Strömungsgeschwindigkeit 1 bis 6 m/s).

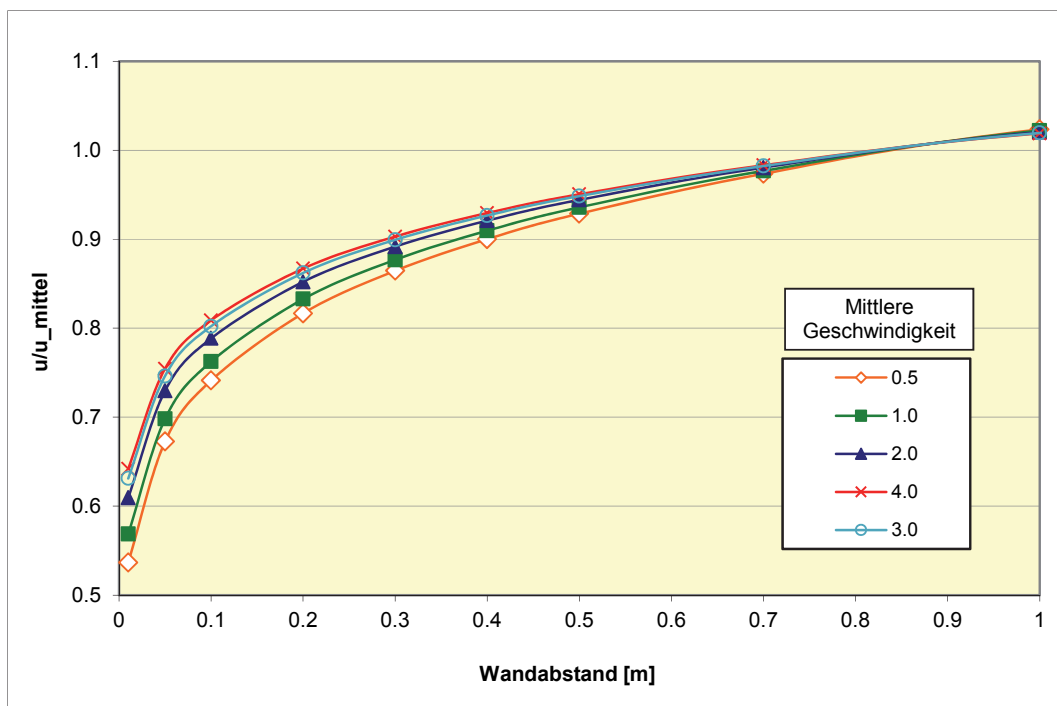


Abb. 2.2 Reynoldsabhängigkeit einer Rohrströmung, wandnaher Bereich.

2.3.3 Bestimmung Volumenstrom

Volumenstrom

Wie zuvor dargelegt, können zwischen der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit und dem effektivem Volumenstrom im Tunnel Unterschiede auftreten. Diese sind mit gerätespezifischen und tunnelgeometrischen Korrekturfaktoren abzugleichen. Zu ihrer Bestimmung muss das Tunnelprofil bekannt sein oder es sind Kalibriermessungen erforderlich. Kalibriermessungen dienen dazu den Volumenstrom im Tunnel präzise zu ermitteln. Im Zustand ohne Verkehr sind z. B. Netzmessungen geeignet.

Bei Punktmessgeräten ist je nach Wandabstand des Messkopfes und Aufbau des Gerätes (Sockel, Abstandblech) gegebenenfalls ein von der Strömungsgeschwindigkeit abhängiger, variabler Korrekturfaktor vorzusehen, um der oben erläuterten Reynoldsabhängigkeit Rechnung zu tragen.

Theoretische Korrekturfaktoren

In der nachfolgenden Graphik sind die theoretischen Korrekturfaktoren aufgrund des Wandabstandes und der Strömungsgeschwindigkeit wiedergegeben. Die angegebenen Wandabstände beziehen sich auf die installierten Punktmessgeräte ACP, COD, FIV und SKN unabhängig deren Messtechnik, Geräteaufbau und Form, sowie der implementierten Auswertelogik (Messwertglättung und Filterung).

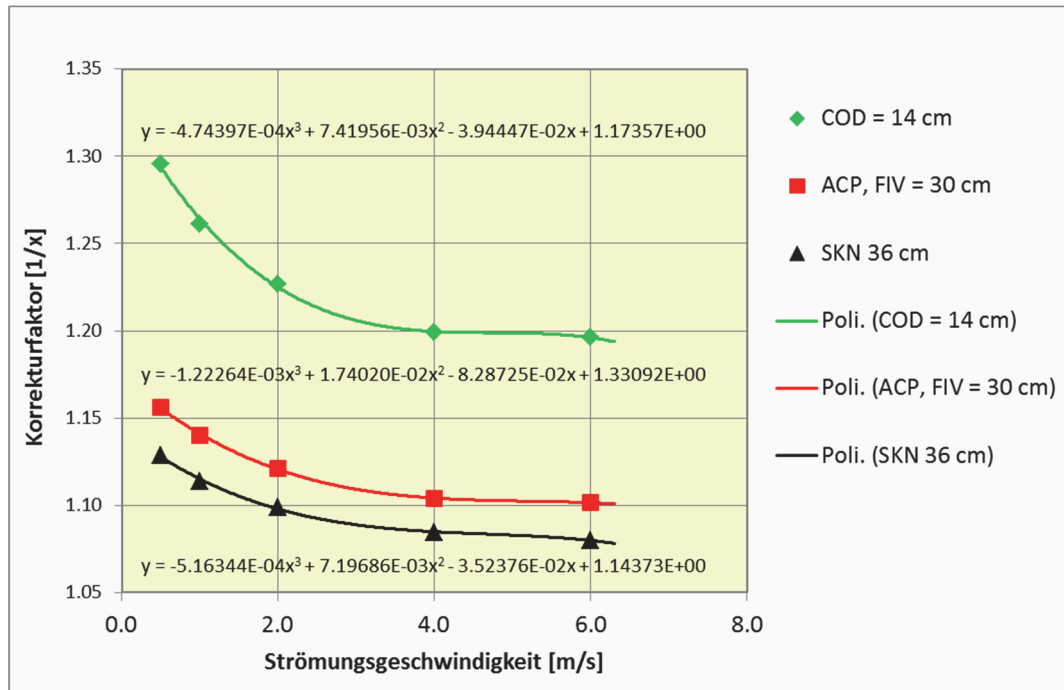


Abb. 2.3 theoretische Korrekturfaktoren unter der Berücksichtigung des Wandabstands

In keinem der Strömungsmessgeräte wurden, wie vom FOP vorgegeben, keine theoretischen Korrekturfaktoren zur Bestimmung des Volumenstroms im Tunnel hinterlegt.

2.4 Auswahl der Tunnel

Die Tunnelauswahl für das FOP wurde aufgrund einer Tunnelmatrix vorgenommen, welche von den Mitgliedern der Begleitkommission erarbeitet wurde. Diese befindet sich im Anhang I. Nachfolgende Kriterien wurden darin aufgenommen:

Als wichtigstes Kriterium für die Tunnelauswahl wurde festgelegt, dass der Tunnel ein richtlinienkonformes Normalprofil aufweisen muss, da dieses bei der Strömungsmessung einen massgeblichen Parameter darstellt.

Als zweiter Punkt wurde definiert, dass die Untersuchungen in Tunneln sowohl mit einem Hufeisenprofil (HU) in Portalnähe wie auch mit einem Rechteckprofil mit Zwischendecke (ZD) im Innenbereich durchzuführen sind. Da in der Regel beim Profilwechsel ein Querschlag vorhanden ist, lässt es diese Anordnung zu, von einem dort untergebrachten Messschrank die beiden Messquerschnitte (im Bereich HU und ZD) bedienen zu können. Weiterhin erlaubt es eine derartige Konfiguration den Installationsaufwand zu reduzieren.

Als dritten Punkt sollen Situationen mit Gegenverkehr (GV) und Richtungsverkehr (RV) berücksichtigt werden. Als besonders interessant wurden Tunnelobjekte mit zwei Röhren bewertet, bei welchen neben Richtungsverkehr zwischendurch auch einmal Situationen

mit Gegenverkehr vorkommen.

Zusätzlichen Punkt positiv bewertet wurde, wenn der Querschlag von aussen oder über einen Sicherheitsstollen zugänglich ist, da dies die Installation und den Unterhalt der Messeinrichtung vereinfacht.

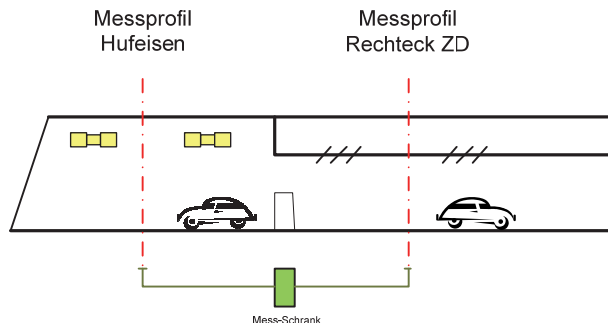


Abb. 2.4 Schematische Anordnung Messprofile

Die Begleitkommission hat aufgrund der Auswahlkriterien die nachfolgenden beiden Tunnel ausgewählt:

Tunnel Bözberg (RV)

- DTV 46'400 (2011)
- 2 Röhren, Richtungsverkehr
- Gesamtlänge 3'700 m
- 2 x 2 Fahrbahnen, Gesamtbreite 7.75 m pro Röhre
- Fahrraum Profil Zwischendecke 47.0 m²
Fahrraum Hufeisenprofil 57.6 m²
- Nordportal 456 m ü.M.
Südportal 456 m ü.M.
Längsgefälle von Norden nach Süden 1.62%
- Eröffnet: 1996

Tunnel Flüelen (GV)

- DTV 14'400 (2011)
- 1 Röhre, Gegenverkehr
- Gesamtlänge 2600 m
- 2x1 Fahrbahn, Gesamtbreite 7.50 m
- Fahrraum Profil Zwischendecke 51.7 m²
Fahrraum Hufeisenprofil 64.6 m²
- Nordportal 465 m ü.M.
Südportal 436 m ü.M.
Längsgefälle von Norden nach Süden 1.12 %
- Eröffnet: 2005



Abb. 2.5 Lage der beiden Tunnel

2.5 Lüftungsinstallationen in den Tunneln

2.5.1 Tunnel Bözberg (RV)

Der 3'790 km lange, zweiröhrige Bözbergtunnel verfügt an beiden Portalen über eine Lüftungszentrale. Die Abluft wird über Abluftschlitze in der Zwischendecke abgesaugt, welche mit im Brandfall schmelzenden Kunststoffprofilen versehen sind und somit lokal eine verstärkte Rauchabsaugung ermöglichen sollten. Die Zuluft wird über einen, unter der Fahrbahn befindlichen Zuluftkanal in den Fahrraum eingeblasen. In keiner der beiden Tunnelröhren sind Strahlventilatoren vorhanden.

Die Tunnellüftung verfügt über die nachfolgenden Betriebszustände:

- Natürliche Lüftung
- Halbquerlüftung
- Querlüftung
- Ereignislüftung mit verteilter Absaugung bzw. konzentrierter Absaugung nach dem Ausschmelzen von Kunststoffprofilen durch die Brandeinwirkung.

2.5.2 Tunnel Flüelen (GV)

Der 2'594 km lange Umfahrungstunnel Flüelen hat in der Mitte eine einzige Abluftzentrale mit 2 Abluftventilatoren sowie einen 211 m hohen Abluftkamin. Die Abluft wird über in die Zwischendecke integrierte 31 Abluftklappen abgesaugt, welche in einem Abstand von ca. 70-75 m eingebaut sind.

Die Zuluft strömt durch die beiden Portale in den Tunnel. Am Nordportal sind zusätzlich 4 reversible Strahlventilatoren montiert.

Die Tunnellüftung verfügt über die nachfolgenden Betriebszustände [3]:

- Natürliche Lüftung
- Mittenabsaugung
- Portalabsaugung
- Mechanische Längslüftung
- Mechanische Längslüftung mit Portalabsaugung
- Lokale Absaugung im Ereignisfall

- Entrauchung Portalbereiche

2.6 Wahl der Messgeräte

Die Wahl der Messgeräte für das FOP wurde aufgrund einer Gerätematrix vorgenommen, welche von den Mitgliedern der Begleitkommission erarbeitet wurde. Diese befindet sich im Anhang II und umfasst die in den Schweizerischen Tunneln vorwiegend installierten Geräte. Die nachfolgenden Messgeräte wurden in der Matrix (Auszug) aufgelistet:

Abb. 2.6 Auszug aus Gerätematrix

Hersteller	Modell	Messtechnik	Messprinzip	Messbereich
ACP	TK-300	Ultraschall	Punktmessung	+/- 10 m/s
Codel	Codel	Ultraschall	Punktmessung	+/- 10 m/s
Schiltknecht	TMS2000DR	Staudruck	Punktmessung	+/- 20 m/s
Sick	Flowsic 200	Ultraschall	Linienmessung	+/- 20 m/s

Wie im Kapitel 1.2 vermerkt, sollte die Auswahl der zu berücksichtigenden Strömungsmessgeräte auch auf das umliegende Ausland ausgeweitet werden. Nachfolgende Lieferanten von Strömungsmessgeräten wurden eingeladen sich aktiv am FOP 2010/025, Luftströmungsmessungen in Strassentunnels, zu beteiligen:

- ACP AG, 2563 Ipsach
- Codel Ltd, vertreten durch J.con-GmbH, 77815 Buehl, Deutschland
- Durag Group GmbH, 22453 Hamburg, Deutschland
- Fives Pillard, 13272 Marseille Cedex 8, Frankreich
- Schiltknecht Messtechnik AG, Gossau ZH
- Sick AG, 6370 Stans

Von den Lieferanten der Messsysteme mussten die nachfolgenden Bedingungen eingehalten werden:

- Vier komplette Messsysteme sind für ca. 6-7 Monate zur Verfügung zu stellen sowie ein zusätzliches Messsystem als Ersatz bei Störungen oder für einen weiteren Messquerschnitt, um Parallelvergleiche zu ermöglichen.
- Einbau der 4 evtl. 5 Messsysteme in den ausgewählten 2 Tunneln.
- Parametrierung der Messsysteme im entsprechenden Tunnelprofil.
- Übergabe der zeitlichen Mittelwerte über 10 Sekunden.
- Bei Zweipunktmessungen wird die separate Ausgabe der Einzelmesswerte der beiden Messpunkte gefordert.
- Analoge Messwertsignale 4-20 mA.
- Life-Zero Überwachung.
- Messbereich +10/-10 m/s, einschliesslich Strömungsrichtung.
- Digitaler Ausgang Sammelstörung, potentialfreier Kontakt 24 Volt.
- Übergabe von Zusatzinformationen wie Messwerte Temperatur, Umgebungsdruck, Differenzdruck usw., soweit vorhanden.
- Es ist nicht Aufgabe des Messsystems den Mittelwert über den Tunnelquerschnitt zu berechnen.
- Demontage und Rücknahme der Messsysteme nach Abschluss der Messkampagne.
- Die Leistungen können nicht entschädigt werden. Es wird jedoch der Zugang zu den Messdaten und zu den Auswertungen sowie den Schlussbericht mit den Ergebnissen des Forschungsprojektes ermöglicht.

Alle sechs eingeladenen Lieferanten bestätigten schriftlich am FOP unter den genannten Bedingungen teilzunehmen.

2.7 Abklärungen für die Messinstallation

Zur Abklärung der Messinstallationen wurde in beiden Tunneln Begehungen durchgeführt, um die örtliche Situation zu erfassen und um gleichzeitig mit den Betreibern der Tunnel die Möglichkeiten und Einschränkungen zu erörtern. Die Begehungen haben wie folgt stattgefunden:

- 24. August 2011 Tunnel Umfahrung Flüelen (TUF)
- 29. August 2011 Tunnel Bözberg (BOZ)

Während den Begehungen wurden in beiden Tunneln alle vorgegebenen Kriterien zur Installation der Testeinrichtungen bestätigt.

2.7.1 Tunnel Bözberg (RV)

Röhre West, Fahrtrichtung Zürich

- Hufeisen (HU) und Rechteckprofil (ZD) sind vorhanden;
- der Messkasten kann in der von aussen zugänglichen Lüftungszentrale installiert werden;
- die Messquerschnitte liegen mehr als 100 m von den Profiländerungen weg;
- die Kabelführung kann teilweise in den bestehenden Kabelkanälen im Werkleitungsstollen unter der Fahrbahn und über bestehende Futterrohre bis zu den beiden Tunnelwänden erfolgen. Ab den Kabelaustritt bis zu den beiden Messquerschnitten werden die Kabel in speziell zu montierenden Kabelschutzrohren (KSR Symalit) verlegt.



Abb. 2.7 Tunnel Bözberg

2.7.2 Tunnel Flüelen (GV)

- Hufeisen (HU) und Rechteckprofil (ZD) sind vorhanden;
- der Messkasten kann in einem, von aussen zugänglichen Querschlag (über den Sicherheitsstollen) installiert werden;
- die Messquerschnitte liegen mehr als 100 m von den Profiländerungen weg;
- die Kabelführung kann teilweise im bestehenden Kabelkanal an der Tunneldecke geführt werden. Beim Übergang vom Querschlag zum Kabelkanal und in den beiden Messquerschnitten werden die Kabel in speziell dafür zu montierenden Kabelschutzrohren (KSR Symalit) verlegt.



Abb. 2.8 Tunnel Flüelen

2.8 Vorbereitung der Messinstallation

Zur Vorbereitung und Koordination der Messinstallationen wie Messschrank, Klemmkasten, Leistungs- und Datenkabel wurden die Lieferanten der Strömungsmessgeräte gebeten für die festgelegten Positionen der Messquerschnitte und den Messschrank die nachfolgenden Unterlagen bzw. Spezifikationen zur Verfügung zu stellen:

- Technische Unterlagen der vorgesehenen Strömungsmessgeräte;
- Installationsort (Höhe und Wandabstand) in den Messquerschnitten;
- Notwendiger Abstand von anderen Strömungsmessgeräten (Interferenzen);
- Stromversorgung und Stromverbrauch (230VAC und 24VDC);
- Liste aller zur Verfügung stehenden I/O;
- Notwendige Schnittstelle zur Datenaufzeichnung, welche sich im Klemmkasten bei den Messquerschnitten oder auch im Messschrank befinden kann;
- Abmessungen der Auswertungseinheiten, welche in den Messschrank integriert werden;
- Schematische Übersichtszeichnung der Messinstallation und Elektroschema.

Weiterhin waren für die Montage und Inbetriebnahme die nachfolgenden Angaben notwendig:

- Zeitaufwand zur Montage der beiden Messquerschnitte in einem Tunnel;
- Notwendige Hilfsmittel (Hebebühne, Leiter, usw.);
- Minimale zur Inbetriebnahme eventuell zu generierende Luftströmung;
- Zeitaufwand zur Inbetriebnahme;
- Angaben über eventuell erforderliche Nachkorrekturen im Fahrraum bzw. Nachjustierungen im Messschrank.

Die positive Strömungsrichtung der Luft wurde wie folgt festgelegt:

- Tunnel Flüelen (GV) in steigender Richtung: Fahrrichtung Schwyz;
- Tunnel Bözberg (RV) in fallender Richtung: Fahrrichtung Zürich.

2.9 Referenzmessung

Parallel zu den Strömungsmessungen mit den verschiedenen installierten Messsystemen wurde mittels Tracergas-Messungen jeweils ein Referenzwert bestimmt.

Zwei Messkampagnen wurden dazu vorgesehen. Die erste wurde ca. 2 Wochen nach der Installation der Strömungsmessegeräte durchgeführt, um die Messwerte zu überwachen und zu kontrollieren, und um eventuelle Fehler und/oder falsche Parametrierungen beheben zu können.

Die zweite Kampagne erfolgte kurz vor der Demontage der Messgeräte, um das Langzeitverhalten der Messgeräte, wie z. B. eine eventuelle Drift, beurteilen zu können.

Die Tracergas-Messungen wurden durch die Hochschule Luzern (HSLU) durchgeführt. Die HSLU hat eine mehrjährige Erfahrung mit Volumenstrommessungen in Strassentunneln. Von der HSLU wurde in der Umfahrung Flüelen bereits im Jahre 2005 eine solche Messung durchgeführt.

Tracergasmethode der konstanten Emission

(Auszug aus der Dokumentation der HSLU, B. Frei)

Als Tracer- oder Spurengas wird Schwefelhexafluorid (SF_6) verwendet. Der Massenstrom des Tracergases wird aus einer Massendifferenzmessung auf einer Hochpräzisionswaage und dem Zeitintervall ermittelt. An einer stromabwärts liegenden Messstelle mit drei im Tunnelquerschnitt verteilten Entnahmestellen wird die Konzentration des Tracergases durch Infrarot-Photoakustik (IR-PAS) und nichtdispersive Infrarotabsorption (NDIR) gemessen. Aus den beiden Messgrössen Tracergasmassenstrom und Tracergaskonzentration lässt sich der Volumenstrom des Trägermediums sehr präzise direkt und integral bestimmen

$$q_V = \frac{q_{mSF_6} \cdot R_{SF_6} \cdot 1}{c \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{Luft} \cdot R_{Luft}}$$

worin:

q_{mSF_6}	Tracergasmassenstrom an der Dosierstelle [kg/s]
R_{SF_6}	Spezifische Gaskonstante von Schwefelhexafluorid SF_6 [J/(kg K)]
c	Tracergaskonzentration an der Messstelle [ppm]
ρ_L	Dichte der feuchten Abluft [kg/m ³]
R_{Luft}	Spezifische Gaskonstante der Abluft [J/(kg K)]

Im Gegensatz zur ebenfalls angewendeten Netzmessung mit z.B. 5x5 Anemometern ist die Tracergasmethode der konstanten Emission unabhängig vom Strömungsprofil und vom Strömungsquerschnitt. Die turbulente Strömung hat zur Folge, dass die Tracergaskonzentration im Tunnelquerschnitt nach einigen hydraulischen Durchmessern bereits homogen ist. Aus dem Volumenstrom kann in Kenntnis des Tunnelquerschnitts leicht die mittlere Strömungsgeschwindigkeit abgeleitet werden.

2.10 Messinstallationen und Messwertaufzeichnungen

Die Messinstallationen und Strömungsmessgeräte (Messsystem) wurden von den Lieferanten zur Verfügung gestellt und durch dieselben jeweils an der von ihnen vorgesehenen Position innerhalb des vorgegebenen Messquerschnitts montiert. Auch die Verkabelungen bzw. Druckleitungen bis zu den Klemmboxen gehörten zum Lieferumfang. Auswerteeinheiten wurden grundsätzlich im Messschrank installiert.

Dieses Vorgehen gewährleistete eine Installation, welche vollständig der Verantwortung des Lieferanten unterlag und daher jeden Interpretationsspielraum ausschloss.

Durch das FOP wurden die Verkabelungen (Stromversorgung und Datenübertragung) zwischen den Klemmboxen im Tunnel und dem Messschrank realisiert. Aufgrund der langen Messperiode wurde eine Verlegung in Kabelschutzrohren gewählt.

Die Installationen in beiden Tunneln wurden für einen auf ein Jahr begrenzten Zeitraum realisiert. Es wurden daher keine galvanischen Trennungen und Überspannungsschütze eingebaut; ebenfalls wurde auf doppelt geschirmte Kabel und eine Erdschiene im Messschrank verzichtet. Der Installationsumfang wurde mit allen Lieferanten der Strömungsmessgeräte abgestimmt und lieferantenseitig als hinreichend bestätigt.

Das FOP stellte weiterhin das Messwertaufzeichnungssystem zur Verfügung. Dies bestand aus einem IPC, einer Soft-SPS sowie den Eingangsmodulen (Lieferant: Automatisierungssysteme Beckhoff). Diese Komponenten wurden im Messschrank zusammen mit der elektrischen Versorgung, dem Netzgerät und den Leistungsschaltern für die verschiedenen Messinstallationen untergebracht.

Die Fernüberwachung der Messinstallationen und Aufzeichnungen erfolgten über einen GSM Router, welcher täglich die Messwerte und die Status- und Störungsmeldungen übermittelte. Somit konnten Ausfälle unabhängig von der Leittechnik und den Leitstellen der Tunnel sofort erfasst und behoben werden.

Die für die Messwertaufzeichnung in den beiden Tunneln notwendigen Messschränke wurden von den Tunnelbetreibern zur Verfügung gestellt. Sie stammten aus dem Rückbau von alten BSA-Anlagen.

Zur Vereinheitlichung und Vereinfachung wurden von den Strömungsmessgeräten nur die analogen Messwerte, die Meldungen zur Strömungsrichtung und die Betriebszustände übermittelt. Auf die Anbindung anderer, von einigen Strömungsmessgeräten zur Verfügung gestellter Busanbindungen (z.B. RS 485, TCP/IP) wurde bewusst verzichtet.

Von allen eingebauten Strömungsmessgeräten befinden sich im Anhang VII die technische Dokumentation mit den wichtigsten Spezifikationen und technischen Details sowie z.T. den möglichen Schnittstellen für die Kommunikation sowie weitere Optionen für die Datenauswertung.

3 Testaufbau

3.1 Aufbau der Messinstallationen

Die Positionen und Einbauhöhen der Strömungsmessgeräte in den beiden unterschiedlichen Tunnelprofilen (HU, ZD) wurden von allen Lieferanten, mit Ausnahme von Fives Pillard, gleich angesetzt. Kleine Unterschiede in der ab der Fahrbahn gemessenen Einbauhöhe bestanden zwischen den beiden Tunneln, Flüelen mit GV und Bözberg mit RV. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Installationen beschrieben.

Im Anhang III befinden sich die Pläne der Tunneln Bözberg und Flüelen mit der genauen Lage der einzelnen Strömungsmessgeräte längs der Tunnelachse sowie der beiden Tunnelprofile HU und ZD. Im Anhang VII befindet sich hingegen eine allgemeine Produktbeschreibung der einzelnen von den Lieferanten eingesetzten Strömungsmessgeräte:

- ACP Arias Environment AG
- DUR Durag GmbH
- COD Codel International Ltd
- FIV Fives Pillard
- SIC Sick AG
- SKN Schiltknecht AG

Die Strömungsmessgeräte wurden jeweils längs der Tunnelachse in zwei Gruppen montiert. Die erste Gruppe im Messprofil 1 (M1) im Bereich des Hufeisenprofils (HU) und die zweite Gruppe Messprofil 2 (M2) im Bereich der Zwischendecke (ZD). Die Lage der Messgeräte längs der Tunnelachse war immer die gleiche, ausser der Positionen der Strömungsmessgeräte von Codel, welche zu einem späteren Zeitpunkt nachträglich montiert wurden.

Der Abstand zwischen den einzelnen Messprofilen, von den geometrischen Gegebenheiten im BOZ im Bereich M1 abgesehen, betrug die von den Lieferanten vorgegebene Minimaldistanz von 20 m, um eventuelle Interferenzen im Ultraschallbereich auszuschliessen. Davon ausgenommen wurden im BOZ die Strömungsmessgeräte von FIV.

Den einzelnen Lieferanten der Strömungsmessgeräte wurden die Pläne der beiden Tunnelprofile HU und ZD zur Verfügung gestellt. Die Lage der Messgeräte wie der Wandabstand und die Einbauhöhe wurde von diesen aufgrund ihrer Erfahrung in eigener Verantwortung festgelegt. Die Projektleitung des FOP hat dazu keine Vorgaben erlassen.

Der minimale Abstand zur Querschnittsänderung Hufeisen - Zwischendecke betrug im Tunnel Flüelen ca. 70 m. Gegenüber den Strahlventilatoren wurde keine Minimaldistanz angesetzt, da deren Einsatz im Rahmen der Untersuchungen des FOP nicht vorgesehen war. Zudem mussten in beiden Tunneln die fest installierten Strömungsmessgeräte der Tunnelsensorik mitberücksichtigt werden.

Im Tunnel Bözberg betrug die Distanz zu den Querschnittsänderungen etwas mehr als 50 m. Die Tunnelgeometrie liess eine grössere Distanz nicht zu, da der gesamte Tunnelabschnitt mit Hufeisenprofil nur knapp 160 m lang ist.

Die Messköpfe auf der Seite der primären Anbindung an den Messschrank hatten die Bezeichnung "A", die Gegenseite "B".

Beispiel: SIC.M1.A.

Im Tunnel Flüelen lagen die primären Anbindungen fahrbahnseitig in Richtung Altdorf und im Tunnel Bözberg normalspurseitig in Richtung Zürich.

3.1.1 ACP – ACP Environment AG

Modell: ACP TK 300

Messtechnik/Messprinzip: Ultraschall/Punktmessung

- Messprofil mit 2 Messgeräten mit zusätzlichem U-förmigem Abstandprofil auf Tunnelwand
- Messprofil mit 1 Klemmboxen
- Installationshöhe ab Fahrbahn: TUF 3.70 / BOZ 4.20 m
- 4x2x0.8; Kabelverbindung für Daten und 24 V Speisung
- Energieversorgung ab der Auswerteeinheit im Messschrank
- 1 Auswerteeinheit im Messschrank für die beiden Messprofile
- Datenschnittstelle im Messschrank

Messwerte 4-20 mA: gemittelter Messwert AB der Luftströmung

Meldungen: Strömungsrichtung, Betriebsstatus

Die Messwerte von A und B wurden von der Auswerteeinheit nicht gesondert abgegeben und die Temperaturmesswerte wurden nicht übermittelt.

Auf die mögliche Anbindung der Strömungsmessgeräte über eine RS 485 Busverbindung wurde verzichtet.

Lage der Messgeräte

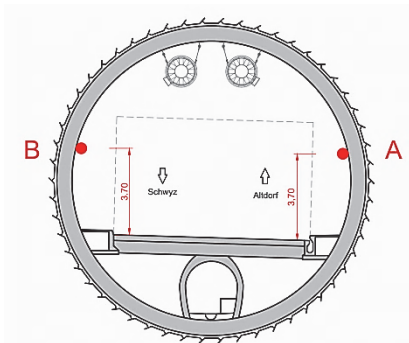


Abb. 3.1 ACP.M1 - Tunnel Flüelen

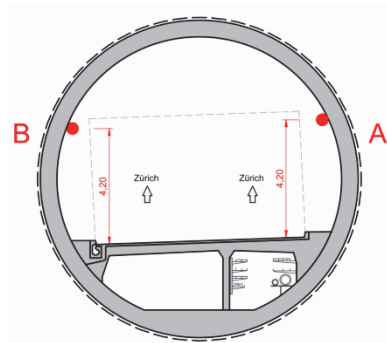


Abb. 3.2 ACP.M1 - Tunnel Bözberg

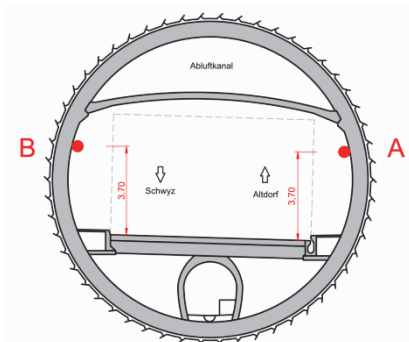


Abb. 3.3 ACP.M2 - Tunnel Flüelen

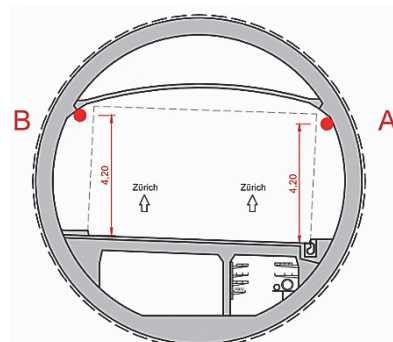


Abb. 3.4 ACP.M2 - Tunnel Bözberg

Abbildung des Strömungsmessgeräts und Klemmbox

Abb. 3.5 ACP, TK 300

Spezifikationen Strömungsmessgerät ACP

In der nachfolgend sind die wichtigsten Funktionen und Einstellungen wiedergegeben, welche vom Lieferanten mitgeteilt wurden.

Abb. 3.6 ACP, Tabelle Spezifikationen

N°	Argument	Spezifikation
1	Erfassung der Temperaturmesswerte	Gemessen PT100
2	Nutzung der Temperaturmessung	Der Messwert wird bei der Ultraschallberechnung verwendet
3	Berechnungsmethode zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Erforderlichen Messgrössen.	Laufzeitdifferenz Frequenz, Distanz, Temperatur Bis 200 Messzyklen pro Sekunde
4	Prinzip der interne Messwertglättung (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert) Länge der Mittelungszeit Frequenz der Änderung des 4-20 mA Wert am analogen Ausgang	gleitender Mittelwert 10 s Stetig
5	Im Gerät hinterlegte Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Kein Korrekturfaktor
6	Kalibrierungen im Werk	Ja, Windkanal. 3 Lüfterstufen positiv und negativ
7	Kalibrierungen vor Ort	Ja, Nullpunkt
8	Intervall des Nullpunktgleich	Bei Wartung der Windmessköpfe
9	Abstand zwischen Messkopf/Messbereich und Tunnelwand	30 cm
10	Empfohlenes Wartungsintervall	2 mal pro Jahr
11	Wartungs- und Unterhaltsarbeiten	Elektrische und mechanische Kontrolle, Reinigung und Nullpunktkalibrierung. Laptop mit Programm und eine Kartonhaube für die Abdeckung des Messkopfes (keine Strömung). Kontrolle der Luftgeschwindigkeit mit einem zertifizierten Anemometer (3 Punktmessung – Mittelwert über min. 60 sec.). Bei Neuanlagen werden auch die WM-Messgeräte mittels Netzmessungen kalibriert und dementsprechende Korrekturfaktoren bestimmt.

3.1.2 COD - Codel International Ltd

Modell: TunnelCraft 3

Messtechnik/Messprinzip: Ultraschall/ Punktmessung

- Messprofil mit 2 Messgeräten auf Tunnelwand
 - Messprofil mit 1 Anschlussbox
 - Installationshöhe ab Fahrbahn: TUF 4.20 / BOZ 4.20 m
 - 4x2x0.8; Kabelverbindung für Daten
 - 2x1x1.0; Kabelverbindung 24 V Speisung
 - Energieversorgung ab Netzteil im Messschrank
 - Datenschnittstelle im Messschrank
- Messwerte 4-20 mA: Luftströmung, virtuelle Temperatur pro Messkopf
Meldungen: Strömungsrichtung, Betriebsstatus

Auf die Installation von Auswerteeinheiten zur Mittelwertbildung AB wurde verzichtet, dieser wird direkt von der SPS berechnet.

Auf die mögliche Anbindung der Strömungsmessgeräte über eine RS 485 Busverbindung wurde verzichte

Lage der Messgeräte

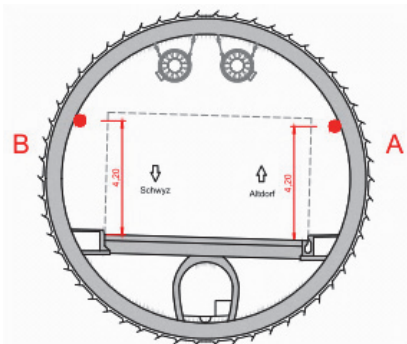


Abb. 3.7 COD.M1 - Tunnel Flüelen

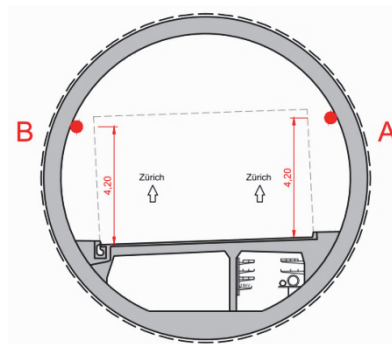


Abb. 3.8 COD.M1 - Tunnel Bözberg

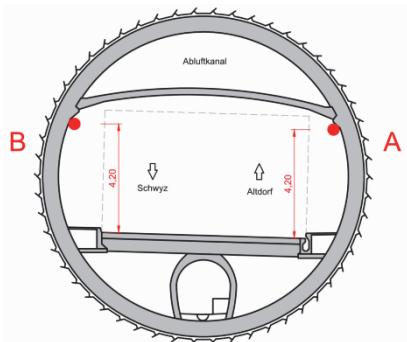


Abb. 3.9 COD.M2 - Tunnel Flüelen

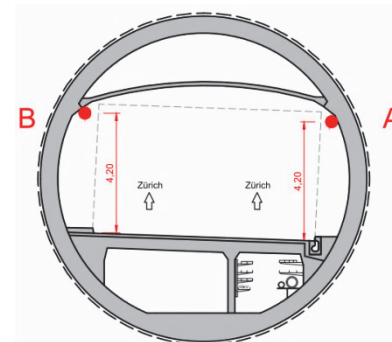


Abb. 3.10 COD.M2 - Tunnel Bözberg

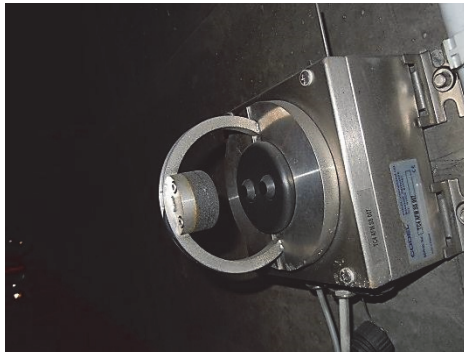
Abbildung des Strömungsmessgeräts

Abb. 3.11 COD –TunnelCraft 3

Spezifikationen Strömungsmessgerät COD

In der nachfolgend sind die wichtigsten Funktionen und Einstellungen wiedergegeben, welche vom Lieferanten mitgeteilt wurden.

Abb. 3.12 COD, Tabelle Spezifikationen

N°	Argument	Spezifikation
1	Erfassung der Temperaturmesswerte	Gemessen PT100
2	Nutzung der Temperaturmessung	Der Messwert wird bei der Ultraschallberechnung verwendet
3	Berechnungsmethode zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Erforderlichen Messgrössen.	Laufzeitdifferenz Frequenz, Distanz, Temperatur
4	Prinzip der interne Messwertglättung (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert) Länge der Mittelungszeit Frequenz der Änderung des 4-20 mA Wert am analogen Ausgang	Exponentiell gleitender Mittelwert, T90 Antwort zwischen 10 s bis 10 min einstellbar 15 s 1 s
5	Im Gerät hinterlegte Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Kein Korrekturfaktor
6	Kalibrierungen im Werk	Ja, Windkanal, Nullpunktgleichung manuell
7	Kalibrierungen vor Ort	Keine Kalibrierung vor Ort
8	Intervall des Nullpunktgleich	Keine automatische Nullpunktgleichung, muss manuell durchgeführt werden.
9	Abstand zwischen Messkopf/Messbereich und Tunnelwand	140 mm
10	Empfohlenes Wartungsintervall	Keine Vorschrift, ausser Nullpunktcheck alle 6 oder 12 Monate
11	Wartungs- und Unterhaltsarbeiten	Nullpunktcheck

3.1.3 DUR - Durag GmbH

Modell: D-FL 220T

Messtechnik/Messprinzip: Ultraschall/Linienmessung

- Messprofil mit 1 Sender und 1 Empfänger auf Tunnelwand
 - Messprofil mit 2 Anschlussboxen, autarker Betrieb ohne zusätzliche Steuereinheit
 - Installationshöhe ab Fahrbahn: TUF 4.10 / BOZ 4.20 m
 - 4x2x0.8 Kabelverbindung für Daten
 - 1x2x1.5 Kabelverbindung für Leistung 230 Volt AC
 - Energieversorgung ab Netzteil im Messschrank
 - Datenschnittstelle im Messschrank
- Messwerte 4-20 mA, : 400 Ohm, potentialfrei, Luftströmung, virtuelle Temperatur
Meldungen: Strömungsrichtung, Betriebsstatus
- Serviceschnittstelle: USB 1.1

Auf die mögliche Anbindung der Strömungsmessgeräte über die vorhandene bidirektionale RS 485 MOBUS RTU - Verbindung, bzw. Intercom RS 485 Master-Slave wurde verzichtet.

Lage der Messgeräte

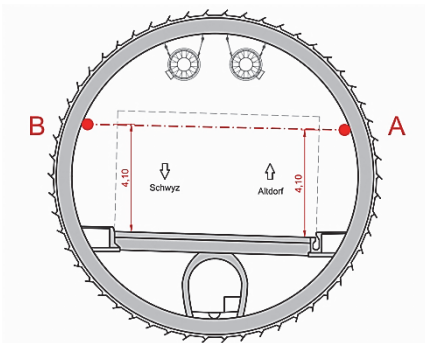


Abb. 3.13 DUR.M1 - Tunnel Flüelen

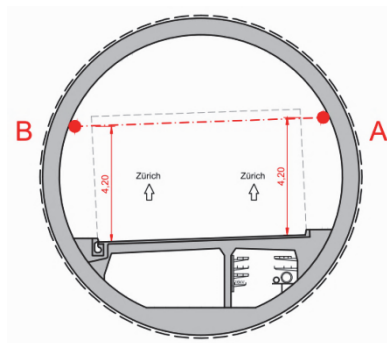


Abb. 3.14 DUR.M1 - Tunnel Bözberg

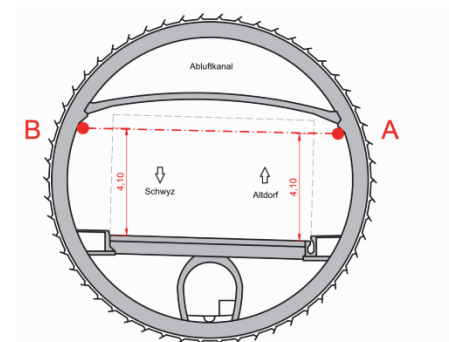


Abb. 3.15 DUR.M2 - Tunnel Flüelen

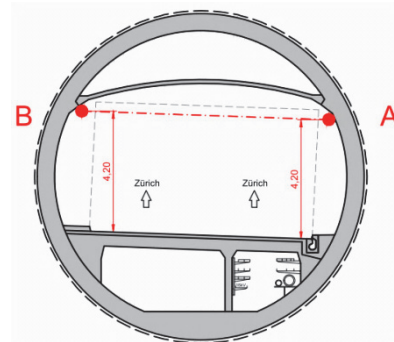


Abb. 3.16 DUR.M2 - Tunnel Bözberg

Die beiden Messköpfe sind auf ca. 4.10 / 4.20 m installiert, das heisst unmittelbar über dem zulässigen Lichtraumprofil der Lastwagen von 4.00 m. Gegenüber der ZD beträgt der vertikale Höhenabstand seitlich jeweils ca. 35 cm und in der Tunnelachse am höchsten Punkt ca. 1.00 m.

Abbildung des Strömungsmessgeräts und Klemmbox



Abb. 3.17 DUR – D-FL 220T

Spezifikationen Strömungsmessgerät DUR

In der nachfolgend sind die wichtigsten Funktionen und Einstellungen wiedergegeben, welche vom Lieferanten mitgeteilt wurden.

Abb. 3.18 DUR, Tabelle Spezifikationen

N°	Argument	Spezifikation
1	Erfassung der Temperaturmesswerte	Die Temperatur wird indirekt aus dem Ultraschalllaufzeitmessergebnis berechnet
2	Nutzung der Temperaturmessung	Neben der Lufttemperatur werden die Temperatur des Ultraschallwandlers und die Temperatur im Elektronikgehäuse gemessen. Die Ultraschallwandlertemperatur und die Temperatur im Elektronikgehäuse werden nur überwacht. Bei Über-/Unterschreitung von Grenzen wird eine Warnung ausgegeben.
3	Berechnungsmethode zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Erforderlichen Messgrößen.	Formel zur Strömungsgeschwindigkeit (v): $v = \frac{L}{2 * \cos \alpha} * \frac{t_- - t_+}{t_- * t_+}$ v: Strömungsgeschwindigkeit L: Entfernung zwischen den Messköpfen α: Einbauwinkel zur Strömungsrichtung t-: Schalllaufzeitmessergebnis gegen die Strömung t+: Schalllaufzeitmessergebnis mit der Strömung
4	Prinzip der interne Messwertglättung (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert) Länge der Mittelungszeit Frequenz der Änderung des 4-20 mA Wert am analogen Ausgang	Es wird ein linearer, gleitender Mittelwert gebildet. Mittelungszeit = 10sec 4-20mA Änderungsfrequenz 1/sec
5	Im Gerät hinterlegte Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Kein Korrekturfaktor
6	Kalibrierungen im Werk	Nein
7	Kalibrierungen vor Ort	Nein
8	Intervall des Nullpunktgleich	Nullpunktgleich ist nicht nötig.
9	Abstand zwischen Messkopf/Messbereich und Tunnelwand	-
10	Empfohlener Wartungsintervall	In der Regel nicht häufiger als 2x pro Jahr
11	Wartungs- und Unterhaltsarbeiten	Reinigung der Sensoren Kalibrierungen sind nicht nötig

3.1.4 FIV - Fives Pillard

Modell: Windcheck

Messtechnik/Messprinzip: Ultraschall/Punktmessung

- Messprofil mit 1 Messgerät
 - Installationshöhe ab Fahrbahn: TUF Gewölbe 7.00 m und Zwischendecke 5.10 m / BOZ 4.70 m
 - 4x2x0.8 Kabelverbindung für Daten und 24V Speisung
 - Energieversorgung ab Netzteil im Messschrank
 - Datenschnittstelle im Messschrank
- Messwerte: Luftströmung und Strömungsrichtung, negativ 4 -12 / Positiv 12 - 20 mA,
 Temperatur 4 - 20 mA
 Meldungen: Betriebsstatus über mA Wert < 3.5 mA = Störung

Lage der Messgeräte

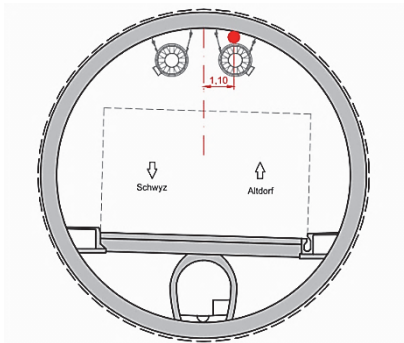


Abb. 3.19 FIV.M1 - Tunnel Flüelen

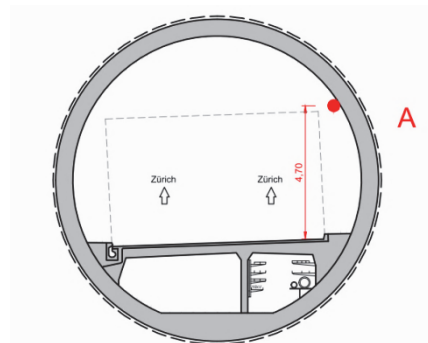


Abb. 3.20 FIV.M1 - Tunnel Bözberg

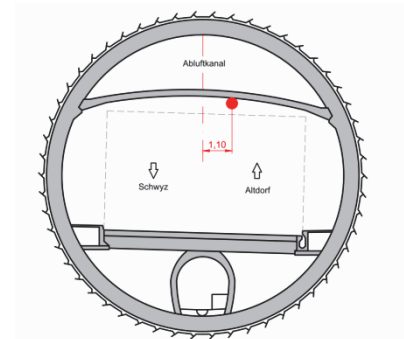


Abb. 3.21 FIV.M2 - Tunnel Flüelen

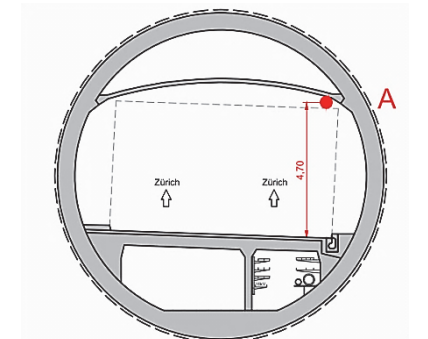


Abb. 3.22 FIV.M2 - Tunnel Bözberg

Die Firma Fives Pillard setzt pro Messprofil nur einen Messkopf ein. Dieser wird in der Regel in Tunneln mit GV in der Mitte des Gewölbes oder auf der Zwischendecke montiert und in Tunneln mit RV im Bereich der Normalspur.
 Im Gegensatz zu allen anderen Ultraschallmessgeräten misst Fives Pillard parallel zur Strömungsrichtung der Luft.

Abbildung des Strömungsmessgeräts

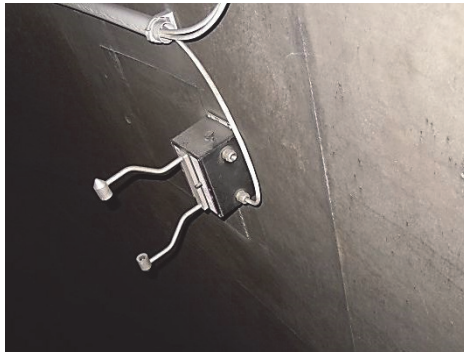


Abb. 3.23 FIV – Windcheck

Spezifikationen Strömungsmessgerät FIV

In der nachfolgend sind die wichtigsten Funktionen und Einstellungen wiedergegeben, welche vom Lieferanten mitgeteilt wurden.

Abb. 3.24 FIV, Tabelle Spezifikationen

N°	Argument	Spezifikation
1	Erfassung der Temperaturmesswerte	Die Temperatur wird mit einer auf dem Gehäuses montierten Temperatursonde realisiert. Es ist eine echte Messung und keine Berechnung
2	Nutzung der Temperaturmessung	Jede Temperaturmessung wird für die Korrektur der Berechnung der Luftgeschwindigkeit gebraucht
3	Berechnungsmethode zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Erforderlichen Messgrössen.	Die Strömungsgeschwindigkeit wird in zwei Schritten berechnet: <ul style="list-style-type: none"> • Messung der Schallausbreitung von links nach rechts und von rechts nach links. • Subtraktion der beiden Messwerte und Division durch einen Korrekturfaktor (Temperatur, Messdistanz, Höhe über Meer wegen der Deformation des Schallwandlers)
4	Prinzip der interne Messwertglättung (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert) Länge der Mittelungszeit Frequenz der Änderung des 4-20 mA Wert am analogen Ausgang	Im Gerät ist ein gleitender Mittelwert programmierbar. Dieser Mittelwert kann mit der RC Programmierkonsole zwischen 1 und 100 s eingestellt werden. Ist kein Mittelwert eingestellt so wird der Messwert alle 500 ms aufgefrischt. Einstellung: 10 s
5	Im Gerät hinterlegte Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Es sind keine Korrekturfaktoren hinterlegt. Der Messwert entspricht der Messung am Installationsort.
6	Kalibrierungen im Werk	Jedes Messgerät ist individuell kalibriert. Dies geschieht im Vergleich mit einem von der COFRAC zertifiziertem Anemometer. Dazu steht im Werk ein 10 Meter langer Windkanal zur Verfügung.
7	Kalibrierungen vor Ort	Nein, nicht notwendig
8	Intervall des Nullpunktgleich	Ein Neukalibrierung des Nullpunktes ist nicht notwendig. Durch die eingesetzte Technik ohne Korrekturfaktoren ist der Nullpunkt eine physikalische Grösse.
9	Abstand zwischen Messkopf/Messbereich und Tunnelwand	Distanz zwischen Messsonde und Tunnelwand ist 30 cm
10	Empfohlener Wartungsintervall	Reinigung der Messköpfe zirka alle 6 Monate. Dieser Intervall kann je nach den Betriebsbedingungen angepasst werden: <ul style="list-style-type: none"> • Hohes oder ausserordentliches Verkehrsauf-

		kommen
		<ul style="list-style-type: none"> • Spezielle meteorologische Bedingungen (Viel Schnee und Streusalzeinsatz)
11	Wartungs- und Unterhaltsarbeiten	<p>Eine Reinigung der Messköpfe mit einem feuchten Tuch ohne aggressives Reinigungsmittel ist empfohlen. Die Reinigung muss mithilfe der RC Programmierkonsole registriert und bestätigt werden.</p> <p>Eine visuelle Kontrolle des Zustandes der Messköpfe ist empfohlen, diese dürfen nicht durch Salzeinwirkung beeinträchtigt sein.</p>

3.1.5 SIC - Sick AG

Modell: Flowsic200

Messtechnik/Messprinzip: Ultraschall/Linienmessung

- 2x2 Sender / Empfänger auf Tunnelwand
 - 2x2 Anschlussboxen
 - Installationshöhe ab Fahrbahn: TUF 4.20 / BOZ 4.20 m
 - 4x2x0.8 Kabelverbindung für Daten und 24V Speisung
 - Energieversorgung ab Auswerteeinheiten im Messschrank
 - 2x1 Auswerteeinheit im Messschrank mit Display
 - Datenschnittstelle im Messschrank
- Messdaten 4-20 mA: Mittlere Luftströmung, virtuelle Temperatur
Meldungen: Mittlere Strömungsrichtung, Betriebsstatus

Auf die mögliche Anbindung der Strömungsmessgeräte über eine RS 485 Busverbindung wurde verzichtet.

Lage der Messgeräte

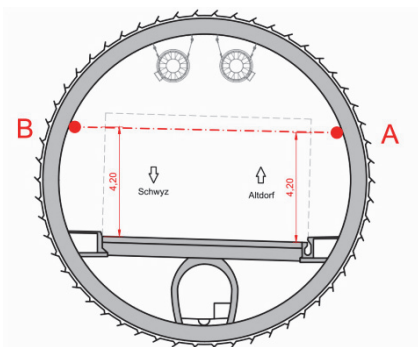


Abb. 3.25 SIC.M1 - Tunnel Flüelen

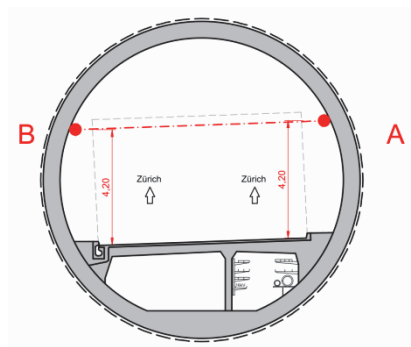


Abb. 3.26 SIC.M1 - Tunnel Bözberg

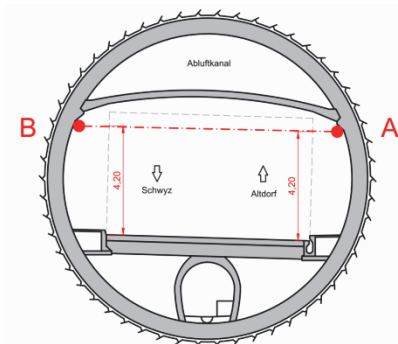


Abb. 3.27 SIC.M2 - Tunnel Flüelen

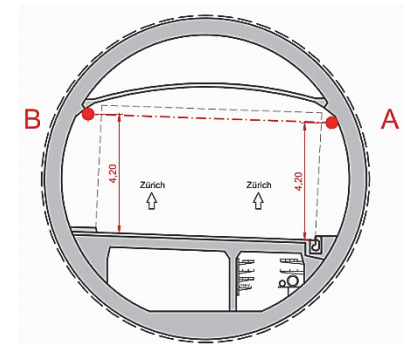


Abb. 3.28 SIC.M2 - Tunnel Bözberg

Die beiden Messköpfe sind auf ca. 4.20 m installiert, das heisst unmittelbar über dem Lichtraumprofil von 4.00 m. Gegenüber der ZD beträgt der vertikale Höhenabstand seitlich jeweils ca. 35 cm und in der Tunnelachse am höchsten Punkt ca. 1.00 m. Um störende Effekte wie Reflexionen an der Zwischendecke zu vermeiden, wurden beide Messköpfe um ca. 5° aus der Horizontalen abwärts abgewinkelt.

Im Gegensatz zu allen anderen Strömungsmessgeräten wurde im Flowsic eine Messwertglättung über 30 s implementiert anstatt der vorgegebenen 10 s. Dies beeinflusst den direkten Vergleich mit den anderen Strömungsmessgeräten, z.B. Abweichungen ab dem Mittelwert über alle Strömungsmessgeräte

Abbildung des Strömungsmessgeräts



Abb. 3.29 SIC – Flowsic200

Spezifikationen Strömungsmessgerät SIC

In der nachfolgend sind die wichtigsten Funktionen und Einstellungen wiedergegeben, welche vom Lieferanten mitgeteilt wurden.

Abb. 3.30 SIC, Tabelle Spezifikationen

N°	Argument	Spezifikation
1	Erfassung der Temperaturmesswerte	Virtuell berechnet aus der mittleren Schallgeschwindigkeit
2	Nutzung der Temperaturmessung	Nein
3	Berechnungsmethode zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Erforderlichen Messgrößen.	Formel zur Strömungsgeschwindigkeit (v): $v = \frac{L}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \left(\frac{1}{t_v} - \frac{1}{t_r} \right)$ v: Strömungsgeschwindigkeit L: Entfernung zwischen den Messköpfen α: Einbauwinkel zur Strömungsrichtung t _v : Schalllaufzeitmessergebnis vorwärts t _r : Schalllaufzeitmessergebnis rückwärts
4	Prinzip der interne Messwertglättung (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert) Länge der Mittelungszeit Frequenz der Änderung des 4-20 mA Wert am analogen Ausgang	Gestaffelte Glättung und Filterung: Gleitender Mittelwert der Signale (Standard 10 Werte) Medianfilter mit anteiliger Mittelung der Focus-Werte (Standard 21 Werte mit 70 % im Focus) Gleitender Mittelwert als T90 in der MCU (Standardeinstellung T90 ab Werk ist 1s. Einstellung war hier bei Test 10 Sekunden.) Die Aktualisierung des Analogausgangs erfolgt alle 2 Sekunden.
5	Im Gerät hinterlegte Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Es wurden keine Korrekturfaktoren parametrier.
6	Kalibrierungen im Werk	Standard Qualitätsprüfung im Werk: Nullpunktüberprüfung und Prüfung der Laufzeitmessung auf Basis von Schallgeschwindigkeit und Temperatur. Keine Kalibrierung im Werk weil das nur im eingebauten Zustand im Tunnel möglich ist.
7	Kalibrierungen vor Ort	Nein
8	Intervall des Nullpunktgleich	Der Nullpunktgleich erfolgt im Rahmen des im Gerät integrierten Kontrollzyklus. Dieser kann jederzeit manuell oder automatisch in definierten Zeitabständen ausgelöst werden (Parametrierung Automatik über Bediensoftware).
9	Abstand zwischen Messkopf/Messbereich und Tunnelwand	-

10	Empfohlener Wartungsintervall	Das typische Wartungsintervall für das verwendete FLOWSIC 200-H (Edelstahl/Titanausführung) beträgt mehr als 5 Jahre.
11	Wartungs- und Unterhaltsarbeiten	Sichtkontrolle. Bei Bedarf Reinigung der Systemteile von äusserer Verschmutzung. Funktionskontrolle mittels Kontrollzyklus (ggf. Aufzeichnung Diagnosefile) Erstellung Parameterprotokolle bei eventuellen Parameteroptimierungen/-änderungen.

3.1.6 SKN - Schiltknecht Messtechnik AG

Modell: TMS 3000

Messtechnik/Messprinzip: Staudruckrohr/Punktmessung

- 2x2 Differenzstaudruckrohre auf Tunnelwand
- 2x2 Feldmessumformer
- Installationshöhe ab Fahrbahn: TUF 3.00 / BOZ 3.00 m
- 4x2x0.8 Kabelverbindung für Daten und 24V Speisung pro Messkopf
- Energieversorgung ab Auswerteeinheit im Messschrank
- Kombinierte Auswerteeinheit 19" im Messschrank für beide Messprofile. Funktionsanzeige über LED
- Datenschnittstelle im Messschrank
- Messdaten 4-20mA: Luftströmung pro Messkopf, mittlerer Luftströmung AB, Temperatur, Luftdruck
- Meldungen: Mittlere Strömungsrichtung AB, Betriebsstatus

Lage der Messgeräte

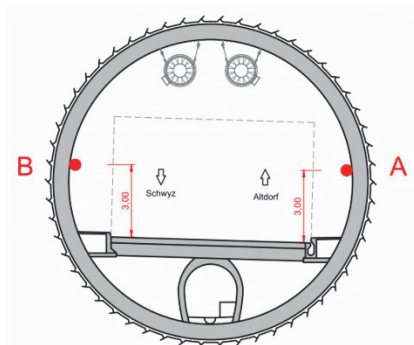


Abb. 3.31 SKN.M1 - Tunnel Flüelen

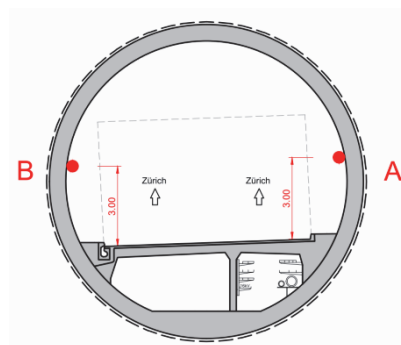


Abb. 3.32 SKN.M1 - Tunnel Bözberg

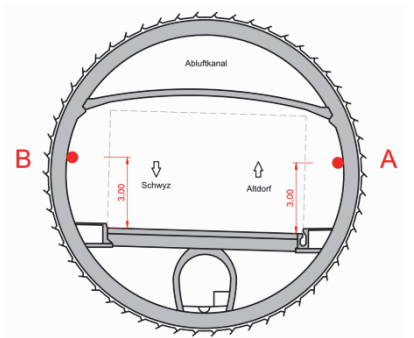


Abb. 3.33 SKN.M2 - Tunnel Flüelen

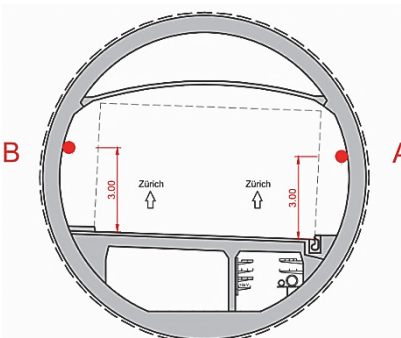


Abb. 3.34 SKN.M2 - Tunnel Bözberg

Eisbildung:

Um das Staudruckmessverfahren auch in Portalzonen einsetzen zu können, wo Vereisungen auftreten können, kann das Differenzstaudruckrohr auf beiden Seiten an den Druckaufnahmeöffnungen mit einer Widerstandsheizung versehen werden, um deren Verschluss durch Eisbildung auszuschliessen.

In den beiden Tunneln Flüelen und Bözberg wurden keine Widerstandsheizungen eingebaut.

Abbildung des Strömungsmessgeräts



Abb. 3.35 SKN – TMS 3000

Spezifikationen Strömungsmessgerät SKN

In der nachfolgend sind die wichtigsten Funktionen und Einstellungen wiedergegeben, welche vom Lieferanten mitgeteilt wurden.

Abb. 3.36 SKN, Tabelle Spezifikationen

N°	Argument	Spezifikation
1	Erfassung der Temperaturmesswerte	Effektiv an den Messpunkten im Fahrraum gemessen. Pro Messpunkt ein eigener PT100-Fühler.
2	Nutzung der Temperaturmessung	Temperatur wird zwingend zur Berechnung der Dichte der Fahrraumluft verwendet. Der Fühler im Messumformer ragt in den Fahrraum hinein.
3	Berechnungsmethode zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Erforderlichen Messgrößen.	$V = \sqrt{2p_{\text{dyn}} / \rho}$ Rho: Dichte der Luft im Fahrraum, wird berechnet aus: Temperatur, statischer Druck, Gaskonstante für Luft und rel. Feuchte. Die beiden ersteren werden gemessen.
4	Prinzip der interne Messwertglättung (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert) Länge der Mittelungszeit Frequenz der Änderung des 4-20 mA Wert am analogen Ausgang	Jeder Messumformer erfasst ca. 1000 Messwerte pro Sekunde. Von je 100 Werten wird das lineare Mittel bestimmt. Es stehen somit pro Sekunde 10 berechnete Werte zur Verfügung, die für die Strömungsausgänge gleitend gemittelt werden. Eingestellte Mittelung: wie verlangt 10s Die 4...20mA-Werte werden alle 0.1s aktualisiert.
5	Im Gerät hinterlegte Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Kalibrierwerte für Druckmesszellen Kalibrierwerte für PT100-Fühler (0°C) Keine Korrekturfaktoren für die Strömungsgeschwindigkeit
6	Kalibrierungen im Werk	Ja, Kalibrierung der Druckmesszellen und des PT100-Temperaturfühlers.
7	Kalibrierungen vor Ort	Nein, eine solche ist nicht erforderlich.
8	Intervall des Nullpunktgleich	Nach Aufwärmprozess des Gerätes alle 5 Minuten.
9	Abstand zwischen Messkopf/Messbereich und Tunnelwand	36 cm (Achse Differenzdruckstaurohr)
10	Empfohlener Wartungsintervall	5 Jahre
11	Wartungs- und Unterhaltsarbeiten	Reinigen der Stauohre, Prüfen der pneumatischen Dichtigkeit, ggf. Austausch der Filter, Messgenauigkeit der Druckmesszellen

3.1.7 Zusätzliche Messeinrichtungen

Um den Einfluss der Lufttemperatur und Luftfeuchte neutral und daher unabhängig von der Datenerfassung der Strömungsmessgeräte beurteilen zu können, wurden in beiden Tunneln diese beiden Werte mit jeweils einem zusätzlichen Messgerät aufgezeichnet. Eingesetzt wurde ein kombiniertes Temperatur- und Luftfeuchtemessgerät vom Typ Humicap der Firma Vaisala eingebaut. Dieses befand sich im Bözbergtunnel im Fahrraum direkt auf der Tunnelwand auf ca. 4.00 m (siehe Abb. 3.37). Im Tunnel Flüelen befand sich dieses im Eingangsbereich zum Querschlag 1, gegenüber dem Fahrraum leicht zurückgesetzt, auf 4.00 m Höhe.



Abb. 3.37 Tunnel Bözberg - Temperatur- und Luftfeuchtemessgerät

Der Luftdruck hingegen, welcher nur für das Staudruckverfahren relevant ist, wurde direkt von diesem Gerät übernommen.

3.2 Verkehrsdaten

Die Verkehrsmenge, deren Zusammensetzung und Fahrgeschwindigkeit beeinflussen massgeblich die Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Fahrraum. Die Verkehrsdaten wurden vom FOP nicht direkt aufgezeichnet. Die Verkehrsdatenerfassungen der beiden Tunnel stellten nur die mittlere stündliche Verkehrsmenge, unterteilt in PW und LW, zur Verfügung.

Weitere, genauere Daten stellte die ASTRA Verkehrsdatenerfassung mit Swiss-10 Kategorisierung Stundenwerte zur Verfügung. Für das FOP waren diesbezüglich die nachfolgenden Zählstellen interessant:

Abb. 3.38 Zählstellen Verkehrserfassung Schweiz

ID	Zählstelle	Fahrtrichtung 1	Fahrtrichtung 2
120	Sisikon S	Altdorf	Brunnen
595	Flüelen	Altdorf	Flüelen
219	Schinznach Dorf	Verzweigung A3/A1	Frick

Die Daten der Zählstelle Schinznach Dorf konnten für den Tunnel Bözberg übernommen werden, da sich die Zählstelle direkt vor dem Tunnelportal ohne zwischenliegende Zu- und Ausfahrten befindet (Abb. 3.41). Hinsichtlich des Umfahrungstunnels Flüelen hingegen besteht ein gewisser Interpretationsbedarf der Daten der beiden Zählstellen Sisikon und Flüelen, da der lokale Verkehr der Ortschaft Flüelen nicht durch den Umfahrungstunnel fährt.

Eine verfeinerte Auflösung der Verkehrsdaten wäre wünschenswert gewesen und hätte für das FOP eine zusätzliche detaillierte Information dargestellt.



Abb. 3.39 Zählstelle ID 120, Sisikon Süd, der Tunnel Flüelen befindet sich weiter südlich, ausserhalb der Abbildung (siehe nachfolgende Abbildung).



Abb. 3.40 Zählstelle ID 595, Flüelen, der Tunnel Flüelen befindet sich rechts der Messstelle

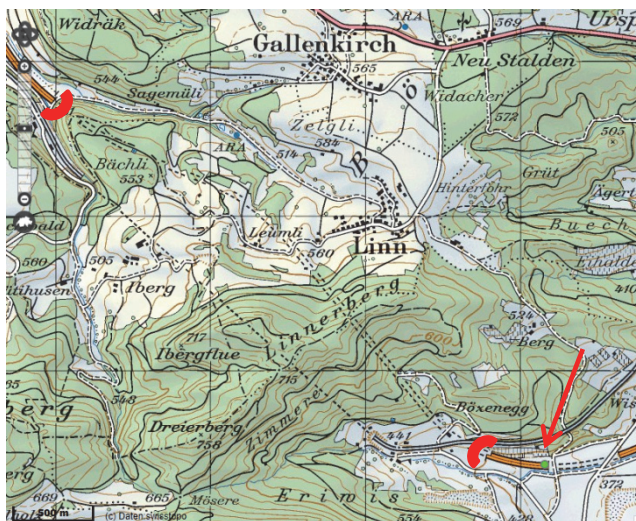


Abb. 3.41 Zählstelle ID 219, Schinznach-Dorf, der Tunnel Bözberg befindet sich links der Messstelle

3.3 Aufbau der Messschranke

Pro Tunnel wurde jeweils ein Messschrank vorbereitet und installiert. Darin untergebracht waren der IPC mit einer Soft-SPS sowie die dazugehörigen I/O Module, die Spannungsversorgung, die Klemmen sowie die Auswerteeinheiten der Strömungsmessgeräte für ACP, SIC und SKN.

Der installierte GSM Router erlaubte die Daten vollautomatisch zu übertragen und ermöglichte eine Fernwartung der Anlage.

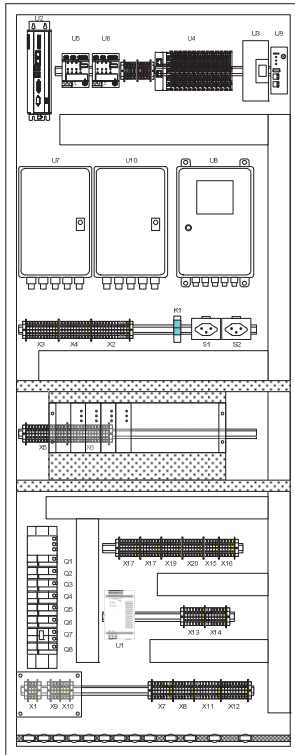


Abb. 3.42 Aufbau Messschrank



Abb. 3.43 Fotografie Messschrank

3.4 Montagen und Inbetriebnahmen

Für die Montagen und Inbetriebnahmen der Strömungsmessgeräte standen Tunnelsperrezeitfenster zwischen 22:00 - 06:00 im Tunnel Flüelen und 20:00 - 06:00 im Tunnel Bözberg zur Verfügung. Diese Zeitfenster reduzierten sich um ca. eine Stunde für die Prozeduren der Tunnelschliessung und -öffnung. Zusätzlich mussten noch teilweise auf Bedürfnisse des Tunnelunterhalts Rücksicht genommen werden. Die Montagen und Inbetriebsetzungen der einzelnen Messsysteme mussten so organisiert werden, dass jedem Unternehmer gleich gute Montagebedingungen gewährleistet werden konnten.

Der Ablauf der Montagearbeiten bis zur Inbetriebnahme der Testinstallationen wurde durch folgende Vorkommnisse beeinflusst:

- Die vorgesehene, effektive Arbeitszeit im Tunnel Bözberg wurde soweit verkürzt, dass eine zusätzliche Teilsperre des Tunnels notwendig wurde, um die Arbeiten abschliessen zu können.
- Die Zusage der Firma Codel zum FOP erfolgte so spät, dass für die Montagen zusätzliche Sperrnächte organisiert und die bereits geplanten Tracergas-Messungen verschoben werden mussten.
- Aus logistischen Gründen und der daraus resultierenden Zeitverzögerung konnte im Tunnel Flüelen die Tracergasmessung unter Verkehr nicht wie geplant durchgeführt werden. Die Messung wurde zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt.

Der zeitliche Ablauf der Messkampagne war wie folgt:

Tunnel Bözberg (RV)

16/17.10.2011	Installation Messschrank, Montage der KSR und Verkabelungen, Montagen der Strömungsmessgeräte
13.12.2011	Abschluss der Montagearbeiten der Strömungsmessgeräte
11/12.01.2012	Montage der Strömungsmessgeräte Codel
18.01.2012	Tracergasmessung
10.04.2012	Demontagen, respektive Schutz der Strömungsmessgeräte wegen der Tunnelreinigung
12.04.2012	Wiedermontage der Strömungsmessgeräte und Funktionskontrolle
29.10.2012	Demontagen der Strömungsmessgeräte

Tunnel Flüelen (GV)

2/3.11.2011	Installation Messschrank, Montage der KSR und Verkabelungen
3/4.11.2011	Montage der Strömungsmessgeräte
15.11.2011	Erste Tracergasmessung
10/11.01.2012	Montage der Strömungsmessgeräte Codel
17.01.2012	Zweite, vollständige Tracergasmessung
10.04.2012	Demontagen, respektive Schutz der Strömungsmessgeräte wegen der Tunnelreinigung
12.04.2012	Wiedermontage der Strömungsmessgeräte und Funktionskontrolle
26.09.2012	Abschliessende Tracergasmessung
30.10.2012	Demontagen der Strömungsmessgeräte

3.5 Aufzeichnung der Messwerte

Die Messwerte und Daten wurden in Datenfiles im CSV Format unabhängig für jede der sechs Testinstallationen mit einem 10 Sekundenzyklus aufgezeichnet (siehe Beispiel in Abb. 3.44). Der Zeitstempel der Datenaufzeichnung wurde vom IPC im Messschrank gesetzt. Während den Tracergasmessungen wurde der Zyklus auf 2 Sekunden verkürzt, um später eine präzisere Zeitkorrektur der Kurven zu ermöglichen.

Eine Synchronisierung der Systemzeit der Aufzeichnungen der Strömungsmessgeräte mit jener des Tunnelleitsystems wurde, da nicht relevant, nicht realisiert.

Datum/Zeit	Name Variabel	Strömungsrichtung	Messwert m/s x100	Status SMG	Alarm PLC	Raw Data	Raw Data
15.02.2012 07:15:20	COD_WM_B_M1	0	688	0	0	0	22555
15.02.2012 07:15:20	COD_WM_A_M2	0	953	0	0	0	31229
15.02.2012 07:15:20	COD_WM_B_M2	0	494	0	0	0	16202
15.02.2012 07:15:20	DUR_WM_AB_M1	0	690	0	0	0	22600
15.02.2012 07:15:20	DUR_WM_AB_M2	0	893	0	0	0	29258
15.02.2012 07:15:20	FIV_WM_AB_M1	1	1413	0	0	0	28917
15.02.2012 07:15:20	FIV_WM_AB_M2	0	722	0	0	0	14925
15.02.2012 07:15:20	SIC_WM_AB_M1	0	718	0	32768	0	23513
15.02.2012 07:15:20	SIC_WM_AB_M2	0	864	0	0	0	28306

Abb. 3.44 Struktur Datenfile

Besondere Vorkommnisse, welche die Betriebsart des Tunnels veränderten, mussten von den Tunnelbetreibern gemeldet werden, um diese in den Auswertungen entsprechend berücksichtigen zu können. Dies betraf konkret aussergewöhnliche Ereignisse wie Brand, Tunnelsperrungen und Verkehrsumleitungen.

Grobauswertungen der Messwerte

Die Datenfiles aus den beiden Tunneln wurden täglich über die GSM Router per E-Mail der Projektleitung gesendet. Die Daten wurden ausgewertet und kontrolliert und zur weiteren Verarbeitung abgespeichert. Systematische Fehler konnten somit frühzeitig erkannt und der betreffende Lieferant benachrichtigt werden, um nicht das Endresultat der gan-

zen Messkampagne zu beeinträchtigen. Beispiele sind im Kapitel 4.5 Funktionsverhalten der Strömungsmessgeräte aufgeführt.

3.6 Messperiode

Im FOP war ursprünglich vorgesehen die Strömungsmessgeräte in den Sperrnächten im Herbst 2011 zu installieren und in den Sperrnächten im Frühling 2012 zu demontieren. Die Lieferanten wurden daher aufgefordert die Messsysteme für ca. 6-7 Monate zur Verfügung zu stellen.

Wie im Kapitel 3.4 beschrieben, hat das Projekt verschiedene Verzögerungen erfahren und die Testinstallationen waren erst ab dem 18.01.2012 (KW03) vollumfänglich, inklusive der ersten Tracergas-Referenzmessung, verfügbar.

Dazukam, dass die Sperrnächte im Frühling für den Bözbergtunnel bereits in der KW11 und für den Tunnel Flüelen in der KW15 vorgesehen waren. Unter diesen Voraussetzungen hätte sich die Messperiode im Tunnel Bözberg auf 7 Wochen reduziert bzw. auf 11 Wochen im Tunnel Flüelen.

Um das Erreichen der Projektziele des FOP zu gewährleisten, beschloss die Begleitkommission die Messperiode bis in den Herbst 2012 zu verlängern. Diese Vorgehensweise wurde mit den Lieferanten abgestimmt.

Die effektive Messperiode dauerte rund 9 1/2 Monate vom 12.01.2012 bis zum 28.10.2012. Die Demontage erfolgte kurz danach.

4 Auswertungen der Messresultate

4.1 Einleitung

4.1.1 Auswertungskonzept

Die Auswertung der Messwerte erfolgte in verschiedenen Teilschritten:

- In einem ersten Schritt wurden die Konsistenz der Messwerte und das Ansprechverhalten der Strömungsmessgeräte untersucht.
- in einem zweiten Schritt wurde das Verhalten der Messgeräte bei verschiedenen Verkehrsverhältnissen bewertet sowie bei speziellen Vorkommnissen während der Dauer der Datenaufzeichnung. Ebenfalls berücksichtigt wurden die meteorologischen Randbedingungen in den beiden Tunneln.
- Als letzter Schritt erfolgte die statistische Auswertung der Messwerte, welche im nachfolgenden Kapitel 6 dargestellt ist.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird das allgemeine Verhalten der installierten Strömungsmessgeräte untersucht und die Messwerte beurteilt. Die Auswertungen und Graphiken beziehen sich vorwiegend auf den Tunnel Bözberg. Der Grund hierfür ist, dass im Tunnel mit RV in der Regel eine höhere Luftströmung herrscht und daher die speziellen Vorkommnisse besser ersichtlich sind als im Tunnel Flüelen mit GV. Graphisch dargestellt sind ausschliesslich die Messwerte aus dem Messprofil 2 (Zwischendecke), soweit das Messprofil 1 (Hufeisenprofil), abgesehen von der geringeren Strömungsgeschwindigkeit, ein identisches Abbild zeigt.

4.1.2 Messwertglättung und Ansprechverhalten

Alle Lieferanten hatten die Vorgabe einen 10 s Mittelwert auszugeben und haben diese auf unterschiedlicher Art erfüllt. Das Ansprechverhalten der Messgeräte steht in direktem Bezug zur Messwertglättung. Die nachfolgende Tabelle gibt die Messwertglättung der einzelnen Strömungsmessgeräte zur Bildung des Mittelwertes wieder.

Abb. 4.1 Messwertglättung der Strömungsmessgeräte

Messgeräte	Messwertglättung	Typ	Mittelungszeit	Signalfrequenz
ACP	Gewichteter gleitender Mittelwert	AB	10 s	kontinuierlich
COD	Exponentielle Messwertglättung, T90 Antwortzeit zwischen 10 s und 10 min einstellbar	AB	T90 – 15 s	1 s
DUR	Gleitender Mittelwert	L	10 s	1 s
FIV	Gleitender Mittelwert zwischen 0.5 s und 100 s einstellbar	A	10 s	1 s
SIC	Gleitender Mittelwert der Signale, 10 Werte. Medianfilter mit anteiliger Mittelung der Focus-Werte, 21 Werte mit 70 % im Focus	L	T90 - 10 s	2 s
SKN	Ca. 1000 Messwerte pro Sekunde. Von je 100 Werten wird das lineare Mittel bestimmt. Pro Sekunde 10 berechnete Werte für gleitenden Mittelwert.	AB	10	0.1 s

Während der Tracergas-Messungen wurde der Aufzeichnungsintervall des 10 s Mittelwerts von 10 s auf 2 s verkürzt. Dies erlaubte es einerseits das Ansprechverhalten andererseits die Messwertglättung der einzelnen Strömungsmessgeräte zu vergleichen. Die nachfolgende Abb. 4.2 zeigt Messwerte aus dem Bözbergtunnel über 2 Minuten, was 60 Aufzeichnungspunkten entspricht.

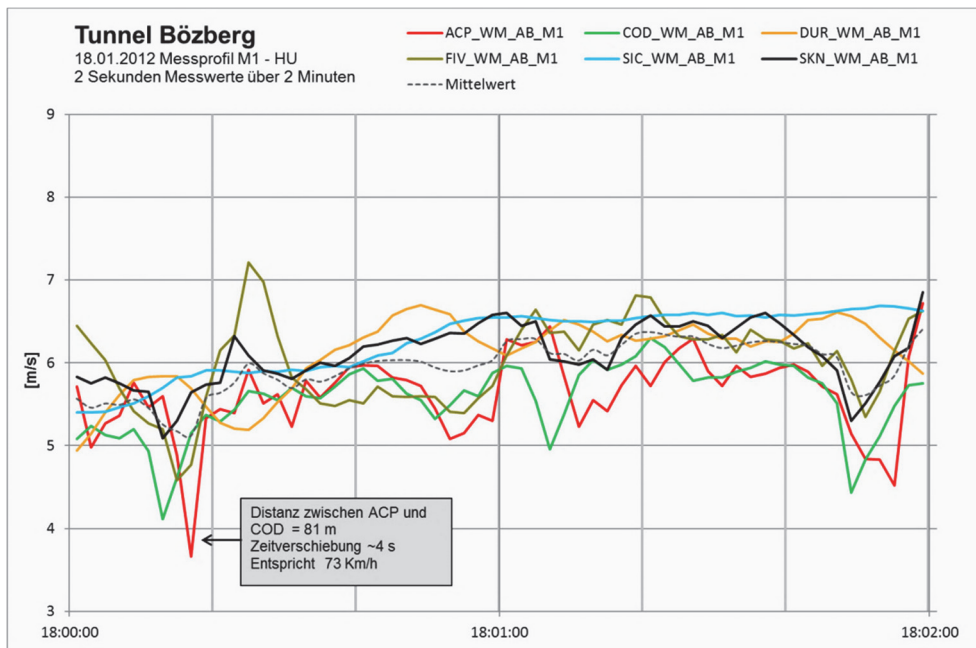


Abb. 4.2 Tunnel Bözberg- M1 Hufeisen, 2 s Messwertkurven

Geschwindigkeitsspitzen werden von vorbeifahrenden Fahrzeugen induziert. Die graphische Darstellung der Messwerte zeigt, dass insbesondere die Ultraschall Punktmessgeräte von ACP, Codel und FIV wesentlich empfindlicher reagieren, während die Punktmessung Staurohr von SKN einer messtechnikbedingter pneumatischer Dämpfung unterliegt. Die Ultraschall Linienmessgeräte von DUR und SIC zeigen messtechnikbedingt stärker geglättete Messwerte.

Es zeigt sich, dass der vorgegebene 10 s Mittelwert messtechnikbedingt und abhängig von den unterschiedlichen Messwertglättungen, variiert. Speziell die von SIC implementierte, kombinierte Messwertglättung und Filterung gibt ein stark gedämpftes Signal zurück.

Das Beispiel in der Abb. 4.2 zeigt den Effekt eines durchfahrenden Fahrzeugs. Die Punktmessungen registrieren Strömungsspitzen, während die Linienmessungen diese nicht wahrnehmen.

Der zeitliche Versatz der markanten Spitzen, beispielhaft aufgezeigt zwischen den Strömungsmessgeräten von ACP und COD, liegt bei rund 4 s und ist auf die Distanz zwischen den beiden Strömungsmessgeräten und die Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs von etwa 73 km/h zurückzuführen.

Die nachfolgende Abb. 4.3 zeigt Messwerte aus dem Tunnel Flüelen über eine Zeitdauer von 2 Minuten, welche 60 Aufzeichnungspunkten entspricht. Es zeigt sich ein ähnliches Verhalten der unterschiedlichen Messgeräte wie im Tunnel Bözberg, nur mit einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit. Hervorzuheben sind die starken Änderungsspitzen bei ACP, die nicht plausiblen, abgedrifteten Messwerte FIV und die Auswirkung der kombinierten Messwertglättung und Filterung bei SIC.

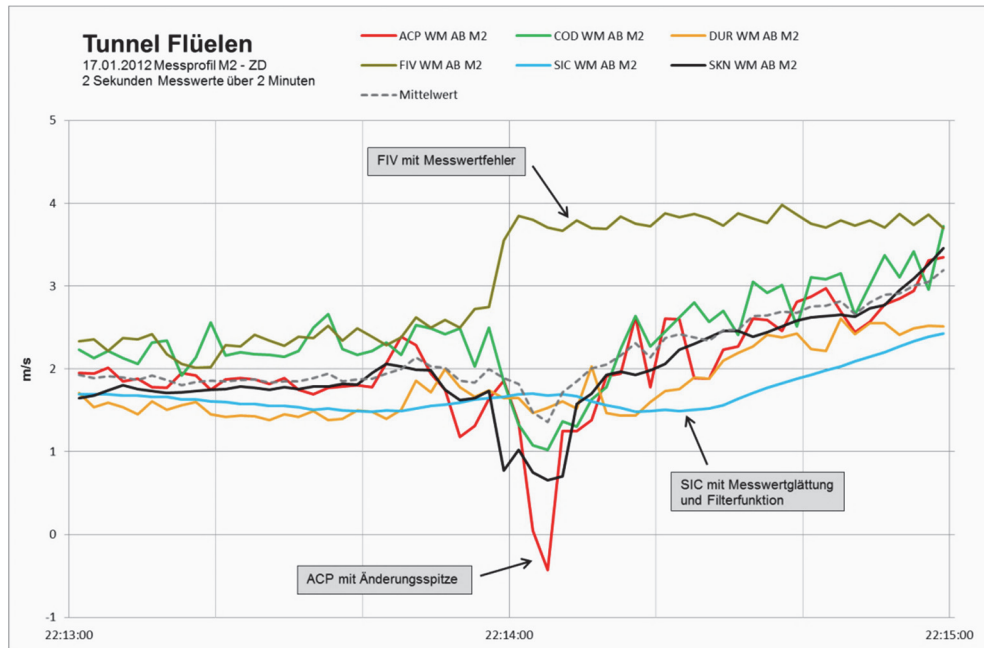


Abb. 4.3 Tunnel Flüelen – M1 Hufeisen, 2 s Messwertkurven

4.1.3 Korrekturfaktoren

Wie in Kapitel 2 erläutert, können zwischen der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit und dem effektivem Volumenstrom im Tunnel wesentliche Unterschiede auftreten. Um den Volumenstrom zu bestimmen, sind die Messwerte mit gerätespezifischen und tunnelgeometrischen Korrekturfaktoren bzw. einem kombinierten Faktor zu multiplizieren.

In keinem der vier Punktmessgeräte (ACP, COD, FIV, SKN) und in keinem der beiden Liniennmessgeräte (DUR, SIC) wurde jedoch ein Korrekturfaktor implementiert. Die gemessenen und aufgezeichneten Messwerte entsprechen also immer a priori nur der lokal gemessenen Strömungsgeschwindigkeit und nicht zwangsläufig dem Volumenstrom im Tunnel.

4.2 Konsistenz der Messwerte

Ein wichtiges Auswertekriterium betrifft die Konsistenz der Messwerte der installierten Strömungsmessgeräte bei Istwert-Änderungen.

4.2.1 Tunnel Bözberg

Über einen längeren Zeitraum von 30 Minuten sind nachfolgend in Abb. 4.4 die 10 s Messwerte aller Strömungsmessgeräte aus dem Tunnel Bözberg abgebildet. Es handelt sich um einen Zeitraum kurz nach Mitternacht am 08.02.2012, welcher völlig zufällig ausgewählt wurde. Diese Graphik gibt Ausschluss über die Konsistenz der Messwerte untereinander sowie auch das Ansprechverhalten der Geräte.

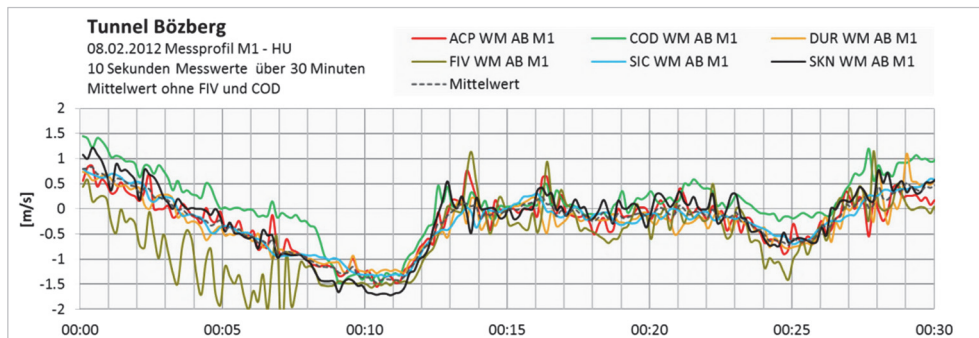


Abb. 4.4 Tunnel Bözberg – M1 Hufeisen, 10 s Messwerte

Offensichtliche Zeitspannen mit Fehlmessungen treten bei FIV auf. Auch sind stärkere Abweichungen bei dem Messquerschnitt von Codel in Bezug auf die übrigen Strömungsmessgeräte zu beobachten.

Über ein 5-Minuten-Fenster betrachtet, folgen die übrigen Messungen den Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit recht zuverlässig. Auch im 1-Minuten-Fenster werden die zeitlichen Änderungen noch relativ konsistent abgebildet. Schwankungen innerhalb einer Minute lassen jedoch kaum mehr einheitliche Trends erkennen. Häufig lassen sich innerhalb dieses Zeitfensters gegensätzliche Abweichungen vom Mittelwert beobachten. Dies kann einerseits an vorbeifahrenden Fahrzeugen liegen, welche zeitlich versetzt die räumlich versetzten Strömungsmessgeräte beeinflussen, andererseits spielt auch die Messwertglättung hinein. Weiterhin können auch lokale Strömungsverhältnisse, welche sich aufgrund der geometrisch unterschiedlichen Anordnungen und der verschiedenen Messtechniken nicht einheitlich auf alle Messsysteme auswirken, einen Einfluss haben.

4.2.2 Tunnel Flüelen

Über einen längeren Zeitraum von 30 Minuten sind nachfolgend in Abb. 4.5 die 10 s Messwerte aller Strömungsmessgeräte aus dem Tunnel Flüelen abgebildet. Diese zeigen ebenfalls ein ausgeglichenes, paralleles Verhalten wie im Tunnel Bözberg, jedoch auf tieferen Geschwindigkeitsniveau.

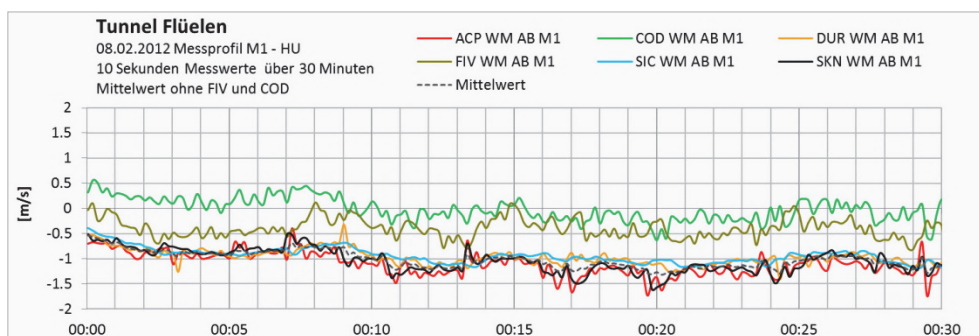


Abb. 4.5 Tunnel Flüelen- M1 Hufeisen, 10 s Messwerte

4.3 Geometrische Bestimmung der Tunnelprofile

In den beiden Tunneln sind die Testinstallationen in zwei unterschiedlichen Tunnelprofilen montiert, im Hufeisenprofil (HU, entspricht Messprofil 1) und im Rechteckprofil im Bereich der Zwischendecke (ZD, entspricht Messprofil 2). Für die Tracergas-Messungen, welche den Volumenstrom ermitteln, ist die präzise ermittelte Querschnittsfläche der Tunnelprofile erforderlich, um auf die Strömungsgeschwindigkeiten der Luft rückschließen zu können.

Die Querschnittsflächen wurden wie folgt bestimmt:

- In einem ersten Schritt wurden die Flächen anhand der Baupläne und einer generellen Masskontrolle vor Ort ermittelt.

- In einem zweiten Schritt wurde das Flächenverhältnis aus Hufeisen- und Zwischendeckenprofil aus den Strömungsmesswerten der beiden Linienmessgeräte in den unterschiedlichen Messquerschnitten M1 und M2 zur Kontrolle bestimmt.

4.3.1 Tunnel Bözberg (Richtungsverkehr)

Ergebnis der geometrischen Bestimmung:

M1 Hufeisenprofil	57.65 m ²
M1 Hydraulischer Durchmesser	8.0 m
M2 Zwischendecke	47.01 m ²
M2 Hydraulischer Durchmesser	7.0 m
Gemittelttes Flächenverhältnis M1 – M2	1.23

Die Analyse der Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen den beiden Messstellen M1 und M2 ergibt einen Wert von 1.21 und stimmt damit erwartungsgemäss sehr gut mit dem geometrischen Flächenverhältnis überein.

4.3.2 Tunnel Flüelen (Gegenverkehr)

Ergebnis der geometrischen Bestimmung:

M1 Hufeisenprofil	66.74 m ²
M1 Hydraulischer Durchmesser	8.6 m
M2 Zwischendecke	50.02 m ²
M2 Hydraulischer Durchmesser	6.9 m
Gemittelttes Flächenverhältnis M1 - M2	1.33

Die Analyse der Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen den beiden Messstellen M1 und M2 ergab einen Wert von 1.25 und stimmte nicht mit dem geometrisch ermittelten Flächenverhältnis überein. In der Folge wurden die beiden Querschnittsflächen wie folgt leicht korrigiert:

M1 Hufeisenprofil	64.66 m ²
M2 Zwischendecke	51.73 m ²
Gemittelttes Flächenverhältnis M1-M2	1.25

4.4 Strömungsverhältnisse im Tunnel

4.4.1 Luftströmung und Verkehrsaufkommen

Tunnel Bözberg

In der nachfolgenden Abb. 4.6 wird die Strömungsgeschwindigkeit der Punktmessgeräte ACP in den beiden Messprofilen M1 und M2 im Tunnel Bözberg mit Richtungsverkehr dargestellt.

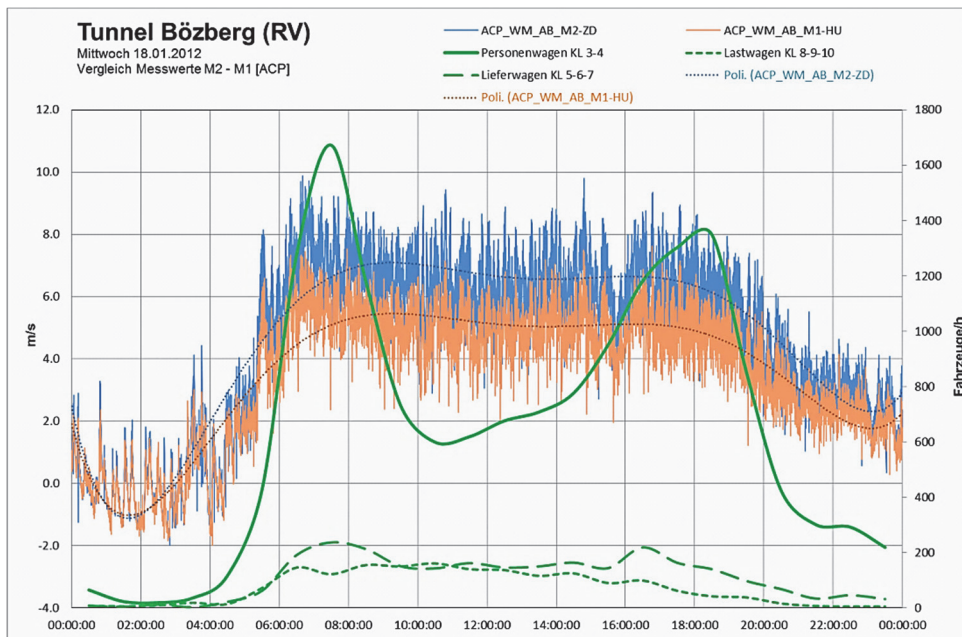


Abb. 4.6 Tunnel Bözberg - Vergleich Strömungsgeschwindigkeit zwischen M1 und M2

Die Längsströmung der Luft im Fahrraum wird massgeblich durch den Verkehrsfluss bestimmt, wie aus den ebenfalls dargestellten Kurven der Verkehrsmenge ersichtlich ist. Aufgetragen sind folgende Fahrzeugklassen (Swiss 10) wie folgt zusammengefasst:

- KL 3-4 Personenwagen, Personenwagen mit Anhänger
- KL 5-6-7 Lieferwagen, Lieferwagen mit Anhänger, Lieferwagen mit Auflieger
- KL 8-9-10 Lastwagen, Lastenzug, Sattelzug.

Der Anteil der restlichen Klassen ist sehr klein und wird daher vernachlässigt.

Bei geringem Verkehr, zwischen 00:00 – 04:00, bewegt sich die Strömungsgeschwindigkeit um den Nullpunkt, während unter Verkehr die Strömungsgeschwindigkeit entsprechend zu- und abnimmt. Wie aus der Abbildung hervorgeht, wird die Längsströmung vor allem von den Lieferwagen und Lastwagen induziert, denn der starke Rückgang des Personenwagenverkehrs tagsüber zwischen 10:00 – 15:00 Uhr ausserhalb der Berufsverkehrsspitzen hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Längsströmung im Tunnel.

Entsprechend dem gemitteltem Flächenverhältnis von 1.23 zwischen den beiden Messprofilen M1 (HU) und M2 (ZD) ist mit zu- und abnehmender Strömungsgeschwindigkeit ein entsprechend grösser Unterschied festzustellen.

Tunnel Flüelen

In der nachfolgenden Abb. 4.7 ist die Strömungsgeschwindigkeit der Punktmessgeräte ACP in den beiden Messprofilen M1 und M2 im Tunnel Flüelen mit Gegenverkehr dargestellt.

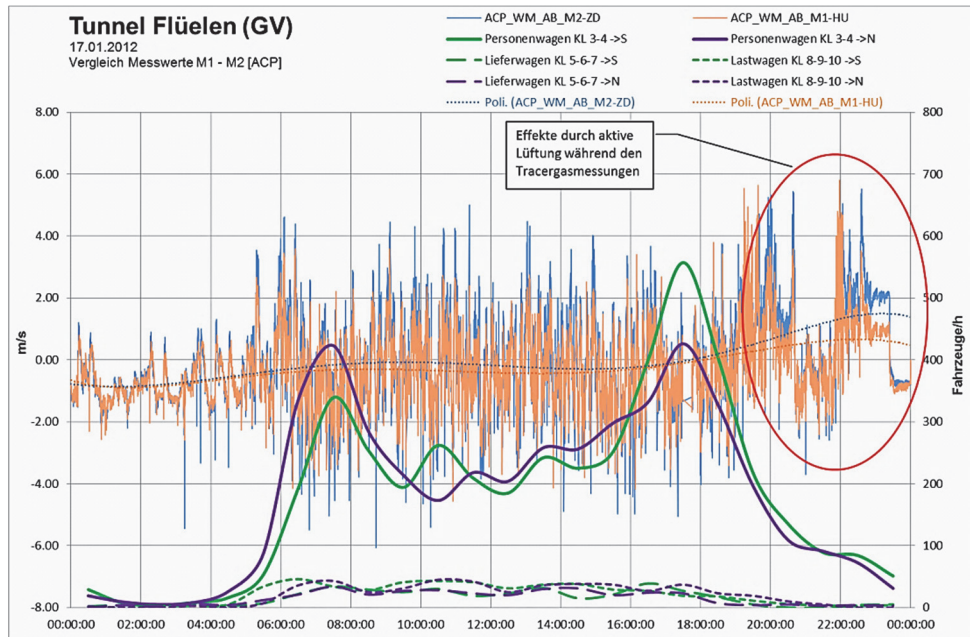


Abb. 4.7 Tunnel Flüelen - Vergleich der Strömungsgeschwindigkeit zwischen M1 und M2

Abgesehen von punktuellen Peaks, wird die Längsströmung der Luft im Fahrraum tagsüber durch den gegenläufigen Verkehrsfluss weitgehend kompensiert, da der Gegenverkehr ausgeglichen ist. Aufgetragen sind die Fahrzeugklassen der Zählstelle Sisikon S mit der gleichen Klassifizierung wie im Tunnel Bözberg.

Bei geringem Verkehr wird die Strömungsgeschwindigkeit von meteorologischen Einflüssen bestimmt. Unter Verkehr wird die Längsströmung vor allem von den Lieferwagen und Lastwagen induziert. Der starke Rückgang des Personenwagenverkehrs tagsüber zwischen 9 und 16 Uhr ausserhalb der Berufsverkehrsspitzen hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Längsströmung im Tunnel.

Da die mittlere Strömungsgeschwindigkeit immer sehr klein ist, ergibt sich daher kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Messprofilen M1 (HU) und M2 (ZD). Zwischen 19 und 23 Uhr ist u.a. der Effekt der Strahlventilatoren und der zentralen Absaugung ersichtlich, welche bei den Tracergasmessungen eingesetzt wurden.

4.4.2 Luftströmung im Tunnel

Die Punktmessgeräte von COD und SKN übermittelten getrennt die Messwerte der beiden, an den Tunnelwänden installierten Messköpfe A und B in einem Messquerschnitt. Dies erlaubt die Strömungsgeschwindigkeit pro Fahrspur separat auszuwerten. Im Tunnel Bözberg (RV) sind dies die Normalspur und die Überholspur, im Tunnel Flüelen (GV) hingegen die beiden Fahrtrichtungen.

Tunnel Bözberg

Die Daten der Punktmessgeräte COD sind für einen typischen Wochentag im Tunnel Bözberg mit Gegenverkehr in Abb. 4.8 dargestellt.

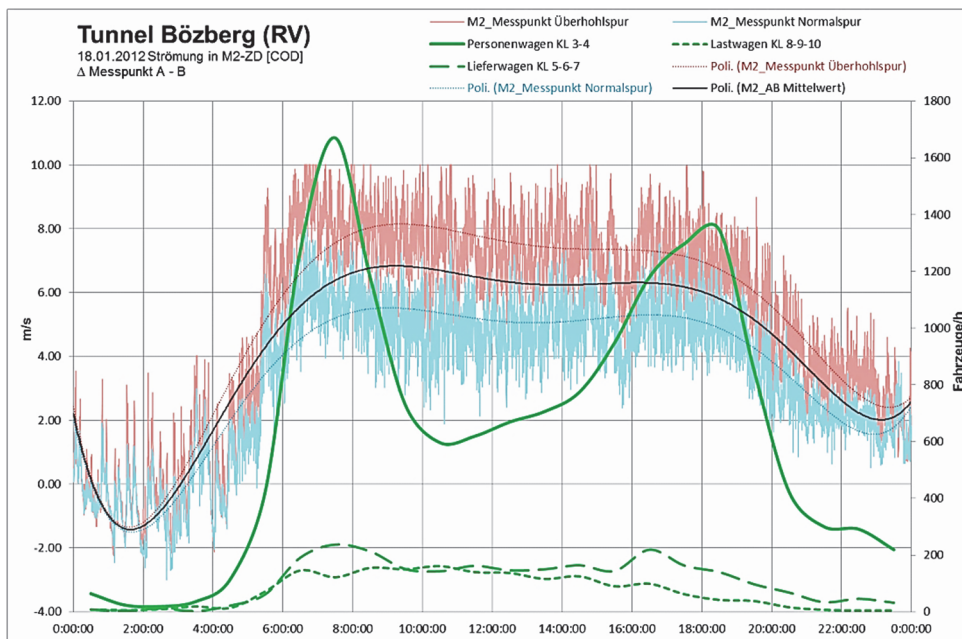


Abb. 4.8 Tunnel Bözberg - Vergleich der Strömungsgeschwindigkeit zwischen A und B

Im Hufeisenprofil-Messquerschnitt beträgt das Geschwindigkeitsverhältnis etwa 3/2, so dass im Bereich der Überholspur bei Verkehr die Strömungsgeschwindigkeit rund 50% über dem Wert der Normalspur liegt.

Dieses Verhältnis ergibt sich einerseits, wie dargestellt, aus den Strömungsmessgeräten von COD in 4.20 m Höhe, wird aber andererseits auch von den Staudruckrohren SKN auf 3.00 m Höhe bestätigt.

Diese Feststellungen weisen darauf hin, dass die Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit unter Verkehr mit nur einer Punktmessung problematisch sein kann (z.B. Strömungsmessgerät FIV). Für eine korrekte Erfassung müsste die Anordnung der Messstelle immer in der Mitte zwischen den beiden Fahrspuren erfolgen.

Tunnel Flüelen

Die Daten der Punktmessgeräte COD sind für einen typischen Wochentag im Tunnel Flüelen mit Richtungsverkehr in Abb. 4.9 dargestellt.

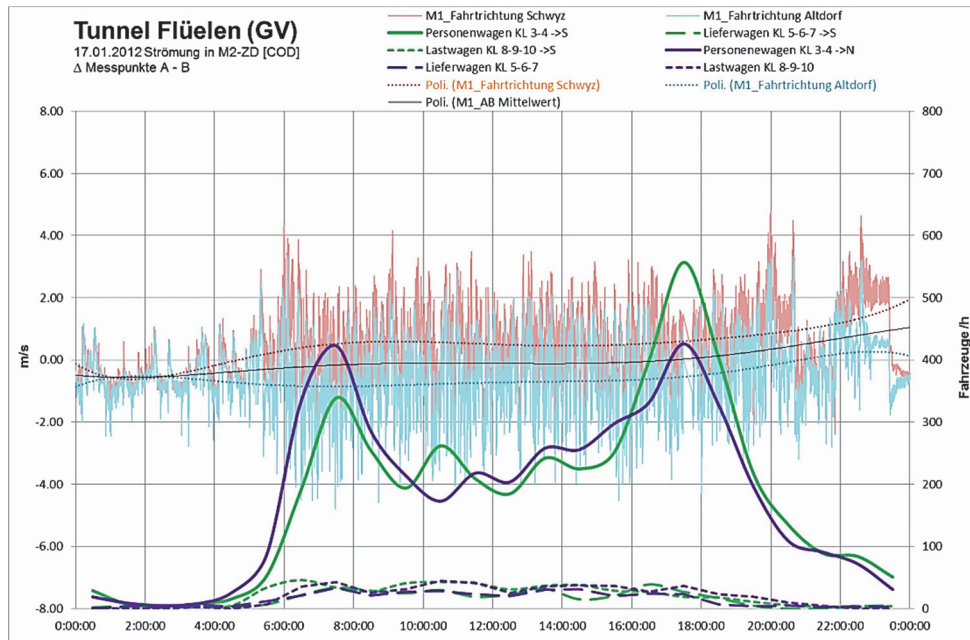


Abb. 4.9 Tunnel Flüelen - Vergleich der Strömungsgeschwindigkeit zwischen A und B

Die Längsströmung der Luft im Fahrraum wird durch den gegenläufigen Verkehrsfluss weitgehend kompensiert, da der gegenläufige Verkehrsfluss ausgeglichen ist, wie aus den ebenfalls dargestellten Kurven der Verkehrsmenge ersichtlich wird. Dementsprechend kleiner ist auch der Unterschied in der Strömungsgeschwindigkeit zwischen den beiden Fahrbahnen Richtung Schwyz und Altdorf.

4.5 Funktionsverhalten der Strömungsmessgeräte

4.5.1 Chronologie einschliesslich aussergewöhnlicher Vorkommnisse

Nachfolgend wird der Ablauf der Messkampagne einschliesslich aussergewöhnlicher Ereignisse und der getroffenen Massnahmen chronologisch wiedergegeben.

Abb. 4.10 Tabelle aussergewöhnlicher Vorkommnisse und Massnahmen

Datum	Lieferant	ausser-gewöhnlich	Vorkommnis – Massnahme
02.11.2011 03.11.2011	Alle		TUF Montage der Strömungsmessgeräte, Verkabelungen und Inbetriebnahme SMG
15.11.2012	HSLU	X	TUF Unvollständige Tracergas-Messung
16.11.2012	Alle		BOZ Montage der Strömungsmessgeräte und Verkabelungen
18.11.2011	DUR		TUF Parametrierung der Störungsmeldungen ab dem Messschrank
13.12.2011	Alle		BOZ Abschluss Montagen und Inbetriebnahme der Strömungsmessgeräte
13.12.2011	DUR	X	BOZ Messkopf A ausgetauscht, da dieser nicht in Betrieb gesetzt werden konnte.
10.01.2012	COD		TUF Einbau der Strömungsmessgeräte Codel, Verkabelungen und Implementation SPS

10.01.2012	FIV	X	TUF Funktionskontrolle der beiden Strömungsmessgeräten über ein Radiokommando von der Fahrbahn aus. Fehlverhalten der Strömungsmessgeräte ist trotzdem aufgetreten.
11.01.2012	FIV	X	BOZ Austausch der beiden Strömungsmessgeräten aufgrund der kontinuierlichen Ausfälle der Messwerte. Austausch ohne Erfolg
17.01.2012	HSLU		TUF Tracergas-Messung
18.01.2012	COD		BOZ Einbau der Strömungsmessgeräte Codel, Verkabelungen und Implementation SPS
18.01.2012	HSLU		BOZ Tracergas-Messung
10.02.2012	ACP	X	BOZ Datenkabel waren vertauscht. Daher waren die Messwerte im Messprofil M1 zu hoch und im Messprofil M2 zu tief. Der Fehler geschah bei der Inbetriebnahme. Kurzer Unterbruch der Datenaufzeichnung von ca. 20 Stunden Messwerte sind nun OK. Die bestehenden Datenfiles wurden softwaremässig korrigiert.
13.02.2012	FIV	X	TUF Am 06.02.2012 wurde Fives per Mail über das kontinuierliche Fehlverhalten aller 4 SMG mit Beispielkurven informiert. Am 13.02.2012 mit telefonischem Kontakt hat Fives mitgeteilt, dass sie am untersuchen und Korrektur der Problematik sind. Eine getestete, neue Lösung wird erst in ca. 3 Monaten zur Verfügung stehen. Das weitere Vorgehen muss abgestimmt werden.
12.03.2012	NSNW Alle		BOZ Tunnelreinigung, teilweise Demontagen und Schutzmassnahmen
13.03.2012	NSNW Alle		BOZ Tunnelreinigung abgeschlossen, Montagen und Kontrolle der Strömungsmessgeräte,
25.03.12	Alle		BOZ, TUF Umstellung auf Sommerzeit +1 Stunde, wird in den Auswertungen vernachlässigt.
10.04.2012	AfBN Alle		TUF Tunnelreinigung, teilweise Demontagen und Schutzmassnahmen
12.04.2012	AfBN Alle		TUF Tunnelreinigung abgeschlossen, Montagen und Kontrolle der Strömungsmessgeräte,
12.04.2012	SIC	X	TUF Aufgrund der festgestellten regelmässigen Ausreisser hat Sick die Messgeräte ausgetauscht und einen proprietären Datenlogger und GSM Modul eingebaut.
01.07.12	DUR	X	BOZ Starke Gewitter im Grossraum Zürich, Bei den Durag Geräten, mit 230 V versorgt, sind die Signale ausgefallen
16.06.2012	BOZ	Brand	BOZ Brandalarm wegen Turboschaden, Brandprogramm aktiv
21.08.2012	DUR	X	BOZ Kontrolle Speisegeräte nach Spannungsausfall. Geräte OK
11.09.2012	DUR	X	BOZ Austausch der Analogkarte SPS mit den Ports DUR und ACP
11.09.2012	FIV	X	TUF Austausch der Kontrolllogik und Sonden der Strömungsmessgeräte 1 Gerät wegen mangelnden Ersatzteilen „ausser Betrieb“
11.09.2012	FIV	X	BOZ Austausch der Kontrolllogik und Sonden der Strömungsmessgeräte 1 Gerät wegen mangelnden Ersatzteilen „ausser Betrieb“
11.09.2012	SKN	X	BOZ Defekte Temperatursonde auf Staudruckrohr ersetzt
11.09.2012	COD	X	FLU

			Temperatursonden in allen SMG wegen Drift ausgetauscht. Wegen einer Fehlmanipulation übermittelt der Messkopf A im M2 keine Messwerte mehr.
11.09.2012	COD	X	BOZ Temperatursonden in allen SMG wegen Drift ausgetauscht. Wegen einer Fehlmanipulation übermittelt der Messkopf A im M2 keine Messwerte mehr
11.09.2012	SIC	X	TUF Aufgrund der festgestellten regelmässigen Ausreisser hat Sick die Messgeräte ausgetauscht und galvanische Trennwandler zwischen den beiden Messköpfen eingebaut. Temperatur im M2 richtig parametrieret.
26.09.2012	HSLU		TUF Tracergas-Messung
28.10.2012	Alle		BOZ, TUF Umstellung auf Winterzeit -1 Stunde, wird in den Auswertungen vernachlässigt.
29.10.2012	Alle		BOZ Ende Messkampagne und Rückbau der Messinstallationen
30.10.2012	Alle		TUF Ende Messkampagne und Rückbau der Messinstallationen

4.5.2 ACP TK 300

Das Strömungsmessgerät der Firma ACP ist ein Ultraschall-Punktmessgerät bestehend aus zwei Messköpfen, welche im Messquerschnitt beidseitig an der Tunnelwand montiert sind. Die Einbauhöhe betrug im Tunnel Flüelen 3.20 m und im Tunnel Bözberg 4.20 m.

Die Auswertelogik für beide Messprofile wurde jeweils im Messkasten installiert. Aufgezeichnet wurde jeweils nur der Mittelwert AB über die beiden Messköpfe A und B. Die Temperatur wurde nicht übermittelt.

Der effektive Volumenstrom bzw. die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel muss über einen Umrechnungsfaktor bestimmt werden, welcher der Einbauposition und insbesondere dem Wandabstand der Messköpfe Rechnung tragen muss.

Generell reagiert das Strömungsmessgerät von ACP sensibler als die anderen installierten Strömungsmessgeräte. Dieses Verhalten ist aus den 2 s Aufzeichnungen während den Tracergas-Messungen wie auch den normalen 10 s Aufzeichnungen klar erkennbar und macht sich insbesondere durch stärkere Ausschläge bemerkbar.

Vereinzelt sind zusätzlich Ausreisser zu bemerken, für welche es insbesondere in einem Richtungsverkehrstunnel wie Bözberg keine plausible Erklärung gibt (siehe z. B. Abb. 4.12, Messquerschnitt M1, gegen 10:00h).

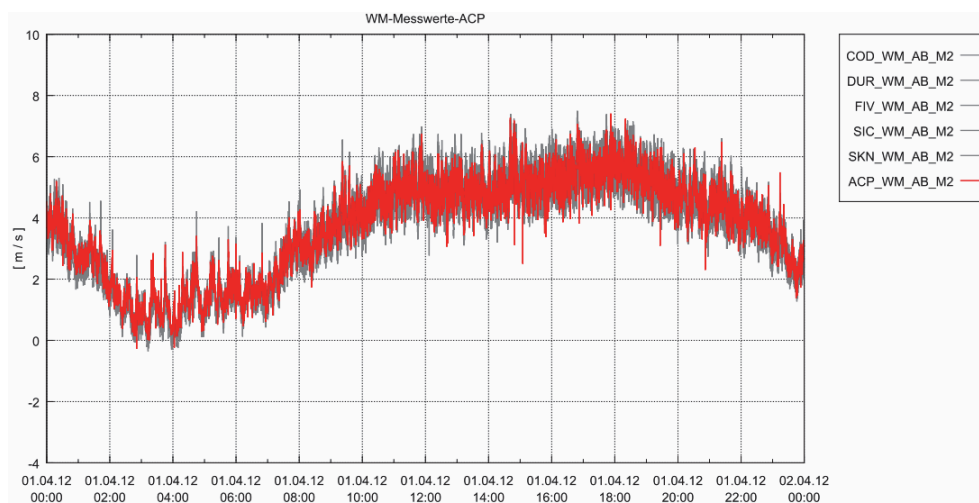


Abb. 4.11 Tunnel Bözberg - 01.04.2012, M2, Messwerte mit mehreren Ausschlägen

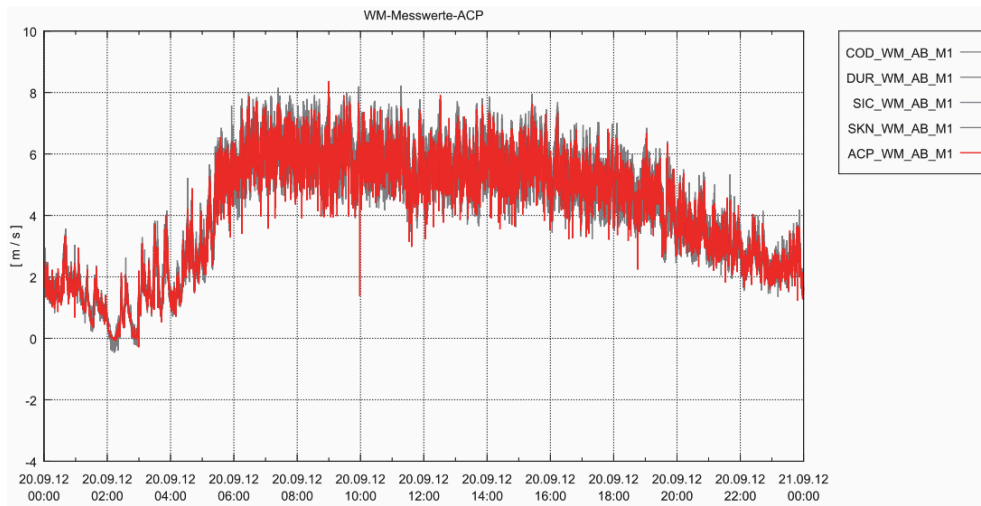


Abb. 4.12 Tunnel Bözberg - 20.09.2012, M1, Ausreisser um 10:00h

Am 01.07.2012 haben starke Gewitter im Grossraum Zürich dazu geführt, dass die analogen Eingänge auf der I/O Karte der SPS, an welchen die Messgeräte von ACP und DUR angeschlossen waren, vermutlich durch eine Überspannung gestört wurden.

Diese Störung führte zu einem Offset der Messwerte (in Bezug auf die übrigen Messgeräte), wie aus den beiden Graphiken Abb. 4.13 vor und Abb. 4.14 nach dem Gewitter ersichtlich ist. Nach dem Austausch der Analogkarte war der Offset nicht mehr vorhanden.

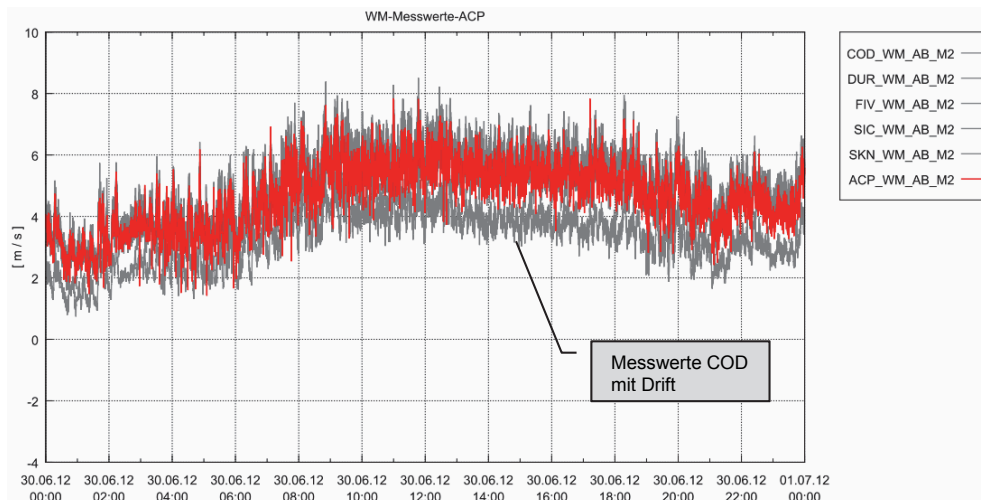


Abb. 4.13 Tunnel Bözberg - 30.06.2012, M2, Messwerte vor dem Gewitter mit guter Übereinstimmung mit den übrigen Messgeräten

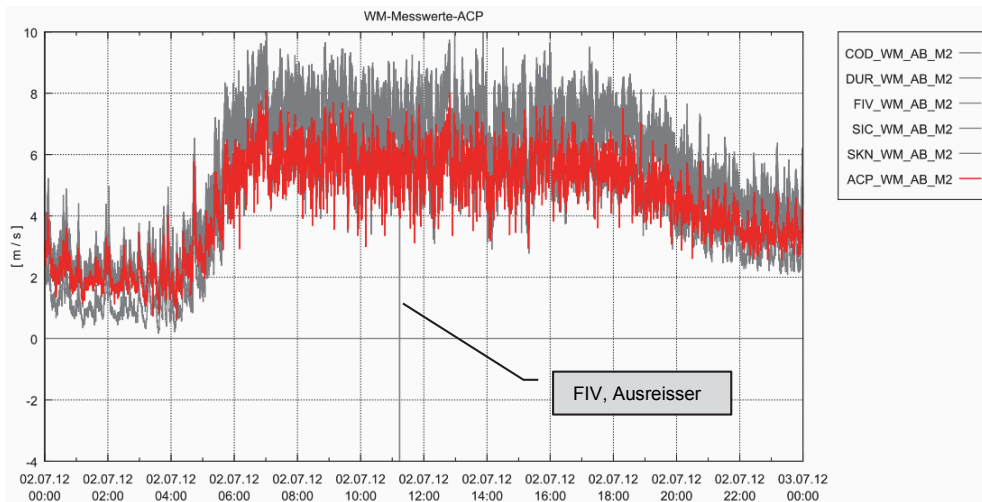


Abb. 4.14 Tunnel Bözberg - 02.07.2012, M2, Messwerte mit dem markanten Offset von zirka 2 m/s unmittelbar nach dem Gewitter vom 01.07.2012

4.5.3 COD TunnelCraft 3

Das Strömungsmessgerät der Firma Codel ist ein Ultraschall-Punktmessgerät bestehend aus zwei Messköpfen, welche im Messquerschnitt beidseitig an der Tunnelwand montiert sind. Die Einbauhöhe betrug sowohl in beiden Tunneln 4.20 m.

Die gesamte Auswerteelektronik ist im Gerät selbst eingebaut. Da die COD Geräte zu einem späteren Zeitpunkt eingebaut wurden, war es nicht mehr möglich die optional dazugehörige, proprietäre Auswertelogik im Messkasten unter zu bringen. Die Einzelwerte der beiden Messköpfe A und B wurden daher der einzelnen der SPS übermittelt und die Mittelwerte AB der Strömungsgeschwindigkeit und der Temperatur in der SPS berechnet.

Wie bei Punktmessungen üblich, muss der effektive Volumenstrom bzw. die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel über einen Umrechnungsfaktor bestimmt werden, welcher der Einbauposition und insbesondere dem Wandabstand der Messköpfe Rechnung tragen muss.

Im Verlauf der Messkampagne hat sich progressiv eine Drift in Bezug auf die übrigen Messgeräte bemerkbar gemacht, welcher insbesondere im Tunnel Bözberg mit RV nach 6 Monaten im Normalbetrieb in beiden Messquerschnitten deutlich wurde. Die Abweichung betrug zum Schluss rund 2/3, d.h. die COD-Werte lagen und 30% unter den übrigen Messwerten.

Im Tunnel Flüelen wurde die Drift ebenfalls festgestellt. Aufgrund des Gegenverkehrs und der daher geringere Luftströmung im Tunnel war sie dort jedoch nicht so klar ersichtlich.

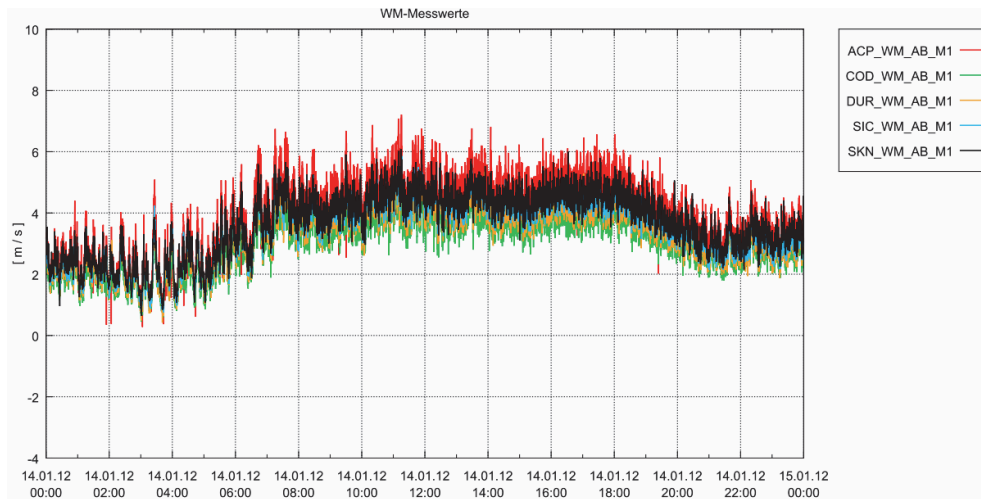


Abb. 4.15 Tunnel Bözberg – 14.01.2012, M1, Messwerte aller Strömungsmessgeräte zu Beginn der Messkampagne, COD (grün) ohne Drift.

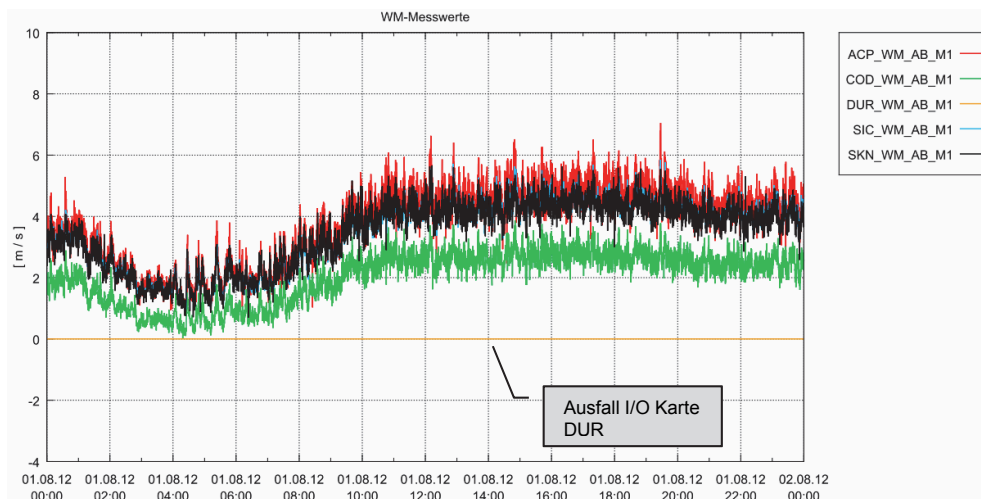


Abb. 4.16 Tunnel Bözberg - 01.08.2012, M1, Messwerte aller Strömungsmessgeräte nach über einem halben Jahr, COD (grün) mit ca. 30% Drift.

Der Lieferant Codel hat die Drift auf eine Serie von instabilen Temperatursonden zurückgeführt, welche eingebaut wurden. In einem Serviceeinsatz am 11.09.2012 wurden diese in allen Strömungsmessgeräten in den beiden Tunneln ersetzt.

Durch eine Fehlmanipulation bei der Nullpunktgleichung bei der Wiederinbetriebnahme durch den Lieferanten am 11.09.2012 wurde jeweils im Tunnel Bözberg im M2 die Datenübertragung des Messkopfs B und im Tunnel Flüelen des Messkopfs A nicht aktiviert. Dadurch war nach dem Serviceeinsatz in den letzten 1½ Monaten der Messkampagne keine auswertbare Mittelwertbildung mehr möglich.

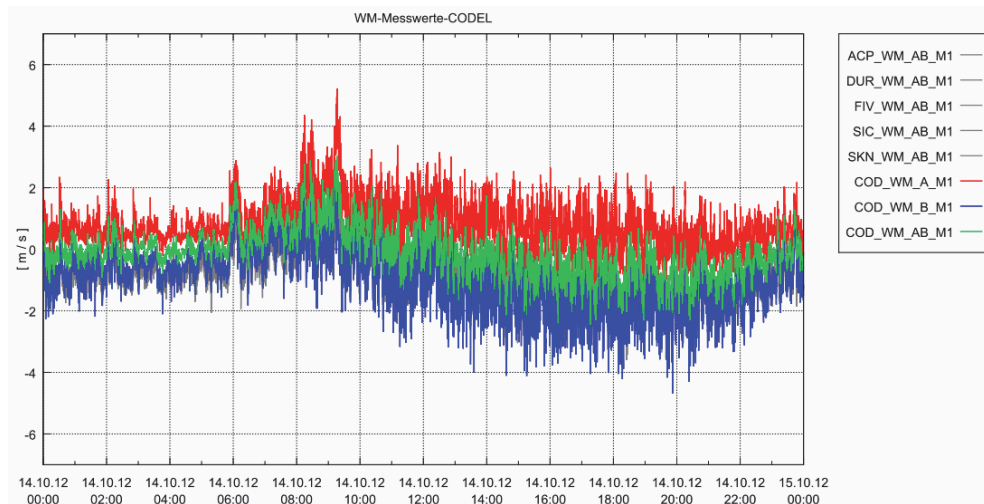


Abb. 4.17 Tunnel Flüelen - 14.10.2012, M1, Messwerte A, B und AB korrekt

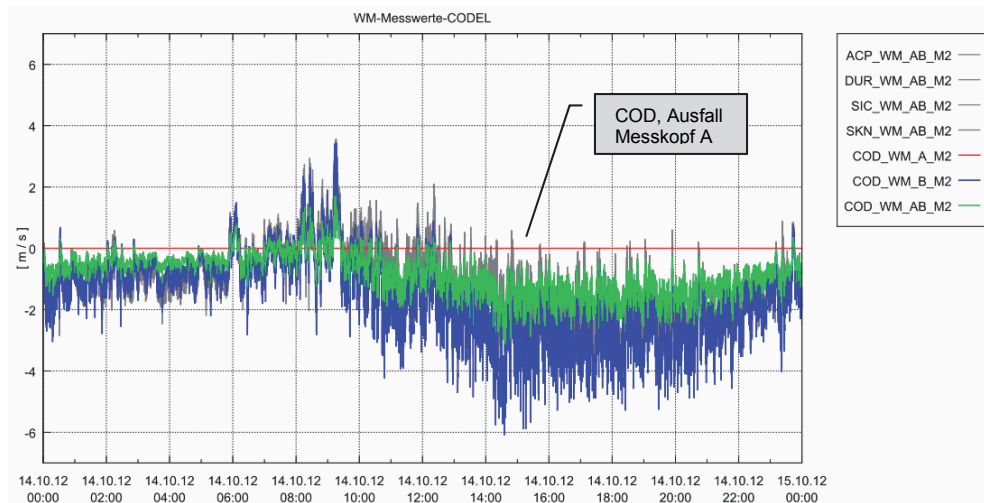


Abb. 4.18 Tunnel Flüelen - 14.10.2012, M2, Ausfall Messkopf A, Messwert B und AB daher ungültig

4.5.4 DUR D-FL 200T

Das Strömungsmessgerät der Firma Durag ist ein Ultraschall-Linienmessgerät, welches in einem 45° Winkel quer über die Fahrbahn von Wand zu Wand misst. Die Geräte sind im Tunnel Flüelen auf 4.10 m und im Tunnel Bözberg auf 4.20 m Höhe ab der Fahrbahn montiert, knapp über dem Bereich der maximal zulässigen Höhe von 4.00 m für grenzüberschreitende Lastwagen (internationale Norm).

Die querende Linienmessung erfasst entlang des Messstrahls die mittlere Strömungsgeschwindigkeit. Der effektive Volumenstrom bzw. die flächengemittelte Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel muss über einen Umrechnungsfaktor bestimmt werden, welcher der Einbauposition und insbesondere dem Deckenabstand des Messstrahls Rechnung trägt.

Als einziges Gerät erfolgt die Stromversorgung der beiden Messköpfe mit 24 VDC ab einem Netzgerät, welches sich in der Klemmenbox an der Tunnelwand befindet. Dadurch erforderten diese Messgeräte die Verlegung zusätzlicher 230 VAC Speiseleitung.

Am 01.07.2012 waren im Grossraum Zürich schwere Gewitter zu verzeichnen. Zur gleichen Zeit sind die Strömungsmessgeräte in beiden Messquerschnitten M1 und M2 ausgefallen. Obwohl die gesamte Installation geerdet war, wurde zuerst auf einen Ausfall der

Netzgeräte in den Klemmboxen durch eine Überspannung geschlossen, da alle übrigen Strömungsmessgeräte im Tunnel, welche über die gleichen Datenkabel und Speisekabel 24 VDC angeschlossen waren, keinen Ausfall verzeichneten.

Dazu ist zu bemerken, dass mit Ausnahme von SIC bei allen Messgeräten zum gleichen Zeitpunkt ein kurzer Ausfall zu verzeichnen war, nach welchen sie dann aber wieder korrekt funktionierten.

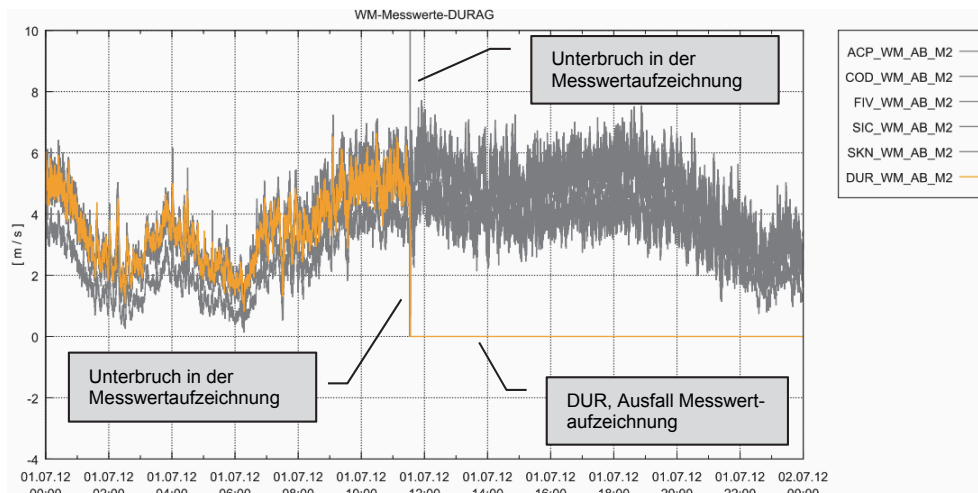


Abb. 4.19 Tunnel Bözberg - 01.07.2012, M2, Ausfall des Strömungsmessgerätes DUR und zeitgleicher Ausreisser des Strömungsmessgerätes FIV

Eine Kontrolle vor Ort am 21.08.2012 ergab, dass die Netzgeräte intakt waren und das Problem auf der Datenseite liegen musste. Am 11.09.2012 wurde daher die analoge I/O Karte der SPS ausgetauscht. Danach wurden die Messwerte wieder korrekt aufgezeichnet.

Zu bemerken ist, dass die gesamte Messinstallation an die Tunnelerde angeschlossen wurde (Messschrank und alle Messgeräte), es wurden jedoch keine Überspannungsschutzeinrichtungen eingebaut.

4.5.5 FIV Windcheck

Das Strömungsmessgerät der Firma Fives Pillard ist ein Ultraschall-Punktmessgerät. Im Gegensatz zu den beiden installierten Ultraschall-Punktmessgeräten (ACP, COD) misst dieses Gerät parallel zur Luftströmung. Pro Messquerschnitt wurde, den Vorgaben des Lieferanten folgend, jeweils nur ein Messpunkt eingerichtet. Im Tunnel Bözberg befanden sich die Geräte jeweils im Übergangsbereich zwischen Tunnelwand und Decke auf der Seite der Normalfahrspur. Im Tunnel Flüelen wurden die Strömungsmessgeräte im Tunnelgewölbe (M1) respektive Zwischendecke (M2) montiert (siehe Kapitel 3.1.4).

Der effektive Volumenstrom im Tunnel muss über einen Umrechnungsfaktor bezugnehmend auf die Einbauposition (im Gewölbe im Hufeisenprofil im M1 und unterhalb der Zwischendecke im M2) des einzelnen Messpunktes und insbesondere dem Wandabstand der Messköpfe Rechnung tragen muss.

Der Windcheck ist montageseitig und bezüglich der Anschlüsse einfach zu handhaben. Die Stromversorgung erfolgt über 24 VDC. Die gesamte Auswerteelektronik ist im Gerät selbst eingebaut und gibt über zwei analoge 4-20 mA Ausgänge die Strömungsgeschwindigkeit und die Temperatur ab.

Das Strömungsmessgerät kann über eine RC-Fernbedienung parametrierbar werden oder über eine Anschlusssteckdose, welche am Gehäuse angebracht ist. Die Parametrierung ist auch ab dem Schaltschrank über die Kabelverbindung möglich.

Das Funktionsverhalten aller vier installierten Messgeräte von FIV war während der gesamten Messkampagne und den unterschiedlich installierten Softwareversionen insge-

samt unbeständig. Phasenweise haben die Geräte, vergleichbar mit den anderen Messgeräten, die Strömungsgeschwindigkeit der Luft während Wochen korrekt erfasst, phasenweise kam es zu Teil- und Totalausfällen, wie dies in den nachfolgenden Graphiken klar aufgezeigt wird.

Funktionskontrollen am 10.01.2012 im Tunnel Flüelen und Austausch der Geräte am 11.01.2012 im Tunnel Bözberg haben an diesem Zustand nichts geändert. Aufgrund dieses Verhaltens hat sich die Firma 3 Monate Zeit erbeten, um ihre proprietäre Software zu überarbeiten.

FIV hat am 11.09.2012 in drei Messgeräten die gesamte Elektronik und die damit verbundenen Messsonden ausgetauscht. Auch die zu diesem Zeitpunkt neu installierte, und überarbeitete Software hat das Fehlverhalten der Messgeräte jedoch nicht behoben.

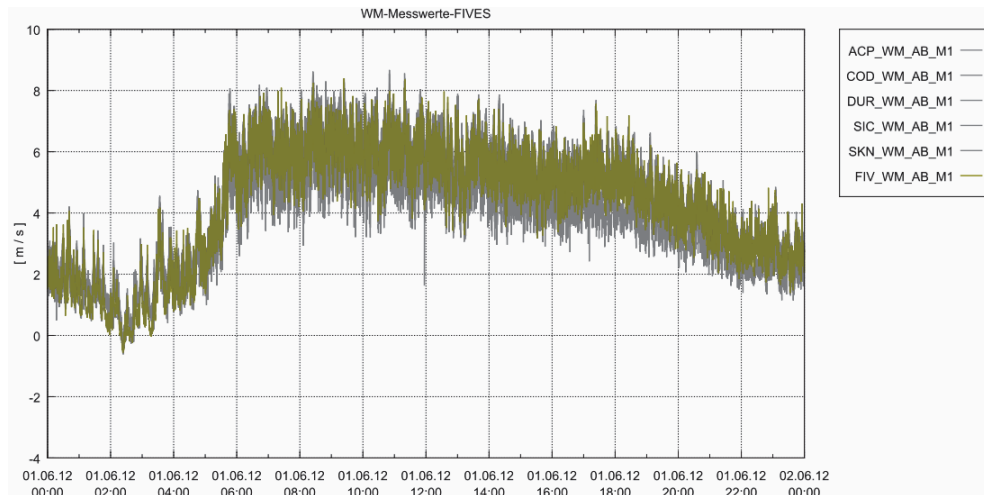


Abb. 4.20 Tunnel Bözberg - 01.06.2012, M1, korrekt funktionierende Messgeräte

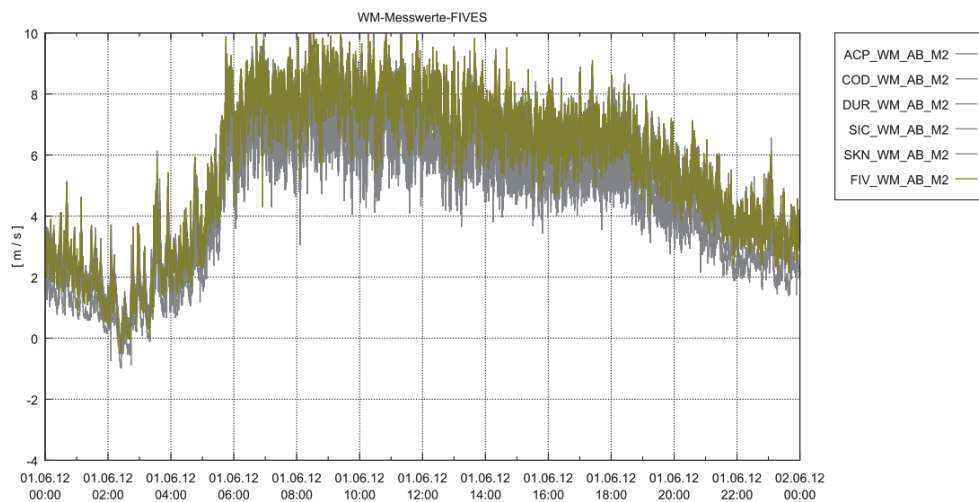


Abb. 4.21 Tunnel Bözberg - 01.06.2012, M2, korrekt funktionierende Messgeräte

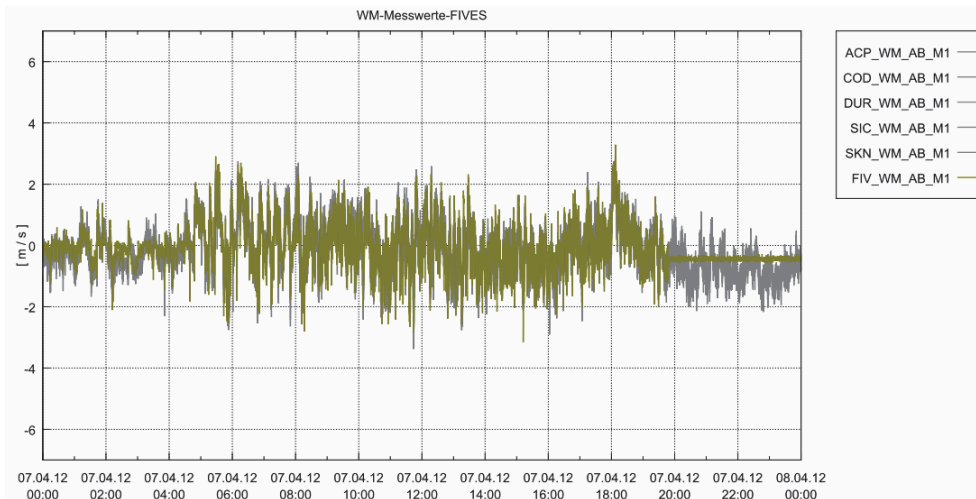


Abb. 4.22 Tunnel Flüelen - 07.04.2012, M1, typisches Bild mit Messgerät mit phasenweisen Teilausfall

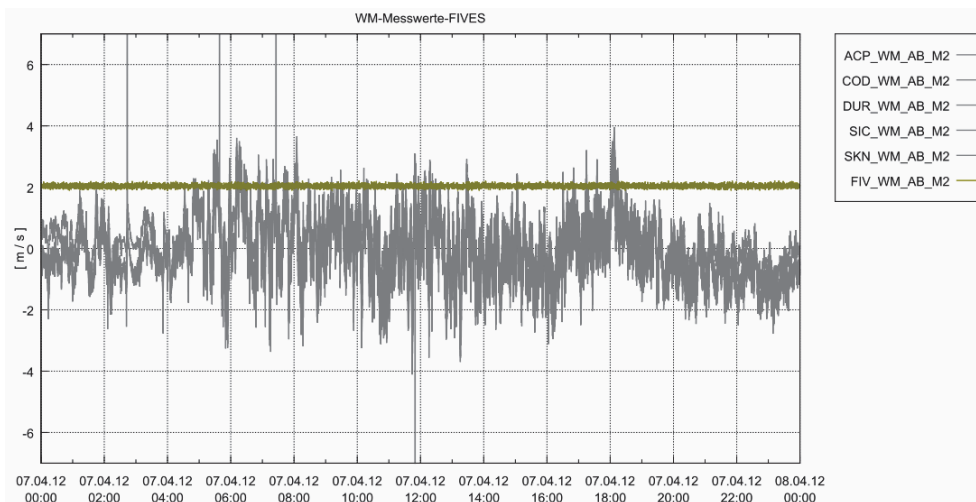


Abb. 4.23 Tunnel Flüelen - 07.04.2012, M2, typisches Bild mit Messgerät mit Totalausfall

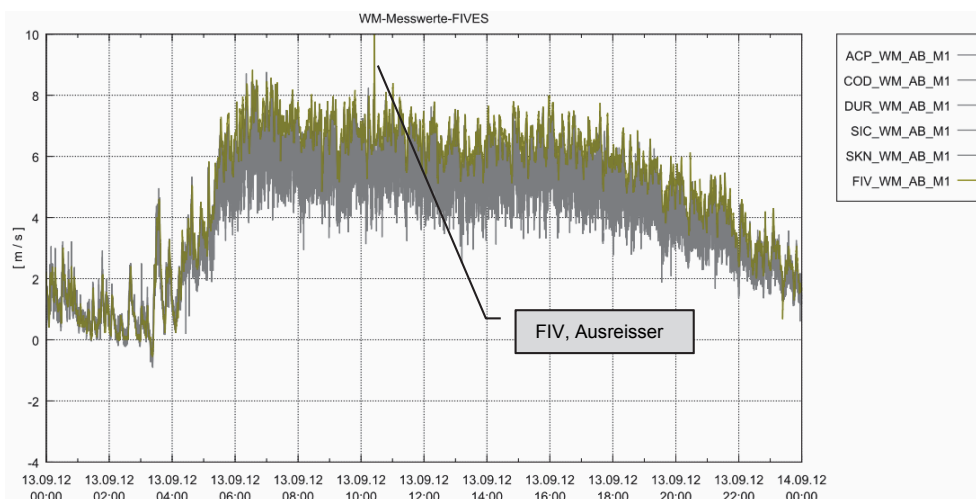


Abb. 4.24 Tunnel Bözberg - 13.09.2012, M1, typisches Bild nach Austausch Messgerät und Software mit Ausreisser

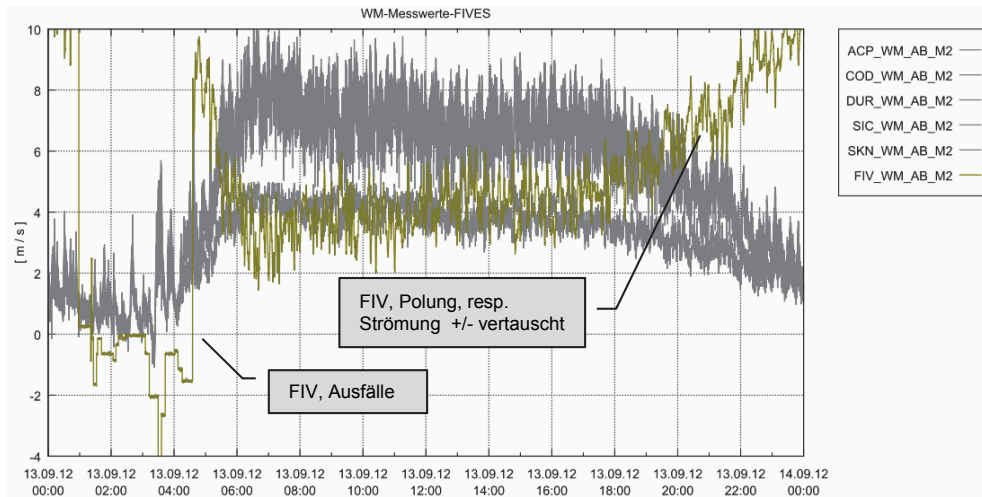


Abb. 4.25 Tunnel Bözberg - 13.09.2012, M2, typisches Bild nach Austausch Messgerät und Software mit Ausfällen. Im Weiteren wurde das Gerät nicht richtig parametrier (Strömungsrichtung, respektive die Polung +/- vertauscht)

Im Tunnel Flüelen war im Messquerschnitt 1 ein extremes Fehlverhalten des Strömungsmessgerätes FIV festzustellen. Kurze Zeit später kam es zu einem Totalausfall. Am 11.09.2012 wurde das Gerät demontiert und festgestellt, dass eine der beiden Messsonden durch Salzeinwirkung korrodiert war. Dadurch wurden die Ultraschallwellen abgelenkt und die Messwerte verfälscht. Dazu ist anzumerken, dass das Gerät zu diesem Zustand keine Störungsmeldung abgesetzt hat.



Abb. 4.26 Tunnel Flüelen - 11.09.2012, M1, durch Salzeinwirkung korrodierter Ultraschallsensor

Nach Auskunft des Lieferanten besteht der Sensor aus Aluminium, was den Effekt der Salzeinwirkung erklärt. Weiterhin informierte der Lieferant, dass die Sensoren zukünftig mit einer Schutzbeschichtung gegen die Salzeinwirkung schützen zu wollen.

4.5.6 SIC Flowsic200

Das Strömungsmessgerät der Firma Sick ist ein Ultraschall-Linienmessgerät, welches in einem 45° Winkel quer über die Fahrbahn von Wand zu Wand misst. Die Geräte sind im Tunnel Flüelen auf 4.20 m und im Tunnel Bözberg auf 4.20 m Höhe ab der Fahrbahn montiert, knapp über dem Bereich der maximal zulässigen Höhe von 4.00 m für grenzüberschreitende Lastwagen (internationale Norm).

Die querende Linienmessung erfasst entlang des Messstrahls die mittlere Strömungsgeschwindigkeit. Der effektive Volumenstrom bzw. die flächengemittelte Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel muss über einen Umrechnungsfaktor bestimmt werden, welcher der Einbauposition und insbesondere dem Deckenabstand des Messstrahls Rechnung trägt.

Glättung und Filterung der Messwerte

Wie schon in den Kapiteln 3.1.5 und 4.2 festgehalten, wurde bei den Strömungsmessgeräten SIC gegenüber allen anderen Strömungsmessgeräten eine markante Messwertglättung festgestellt, welche aus systeminhärenten Gründen aus einer Glättung und einer zusätzlichen Filterung besteht. Dadurch wird eine zusätzliche zeitliche Verschiebung von zirka 21 Sekunden geriert, wie aus der nachfolgenden Abb. 4.27 hervorgeht. Aufgetragen ist der 2 s und der geglättete 10 s Messwert DUR sowie der geglättete Messwert SIC.

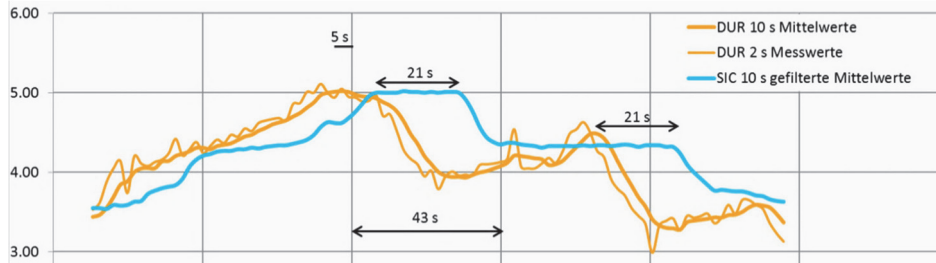


Abb. 4.27 Inhärente Messwertglättung der Strömungsmessgeräte SIC

Montagevorschrift

Wenn für die Installation nicht genügend Freiraum nach oben vorhanden ist (1 m) und dadurch die Strömungsmessgeräte nahe an der Zwischendecke montiert werden müssen, dann sollen diese gemäss den Installationsanweisungen [4] leicht nach unten abgewinkelt montiert werden, um Reflektionen an der Zwischendecke zu vermeiden.

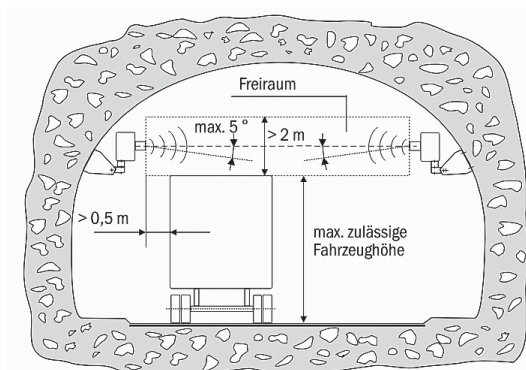


Abb. 4.28 Auszug aus den Installationsvorschriften von Flowsic200 [4]

In beiden Tunneln und jeweils im Messquerschnitt M2 im Bereich der Zwischendecken wurden regelmässig Ausreisser festgestellt, welche vorwiegend am frühen Morgen bei geringen Verkehr auftraten (Daten des Tunnels Bözberg in Abb. 4.29 und des Tunnels Flüelen in Abb. 4.30). Diese Ausreisser betrafen analog auch die Werte der virtuellen Temperatur wie aus Abb. 4.31 hervorgeht.

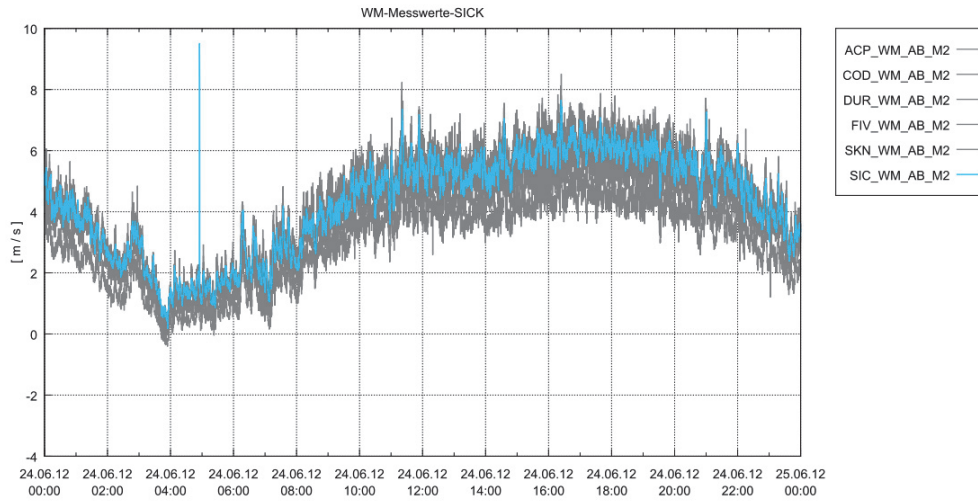


Abb. 4.29 Tunnel Bözberg - 24.06.2012, M2, Beispiel eines Ausreissers

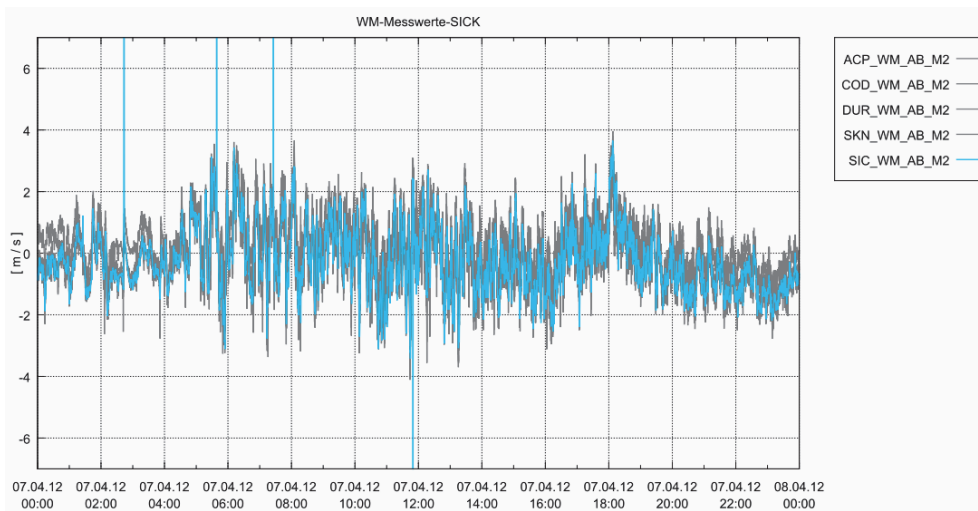


Abb. 4.30 Tunnel Flüelen - 07.04.2012, M2, Beispiele Ausreisser

Bezüglich der von den Strömungsmessgeräten SIC ausgegebenen virtuellen Temperaturen wurden Abweichungen in Bezug auf die übrigen Temperaturmessungen und insbesondere die Referenztemperaturmessung festgestellt. Die Abweichungen betrugen in beiden im Tunneln zwischen 3-5 K.

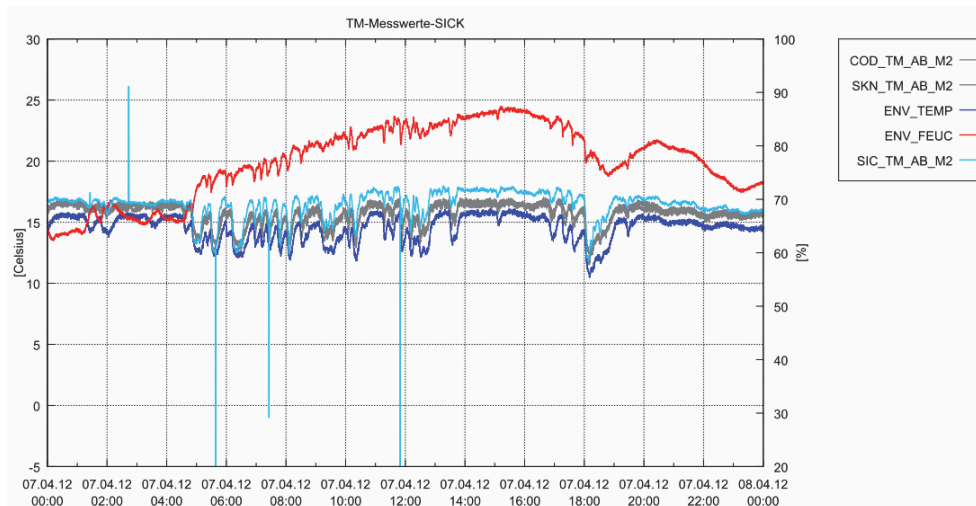


Abb. 4.31 Tunnel Flüelen - 07.04.2012, M2, Beispiel von Ausreisser Temperatur und generelle Abweichung von ca. 3°C

Um die Problematik der Ausreisser-Werte aufzuklären, hat die Firma Sick am 12.04.2012 in einem ersten Schritt in der Auswerteeinheit für den M2 im Tunnel Flüelen einen proprietären Datenlogger und ein GSM Modul installiert, um die Softwareaufzeichnungen auszuwerten. Die Ursache konnte nicht ermittelt werden.

Bei einem Serviceeinsatz am 11.09.2012 wurden im Tunnel Flüelen im Messquerschnitt M2 im Bereich der Zwischendecke die beiden Messköpfe ausgetauscht und gleichzeitig galvanische Trennwandler zwischen den beiden Köpfen eingebaut. Gleichzeitig wurde auch die Messdistanz zwischen den beiden Köpfen neu ausgemessen und der Berechnungskoeffizient für die Temperatur optimiert. Das Phänomen der Ausreisser im M2 wurde jedoch auch durch diese Massnahmen nicht behoben, wie aus Abb. 4.32 hervorgeht. Die Optimierung der Temperaturberechnung löste jedoch immerhin die zuvor beschriebene Abweichungsproblematik.

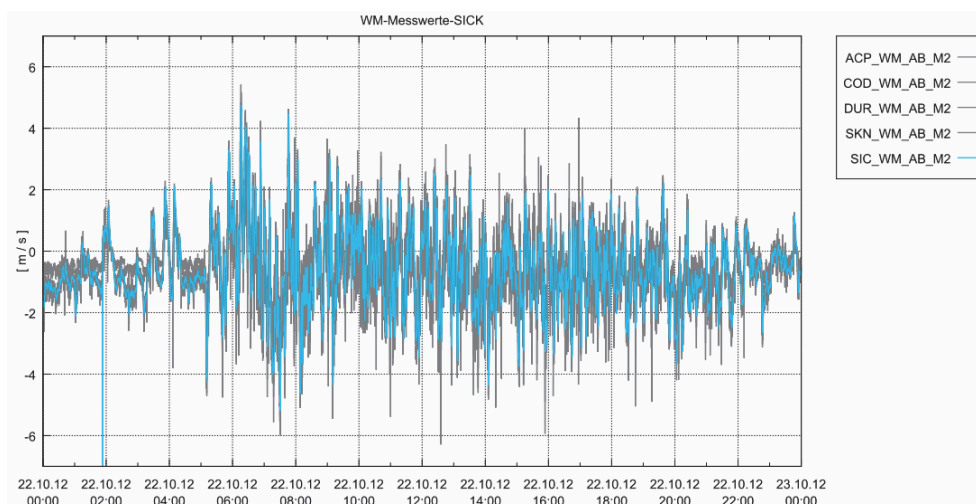


Abb. 4.32 Tunnel Flüelen - 22.10.2012, M2, Ausreisser nach dem Serviceeinsatz vom 11.09.2012

4.5.7 SKN TMS 3000

Das Strömungsmessgerät der Firma Schiltknecht ist ein Staudruckrohr-Punktmessgerät bestehend aus zwei Messköpfen, welche im Messquerschnitt beidseitig an der Tunnelwand montiert sind. Die Einbauhöhe betrug im Tunnel Flüelen sowie im Tunnel Bözberg 3.00 m.

Die Differenzdruckumformer wurden im Tunnel oberhalb der Staudruckrohre montiert, um

lange Druckschläuche zu vermeiden. Die gesamte Auswertelektronik wurde im Messschrank eingebaut. Die Strömungsgeschwindigkeits-Einzelwerte der beiden Messköpfe A und B wie auch die gemessene Lufttemperatur und der barometrische Luftdruck wurden in der SPS gespeichert.

Wie bei Punktmessungen üblich muss der effektive Volumenstrom bzw. die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel über einen Umrechnungsfaktor bestimmt werden, welcher der Einbauposition und insbesondere dem Wandabstand der Messköpfe Rechnung trägt.

Ab dem 28.08.2012 ist im Tunnel Bözberg im Messquerschnitt M2 der Messwert der mittleren Temperatur unregelmässig und wiederholt auf über 86.5°C angestiegen (Abb. 4.33). Ursache war ein Wackelkontakt eines PT100. Bei diesem Betriebszustand wurde ein Mittelwert aus dem maximalen Messwert 150°C und des intakten Messwert 23°C gebildet.

Bei einem Serviceeinsatz am 11.09.2012 konnte der defekte Sensor ausgetauscht und somit das Problem behoben werden.

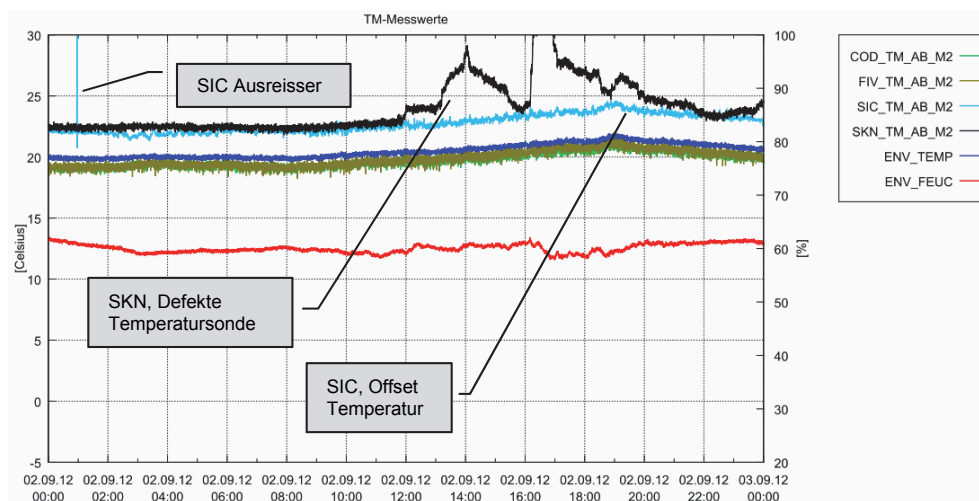


Abb. 4.33 Tunnel Bözberg - 02.09.2012, M2, Defekte Temperatursonde

Der Einfluss der defekten Temperaturmessung auf die Messwerte der Strömungsgeschwindigkeit nicht direkt visuell feststellbar, da die Temperatur nur eine Korrekturkomponente darstellt.

4.6 Meteorologische und andere Einflüsse

Zusätzlich und unabhängig von den Strömungsmessgeräten wurden in beiden Tunneln die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte aufgezeichnet.

Erwartungsgemäss konnte bei der Auswertung der Strömungsmesswerte bezüglich der drei meteorologischen Grössen kein Einfluss festgestellt werden, wie die folgenden Kapitel aufzeigen.

4.6.1 Luftdruck

Der Umgebungsdruck wurde vom Strömungsmessgerät SKN erfasst und aufgezeichnet. Dieser veränderte sich nur langsam und bewegte sich während der Messkampagne etwa zwischen 950 – 980 mbar.

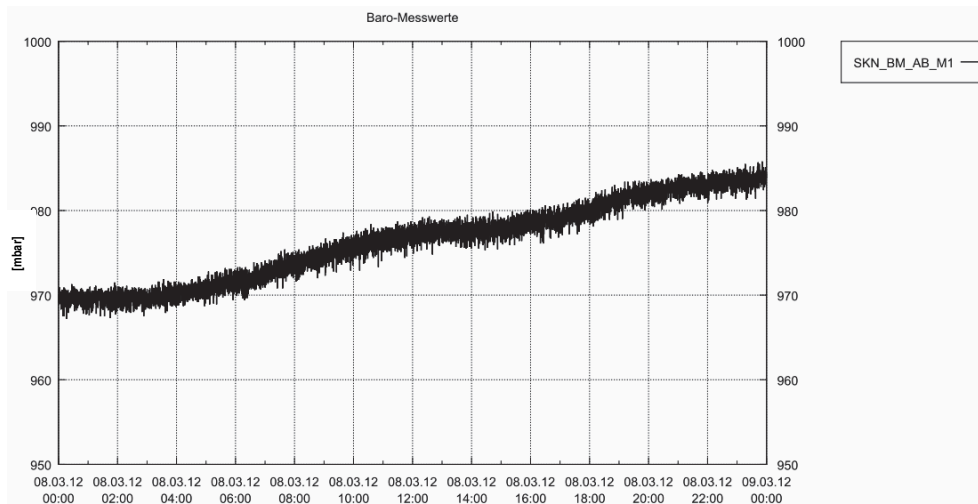


Abb. 4.34 Tunnel Bözberg - 08.03.2012, Messwert Luftdruck am Strömungsmessgerät SKN mit einer Veränderung von 14.6 mbar/24h

4.6.2 Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit wurde mit dem Vaisala Humicap gemessen und im IPC aufgezeichnet. Während der gesamten Messkampagne bewegte sie sich normalerweise zwischen 40-70% mit extremen von weniger als 20% und mehr als 95% bei der Tunnelreinigung.

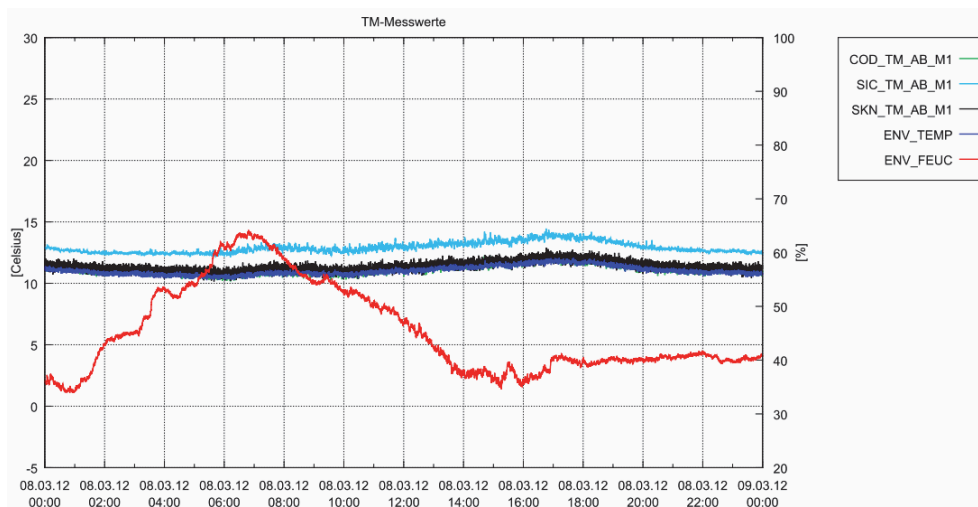


Abb. 4.35 Tunnel Bözberg - 08.03.2012, Messwerte der relativen Luftfeuchtigkeit (rote Kurve, Messskala rechts) und Temperaturen der Strömungsmessgeräte (COD, FIV, SIC, SKN) und dem Humicap (Messskala links).

Die in Abb. 4.35 beispielhaft angeführten Tagesverläufe im Tunnel Bözberg zeigen eine Veränderung der relativen Feuchte von ca. 35% auf 63%. Dies entspricht einer Zunahme der absoluten Feuchte um rund 2.6 g/m^3 , welche die Luftdichte um etwa 0.2% erhöht. Dieser äussert geringe Dichteinfluss wird bei der Auswertung der Staudruckrohre berechtigterweise vernachlässigt.

Die Daten der Messkampagne lassen für keines der Messgeräte einen Einfluss der Luftfeuchte ableiten.

4.6.3 Temperatur

Die Tunneltemperaturen wurden zusätzlich zu den Temperaturdaten der Strömungsmessgeräte mit einem Vaisala Humicap gemessen und aufgezeichnet, um jeweils einen Referenzwert zu den unterschiedlichen Messverfahren bzw. Berechnungsmethoden der

virtuellen Temperatur zu haben.

Ultraschall-Geräte

Die Lufttemperaturen, virtuelle Temperaturen genannt, welche von den bidirektionalen Ultraschall-Strömungsmessgeräten von DUR und SIC übermittelt werden, sind Zusatzinformationen, welche nur dann als plausibel betrachtet werden dürfen, wenn die Messstrecke genau ermittelt und eine entsprechende Kalibrierung durchgeführt wurde. Hingegen verfügen die Strömungsmessgeräte von ACP, COD, und FIV über einen PT 100 Sensor. Das Messgerät DUR hat zusätzlich für die Plausibilitätskontrolle einen PT100 Sensor.

Bei dem bidirektionalen Ultraschallverfahren bei den SIC Geräten wird die Lufttemperatur zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit nicht benötigt, da sie durch die doppelte Laufzeitmessung als Parameter entfällt.

Staudruckrohr

Die Luftdichte wird bei den Staurohren systemproprietär mittels Temperatur- und Luftdruckmessung bestimmt, da sie für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit aus dem Differenzdruck erforderlich ist.

4.6.4 Verschmutzung und Korrosion

Die Strömungsmessgeräte COD wurden am 10/11.01.2012 montiert, während alle anderen Strömungsmessgeräte rund zwei Monate vorher am 2/3.11.2011 im Tunnel Flüelen und am 16/17.11.2011 im Tunnel Bözberg montiert wurden. Eines der Ziele des FOP war das Verhalten der Strömungsmessgeräte während der Wintermonate unter harschen Einsatzbedingungen zu dokumentieren.

Streusalz, Schnee

Zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit auf den Autostrassen wird im Winter bei Frostgefahr von den zuständigen Gebietseinheiten Streusalz ohne Zusätze gestreut oder die Fahrbahnen mit einem Sole-Salz Gemisch besprüht. Diese Massnahmen betreffen ebenfalls die Portalbereiche der Tunnel Bözberg und Flüelen.

Das in der Regel eingesetzte Steinsalz besteht aus Natriumchlorid (NaCl) und im geringen Mass eventuell auch mineralischen Zusatzstoffen. Bei tieferen Temperaturen ab zirka -8°C kommen zum Teil andere Salze zur Anwendung wie Calciumchlorid oder Magnesiumchlorid.

Um den einen möglichen korrosiven Einfluss auf die Strömungsmessgeräte beurteilen zu können, wurden visuelle Prüfungen durchgeführt.

Weitere Verschmutzungs- bzw. Beschädigungsrisiken gehen von Schnee und Eis aus, welche sich in den Tunneln bevorzugt von Fahrzeugen infolge von Erwärmung und höheren Relativgeschwindigkeiten der Luft lösen und beträchtliche Schäden verursachen können.

Verschmutzung – Korrosion

Vor der Tunnelreinigungen, welche im Tunnel Bözberg am 12.03.2012 und im Tunnel Flüelen am 10.04.2012 stattfanden, und nach einer Einsatzzeit von rund 4 Monaten, wurden die Strömungsmessgeräte visuell kontrolliert und ihr Zustand fotografisch dokumentiert.

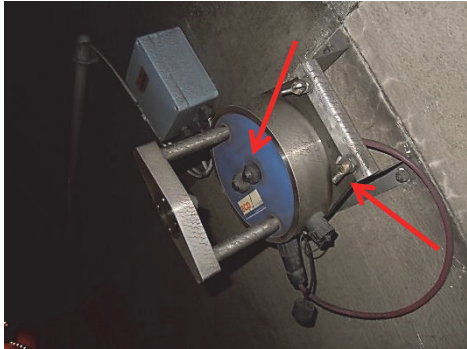


Abb. 4.36 Tunnel Bözberg – ACP, Flugrostspuren an den Flügelmuttern und Schmutzablagerungsspuren am Sensorkopf

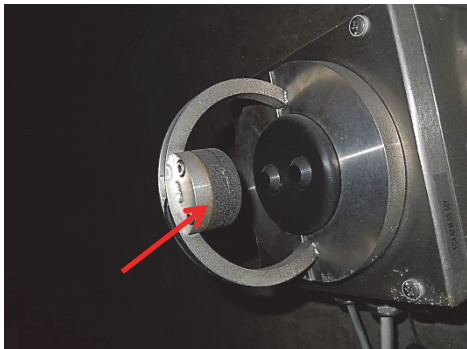


Abb. 4.37 Tunnel Bözberg – COD, leichte Schmutzablagerungsspuren an Gehäuse und Sensorkopf



Abb. 4.38 Tunnel Bözberg – DUR, Flugrostspuren an Schweissstellen und Befestigungsteilen (Mutter)



Abb. 4.39 Tunnel Bözberg - FIV, Verschmutzungsspuren



Abb. 4.40 Tunnel Bözberg – FIV, Sensorkopf mit Ablagerungen



Abb. 4.41 Tunnel Bözberg, SIC – Flugrostspuren auf dem Gehäuse

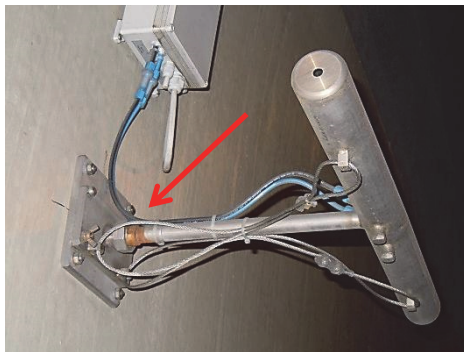


Abb. 4.42 Tunnel Bözberg, SKN – Flugrostansatz an der Schweissstelle der Aufhängung

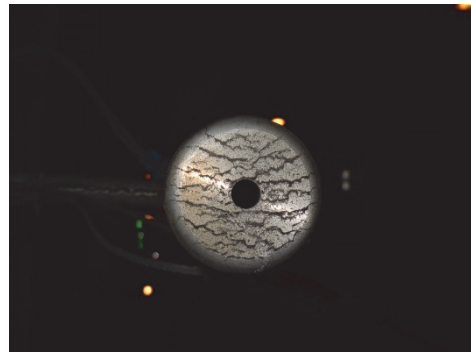


Abb. 4.43 Tunnel Bözberg, SKN – Druckbohrung Staudruckrohr mit unwesentlichen Schmutzspuren.

Eine weitere visuelle Kontrolle, welche wiederum photographisch festgehalten wurde, hat bei den Demontagen im Tunnel Bözberg am 29.10.2012 und im Tunnel Flüelen am 30.10.2012 stattgefunden. Der bereits im Frühjahr festgestellte Zustand ist nahezu unverändert geblieben, warum an dieser Stelle auf eine Wiedergabe der Fotodokumentation verzichtet wird.

Generell kann festgehalten werden, dass bei keinem der Strömungsmessgeräte Materialkorrosion aufgetreten ist, mit Ausnahme der Sensorbeschädigung bei einem der FIV Geräte (wie bereits im Kapitel 4.5.5 beschrieben). Festgestellt wurden ansonsten bei allen Strömungsmessgeräten einzig Verschmutzungen und Flugrostspuren insbesondere an den Aufhängungen und den Befestigungselementen (Abrieb von Fahrzeugen).

4.7 Weitere Beobachtungen und Vorkommnisse

4.7.1 Tunnel Flüelen – Föhnsturm Kanton Uri 28/29.04.2012

In der Nacht vom 28. auf den 29. April 2012 ist im Kanton Uri ein starker Föhnsturm mit Windböen bis zu 200 km/h auf dem Gütsch (2167 m ü. M, Station Meteo Schweiz) aufgetreten. Diese extreme Wetterlage hat eine starke Längsströmung in den Tunnel Flüelen induziert. Es wurde ein Spitzenwert von 9.24 m/s im Messquerschnitt im Bereich der Zwischendecke aufgezeichnet (Abb. 4.44). Vernachlässigt man den Strömungseinfluss von Fahrzeugen im Tunnel, entspricht diese Längsgeschwindigkeit einem Totaldruckverlust über die Tunnellänge von knapp 400 Pa. Um einen derartigen Totaldruck durch dynamischen Winddruck aufzubauen, war eine auf das Portal gerichtete Windgeschwindigkeitskomponente von etwa 25 m/s bzw. 90 km/h erforderlich. Aufgrund der Lage der Portale (das Südportal liegt in einem 90° Winkel zur Windrichtung, das Nordportal hingegen liegt im Sog) ist ein kombinierter Effekt – Druck und Sog – wahrscheinlich.

Es ist offensichtlich, dass bei solchen extremen meteorologischen Verhältnissen eine Tunnellüftungsanlage in der Regel nicht mehr in der Lage ist, die Strömungsverhältnisse im Tunnel vorgabengerecht zu beherrschen (Längslüftung bzw. Einstellung des Strö-

mungsnulldpunktes im Absaugbereich).

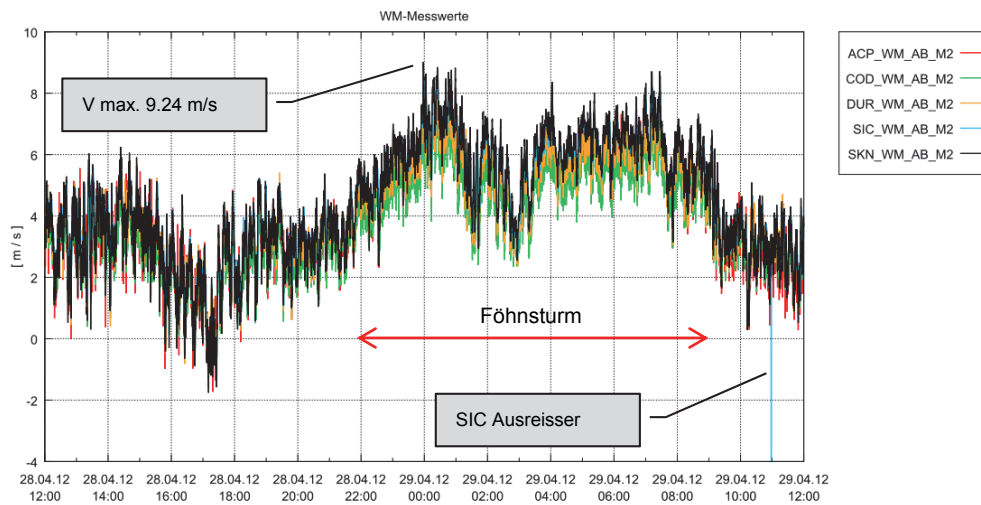


Abb. 4.44 Tunnel Flüelen - 28/29.04.2012, Föhnsturm V max. 9.24 m/s

4.7.2 Tunnel Bözberg – Spurabbau für Unterhalt

Am 20.03.2012 wurde im Tunnel Bözberg kurz nach 14:00h die Normalspur für den Unterhalt an einem Sichttrübungsgerät gesperrt. Wie aus Abb. 4.45 hervorgeht (Messquerschnitt M2), wirkt sich dies klar auf das Messverhalten der Einzelpunktmessung von FIV aus, welche im Zwischendeckenbereich normalspurseitig montiert ist. Da alle anderen Messgeräte entweder traversierend messen oder über zwei Messpunkte verfügen, ist bei ihnen keine Fehlmessung erkennbar.

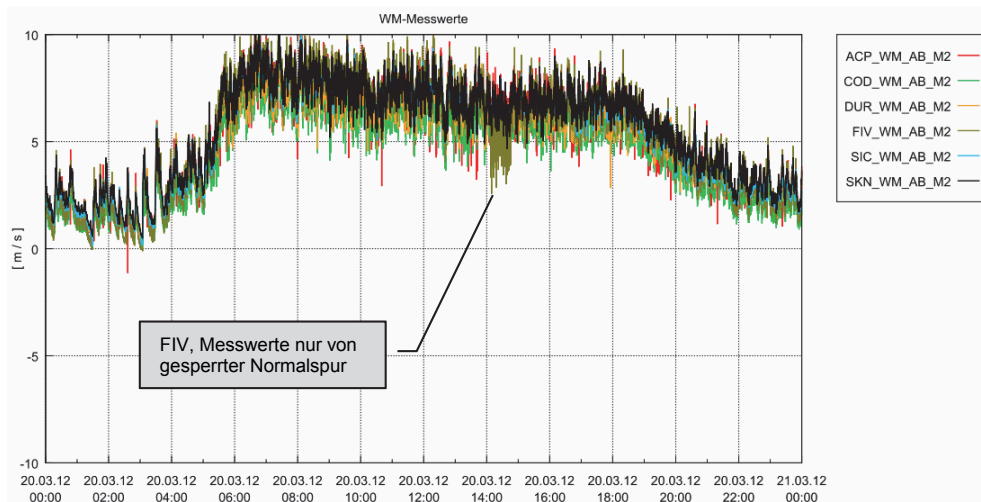


Abb. 4.45 Tunnel Bözberg - 20.03.2012, M2, Abbau der Normalspur kurz nach 14:00h.

4.7.3 Tunnel Bözberg – Sperrnächte

Während den Frühjahrssperrnächte des Tunnels Bözberg wurde die Röhre in Fahrrichtung Basel gesperrt und die Röhre in Fahrrichtung Zürich im Gegenverkehr betrieben. Dazu wurde zuerst die Röhre in Fahrrichtung Zürich komplett gesperrt und dann gegen 20:30h für den Gegenverkehr geöffnet. Wie Abb. 4.46 zeigt, geht dies klar aus den aufgezeichneten Daten hervor. Während der Gegenverkehrsphase schwankte die Strömungsgeschwindigkeit zwischen -2 m/s und +2 m/s.

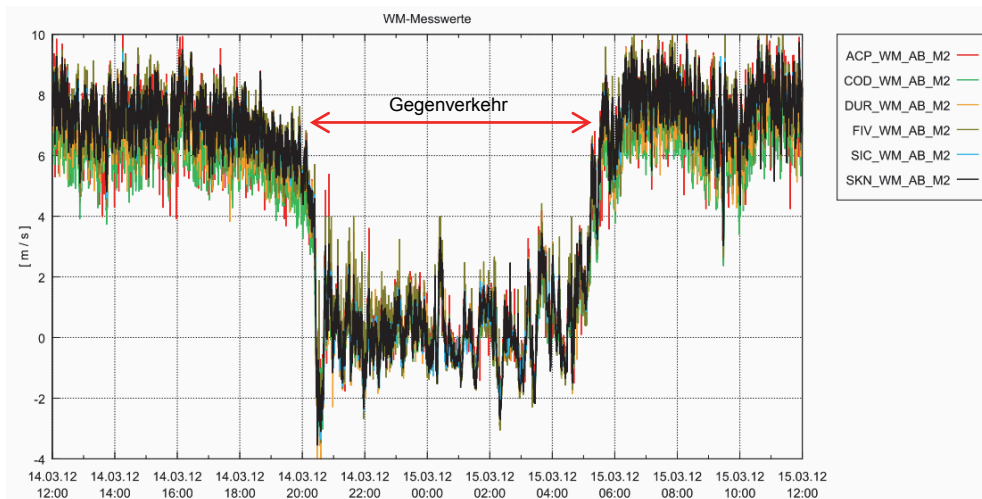


Abb. 4.46 Tunnel Bözberg - 14/15.03.2012, Sperrnacht in der Röhre Basel und Gegenverkehr in der Röhre Zürich mit kurzer Tunnelschliessung in der Einrichtungsphase

4.7.4 Tunnel Bözberg – Brandalarm durch Turboschaden

Am 16.06.2012 wurde im Tunnel Bözberg durch einen Turboschaden an einem Fahrzeug und der dadurch entstandenen Ölverdampfung das Brandprogramm aktiviert und der Tunnel geschlossen. Im Tunnel herrschte zu diesem Zeitpunkt eine Längsströmung in Fahrtrichtung von ca. 5 m/s vor. Durch die verteilte Absaugung der Rauchgase (Schlitze in der Zwischendecke) wurde in der Folge die Strömung vom Ausfahrtportal her in den Tunnel hinein innerhalb von rund 4 Minuten umgekehrt. Nach 10 Minuten (Abb. 4.48) erreichte die Rückströmung etwa -3 m/s.



Abb. 4.47 Tunnel Bözberg - 16/06.2012, Turboschaden und Ölverdampfung

Weiterhin zeigen die Messwerte in Abb. 4.48 folgendes auf:

- Wie schon im Kapitel 4.5.3 beschrieben, trat bei den Strömungsmessgeräten von COD während der Messkampagne eine Messwert-Drift auf, welche auf instabile Temperatursonden zurückgeführt wurde. Diese Drift ist auch aus den vorliegenden Daten im Normalbetrieb deutlich zu erkennen. Während der Phase der Strömungsumkehr ist sie hingegen nicht ersichtlich.
- Bei den Strömungsmessgeräten ACP ist ein gegenläufiges Phänomen erkennbar: Es herrscht gute Übereinstimmung mit den übrigen Strömungsmessgeräten im Normalbetrieb, während der Strömungsumkehr hingegen zeigen die ACP Geräte etwas geringere negative Strömungswerte an. Vergleiche dazu auch Abb. 4.49.

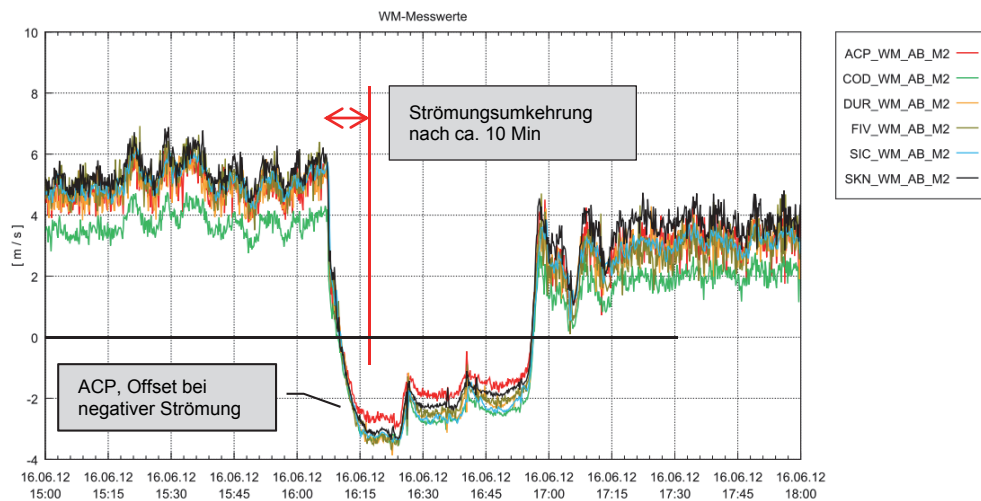


Abb. 4.48 Tunnel Bözberg - 16.06.2012, M2, Strömungsumkehrung ausgelöst durch das Brandprogramm

4.7.5 Tunnel Bözberg – Stockender Verkehr

Am 28.06.2012 kam es im Tunnel Bözberg zweimal kurz hintereinander zu Staus mit etwa 15-20 minütigen Verkehrsstillständen. Im Tunnel herrschte zuvor eine Längsströmung in Fahrtrichtung von ca. 7 m/s im Bereich der Zwischendecke. Während des stockenden Verkehrs ging die Luftströmung auf ca. 1 m/s zurück, wie aus den Daten der Strömungsmessgeräte in Abb. 4.49 ersichtlich ist.

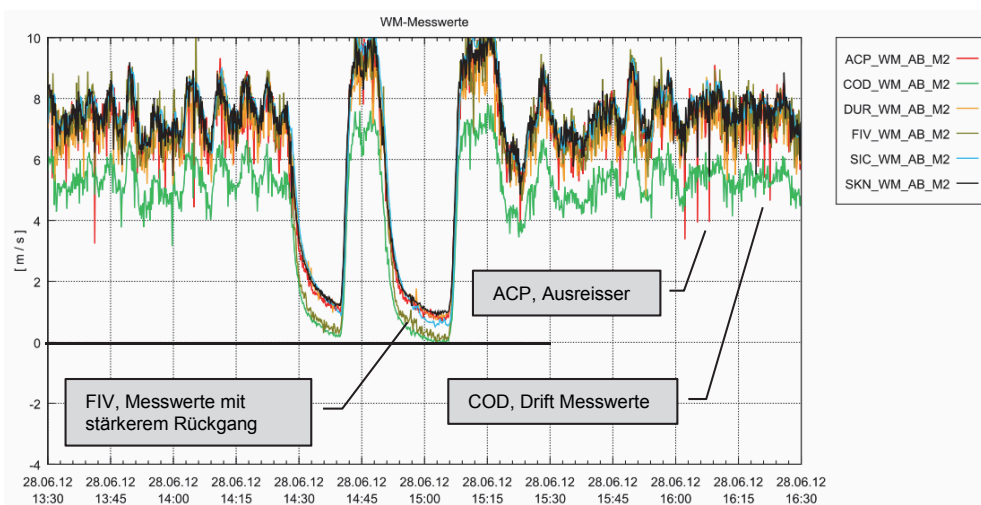


Abb. 4.49 Tunnel Bözberg – 28.06.2012, M2, Stockender Verkehr

Weiterhin zeigen die Messwerte in Abb. 4.49 folgendes auf:

- Der im Kapitel 4.5.3 beschriebene Drift der Strömungsmessgeräte von COD ist ersichtlich.
- Das Messgerät von FIV zeigt einen stärkeren Rückgang der Strömungsgeschwindigkeit an. Dies könnte damit zusammenhängen, dass es sich um eine Einzelmessung normalspurseitig handelte und dort möglicherweise die Fahrtgeschwindigkeit der Fahrzeuge komplett zum Erliegen kam.
- Die Messgeräte von ACP weisen deutlich erkennbare, starke Einzelausschläge (Ausreisser) während des Normalbetriebes auf (siehe auch Kapitel 4.5.2).

4.7.6 Tunnel Bözberg, Tunnel Flüelen – Tunnelreinigung

Reinigungsvorgang

In beiden Tunneln haben während der Messkampagne Tunnelreinigungen mit Einsatz von Waschzügen stattgefunden, zuerst eine Hochdruckreinigung danach eine Bürstenreinigung. Abgesehen von den Messgeräten FIV befanden sich alle anderen im Bereich der rotierenden Bürsten. Im Tunnel Bözberg hat die Tunnelreinigung am 12.03.2012 und im Tunnel Flüelen am 12.04.2012 stattgefunden. Den Lieferanten wurde es freigestellt ihre Geräte zu demontieren oder nötigenfalls zu schützen, um den Gefahren des Verstellens oder von Beschädigungen entgegenzutreten.

Einzig die Staudruckrohre wurden abgehängt und der dazugehörige Messumformer geschützt, da dieser nur als provisorische Testeinrichtung montiert worden war. Alle übrigen Strömungsmessgeräten und Klemmboxen wurden ohne Vorkehrungen vor Ort belassen.



Abb. 4.50 Tunnel Flüelen – 12.04.2012, Hochdruckreinigung.

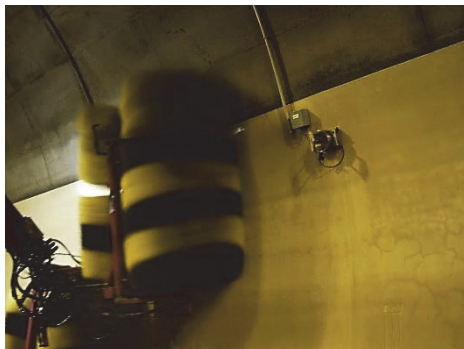


Abb. 4.51 Tunnel Flüelen – 12.04.2012, rotierende Reinigungsbürsten.

Strömungsmessgeräte

Aus der nachfolgenden Abb. 4.52 ist der Effekt des durchfahrenden Waschzuges um 04:29 auf die einzelnen Strömungsmessgeräte ersichtlich, welcher insbesondere bei den Punktmessungen von ACP und COD deutlich erkennbar ist.

Weiterhin zeigen die Messwerte in Abb. 4.52 folgendes auf:

- Die Messgeräte von ACP weisen deutlich erkennbare, starke Einzelausschläge (Ausreisser) auf (siehe auch Kapitel 4.5.2).
- Nach der Tunnelwaschung hat das Messgerät FIV gegen 07:00h spontan die Strömungsgeschwindigkeit wieder richtig erfasst nachdem es am Vortag ab 16:00 einen Totalausfall erlitten hat.

Um 05:00h wurde der Tunnel wieder für den Verkehr geöffnet. Die Funktionalität und Messwernerfassung wurde bei keinem Strömungsmessgerät sichtlich durch den Waschvorgang beeinflusst.

Während des Waschvorgangs stieg die Luftfeuchtigkeit auf rund 95% an und hargte auf diesem Niveau für rund ca. 5 Stunden während des Trocknungsvorganges aus (Abb. 4.53).

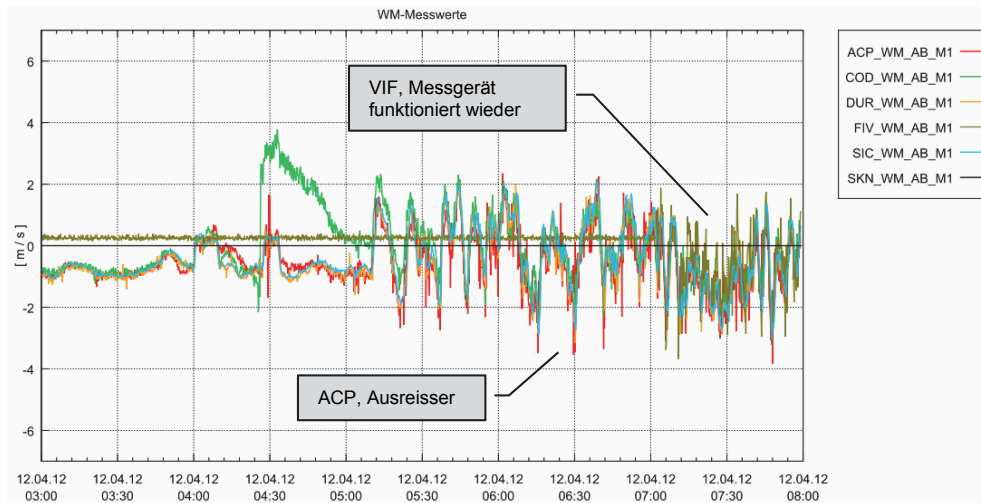


Abb. 4.52 Tunnel Flüelen - 12.04.2012, M1, Verhalten der Strömungsmessgeräte während der Durchfahrt des Waschzuges

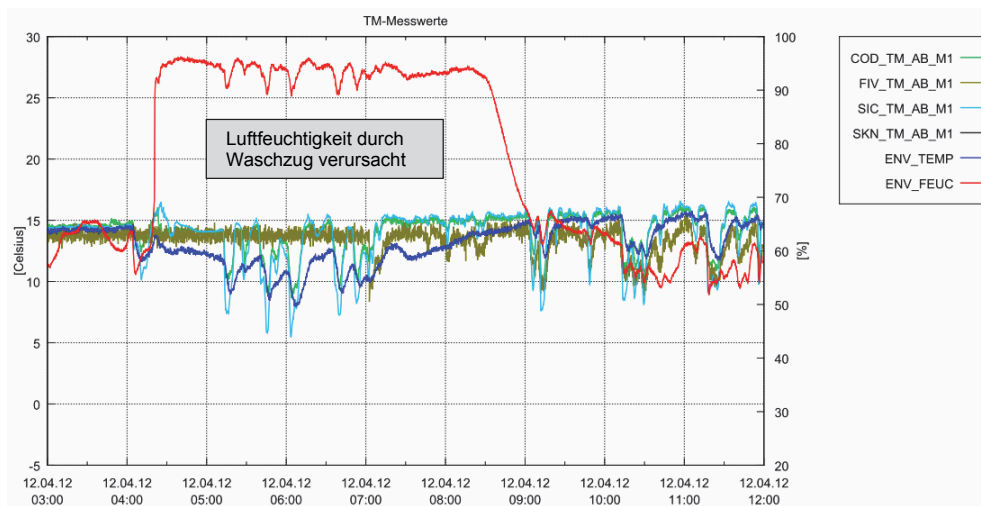


Abb. 4.53 Tunnel Flüelen, - 12.04.2012, M2, Anstieg der Luftfeuchtigkeit während der Durchfahrt des Waschzuges

Messgerät COD

Beim Strömungsmessgerät COD wurde der, etwas zu filigrane PT100 Temperaturfühler durch die rotierende Bürste abgelenkt.



Abb. 4.54 Tunnel Flüelen – COD, abgelenkter Temperaturfühler.

5 Tracergas-Messungen

5.1 Ziel der Referenz-Messungen

Das Ziel der Referenz-Messungen war, parallel zu den Messungen mit den verschiedenen Messsystemen, einen neutralen Referenzwert der Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum unter Verkehr zu bestimmen.

In Abstimmung mit der Begleitkommission wurde hierzu die Tracergas-Methode gewählt. Die klassischen Netzmessungen wurden nicht in Betracht gezogen, da diese unerwünschte Vollsperrungen der Tunnel erforderlich gemacht hätten.

Vorgesehen wurden zwei Messkampagnen. Eine erste wurde kurz nach der Installation der Strömungsmessgeräte durchgeführt und eine zweite unmittelbar vor deren Demontage ca. 9 Monate später. Durch den zeitlichen Versatz sollte die zeitliche Stabilität der Strömungsmesssysteme beurteilt werden können.

Beauftragt wurde die Hochschule Luzern (HSLU), welche einschlägige Erfahrungen mit Tracergas-Messverfahren in Strassentunneln auch unter Verkehr vorweisen konnte.

5.2 Installationen

Im Tunnel Flüelen lagen die Messquerschnitte der Tracergas-Messungen bei jenen der Strömungsmessgeräte im Hufeisenprofil (M1) und im Rechteckprofil mit Zwischendecke (M2). Im Tunnel Bözberg hingegen lagen beide Tracergas-Messquerschnitte aus logistischen Gründen im Zwischendeckenbereich. Die installierten Entnahmestellen wurden so ausgeführt, dass sie während der ganzen Messkampagne zusammen mit den Strömungsmessgeräten vor Ort bleiben konnten und wurden entsprechend vor Verschmutzungen geschützt (z. B. Verschliessen der Messschläuche).

Theoretisch hätte eine Messstelle für die Volumenstrombestimmung ausgereicht. Um die Aussagekraft der Messungen zu verbessern, wurden jedoch zwei Messstellen, wie zuvor beschrieben, vorgesehen. Zusätzlich wurden jeweils zwei Zeitintervalle vorgegeben. Das erste Intervall begann etwa um 18:00 Uhr mit starkem Verkehrsaufkommen, während ein zweites nach 22:00 Uhr mit schwachem Verkehrsaufkommen gewählt wurde.

5.3 Zeitkorrektur

Die Luft im Tunnel kann bei den herrschenden, geringen Strömungsgeschwindigkeiten als inkompressibel betrachtet werden (Machzahl < 0.3). Auch Temperaturschwankungen entlang des Tunnels ändern im Normalbetrieb die Luftdichte höchstens geringfügig. Bei reinen Längsströmungsverhältnissen ist daher der Volumenstrom zu einem gegebenen Zeitpunkt im Tunnel überall gleich und die Strömungsgeschwindigkeit variiert nur bei Querschnittsänderungen.

Der kontinuierliche, konstante Tracergas-Massenstrom wird an der Eindüsstelle in den Luftstrom aufgegeben und verteilt. Die sich dabei einstellende Tracergas-Konzentration hängt vom Volumenstrom der Luft zum Eindüsezeitpunkt ab. Dies bedeutet, dass der Zeitpunkt der Eindüsung der Konzentrationsmessung zugeordnet werden muss, welche jedoch erst zeitlich versetzt stromabwärts erfolgt. Dieser zeitliche Versatz muss daher rechnerisch bestimmt werden, um der Konzentrationsmessung den korrekten Zeitwert zuordnen zu können. Die Tracergas-beladene Luft strömt von der Eindüsstelle zur Konzentrationsmessstelle mit in der Regel variierender Geschwindigkeit. Da die Tracergas-methode selbst die Luftgeschwindigkeit bestimmt, muss die Berechnung der Zeitkorrektur iterativ über ein Integrationsverfahren erfolgen.

Folgendes Integral beschreibt die Lauflänge L zwischen Eindüsstelle und Messstelle. Die Zeit t_0 entspricht dem Eindüsezeitpunkt und die Zeit t_1 dem Messzeitpunkt.

$$L = \int_{t_0}^{t_1} v(t) dt$$

Die Differenz

$$\Delta t = t_1 - t_0$$

Ist die gesuchte Zeitkorrektur.

Praktisch umgesetzt wird die Berechnung in diskreter Form über eine Summenbildung, welche numerisch dann stoppt, wenn die Summe dem Abstand zwischen Eindüsstelle und Messstelle entspricht. Der Parameter i ist der Laufparameter der einzelnen Messwerte.

$$L = \sum_{\substack{L=\text{Abstand} \\ i=\text{Eindüsung}}} \frac{v_i + v_{i-1}}{2} (t_i - t_{i-1})$$

$$\Delta t = \sum_{\substack{L=\text{Abstand} \\ i=\text{Eindüsung}}} (t_i - t_{i-1})$$

Wie schon eingangs erwähnt, muss diese Berechnung iterativ solange wiederholt werden, bis sich die Zeitkorrekturen der Messwerte nicht mehr ändern, da es sich um ein rekursives Verfahren handelt.

5.4 Messkampagne Januar 2012

Nachdem alle Messgeräte installiert waren, konnten an den nachfolgenden angeführten Tagen die ersten Tracergas-Messungen durchgeführt werden:

- 17.01.2012 Tunnel Flüelen
- 18.01.2012 Tunnel Bözberg

Im Tunnel Flüelen (Gegenverkehr) konnte mit dem Abluftsystem keine kontinuierliche Längsströmung erzeugt werden. Die vorherrschende Föhnlage und vorwiegend einseitige Verkehrsaufkommen hatten einen zu starken Einfluss.

Im Tunnel Bözberg (Richtungsverkehr) herrschten hingegen ideale Bedingungen mit einer ausgebildeten Luftströmung in Fahrt- und Messrichtung.

In beiden Tunneln unterlag die Strömungsgeschwindigkeit der Luft verkehrsbedingten Schwankungen.

5.4.1 Tunnel Bözberg (RV)

Die Dosierstelle wurde beim Querschlag V8B und die erste Messstelle im Profil M2 in 359 m Abstand beim Querschlag V9B und die zweite Messstelle ebenfalls im Profil M2 in 645 m Abstand bei der Lüftungszentrale ZBS eingerichtet.

Um eine gute Vermischung des Tracergases zu erreichen, wurden an der Dosierstelle zur Eindüsung zwei auf Stativen montierte Kleinventilatoren eingesetzt.



Abb. 5.1 Tunnel Bözberg / Flüelen – Kleinventilator zur Eindüsung des Tracergases

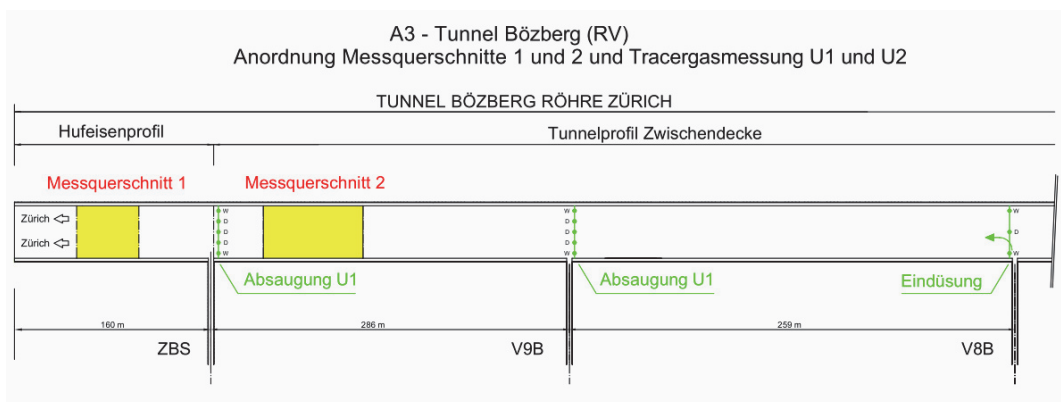


Abb. 5.2 Tunnel Bözberg – Lage der Zonen mit den beiden Messprofilen M1 und M2, sowie die Eindüsstelle und die beiden Absaugprofile U1 und U2.

Da der Tunnel im Richtungsverkehr befahren wird, reichte der Kolbeneffekt der Fahrzeuge in beiden Zeitintervallen aus, um eine ausreichende Längsgeschwindigkeit während der Messungen sicherzustellen.

Die Ergebnisse sind in Abb. 5.3 und Abb. 5.4 dargestellt. Die Tracergas-Messungen geben die niederfrequenten, zeitlichen Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit analog zu den Strömungsmessgeräten wieder. Ebenfalls ist eine gute Übereinstimmung der Messwerte der Strömungsmessgeräte mit den Tracergas-Messungen zu verzeichnen, so dass deren Plausibilisierung im Rahmen des Tracergas-Streubandes gegeben ist.

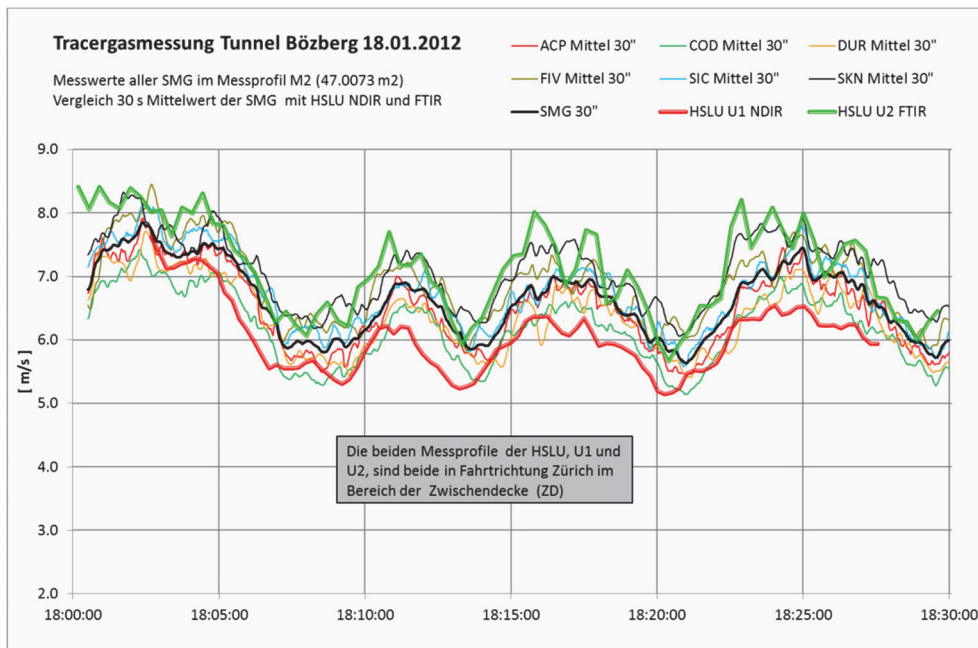


Abb. 5.3 Tunnel Bözberg - 18:00, Vergleich der über 30 s gemittelten Messwerte der Strömungsmessgeräte und der beiden Tracergas-Messungen.

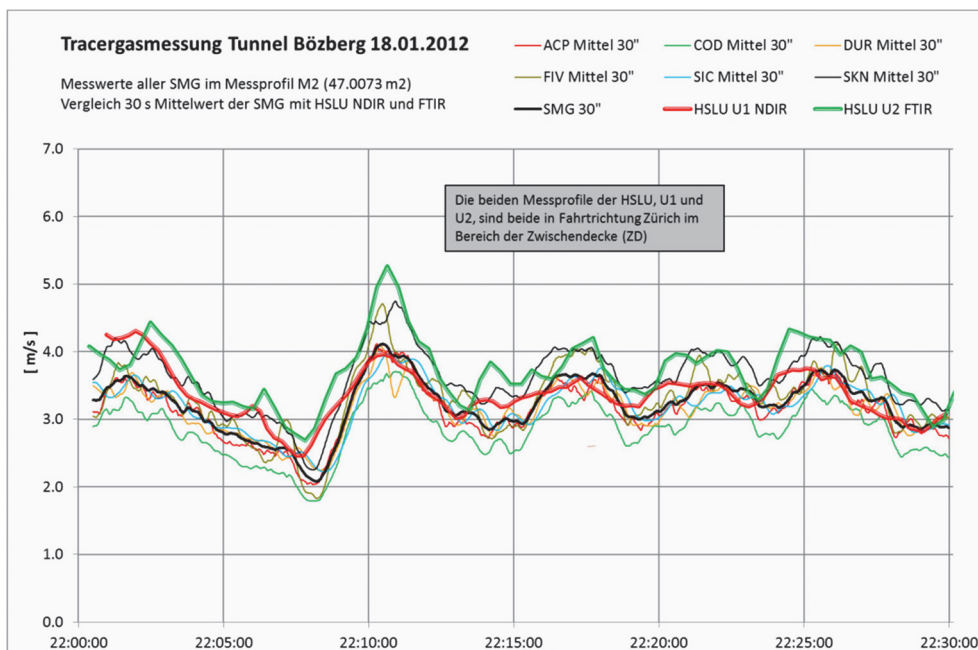


Abb. 5.4 Tunnel Bözberg - 22:00, Vergleich der über 30 s gemittelten Messwerte der Strömungsmessgeräte und der beiden Tracergas-Messungen.

Bezüglich dieses Streubandes ist zu beobachten, dass die Kurven der beiden Tracergas-Messungen unter sich in den beiden Zeitintervallen Differenzen von ca. 15% aufweisen. Trotz intensiver Bemühungen durch den Projektverfasser und die HSLU konnte für diese Diskrepanz keine schlüssige Erklärung gefunden werden.

Ein nicht mehr überprüfbarer Unsicherheitsfaktor waren die Installationen der Nylon-schläuche im Fahrraum in den beiden Messprofilen mit jeweils 5 Probeentnahmepunkten.

5.4.2 Tunnel Flüelen (GV)

Die Dosierstelle wurde am Nordportal eingerichtet. Um die Messinstallation mit ihren Gasflaschen nicht durch Umwelteinflüsse zu beeinträchtigen (z.B. Wind), wurde diese in der ersten SOS-Nische auf der Höhe der Portalzentrale Nord errichtet. Um eine gute

Vermischung des Tracergases zu erreichen, wurden an der Dosierstelle zur Eindüsung zwei auf Stativen montierte Kleinventilatoren eingesetzt.

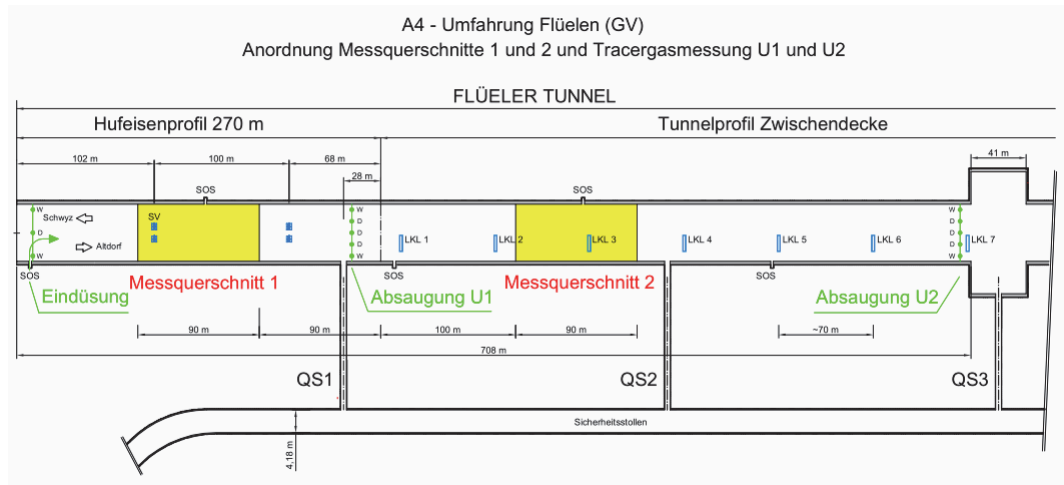


Abb. 5.5 Tunnel Flüelen – Lage der Zonen mit den beiden Messprofilen M1 und M2, sowie die Eindüsstelle und die beiden Absaugprofile U1 und U2.

Die erste Messestelle im Profil M1 wurde in 244 m Portalabstand beim Querschlag N° 1 eingerichtet, die zweite Messstelle im Profil M2 in 679 m Abstand kurz vor der Ausstellbucht Nord. Um eine gute Probenentnahme an der Messstelle zu erreichen, wurden 5 Entnahmepunkte mit Nylonschläuchen vorgesehen. Drei dieser Punkte lagen knapp über dem Verkehrsraum und zwei oberhalb der seitlichen Bankette.

Um bei den Messungen unter Gegenverkehr eine kontinuierliche Luftströmung Richtung Südportal sicherzustellen, musste diese mit Hilfe des Abluftsystems über die Lüftungsklappen und mit der Mittenabsaugung erzwungen werden. Auf die Verwendung der Strahlventilatoren wurde verzichtet, andernfalls wären die Resultate der Messgeräte im Messquerschnitt 1 negativ beeinflusst worden.

Die Ergebnisse für den Tunnel Flüelen unter Verkehr gegen 19:30h sind in Abb. 5.6 und Abb. 5.7 dargestellt. Infolge der vorherrschenden Föhnlage, wegen der Gegenverkehrssituation und z.T. auch asymmetrischen Verkehrsfluss, traten sehr schnelle und heftige Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit auf. Auch wenn die Tracergas-Messungen die Größenordnungen der gemessenen Geschwindigkeitswerte bestätigten, waren sie unter diesen Rahmenbedingungen nicht in der Lage die Änderungsdynamik getreu wiederzugeben, was in Anbetracht der grossen Abstände zwischen Dosier- und Messstellen der messsysteminhärenten Funktionsgrenze zugeordnet werden muss.

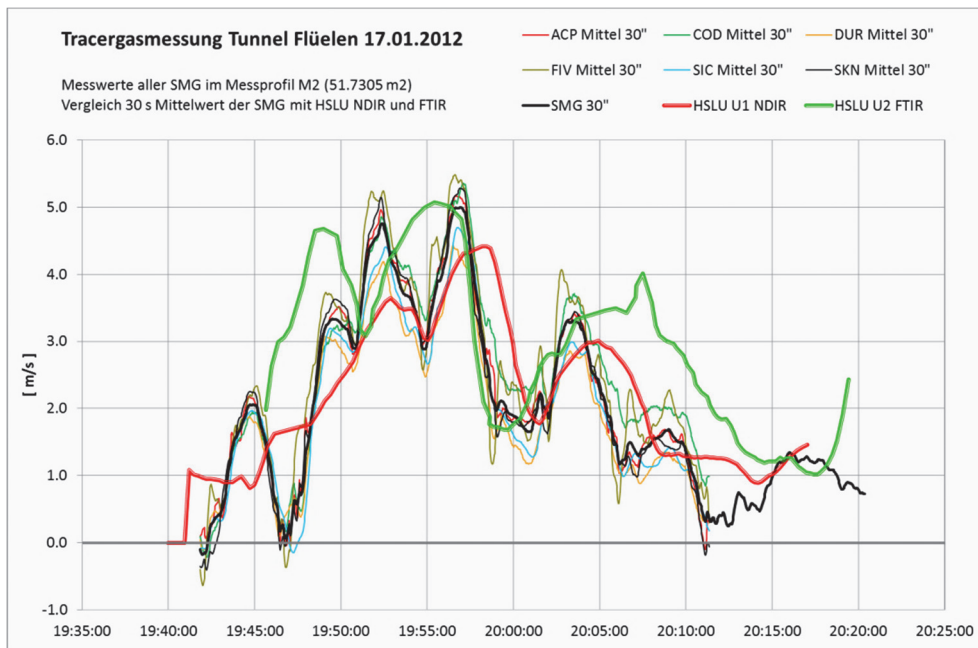


Abb. 5.6 Tunnel Flüelen - 19:30, Vergleich der über 30 s gemittelten Messwerte der Strömungsmessgeräte und der beiden Tracergas-Messungen.

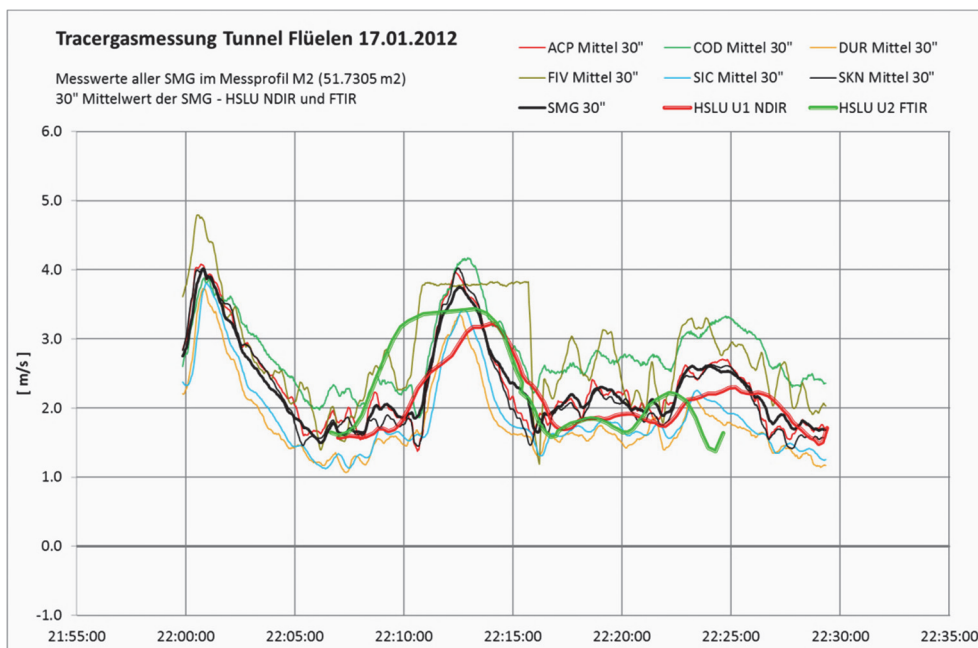


Abb. 5.7 Tunnel Flüelen - 22:00, Vergleich der über 30 s gemittelten Messwerte der Strömungsmessgeräte und der beiden Tracergas-Messungen.

Während des zweiten Zeitintervalls ab 22:00h waren die Strömungsverhältnisse im Tunnel Flüelen deutlich ausgeglichener, wie aus Abb. 5.7 hervorgeht.

Eine gute Übereinstimmung zwischen Tracergas-Ergebnissen und den Strömungsmessgeräten kann beobachtet werden. Rein qualitativ erscheint diese Übereinstimmung am besten zu den Messgeräten von ACP, SIC, DUR und SKN auszufallen. Wie schon mehrfach beobachtet, hatte auch im dargestellten Zeitintervall die Messung von FIV Funktionsstörungen.

5.5 Messkampagne September 2012

Die Tracergas-Messungen im Januar 2012 haben Grenzen dieser Messtechnik bezüglich

der Auflösung transienter Strömungszustände und der Messgenauigkeit unter dynamischen Bedingungen aufgezeigt, welche zuvor nicht bekannt waren.

Die Begleitkommission hat daher beschlossen eine weitere Messkampagne im September durchführen zu lassen und aufgrund der Resultate zu beschliessen, ob am Ende der Messkampagne in beiden Tunneln eine abschliessende Tracergasmessung durchgeführt wird.

Aufgrund der besseren Zugänglichkeit wurde für die Messung der Tunnel Flüelen gewählt und die Messung nur auf den weiter im Tunnelinneren liegenden Messquerschnitt M2 (Zwischendecke) beschränkt. Für die Erzeugung einer Längsgeschwindigkeit konnten daher auch die vier Strahlventilatoren des Tunnellüftungssystems eingesetzt werden.

5.5.1 Tunnel Flüelen (GV)

Die Anordnung der Dosierstelle am Nordportal und der Messstelle M2 war identisch wie bei der Messung im Januar 2012. Während einer Tunnelsperrung kurz vor der Messung konnte die im Tunnel fest eingebaute Messinstallation der Absaugschläuche funktionell überprüft werden. Während der Messung wurde die SISTO-Lüftung ausgeschaltet, um auch geringste Störeinflüsse innerhalb der Messtrecke ausschliessen (2 Querschläge) zu können.

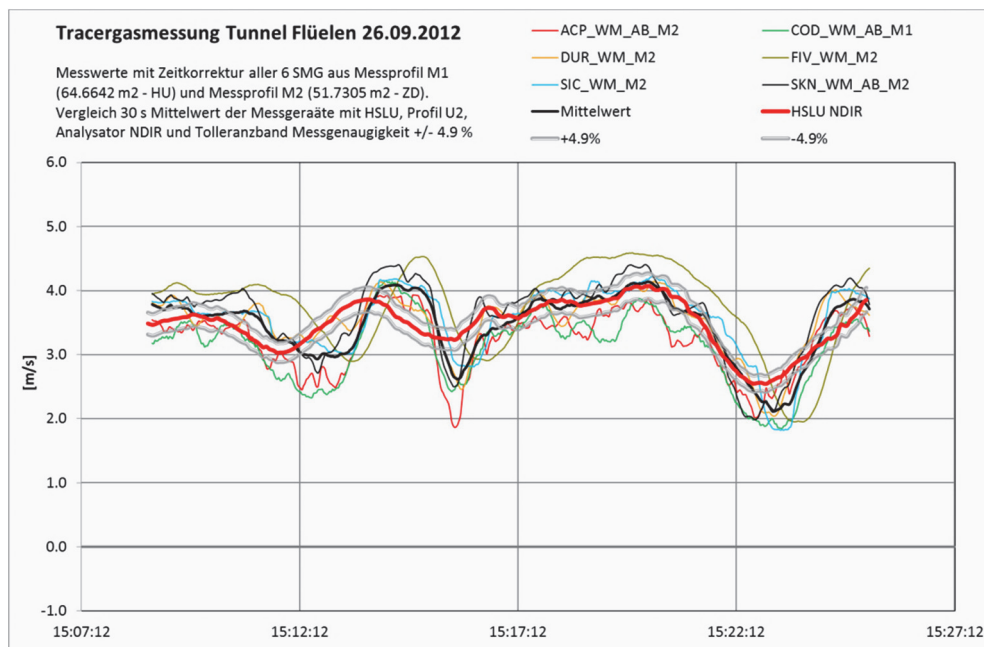


Abb. 5.8 Tunnel Flüelen - 15:00, Vergleich der über 30 s gemittelten Messwerte der Strömungsmessgeräte und der Tracergas-Messung im M2.

Der Vergleich der Messdaten zeigt eine qualitativ gute Übereinstimmung zwischen Tracergas-Messung und insbesondere den Strömungsmessgeräten SIC, DUR und SKN. Die Messwerte von FIV zeigen einen markanten zeitlichen Versatz, welcher durch eine am 11.09.2012 neu implementierte, geräteinterne Messwertfilterung verursacht wird.

Die zeitlichen Änderungen der Ist-Werte der Strömungsgeschwindigkeit waren offensichtlich hingegen wieder so schnell, dass sie von der Tracergasmessung nur teilweise erfasst werden konnten. Eine vertiefte Analyse auf Basis dieser Referenzmessung ist daher nicht sinnvoll.

Die Begleitkommission hat daher auf die vorgesehenen Tracergasmessungen kurz vor Abschluss der Messkampagnen in den Tunneln Flüelen und Bözberg verzichtet.

5.6 Resultate und Interpretation

5.6.1 Schlussbericht HSLU

Der Schlussbericht der Hochschule Luzern [5] vom 27.02.2013 "Bestimmung von Referenzvolumenströmen mit der Tracergasmethode zur Ermittlung von mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in zwei Strassentunneln" befindet sich in den Anhängen.

5.6.2 Vergleich Tracergasmessung - Strömungsmessgeräte

Wie die Auswertungen der verschiedenen Messkampagnen der Tracergasmessung gezeigt haben, gab es systembedingte Unterschiede zwischen der aus dem ermittelten Volumenstrom abgeleitete Strömungsgeschwindigkeit und den durch die Messgeräte lokal gemessenen und nicht korrigierten Strömungsgeschwindigkeiten.

Ein direkter Vergleich zwischen der mit der Tracergasmessung bestimmten, mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der über die gleiche Zeitspanne, ohne Korrekturfaktoren, lokal gemessenen, mittleren Strömungsgeschwindigkeit über alle Messgeräte ergibt folgende, prozentuale Abweichungen:

Richtungsverkehr:

- BOZ, 18.01.2012, 18:00 Messprofil M1 4.93 m/s +5%
- BOZ, 18.01.2012, 18:00 Messprofil M2 6.04 m/s +7%
- BOZ, 18.01.2012, 22:00 Messprofil M1 2.75 m/s -6%
- BOZ, 18.01.2012, 22:00 Messprofil M2 3.37 m/s -5%

Gegenverkehr:

- TUF, 26.09.2012, 15:00 Messprofil M2 3.08 m/s -11%

Die Tabellen mit den spezifischen prozentualen Abweichungen der einzelnen Strömungsmessgeräte befindet sich im Anhang V.

In Anbetracht der systembedingten Messunsicherheit der Tracergasmessung gemäss der HSLU von 4.9% [5] ist die mittlere Übereinstimmung zumindest im Tunnel Bözberg (RV) als gut zu bezeichnen.

5.7 Schlussfolgerungen Tracergas-Messungen

Das gesetzte Ziel parallel zu den Messungen mit den Strömungsmessgeräten zwei neutrale Referenzwerte der effektiven Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum, unter Verkehr, kurz nach der Installation der Strömungsmessgeräte und unmittelbar vor deren Demontage zu bestimmen, konnte nicht vollumfänglich mit der gewünschten Genauigkeit umgesetzt werden. Speziell die festgestellten, unterschiedlichen Messresultate der Tracergasmessungen in den beiden Messprofilen M1 und M2 im Tunnel Bözberg (RV) im Monat Januar 2012 konnte nicht abschliessend geklärt werden.

Als aufwendig hat sich der Aufbau der Messinstallationen in beiden Tunneln erwiesen, welche in kurzen Zeitfenstern realisiert werden mussten. Da die Messinstallationen für das Multipoint Sampling über die gesamte Messkampagne im Tunnel verblieben, mussten die Öffnungen der Absaugschläuche nach der Messung gegen Verschmutzung verschlossen und vor der nächsten Messung wieder geöffnet werden. Dies war jeweils mit einem zusätzlichen, grösseren logistischen Aufwand und Fahrbahnsperungen verbunden.

Während den beiden Tracergasmessungen im Tunnel Flüelen (GV) in den Monaten Januar sowie September 2012 herrschte jeweils eine Föhnlage vor, welche, zusätzlich zum teilweisen asymmetrischen Verkehrsfluss, die Generierung der gewünschten konstanten Luftströmung im Tunnel erschwerte.

Trotz dieser Schwierigkeiten und der systembedingten Trägheit der Gasanalytoren gegenüber den sehr schnell reagierenden Strömungsmessgeräten der unter Verkehr stark

variierenden Strömungsverhältnisse war eine globale Plausibilisierung der Messdaten möglich.

Die durch die HSLU parallel zur Tracergasmessung mit konstanter Immission und Multi-point Sampling ausgeführte Tracergasmessung mit Impulsimmissionen und Singlepoint Sampling haben dieselben Ergebnisse ergeben. Letztere im Schlussbericht der HSLU beschriebene Messmethode [5] erlaubt es in Zukunft Tracergasmessungen mit einem geringeren Installationsaufwand durchzuführen. Ein weiterer Vorteil bei der Impulsimmission liegt in der Tatsache, dass die Zeitspanne zwischen der Eindüsung und Entnahme bekannt ist, welche hingegen bei der konstanten Immission mit einem rekursiven Verfahren in Annäherung berechnet werden muss.

6 Statistische Auswertungen

6.1 Allgemein

Für eine vergleichende, statistische Auswertung der Strömungsmessgeräte wurden die Messdaten von zwei typischen Wochentagen herangezogen. Es handelt sich dabei um einen Wintertag (Mittwoch, den 8.2.2012) und für den Langzeitvergleich 7 Monate später einen Sommertag (Mittwoch, den 05.09.2012). Dies war die längste, mögliche Vergleichszeitspanne mit derselben Gerätekonfiguration, weil am 11.09.2012 an den Geräten FIV, SKN, COD, SIC Wartungsarbeiten durchgeführt wurden.

Die saisonalen Temperaturunterschiede in den beiden Tunneln sind entsprechend hoch. Nachfolgend werden die mittleren Tagestemperaturen angegeben, welche im Winter im Tunnel Bözberg mit RV wegen der kontinuierlichen Luftströmung in Fahrtrichtung naturgemäss tiefer liegen:

- Tunnel Bözberg (RV) Winter 2.5°C Sommer 23.5°C Δ 21.1°C
- Tunnel Flüelen (GV) Winter 7.0°C Sommer 23.9°C Δ 16.9°C

Um die Messwerte begrenzt zu glätten, wurden die aufgezeichneten 10 s Mittelwerte aus 24h jeweils über 60 s gleitend gemittelt. Zur Konsistenzprüfung der Messungen untereinander wurde anschliessend aus den 60 s Werten ein Mittelwert über jene installierten Messgeräte gebildet, welche plausible Messwerte abgaben.

Die Punktmessungen der Strömungsmessgeräte FIV mussten jedoch von der Mittelwertbildung an beiden Tagen ausgeschlossen werden, da die hohe Anzahl nicht plausibler Werte den Mittelwert zu stark verfälscht hätte. Ebenfalls ausgeschlossen werden mussten die Messwerte von COD, da bei diesen zwischenzeitlich eine starke Drift aufgetreten war (wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben).

Diese Mittelwertbildung ergab daher einen Referenzwert auf Basis der, mit unterschiedlicher Messtechnik gemessenen, plausiblen, lokalen Strömungsgeschwindigkeiten. Auf die Anwendung von Korrekturfaktoren auf die Messwerte, z.B. für den Wandabstand oder auf Basis des ermittelten Volumenstromes der Tracergasmessung bzw. eines generellen Offsets der Messwerte, wurde verzichtet, da keine hinreichend genaue Referenzmessung zur Verfügung stand.

6.1.1 Tagesverläufe Tunnel Bözberg

Nachfolgend werden jeweils die Graphiken der beiden analysierten Tagesverläufe vom 08.02.2012 und 05.09.2012 für alle Strömungsmessgeräte wiedergegeben (BOZ Profile M1 und Flüelen M2).

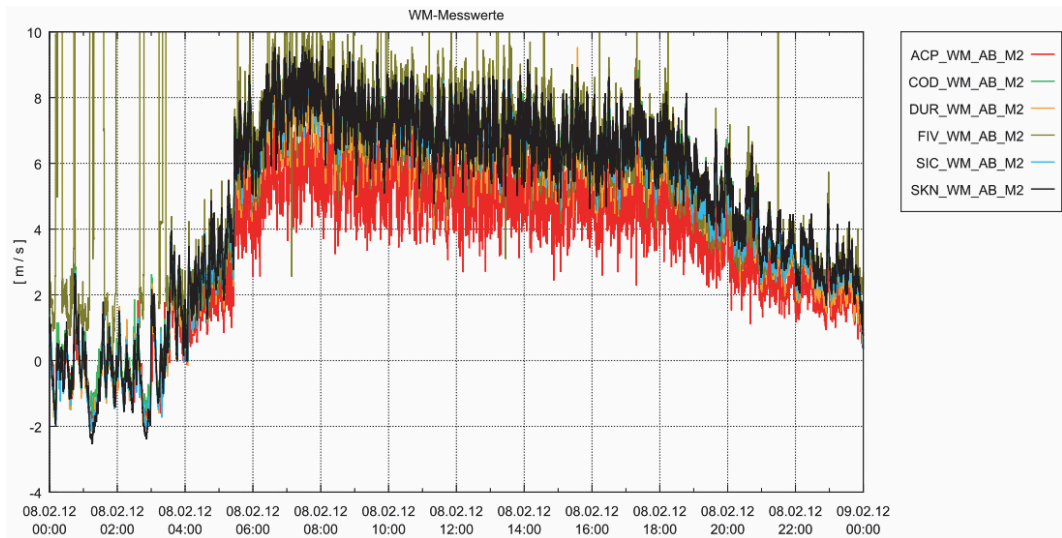


Abb. 6.1 Tunnel Bözberg – M2, alle Strömungsmessgeräte am 08.02.2012.

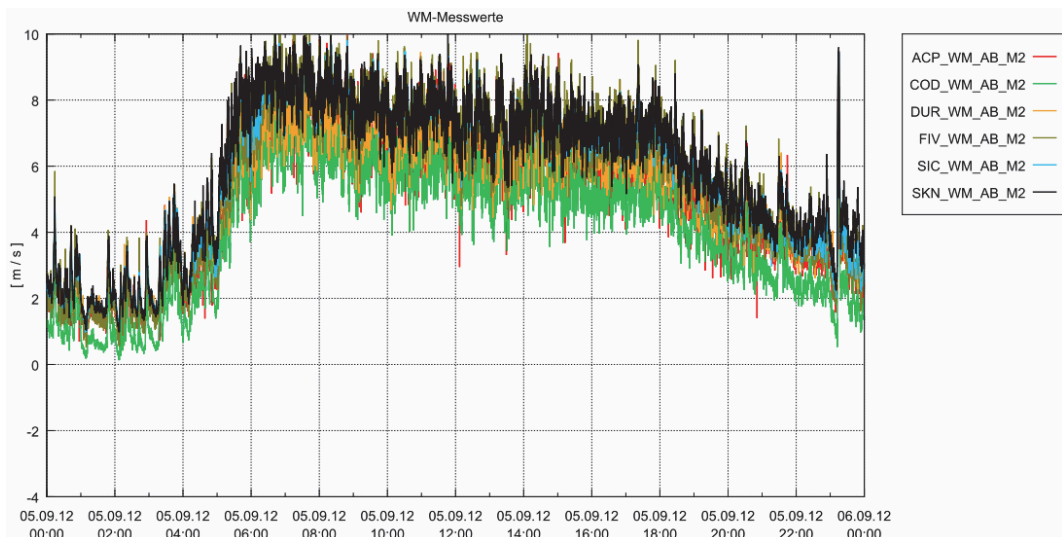


Abb. 6.2 Tunnel Bözberg – M2, alle Strömungsmessgeräte am 05.09.2012.

6.1.2 Tagesverläufe Tunnel Flüelen

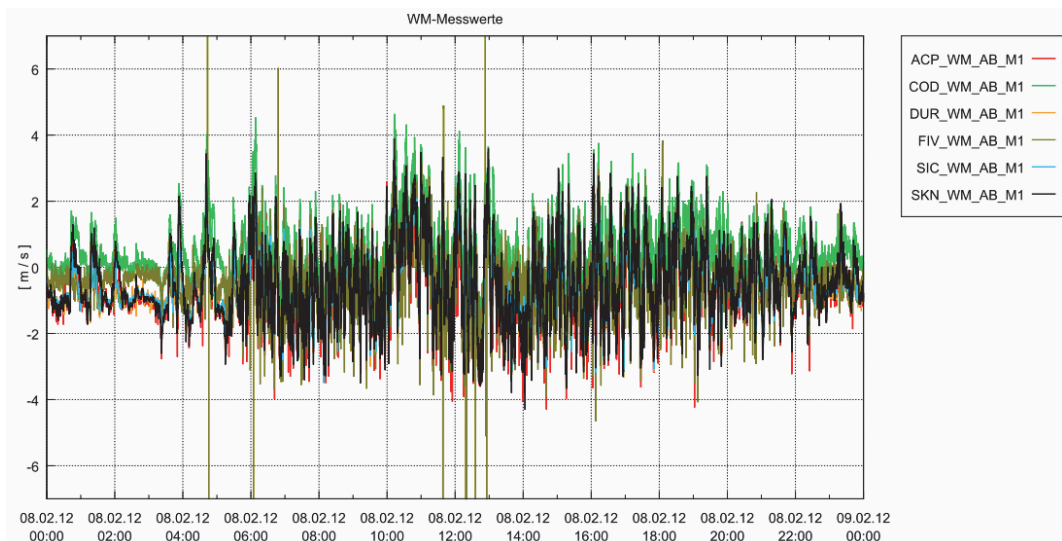


Abb. 6.3 Tunnel Flüelen – M1, alle Strömungsmessgeräte am 08.02.2012.

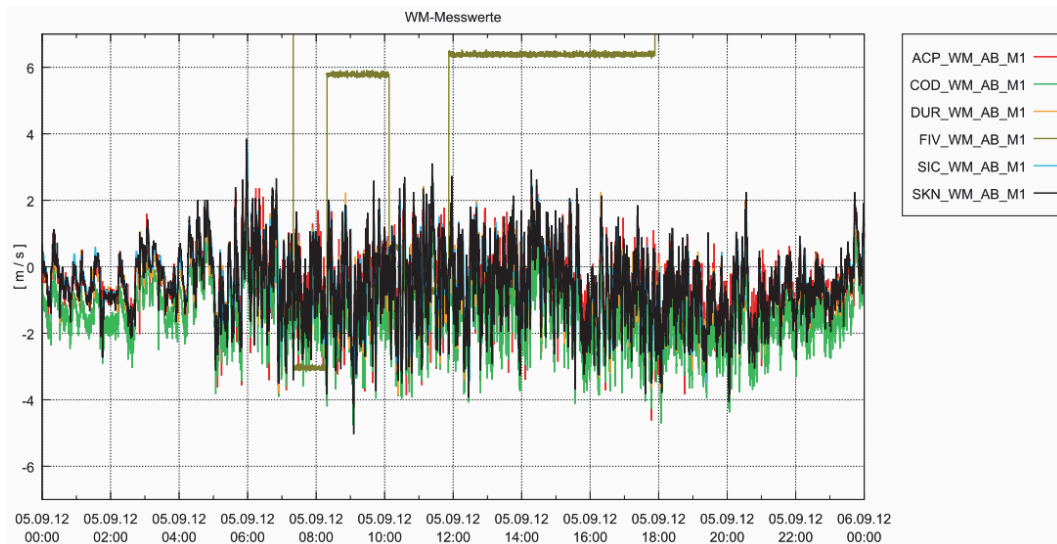


Abb. 6.4 Tunnel Flüelen – M1, alle Strömungsmessgeräte am 05.09.2012.

6.1.3 Graphische Auswertungen

In den nachfolgenden 8 Graphiken werden die Messdaten in den beiden Messquerschnitten M1 (Hufeisenprofil) und M2 (Rechteckprofil) für die Tunnel Bözberg und Flüelen dargestellt. Abgebildet ist die absolute Abweichung der einzelnen, über 60 Sekunden gemittelten Messdaten von einem theoretisch gebildeten Mittelwert aus den plausiblen Messwerten von ACP, DUR, SIC und SKN.

Weitere Abbildungen, welche jeweils den gleitenden Mittelwert des Strömungsmessgerätes mit dem Mittelwert der Messstellen vergleichen und die absolute Abweichung der einzelnen, über 60 Sekunden gemittelten Messdaten von dem Mittelwert darstellen, befinden sich im Anhang IV.

Zusammengefasst wurden für die einzelnen Messquerschnitte einerseits die Punktmessungen von ACP, COD und FIV und andererseits die Linienmessungen von DUR, SIC und die Staudruckrohre von SKN, für den 08.02.2012 und den 05.09.2012 sowie den 24.10.2012 kurz vor Abschluss der Messkampagne.

Naturgemäss sind im Tunnel Flüelen die Streubänder um den Mittelwert höher, da es sich um einen Gegenverkehrstunnel handelt. Im Tunnel Bözberg hingegen werden im Sommer nur ausnahmsweise negative Werte gemessen.

6.2 Tunnel Bözberg

6.2.1 Hufeisenprofil M1 08.02.2012

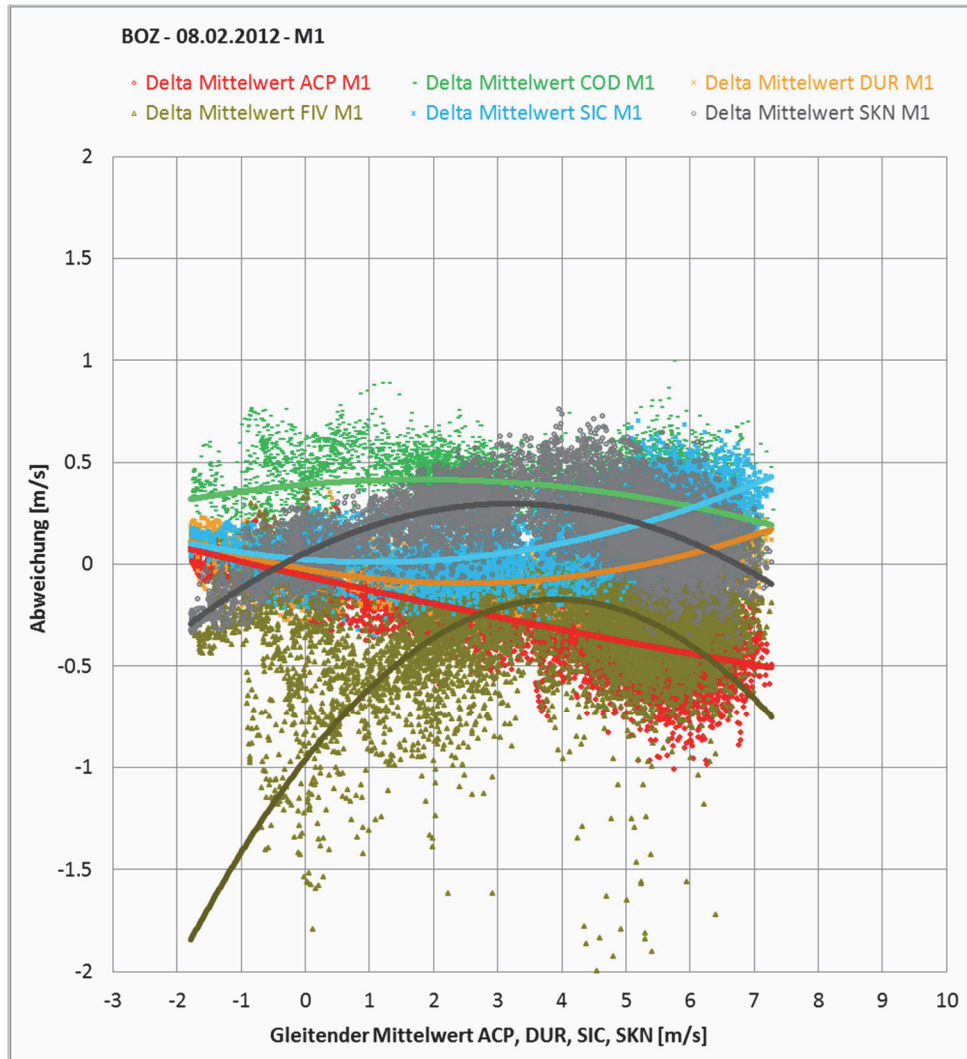


Abb. 6.5 Tunnel Bözberg – M1, 08.02.2012

Der graphische Vergleich der einzelnen Messsysteme mit den Mittelwerten aller plausiblen Strömungsmessgeräte im Monat Februar ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- ACP Die Abweichungen der Messwerte nehmen linear mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nach unten hin zu und erreichen 0.5 m/s bei einer Geschwindigkeit von 7 m/s.
- COD Die Messwerte liegen mit einem quasi konstanten Offset etwa 0.25 m/s über den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- DUR Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- FIV Die Messwerte weisen eine hohe Rate nicht plausibler Werte auf.
- SIC Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- SKN Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.

6.2.2 Hufeisenprofil M1 05.09.2012

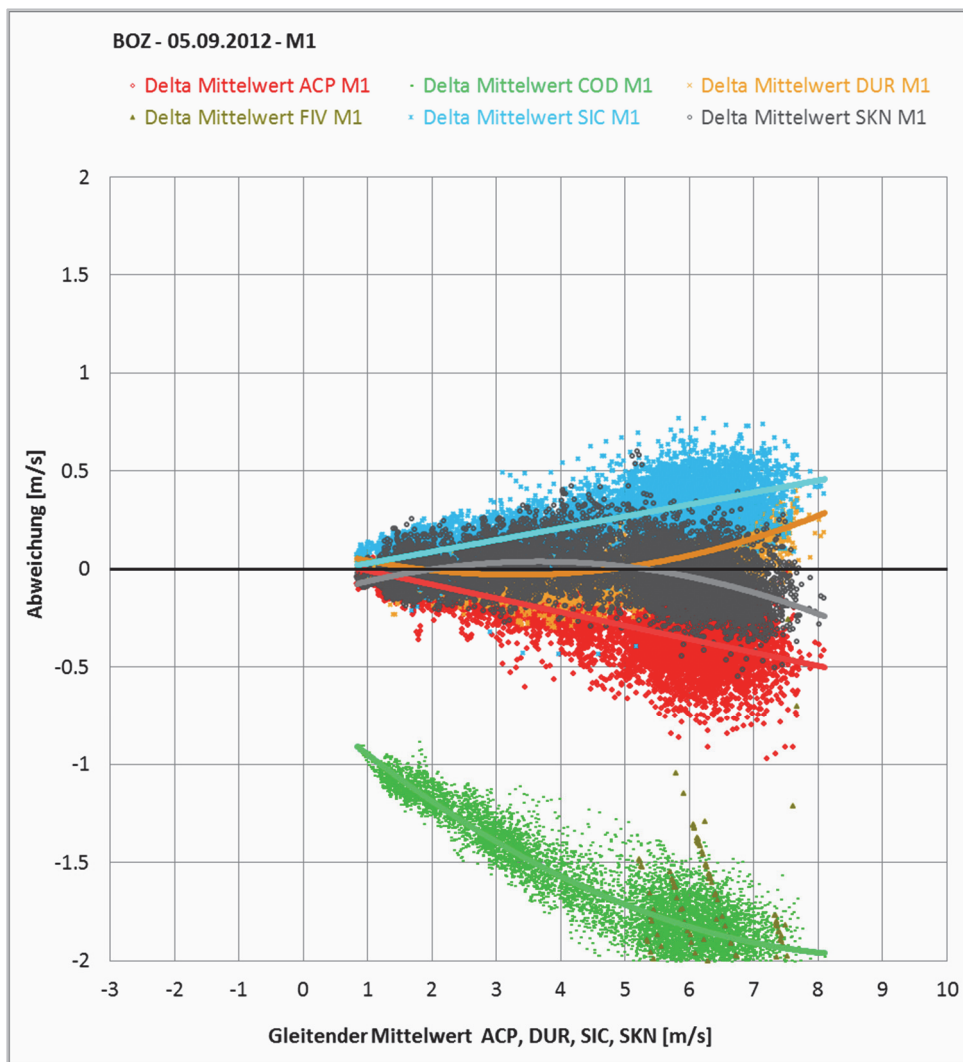


Abb. 6.6 Tunnel Bözberg – M1, 05.09.2012

Der graphische Vergleich der einzelnen Messsysteme mit den Mittelwerten aller plausiblen Strömungsmessgeräte 7 Monate später im September ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- ACP** Es gibt kaum Divergenzen zwischen dem Winter- und Sommertag; die Abweichungen der Messwerte nehmen linear mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nach unten hin zu und erreichen 0.5 m/s bei einer Geschwindigkeit von 8 m/s.
- COD** Sieben Monate später sind die Messwerte stark abgedriftet und erlauben nicht mehr eine sinnvolle Interpretation der Messwerte.
- DUR** Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- FIV** Die Messwerte sind nicht mehr plausibel (siehe dazu die Messwerte im Bereich -1.5/-2.0 m/s zwischen 5-7 m/s gleitender Mittelwert).
- SIC** Die Abweichungen der Messwerte nehmen annähernd linear mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nach oben hin zu und erreichen 0.45 m/s bei einer Geschwindigkeit von 8 m/s.
- SKN** Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.

6.2.3 Rechteckprofil M2 08.02.2012

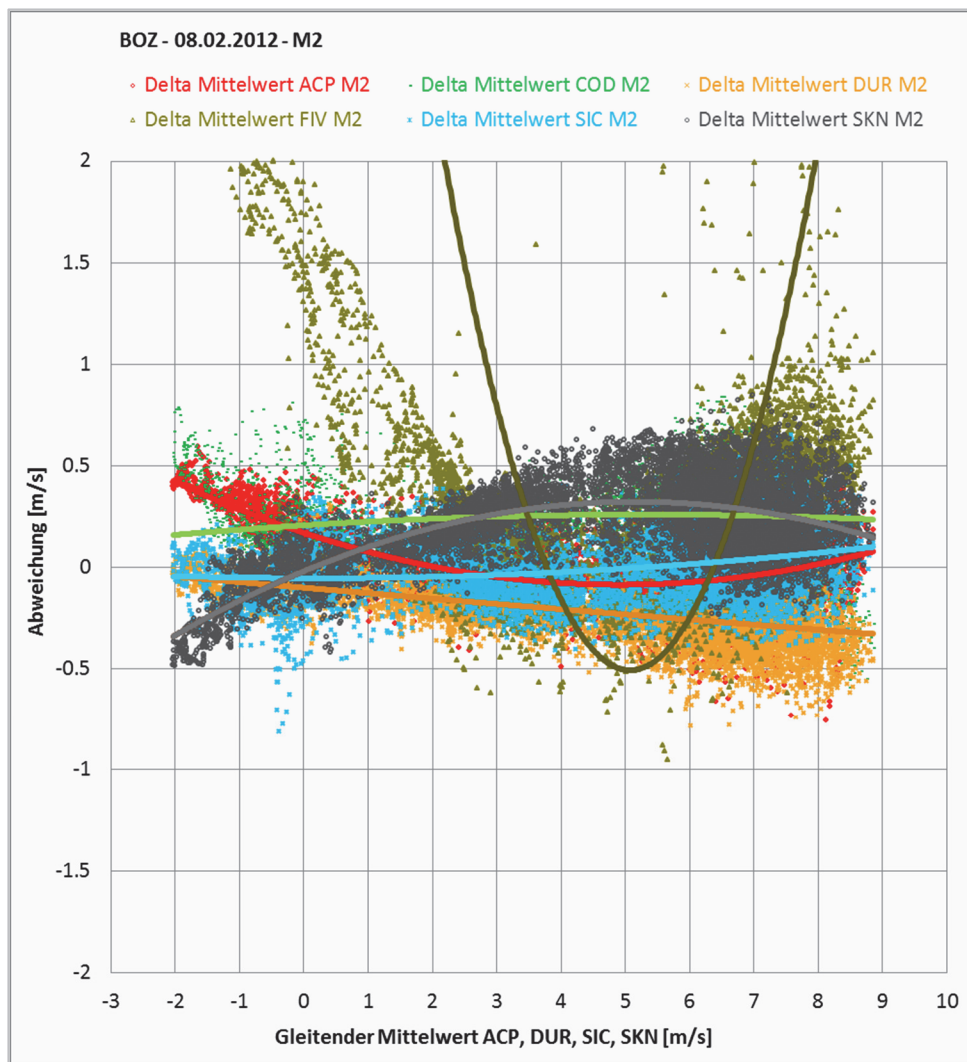


Abb. 6.7 Tunnel Bözberg – M2, 08.02.2012

Der graphische Vergleich der einzelnen Messsysteme mit den Mittelwerten aller plausiblen Strömungsmessgeräte im Monat Februar ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- ACP** Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- COD** Die Messwerte liegen mit einem quasi konstanten Offset etwa 0.20 m/s über den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- DUR** Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Die Abweichungen der Messwerte nehmen linear mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nach unten hin zu und erreichen 0.3 m/s bei einer Geschwindigkeit von 8 m/s. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- FIV** Die Messwerte weisen eine hohe Rate nicht plausibler Werte von bis 10 m/s auf, welche die polynomische Kurve über die Graphik hinaus ± 2 M/s beeinflusst.
- SIC** Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- SKN** Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.

6.2.4 Rechteckprofil M2 05.09.2012

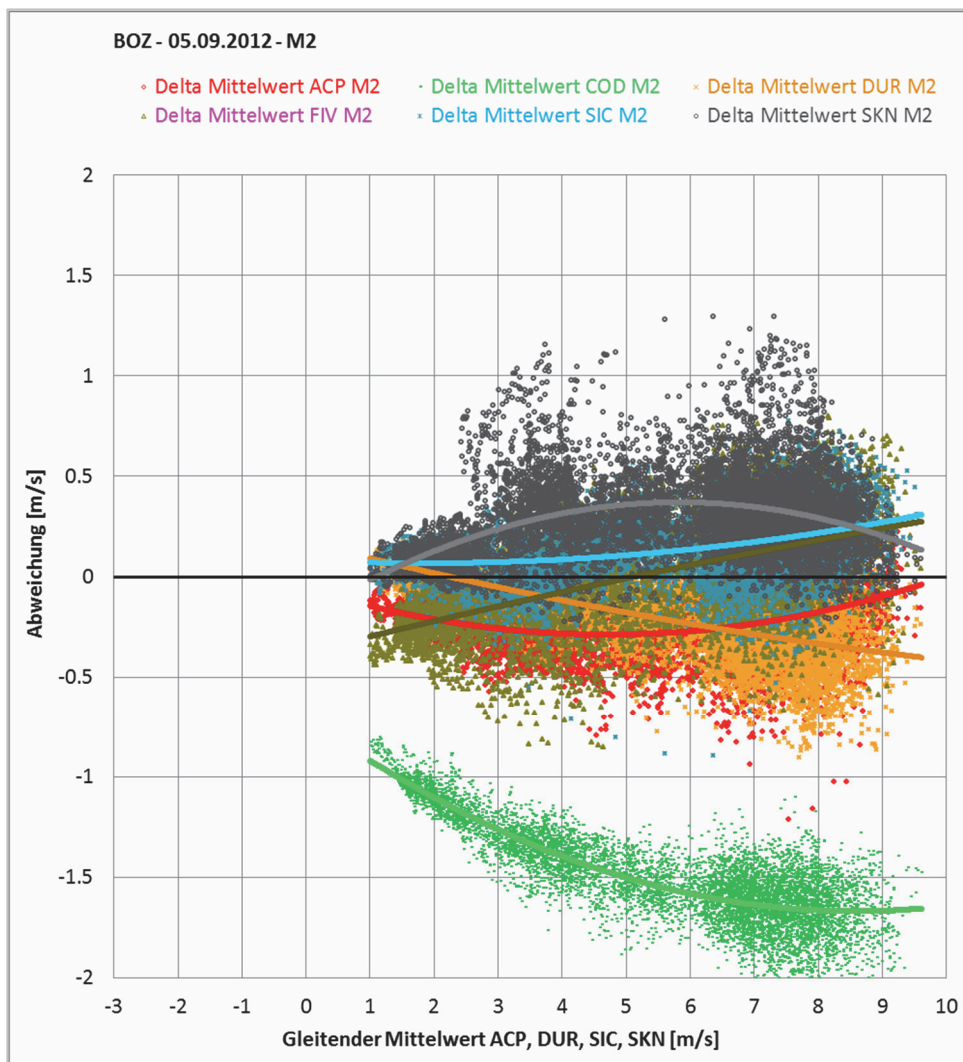


Abb. 6.8 Tunnel Bözberg – M2, 05.09.2012

Der graphische Vergleich der einzelnen Messsysteme mit den Mittelwerten aller plausiblen Strömungsmessgeräte 7 Monate später im September ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- ACP Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- COD Sieben Monate später sind die Werte jedoch stark abgedriftet und erlauben nicht mehr eine sinnvolle Interpretation der Messwerte.
- DUR Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Die Abweichungen der Messwerte nehmen linear mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nach unten hin zu und erreichen 0.35 m/s bei einer Geschwindigkeit von 9 m/s. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- FIV Die Messwerte sind durchgehend plausibel und liegen nahe an den Mittelwerten. Vernachlässigt man die nicht plausiblen Werte in Februar, so ergibt der zeitliche Vergleich eine stabiles Verhalten.
- SIC Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- SKN Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.

6.3 Tunnel Flüelen

6.3.1 Hufeisenprofil M1 08.02.2012

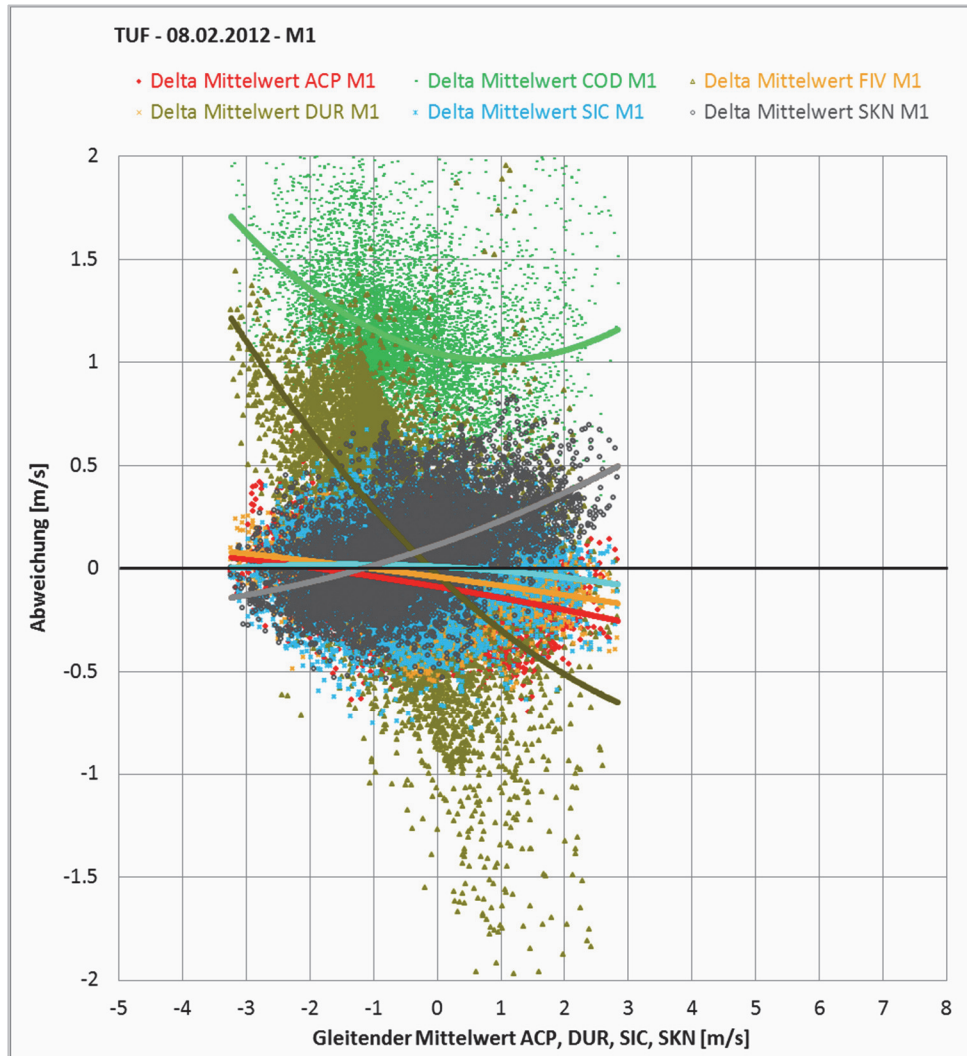


Abb. 6.9 Tunnel Flüelen – M1, 08.02.2012

Der graphische Vergleich der einzelnen Messsysteme mit den Mittelwerten aller plausiblen Strömungsmessgeräte im Monat Februar ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- ACP Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- COD Die Messwerte liegen rund 1.0-1.5 m/s über den Mittelwerten.
- DUR Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- FIV Die Messwerte weisen eine hohe Rate nicht plausibler Werte auf.
- SIC Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten.
- SKN Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Die Abweichungen der Messwerte nehmen linear mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nach oben hin zu und erreichen 0.50 m/s bei einer Geschwindigkeit von 3 m/s. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.

6.3.2 Hufeisenprofil M1 05.09.2012



Abb. 6.10 Tunnel Flüelen – M1, 05.09.2012

Der graphische Vergleich der einzelnen Messsysteme mit den Mittelwerten aller plausiblen Strömungsmessgeräte 7 Monate später im September ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- ACP Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Die Abweichungen der Messwerte nehmen linear mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nach unten hin zu und erreichen 0.6 m/s bei einer Geschwindigkeit von 3 m/s.
- COD Die Messwerte sind von einem Offset von 1.0-1.5 m/s stark nach unten zu einem näherungsweisen Offset von -1 m/s abgedriftet.
- DUR Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- FIV Die Messwerte sind nicht mehr plausibel.
- SIC Die SIC-Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Das Streuband der Messwerte um die Mittelwerte ist ausgeprägter.
- SKN Die SKN-Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.

6.3.3 Rechteckprofil M2 08.02.2012

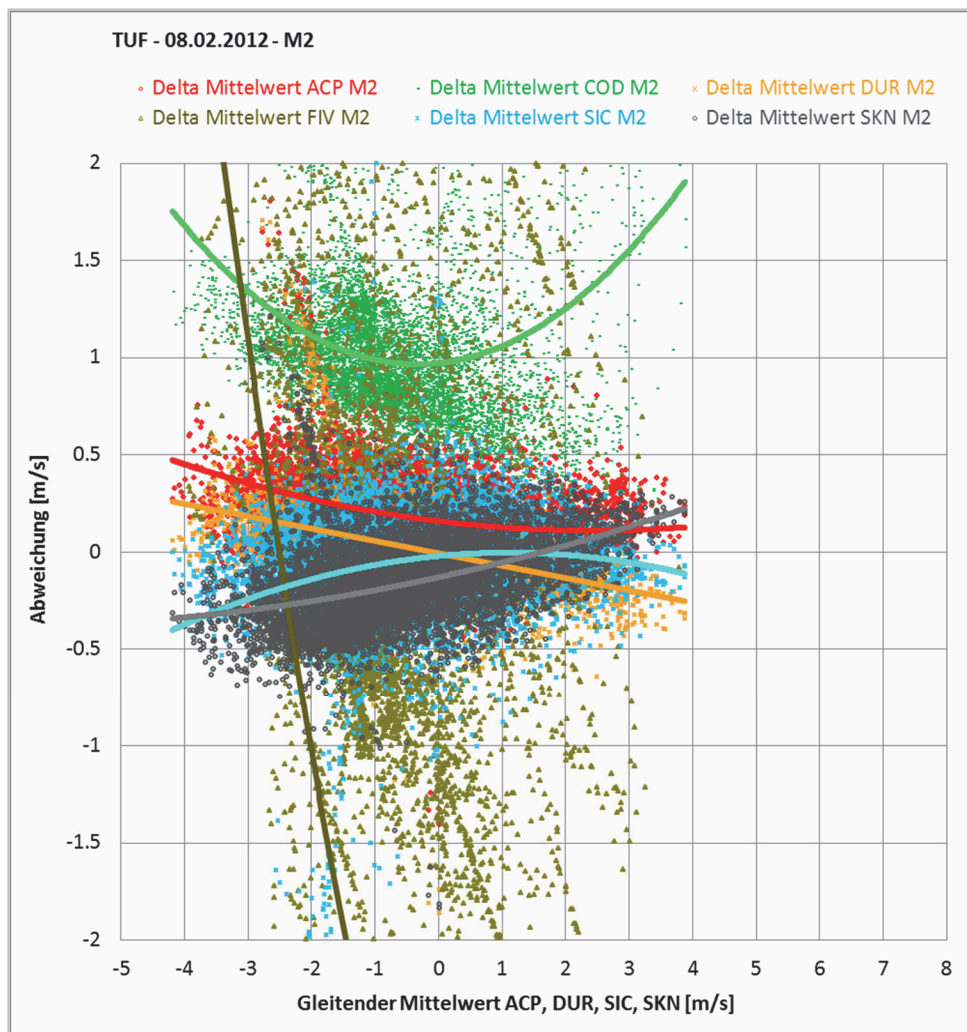


Abb. 6.11 Tunnel Flüelen – M2, 08.02.2012

Der graphische Vergleich der einzelnen Messsysteme mit den Mittelwerten aller plausiblen Strömungsmessgeräte im Monat Februar ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- ACP Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- COD Die Messwerte liegen rund 1.0-1.5 m/s über den Mittelwerten.
- DUR Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- FIV Die Messwerte sind nicht plausibel.
- SIC Die SIC-Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Nach 7 Monaten ist das Streuband der Messwerte um die Mittelwerte ausgeprägter.
- SKN Die SKN-Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.

6.3.4 Rechteckprofil M2 05.09.2012

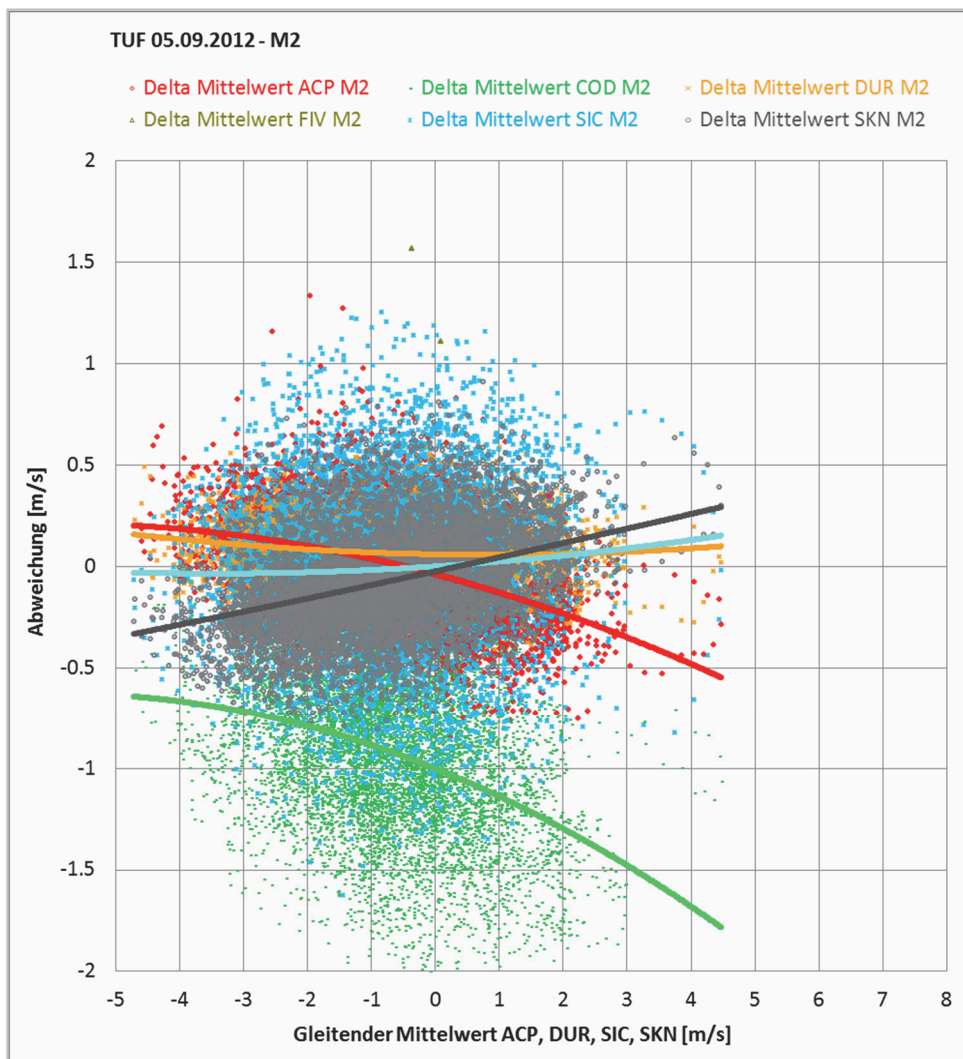


Abb. 6.12 Tunnel Flüelen – M2, 05.09.2012

Der graphische Vergleich der einzelnen Messsysteme mit den Mittelwerten aller plausiblen Strömungsmessgeräte 7 Monate später im September ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- ACP Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Die Abweichungen der Messwerte nehmen linear mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nach unten hin zu und erreichen 0.5 m/s bei einer Geschwindigkeit von 3 m/s.
- COD Die Messwerte sind von einem Offset von 1.0-1.5 m/s stark nach unten zu einem näherungsweisen Offset von -1 m/s abgedriftet.
- DUR Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- FIV Das Messgerät ist ausgefallen.
- SIC Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.
- SKN Die Messwerte liegen nahe an den Mittelwerten. Im Rahmen der Interpretationsgenauigkeit muss das zeitliche Verhalten als stabil bezeichnet werden.

7 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

7.1 Ziele und Erkenntnisse FOP

Das Erfassen der Strömungsgeschwindigkeit und deren Einbindung in die Leittechnik kann mit erheblichen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden sein. Das Ziel des Forschungsprojekts war es diese schon immer als wichtig angesehenen Aspekte zu untersuchen und die entsprechenden Fragen zu beantworten.

Das Projekt wurde mit unerwarteten, funktionellen Störungen der Messgeräte konfrontiert, welche das Endergebnis nicht unwesentlich beeinflussten. So mussten zwei von den sechs Strömungsmessgeräten wegen Messwertfehlern und Drift bei den vergleichenden, statistischen Auswertungen ausgeklammert werden. Auch die übrigen vier Messgeräte wiesen im Verlaufe des Projektes verschiedene, funktionelle Probleme auf.

Die Versuchsanstaltungen wurden in in Betrieb stehenden Tunneln eingebaut, was die logistischen Aufgaben in den zeitlich beschränkten Unterhaltsfenstern und Sperrzeiten nicht unwesentlich erschwerte. Nachregulierungen waren nur beschränkt möglich, so dass Gerätestörungen häufig erst mit deutlicher Verzögerung behoben werden konnten, was zu einem gewissen Datenverlust führte.

Trotzdem konnten die wesentlichen Ziele des Forschungsprojektes erreicht werden. So konnten insbesondere das Langzeitverhalten der Strömungsmessgeräte und die Plausibilität der Messwerte detailliert untersucht und dokumentiert werden.

Die Referenzmessungen des Volumenstromes zu Beginn und am Ende der Messkampagne mit der Tracergas-Methode der konstanten Emission unter Verkehr haben es nicht vollumfänglich erlaubt, einen neutralen, zuverlässigen Referenzwert gegenüber den Strömungsmessgeräten zu bestimmen. Die systembedingte Trägheit der Gasanalysatoren und die zeitliche Verzerrung der Messwerte infolge der räumlich versetzten Eindüsung des Tracergases zur Konzentrationsmessstelle waren gegenüber den sehr schnell reagierenden Strömungsmessgeräten der unter Verkehr stark variierenden Strömungsverhältnisse zu gross. Die Tracergasmessungen erlaubten es jedoch, im Rahmen ihrer systemeigenen Messungsgenauigkeit, die Genauigkeit der lokal gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten zu beurteilen.

Über den Zeitraum der Messkampagne zeigte sich, dass einige Messgeräte hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Stabilität noch Optimierungspotential aufweisen. Dieser Umstand wurde von mehreren Lieferanten in ihrer Stellungnahme nach Abschluss der Messkampagne auch bestätigt und dürfte zukünftigen Messgeräten zu Gute kommen.

Nachfolgend eine Übersicht über die Ziele und Erkenntnisse des FOP, welche im Kapitel 1.4 aufgeführt wurden.

7.1.1 Kalibrierungen / Inbetriebsetzung

Alle durch die Lieferanten eingesetzten Messgeräte wurden von diesen in Werktests funktionell geprüft und vor dem Einbau in die beiden Tunnel entsprechend eingestellt und kalibriert.

Eine Nachkalibrierung vor Ort wurde nur bei den Punktmessgeräten von ACP und COD mittels eines Nullpunktabgleichs durchgeführt. Zudem wurde die Plausibilität der Messwerte mit einem zertifizierten, mobilen Anemometer verifiziert.

Die beiden Linienmessgeräte von DUR und SIC erfordert keine Kalibrierung. Sie sind mit einem softwaremässigen, automatischen Nullpunktabgleich ausgerüstet. Auch das Messgerät von FIV, einmal im Werk kalibriert, erfordert keinen weiteren Nullpunktabgleich. Dasselbe trifft auch auf das Staudruckrohr von SKN zu, welches mit einem automatischen Nullpunktabgleich der Druckzellen ausgerüstet ist.

Erneute Nullpunktgleichungen werden bei der Wartung der Messköpfe der Geräte von ACP zirka alle 6 Monate empfohlen. Dasselbe gilt auch für die Geräte von COD. Alle anderen Geräte sehen keinen erneuten Nullpunktgleich vor.

7.1.2 Einfluss von Störgrößen

Installationsort:

Die Installationsstandorte längs dem Tunnel wurden sorgfältig und in Anlehnung an das Merkblatt Sensorik 23001-11320 so gewählt, dass eine Beeinflussung der Messwerte durch Störgrößen (Schilder, Querschnittsänderungen etc.) weitgehend ausgeschlossen werden konnte. Die Ergebnisse der Messkampagne bestätigen, dass in der Tat keine Störungen durch lokale Strömungsphänomene aufgetreten sind und die Festlegung der Montageorte daher zielführend war.

Weiterhin wurden die einzelnen Messprofile gemäss den Angaben der Lieferanten soweit auseinander montiert, dass Interferenzen im Ultraschallbereich ausgeschlossen werden konnten.

Die Positionswahl der Strömungsmessgeräte in den beiden Messprofilen, Hufeisen und Zwischendecke, wurde den Lieferanten freigestellt und von diesen auf Erfahrungsbasis vorgenommen.

Bei der Tracergasmessung vom 26.09.2012 konnte festgestellt werden, dass die Linienmessung von DUR, welche sich in einem Abstand von zirka 50 Meter zu den zwei in Betrieb befindlichen Strahlventilatoren befand (Leistung 22 kW, Schub 710 N, Volumenstrom 17.5 m³/s), korrekte Messwerte lieferte.

Der im Merkblatt 23001-11320 angegebene minimale Abstand von 100 m zu Strahlventilatoren ist daher gut bemessen.

Umgebungsdruck:

Alle Ultraschallmessgeräte zeigten sich unempfindlich gegenüber Änderungen des Umgebungsdruckes. In die Auswertung der Staurohre floss der Umgebungsdruck korrekt ein.

Temperatur:

Physikalisch gesehen beeinflusst die Lufttemperatur alle Strömungsmessgeräte. Ein Teil der Messgeräte ist daher mit einer Temperatursonde vom Typ PT100 ausgerüstet, deren Messwert direkt in die Strömungsberechnung einfließt. Dies ist der Fall bei ACP, COD, DUR, FIV und SKN.

Die beiden Linienmessgeräte von DUR und SIC berechnen hingegen eine virtuelle Temperatur. Das Gerät von DUR weist zusätzlich eine eingebaute Temperatursonde auf, welche zur Plausibilisierung der virtuellen Temperatur dient. Das Messgerät von SIC hat keine eigene Temperaturmessung.

Die Robustheit der PT100 Temperatursonden ist daher massgebend für stabile Strömungsmessungen. Die massive Drift bei allen Geräten von COD zeigte das diesbezügliche Fehlerpotential auf, welches nach wenigen Monaten einen systematischen Messwertfehler von zirka 2.0 m/s verursachte.

Die Berechnung der virtuellen Temperatur bei den Geräten SIC zeigte eine Abweichung von zirka 3-5 °C. Die Ursache war die nicht präzise genug ausgemessene Distanz zwischen den beiden Messköpfen und relative Parametrierung. Da die Temperatur jedoch bei der Berechnungsmethode von SIC nicht direkt einfließt, führte dies nicht zu Messwertfehlern der Strömungsgeschwindigkeit.

Feuchtigkeit:

Starke Änderungen der Luftfeuchtigkeit, wie sie z. B. bei den Tunnelreinigungen aufgetreten sind, haben keinen erkennbaren Einfluss auf die Messwerte ausgeübt.

7.1.3 Mittelwertbildung bei Punktmessungen

Bei den Ultraschall-Punktmessgeräten ACP und COD sowie bei den Staudruckrohren SKN wird ein arithmetischer Mittelwert aus den beiden Messwerten eines Messquerschnitts berechnet. Diese Mittelwertbildung ist sowohl bei Richtungsverkehr wie auch bei Gegenverkehr plausibel und erfolgte durchgehend korrekt.

Die statistischen Auswertungen haben gezeigt, dass zwischen dem Mittelwert aus zwei Punktmessungen seitlich an den Tunnelwänden und der Einzelpunktmessung von FIV im Deckenbereich keine wesentlichen Unterschiede auftreten. Im Tunnel Flüelen mit Gegenverkehr wurde das Messgerät in der Tunnelmitte im Gewölbe montiert. Im Tunnel Bözberg hingegen, wo das Gerät über der Normalspur angebracht war, kam es bei einem Spurabbau zu einer verminderten Anzeige der Strömungsgeschwindigkeit gegenüber allen anderen Messsystemen.

Der Nachteil dieser Einzelpunktmessung liegt vor allem in der Einbauposition im Deckenbereich, welche für den Einbau und Unterhalt jeweils den Einsatz von Hebeeinrichtungen und die Sperrung von beiden Fahrbahnen erfordert.

7.1.4 Integrationszeiten und Messwertglättung

In den eingesetzten Messgeräten waren unterschiedliche Prinzipien der Messwertglättung wie linear gleitender Mittelwert, T90, sowie weitere systemeigene Filterfunktionen implementiert. Allen Messgeräten gemeinsam ist, dass die Integrationszeiten und Messwertglättungen einstellbar sind.

Die vom FOP vorgegebene Integrationszeit von 10 Sekunden für gleitende Mittelwerte hat erlaubt die Konsistenz und Reaktivität der abgegebenen, geglätteten Messwerte qualitativ zu beurteilen.

Die Auswertungen zeigten, dass es bei in stationären Strömungsverhältnissen im Tunnel zu Ausreissern kommt wie z.B. bei den Geräten von ACP und zu massiven Ausfällen bei den Geräten von FIV.

Die Geräte von SIC hatten zusätzlich zur Messwertglättung eine Median Filterfunktion implementiert, was zu einer stärkeren Glättung der Messwerte führte und zu einer verlangsamt Reaktion auf Ist-Wert Änderungen.

Die vom FOP vorgegebene Integrationszeit von 10 Sekunden, welche auch der Ereignisfallvorgabe des Merkblatts Sensorik 23001-11320 entspricht, erscheint angemessen für Tunnel mit Richtungs- und Gegenverkehr. Mit 10 Sekunden wird im Ereignisfall eine ausreichende Reaktionszeit sichergestellt, um Lüftungsanlagen dynamisch zu regeln.

Wird hingegen die Strömungsmessung auch im Normalbetrieb zur Lüftungsregelung genutzt, sind längere Mittelungszeiten zulässig. Diese sind gemäss Merkblatt Sensorik 23001-11320 direkt auf der Leitebene gemäss den Anforderungen der unterschiedlichen Betriebszustände zu realisieren.

7.1.5 Messwertfehler

Das hardwaremässige oder softwaremässige Erkennen und Ausscheiden von Messwertfehlern schon innerhalb eines Messsystems ist von hoher Bedeutung, denn es hat sich gezeigt, dass aufgetretene Hardwarefehler, wie z.B. der Ausfall einer PT100 Sonde bei SKN oder eines korrodierten Sensor bei FIV nicht detektiert und gemeldet worden sind.

Dasselbe betrifft auch die Auswertesoftware einiger Geräte, welche z. B. starke Ausreisser (Fehlmessungen bei ACP, SIC) oder Deadlocks (FIV) nicht als Fehler erkannten.

Nur aufgrund der kontinuierlichen visuellen, täglichen Kontrolle der aufgezeichneten Messwerte konnten derartige Fehler im Forschungsbericht detektiert werden. Unbedingt erstrebend ist, dass solche Fehler künftig automatisch erkannt werden.

7.1.6 Bestimmung des Volumenstroms / Messgenauigkeit

In keinem der eingesetzten Strömungsmesssysteme wurden durch die Lieferanten Korrekturfaktoren zur Umrechnung der lokalen Messwerte auf eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit bzw. den Volumenstrom hinterlegt. Die Genauigkeit der durchgeführten Tracergas-Referenzmessungen war nicht ausreichend, um diesbezüglich zu derartiger Faktoren konkrete, quantitative Aussagen machen zu können.

Qualitativ geht aus den Auswertungen und Vergleichen über die gesamte Messperiode hervor, dass insbesondere die automatisch Nullpunkt-abgleichenden Linienmessgeräte DUR, SIC und die Staudruckrohre SKN über den Messbereich unter sich konsistente Messwerte abgaben.

Tendenziell wichen die Punktmessungen von ACP und COD leicht und mit ansteigender Strömungsgeschwindigkeit zunehmend von den Mittelwerten aller stabilen Messungen (ACP, DUR, SIC, SKN) ab. Da sich die Punktmessungen von COD verhältnismässig nah an der Wand befanden, ist diese geschwindigkeitsabhängige Abweichung möglicherweise auf die im Kapitel 2.3.2 beschriebene Reynoldszahl-Abhängigkeit zurückzuführen. Die Punktmessungen von ACP und SKN hingegen wiesen einen grösseren Wandabstand auf und lagen dadurch näher am „neutralen“ Punkt, bei welchem die lokale Geschwindigkeit der mittleren entspricht. Dadurch waren sie weniger einer Reynoldszahl-Abhängigkeit ausgesetzt.

Die Richtlinie 13001 fordert für Strömungsmessungen eine Messgenauigkeit von ± 0.2 m/s bei 3 m/s. Aufgrund der Abweichungen von den Mittelwerten aller stabilen Messungen (ACP, DUR, SIC, SKN) können diesbezüglich letztendlich nur Aussagen auf Basis eines relativen Referenzwertes gemacht werden, da die Genauigkeit der Tracergasmessungen für diese Betrachtung entgegen den Erwartungen nicht ausreichte.

Wohlgemerkt in den Grenzen dieses Betrachtungsansatzes ergeben die statistischen Auswertungen des Kapitels 6, dass nur die beiden Linienmessungen konsistent die geforderte Messgenauigkeit erreichen. Die Punktmessungen von SKN und ACP weisen hingegen bei 3 m/s teilweise erhöhte Abweichungen von bis zu 0.3-0.5 m/s auf. Wie schon angeführt, ist diese Abweichung möglicherweise auf fehlende, Reynoldszahl-abhängige Korrekturfaktoren zurückzuführen.

Aus heutiger Sicht und auf Basis des aktuellen Wissenstandes kann unter üblichen Tunnelbedingungen und bei Einhaltung der Montagehinweise im TM Lüftung „Sensorik“ bei Linienmessungen mit automatischer Nullpunktgleichung auf eine Referenzmessung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit verzichtet werden, ohne Gefahr zu laufen die Vorgaben der Richtlinie 13001 bezüglich der Messgenauigkeit nicht einzuhalten.

Bei Punktmessungen hingegen kann zur Zeit noch nicht pauschal auf Referenzmessungen verzichtet werden. Dieser Vorbehalt kann möglicherweise jedoch zukünftig durch die Anwendung von empirisch bestimmten Korrekturfaktoren gerätespezifisch wegfallen.

Die Kosten einer Referenzmessung für eine Kalibrierung der Korrekturfaktoren sind von der Tunnelkonfiguration und spezifischen Gegebenheiten und Anforderungen abhängig. Im Rahmen des FOP wurden folgende, unverbindliche Richtpreise für Referenzmessungen (Netzmessung und Tracergasverfahren) ermittelt.

- Kosten einer Netzmessung 5x5 CHF 10'000 / 15'000
- Kosten Tracergasmessung Impulsmethode CHF 10'000 / 12'000

Diesbezüglich ist anzumerken, dass Netzmessungen eine komplette Tunnelsperrung erfordern, während Tracergasmessungen unter der Bedingung einer eindeutigen und konstanten Strömungsgeschwindigkeit auch unter Verkehr durchgeführt werden können.

7.1.7 Fernkontrolle der Messwerte

Die tägliche, vergleichende Analyse der verschiedenen Messwerte hat gezeigt, dass regelmässige, automatisierte Plausibilitätskontrollen der Messwerte erforderlich sind, um

die Zuverlässigkeit eines Strömungsmesssystems dauerhaft zu gewährleisten.

Während den Tracergas-Messungen im Tunnel Flüelen war die Präsenz im Kommando-
raum zur Regulierung der Lüftungsanlagen erforderlich. Bei dieser Gelegenheit wurden
parallel die Messwerte der 2x3 im Tunnel fest installierten Strömungsmessgeräte von SIC
(baugleich mit den Strömungsmessgeräten des FOP) visuell kontrolliert. Beide Male, am
17.01.2012 sowie am 26.09.2012, waren jeweils die Messwerte eines, bzw. von zwei
Messquerschnitten nicht korrekt (Abweichung zirka 20%, bzw. 50%), bei eindeutigen,
kontrollierten Strömungsverhältnissen. Dieses Beispiel unterstreicht, wie wichtig automa-
tische Plausibilitätskontrollen der Messwerte sind.

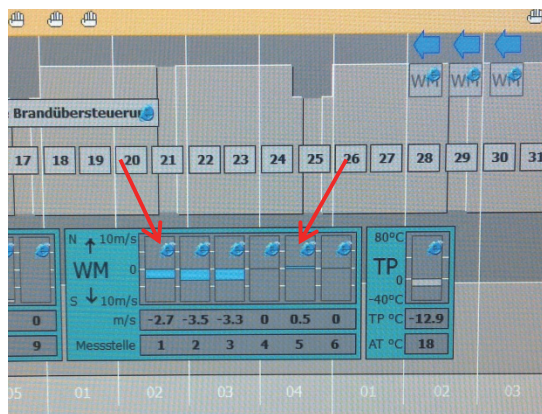


Abb. 7.1 Tunnel Flüelen 26.09.2012 - Anzeige im MMI mit zwei Strömungsmessgeräten mit grossen Abweichungen (N° 1 und N° 5).

Dazu gibt es u.a. folgende drei Ansätze:

1. Verfügt ein Tunnel über ein Längslüftungssystem, werden periodisch reine Längsströmungen erzeugt. Besteht zusätzlich ein Halbquer- oder Querlüftungssystem, ist dieses während der Prüfung zumindest abschnittsweise ausser Betrieb zu nehmen. Die Prüfungen finden nach Möglichkeit bei geringem Verkehrsaufkommen statt und erlauben eine vergleichende Plausibilitätsprüfung aller Messgeräte im betroffenen Lüftungsabschnitt.
2. Steht kein Längslüftungssystem zur Verfügung, können bei vielen Anlagen abschnittsweise Längsströmungen mit Halbquer- oder Querlüftungssystemen gezielt induzieren werden.
3. Bei Tunnelobjekten mit Halbquer- oder Querlüftungssystemen kann über eine Volumenstrombilanz der Zu- und Abluftventilatoren eine „theoretische“ Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum erstellt werden, welche z. B. mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrat ständig eine vergleichende Plausibilisierung aller Strömungsgeräte in einer Tunnelröhre erlaubt. Eine solche theoretische Kurve des Gotthard-Strassentunnels ist nachfolgend beispielhaft dargestellt. Weicht eine Strömungsmessung zu stark von dieser Kurve ab, ist die Plausibilität der Messung zu hinterfragen.

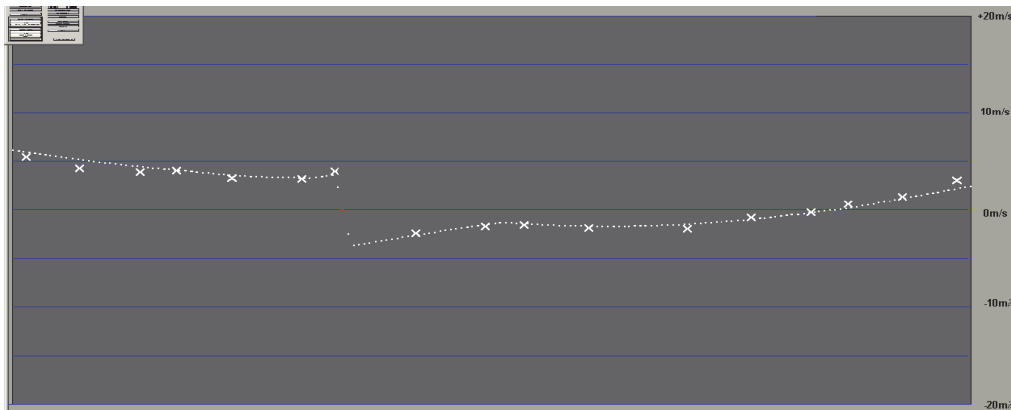


Abb. 7.2 Beispiel eines Abgleichs einer „theoretischen“ Kurve mit den Strömungsmesswerten, Gotthard-Strassentunnel.

Derartige, automatisierte Plausibilitätskontrollen sollten in die Leittechnik implementiert werden, um Messwertfehler frühzeitig festzustellen.

Eine systembedingte, gleichartige Drift aller Messgeräte jedoch, z. B. verursacht durch instabile Komponenten, wie sie während der Messkampagne bei den Geräten von COD aufgetreten ist, kann nur durch Nullpunktgleichungen oder unabhängige Kontrollmessungen erfasst werden.

7.1.8 Fernparametrierbarkeit

Die Testinstallationen des FOP haben nur einen sehr begrenzten bzw. keinen Fernzugriff auf die Messgeräte zugelassen. Die Parametrierungen wurden vor Ort im Fahrraum mit portablen Computern oder mittels einer Funkbedienung (FIV) durchgeführt. Alle während der gesamten Messkampagne an den Strömungsmessgeräten aufgetretenen, hard- wie auch softwareseitigen Probleme mussten vor Ort und daher im Fahrraum gelöst werden. Dafür waren Teil- oder Vollsperrungen der Tunnel notwendig. Idealerweise sollten erforderlichen Zugriffe zur Kalibrierung der Strömungsmessgeräte per Fernzugriff durchgeführt werden können.

Bezüglich der Wartung und Instandhaltung sind Geräte ohne aktive Komponenten im Fahrraum vorteilhaft, bei welchen die Auswerteeinheiten in technischen Räumen untergebracht sind.

7.1.9 Langzeitverhalten der Anlage

Im Rahmen des FOP wurden die Messwerte der sechs Strömungsmessgeräte über 9 Monate täglich visuell ausgewertet und verglichen. Es hat sich gezeigt, dass nicht alle Geräte ein gleichmäßiges, stabiles Langzeitverhalten hatten. Diesbezüglich ist insbesondere die richtungsgleiche Drift aller COD Geräte zu erwähnen.

Bei der Tunnelreinigung mit rotierenden Bürsten wurden in Absprache mit den Lieferanten keine speziellen Massnahmen getroffen, abgesehen von der Demontage der Staudruckrohre. Ansonsten wurde nur sichergestellt, dass die mechanische Halterung der rotierenden Bürsten die Geräte nicht beschädigen konnte. Kein Messsystem wurde durch die Tunnelwaschung negativ beeinflusst, abgesehen von einem abgelenkten Thermofühler bei COD.

Anzufügen ist, dass minimale Verschiebungen der Messgeometrie der Geräte zu Messwertfehlern führen können, welche nicht unbedingt unmittelbar erkennbar sind, wenn keine sichtbare Deformierung vorliegt.

Während der Messkampagne des FOP wurde eine Ultraschall-Messsonde eines FIV Geräts durch Salzkorrosion zerstört. Bei allen anderen Geräten wurden zwar Flugrostspuren und Ablagerungen festgestellt, eigentliche Korrosionserscheinungen traten jedoch nicht auf.

7.1.10 Unterhalt der Strömungsmessgeräte

Die Lieferanten der Strömungsmessgeräte von ACP, COD, DUR und FIV geben ein Wartungsintervall von 6 Monaten an. SIC (Edelstahlausführung) und SKN nennen ein Wartungsintervall von maximal 5 Jahren.

Das FOP hat gezeigt, dass zwischen der eigentlichen Wartung vor Ort und der Kontrolle der Plausibilität der Messwerte unterschieden werden muss. Bei einer kontinuierlichen automatischen Überwachung und Plausibilisierung der Messwerte sollten die Wartungsintervalle grösser als 1 Jahr sein. Anzustreben sind Wartungsintervalle von 2 Jahren. Störungen sind unmittelbar zu beheben. Mitberücksichtigt werden müssen u.a. spezielle Gegebenheiten und Betriebsbedingungen.

7.1.11 Kosten der Strömungsmessgeräte

Die Installationskosten der Strömungsmessgeräte sind von der Anlagenkonfiguration und den projektspezifischen Gegebenheiten und Bedürfnisse abhängig. Im Rahmen des FOP haben die Lieferanten einen verbindlichen Richtpreis für eine minimale Installation eines Messprofils angegeben. Daraus geht hervor dass die Kosten für ein komplettes Messprofil aus zwei einzelnen Punktmessungen zirka 40% tiefer liegen als für ein Messprofil mit einer Linienmessung. Die Kostengünstigste Version ist eine einzelne Punktmessung.

7.2 Zusammenfassung der Auswertungen

In der nachfolgenden Tabelle werden die wesentlichen Ergebnisse des FOP zusammengefasst. Diese Zusammenstellung gilt für die im FOP eingesetzten Geräte und deren Messwertauswertungen während der Messkampagne. Nicht berücksichtigt sind etwaige, zwischenzeitliche Weiterentwicklungen und Optimierungen durch die Hersteller.

Bemerkungen zu den Auswertungen der Messkampagne der einzelnen Lieferanten der Messgeräte befinden sich im Anhang VI.

Abb. 7.3 Zusammenfassung der Auswertungen

Argument	ACP	COD	FIV	DUR	SIC	SKN
Abweichung von den Mittelwerten	Mittel o	Mittel o	Mittel o	Gering ++	Gering ++	Mittel o
Zeitliche Stabilität (Drift)	Hoch ++	Schwach --	Mittel o	Hoch ++	Hoch ++	Hoch ++
Ausreisser / Fehlmessungen	Mittel o	Gering ++	Stark --	Gering ++	Mittel o	Gering ++
Reaktivität / Instationäres Verhalten	Hoch ++	Hoch ++	Hoch ++	Hoch ++	Reduziert -	Hoch ++
Störung durch Verkehrseinfluss	Mittel o	Mittel o	Sensibel -	Schwach +	Schwach +	Schwach +
Korrosionsschutz	Sehr gut ++	Sehr gut ++	Sensibel -	Sehr gut ++	Sehr gut ++	Sehr gut ++
GESAMT	+	+	-	++	+	++

7.3 Empfehlungen

7.3.1 Empfehlungen an Hersteller - Konstrukteure

Die Erfahrungen des FOP mit der Installation, Inbetriebnahme und detaillierten Analyse über neun Monate erlauben nachfolgende, synthetisch aufgeführten Empfehlungen zu formulieren:

- Korrosionsfreie Montageelemente, Geräte und Sonden;
- Korrosionsgarantie;
- Mechanische Stabilität der Geräte;
- 24V DC Stromversorgung;
- Stabile elektronische und elektrotechnische Komponenten;
- Ausschluss von Fehlmessungen durch bauliche Gegebenheiten (z.B. Zwischendecke) und Betriebszustände (Verkehr, Ereignisse);
- Verbesserte Störungs- und Alarmanalyse mit Rückmeldung an die Leittechnik;
- Fernzugriff auf die Geräte;
- Wartungsintervall 1 Jahr oder länger;
- Abspeicherung der Konfiguration auf Leitebene und Möglichkeit des Reload;
- Nach Bedarf Schutzvorrichtung für Tunnelwaschung.

7.3.2 Empfehlungen an Planer

Im Rahmen der Planung von Strömungsmesseinrichtungen wird empfohlen ein besonderes Augenmerk auf folgende Punkte zu legen, welche im Verlauf des FOP festgestellt wurden:

- Definition der Messprofile, Einbau- und Betriebsbedingungen des Tunnels;
- Klare Spezifikation der Strömungsmessgeräte;
- Lieferanten müssen alle Einstellungen und Parametrierungen bekannt geben (keine Black Box);
- Sicherstellen, dass die Messwerte mit einer minimalen Mittelwertbildungszeit von 10 Sekunden im Ereignisfall vom Gerät zur Verfügung gestellt werden;
- Galvanische Trennwandler und Überspannungsschutz vorsehen;
- Vorgaben für die Inbetriebsetzung der Anlage und zertifizierte Kontrolle der Inbetriebnahme der Messinstallationen;
- Prozeduren für regelmässigen Funktionstests der Geräte;
- Saubere Trennung zwischen der Messwernerfassung im Tunnel und der Messwertverarbeitung in der Anlagenleittechnik (Korrekturfaktoren, gleitende Mittelwertbildung);
- Fernzugriff ab Anlagenleitebene auf die Parametrisierung der Geräte;
- Regelmässige, automatische Plausibilitätskontrollen der Messwerte. Abweichungen sind als Störung in die Ereignisliste der Leittechnik einzutragen;
- Notwendigkeit einer Referenzmessung begründen.

7.3.3 Empfehlungen an Betreiber

Die Erfahrungen des FOP erlauben die nachfolgenden Empfehlungen an die Tunnelbetreiber festzuhalten:

- Regelmässige Wartung gemäss den Empfehlungen des Lieferanten;
- Betriebsstatistik jedes einzelnen Geräts (Journal);
- Regelmässige Funktionskontrollen, Messwert-Plausibilisierung mit Referenz-Anemometer;
- In die Auswertung von Ereignissen ist das Verhalten der Strömungsmessgeräte mit einbeziehen.

7.3.4 Empfehlungen ASTRA

Aufgrund der Erfahrungen des FOP mit den Strömungsmessgeräten und den Resultaten der Messkampagne sollten die folgenden Vorgaben in der Richtlinie Lüftung und dem Technische Merkblatt Sensorik die nachfolgenden Vorgaben zu überprüft, respektive ergänzt werden.

Richtlinie ASTRA 13 001 „Lüftung der Strassentunnel“

- Automatische Plausibilitätskontrollen der Messwerte erforderlich, wenn diese in die Steuerung eingebunden sind;
- Resultate der Plausibilitätskontrolle sind zu archivieren;

Merkblatt 23001-11320 „Sensorik“

- Einbauhöhe: zwischen Linienmessgeräten und Punktmessgeräten unterscheiden;
- Minimale Einbauhöhe von Punktmessgeräte ab Gehweg ≥ 2.50 m
- Minimaler Wandabstand ≥ 30 cm
- Zu kleiner Deckenabstand kann bei Linienmessungen zu Fehlmessungen durch Reflexionen führen, als Hinweis aufnehmen;
- Korrekturfaktoren zur Volumenstrombestimmung in der Leittechnik hinterlegen;
- Abstand zu den Strahlventilatoren kann in Abhängigkeit ihrer Schubleistung bestimmt werden;

7.4 Schlussbemerkungen

Die Ergebnisse des FOP zeigen, dass zwischen den an eine genaue und zuverlässige Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit gesetzten Erwartungen und dem konkreten Verhalten der Messgeräte im Tunnel noch immer gewisse Diskrepanzen bestehen, welche noch nicht vollumfänglich gelöst sind.

Das Projekt wurde mit unerwarteten, funktionellen Störungen der Messgeräte konfrontiert, welche das Endergebnis nicht unwesentlich beeinflussten. Zwei der sechs Strömungsmessgeräte mussten wegen Messwertfehlern und Drift von vergleichenden, statistischen Auswertungen ausgeklammert werden. Auch die übrigen vier Messgeräte wiesen im Verlaufe des Projektes verschiedene, funktionelle Probleme auf, welche von den Lieferanten zukünftig berücksichtigt werden müssen, um die Zuverlässigkeit und Stabilität hinsichtlich des Langzeitverhaltens zu verbessern.

Trotzdem konnten die wesentlichen Ziele des Forschungsprojektes erreicht werden. Die Messwerte der Strömungsmessgeräte wurden detailliert analysiert, auf Plausibilität geprüft und dokumentiert. Aus den Untersuchungen ergeben sich Empfehlungen zur Verbesserung und Optimierung der Thematik „Strömungsmessung“ an die Lieferanten, Planer und Betreiber sowie an die Richtlinien und technischen Merkblätter des ASTRA.

Bezüglich der Messgeräte ist das automatische und autonome Erkennen und Ausschleiden von Messwertfehlern innerhalb des Messsystems für die Zuverlässigkeit bzw. Vertrauenswürdigkeit wichtig; diese Informationen müssen an die Leittechnik übermittelt werden. Regelmässige, automatisierte Plausibilitätskontrollen der Messwerte sind ebenfalls erforderlich, um die Zuverlässigkeit eines Strömungsmesssystems dauerhaft zu gewährleisten.

Die unter Verkehr durchgeführten Tracergasmessungen zur Bestimmung neutraler Referenzwerte waren nicht ausreichend schnell, um die variierenden Strömungsverhältnisse in den Tunneln detailliert zu erfassen. Die Ableitung möglicherweise erforderlicher, messsystem- und lageabhängiger Korrekturfaktoren zwischen der lokal gemessenen Strömungsgeschwindigkeit und dem Volumenstrom im Tunnel war dadurch nicht sinnvoll möglich. Vertiefende Untersuchungen zu diesem Thema unter Berücksichtigung der Gerätebauformen und von Reynoldszahl-Effekten bleiben der Zukunft vorbehalten und erfordern klar beherrschte und stabile Strömungszustände z. B. in einem Prüfstand oder Versuchstunnel.

Aus heutiger Sicht und auf Basis des aktuellen Wissenstandes kann unter üblichen Tunnelbedingungen und unter Einhaltung der Montagehinweise des TM Lüftung „Sensorik“ bei Linienmessungen mit automatischer Nullpunktgleichung auf eine Kalibrierung mit Referenzmessung im Fahrraum verzichtet werden, ohne Gefahr zu laufen die Vorgaben der Richtlinie 13001 bezüglich der Messgenauigkeit zu verfehlen.

Bei Punktmessungen hingegen kann heute noch nicht pauschal auf derartige Referenz-

messungen verzichtet werden. Dieser Vorbehalt kann aber möglicherweise zukünftig durch die Anwendung von empirisch bestimmten Korrekturfaktoren gerätespezifisch wegfallen.

Die festgestellten, funktionellen Störungen der Messgeräte haben auch gezeigt, dass die Vorgabe der Richtlinie bzw. des TM Lüftung „Sensorik“, plausibilisierbare Gruppen mit 3 Strömungsmessungen einzusetzen, richtig ist, um die Zuverlässigkeit des Messsystems zu gewährleisten.

Generell ergibt sich aus dem FOP, dass die heute installierten Messgeräte den gestellten Anforderungen unter üblichen Randbedingungen genügen, wenn die aufgeführten Empfehlungen an Lieferanten, Planer und Betreiber Berücksichtigung finden.

Anhänge

I	Tunnelmatrix	129
II	Gerätematrix	132
III	Übersicht Testinstallationen	133
III.1	Lage der Messprofile im Tunnel Flüelen	133
III.2	Lage der Messprofile im Tunnel Bözberg	134
IV	Tagesauswertungen	135
IV.1	Tunnel Bözberg 08.02.2012	135
IV.2	Tunnel Bözberg 05.09.2012	141
IV.3	Tunnel Flüelen 08.02.2012	147
IV.4	Tunnel Flüelen 05.09.2012	153
IV.5	Tunnel Bözberg 24.10.2012	159
IV.6	Tunnel Flüelen 24.10.2012	165
V	Vergleichsfaktoren	171
V.1	Bözberg 18.01.2012 - 18:00 – M1	171
V.2	Bözberg – 18.01.2012 – M2	171
V.3	Bözberg – 18.01.2012 – 22:00 – M1	171
V.4	Bözberg – 18.01.2012 – 22:00 – M2	171
V.5	Flüelen – 26.09.2012 – 15:00 – SMG (M1/M2)	172
VI	Stellungnahmen Lieferanten SMG	173
VI.1	ACP - Arias Environement AG	173
VI.2	COD - Codel International Ltd	175
VI.3	DUR - Durag GmbH	180
VI.4	FIV - Fives Pillard	183
VI.5	SIC - Sick SA	186
VI.6	SKN - Schiltknecht AG	194
VII	Produktbeschreibung der Strömungsmessgeräte	197
VII.1	Strömungsmessgerät ACP TK 300	197
VII.2	Strömungsmessgerät Codel TunnelCraft 3	201
VII.3	Strömungsmessgerät Durag D-FL 220T	207
VII.4	Strömungsmessgerät Sick Flowsic200	211
VII.5	Strömungsmessgerät Schiltknecht TMS 3000	215

I Tunnelmatrix

Die Auswahl der Tunnel für das FOP wurde aufgrund einer Tunnelmatrix vorgenommen, welche von den Mitgliedern der Begleitkommission erarbeitet wurde. Die Kriterien der Tunnelmatrix sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**¹ und die entsprechenden Tunnel in Abb. I.2 aufgeführt.

Abb. I.1 Kriterien Tunnelmatrix

Kriterium	Argument
Betreiber / Zuständig	
Länge	Km
Inbetriebnahme / Sanierung	Jahr
Profiltyp	Kreis, Hufeisen
Profil Fahrraum	Rechteck, Hufeisen, Z-Decke
Querschnitt Fahrraum	m ²
Anzahl Tunnelröhren	
Anzahl Fahrspuren	pro Röhre
Verkehrsart	RV1, RV2, GV
DTV	
Anteil Schwerverkehr	%
Max Fahrgeschwindigkeit	km/h
Mögliche Installation Messschrank	Querschlag Ausstellbucht
Installationsfenster	Tag/Nacht, Herbst/Frühling, Umleitung möglich
Besonderheiten	Verzweigung Ein- Ausfahrt Kreisel
Ventilatoren	Anzahl Strahl- Axialventilatoren
Lüftungsklappen	Anzahl
Lüftungsart	Querlüftung, Halbquerlüftung, Längslüftung, Rauchabsaugung
Strömungsmessgerät	Rohwerte/Gemittelt/Zeit
Mittelwertbildung	Leittechnik/Gerät über n Sek
Mittelwertbildung	Normal/Ereignis
Verwendung zur aktiven Regelung der LUE	Normal/ Ereignis
Bei Punktmessung	Wandabstand [cm] /Korrekturfaktor
Netzmessung	Vorhanden, wann ausgeführt (Jahr)
Meteorologische Daten	Innen/Aussen, Temperatur, Feuchte, Wind
Verkehrszählung	Eigene Zählung / ASTRA Erfassung

Abb. I.2 Auszug aus der Tunnelmatrix

Tunnel	Betreiber	Km	Inbetriebnahme / Sanierung	Profiltyp	Profil / Fahr- raum
Gotthard Tunnel	AfBN	16.4	1980	Hufeisen	Rechteck, ZD
Lungern	HTA-OW	3.6	2012	Hufeisen	Z-Decke
Flimserstein	TBA Kt. GR	2.7	2006	Hufeisen	Z-Decke
San Bernardino	TBA Kt. GR	6.6		Hufeisen	Z-Decke
Sonnenbergtunnel	F3, Zentras	1.5	1976 / 06-13	Hufeisen	Z-Decke

Eggrain Tunnel	TBA-ZH	0.480	2006	Hufeisen	Hufeisen
Eggrain-/Ristet (E)	TBA-ZH	0.350	2006	Hufeisen	Hufeisen
Eggrain-/Ristet (A)	TBA-ZH	0.450	2006	Hufeisen	Hufeisen
Hafnerberg Tunnel	TBA-ZH	1.380	2006	Hufeisen	Hufeisen
Aescher Tunnel	TBA-ZH	2.160	2009	Hufeisen	Hufeisen, ZD
Uetliberg Tunnel	TBA-ZH	4.420	2009	Kreis u. Hufeisen	Hufeisen, ZD
Islisberg Tunnel	TBA-ZH	4.950	2009	Kreis	Hufeisen, ZD
Gubrist Tunnel	TBA-ZH	3.3	1985 / 2009-2011 (nur BSA)	Kreis	ZD
Milchbuck Tunnel	TBA-ZH	1.9	1986 / 2007 (nur BSA)	Hufeisen	ZD
Tunnel Arzillier VD	F2 / GEIII	0.30	1988 / 2010	Hufeisen	Hufeisen
Galerie de St-Maurice	F2 / GEIII	1.23	1988 / 2010	Kasten	Rechteck
Tranchée couverte de Champsec	F2 / GEIII	0.71	2004 / 2012	Kasten	Rechteck
Tunnels et galeries de Sierre	F2 / GEIII	2.50	1999 / -	Hufeisen + Kasten	Hufeisen + Rechteck
Tunnel Gamsen	F2 / GEIII	1.05	2002 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Gorwetsch	ANSB NV	1.71	2018 / -	Polygon	Polygon
Tranchée couverte Ermitage	ANSB NV	0.38	2018 / -	Polygon	Polygon
Tranchée couverte Pfyngut	ANSB NV	2.12	2018 / -	Polygon	Polygon
Tunnel Susten	ANSB NV	2.07	2018 / -	Hufeisen	Hufeisen
Gedeckter Einschnitt Turtmann	ANSB NV	1.32	2016 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Riedberg	ANSB NV	0.56	2016 / -	Hufeisen	Hufeisen
Gedeckter Einschnitt Raron	ANSB NV	0.90	2017 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Visp	ANSB NV	2.64	2016 / -	Kreis	Kreis, ZD, WLK
Tunnel Eyholz	ANSB NV	4.25	2014 / -	Kreis	Kreis, ZD, WLK
Tunnel Gstipf	F2 / GEIII	0.22	1985 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Gesterna	F2 / GEIII	0.11	1975 / 2007	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Bächwald	F2 / GEIII	0.11	1972 / 2007	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Schallberg	F2 / GEIII	0.47	1973 / 2008	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Kapf 1+2	F2 / GEIII	0.11	1969 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Kulm	F2 / GEIII	0.40	1967 / 2013	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Wechselkehr	F2 / GEIII	0.12	1994 /	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Gabi	F2 / GEIII	0.08	1967 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Casermetta	F2 / GEIII	0.31	1969 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Varen	Kanton VS	0.15	2006 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Schwarzkreuz	Kanton VS	0.12	2006 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Hubil	Kanton VS	0.97	2005 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Platta	Kanton VS	1.00	1999 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Regrouillon	Kanton VS	0.74	1994 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Untereisenbahn	Kanton VS	0.40	1998 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Mittal	Kanton VS	2.40	1986 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Mühlebach	Kanton VS	1.00	1992 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Jostbach	Kanton VS	0.60	1992 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Collombey	Kanton VS	1.00	2003 / -	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Vispéral	Kanton VS	3.20	1996 / 2016	Hufeisen	Hufeisen
Tunnel Stägjitschuggen	Kanton VS	2.30	2008 / -	Kreis	Kreis, ZD

Seelisbergtunnel	AFBN	9.8	1980	Hufeisen Rund	Rechteck, ZD
Flüelertunnel	AFBN	2.6	2005	Hufeisen	Rechteck, ZD, Hufeisen
Mosi	AFBN	1.1	1965	Hufeisen	Rechteck, ZD

II Gerätematrix

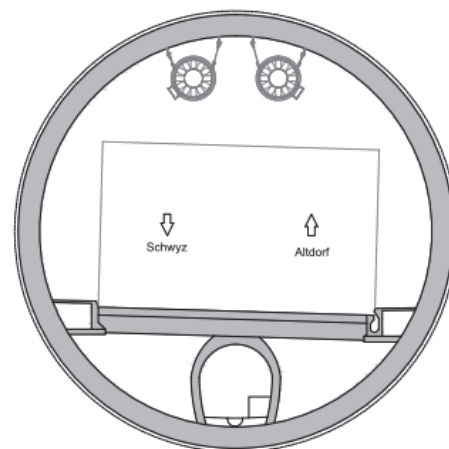
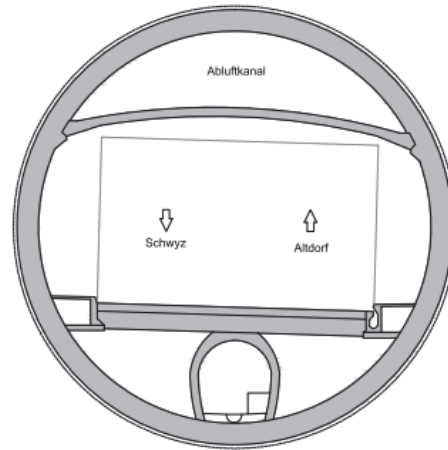
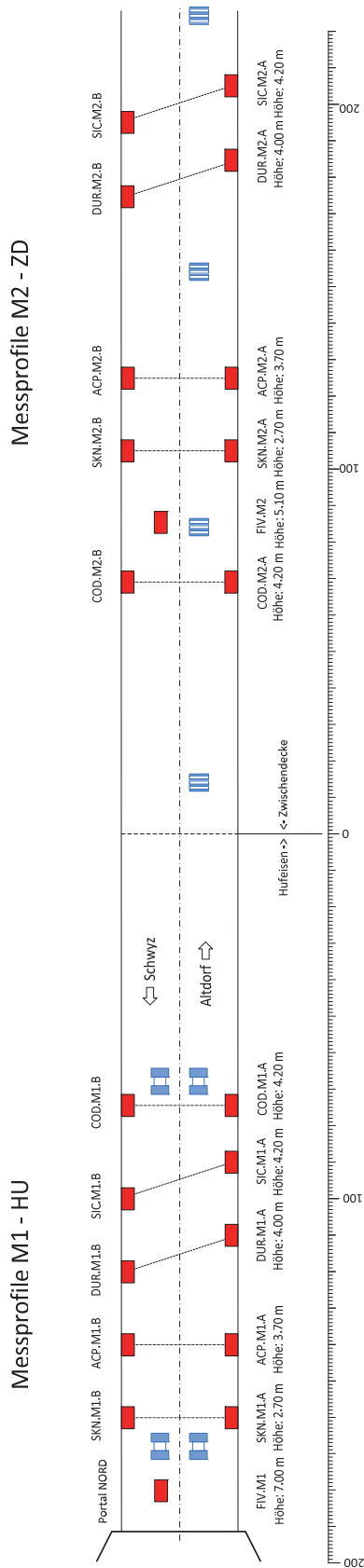
Die Wahl der Messgeräte für das FOP wurde aufgrund einer Gerätematrix vorgenommen, welche von den Mitgliedern der Begleitkommission erarbeitet wurde. Nachfolgende Kriterien wurden darin berücksichtigt:

Abb. II.1 Kriterien Gerätematrix

Kriterium	Argument
Hersteller	
Modell	
Messtechnik	Druck, Ultraschall
Messprinzip	Punktmessung, Linienmessung
Kurzbeschreibung	
Messbereich	m/s
Unterlagen	
Betreiber	
Eingesetzt in Tunnel	
Anzahl Messstellen	
Inbetriebnahme	
Installiert von	
Unterhalt durch	
Erfahrungen	
Empfehlungen	

III Übersicht Testinstallationen

III.1 Lage der Messprofile im Tunnel Flüelen



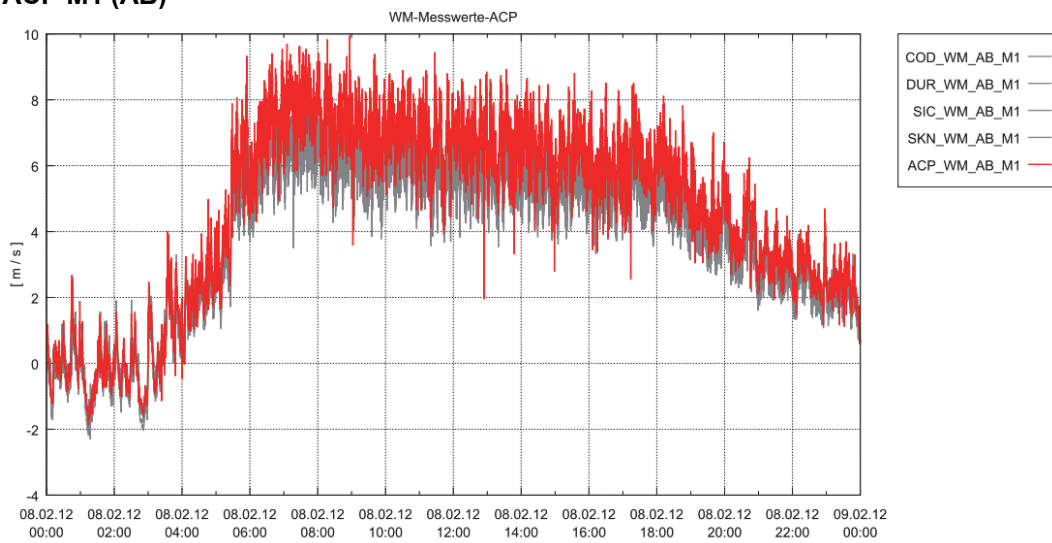
IV Tagesauswertungen

In den nachfolgenden Graphiken sind die detaillierten Messwerte der einzelnen Messgeräte aus den beiden Tunneln Bözberg und Flüelen aus den beiden Messprofilen Hufeisen (M1) und Zwischendecke (M2) dargestellt. Diese Messwerte dienen als Grundlage der im Kapitel 6 erarbeiteten statistische Auswertungen vom 08.02.2012 und 05.09.2012.

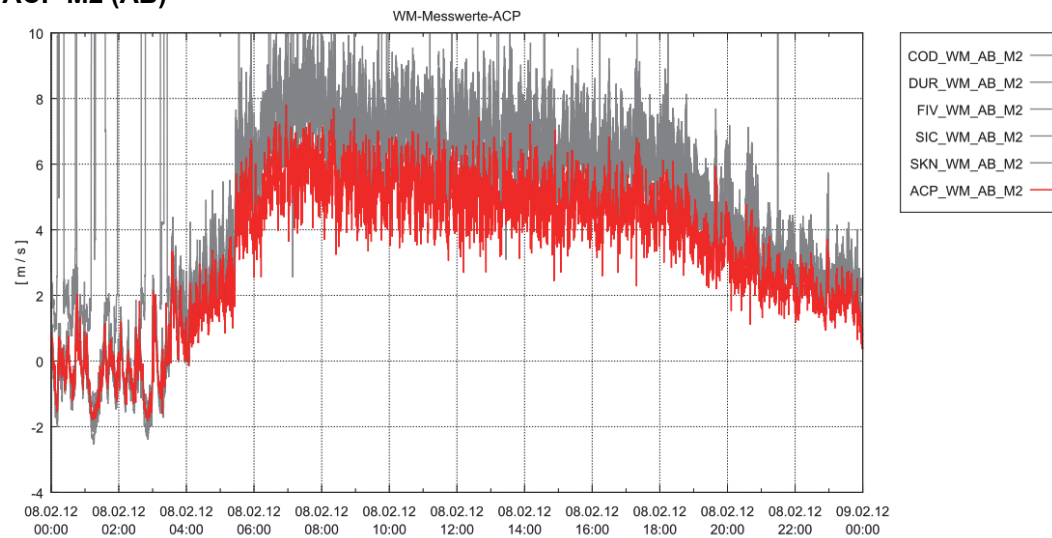
Zusätzlich wiedergegeben sind die detaillierten Messwerte der einzelnen Messgeräte am Abschluss der Messkampagne am 24.10.2013

IV.1 Tunnel Bözberg 08.02.2012

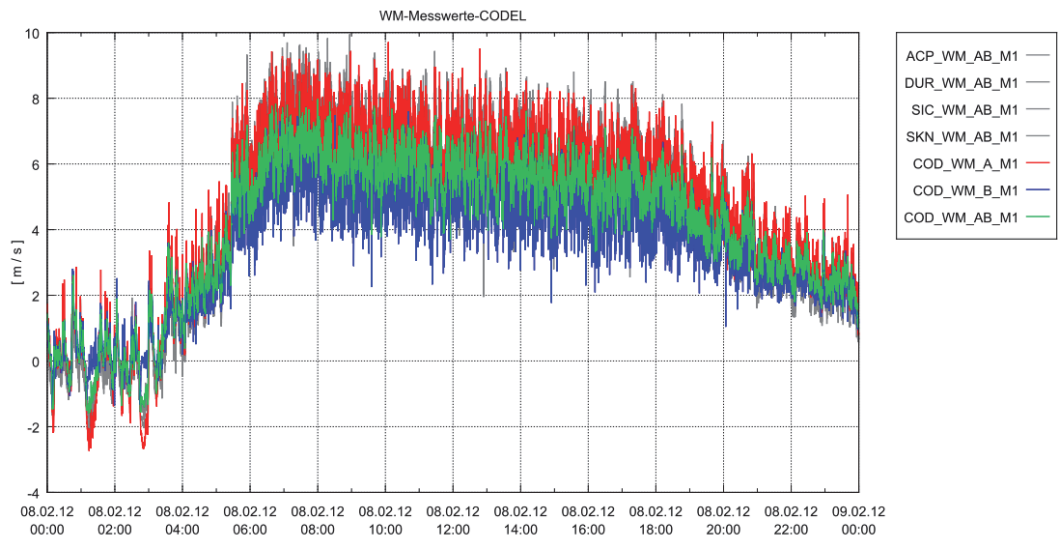
ACP M1 (AB)



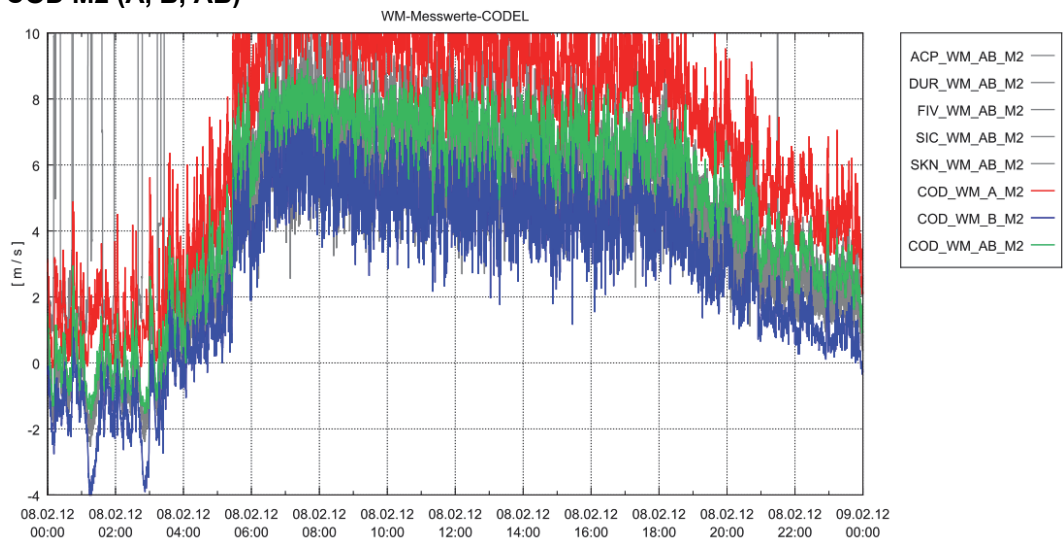
ACP M2 (AB)



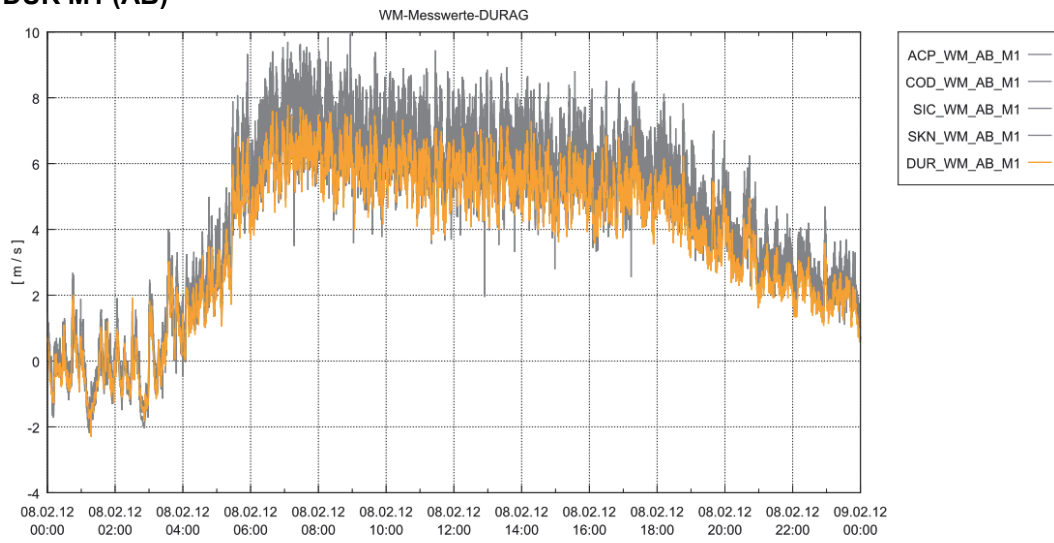
COD M1 A, B, AB)



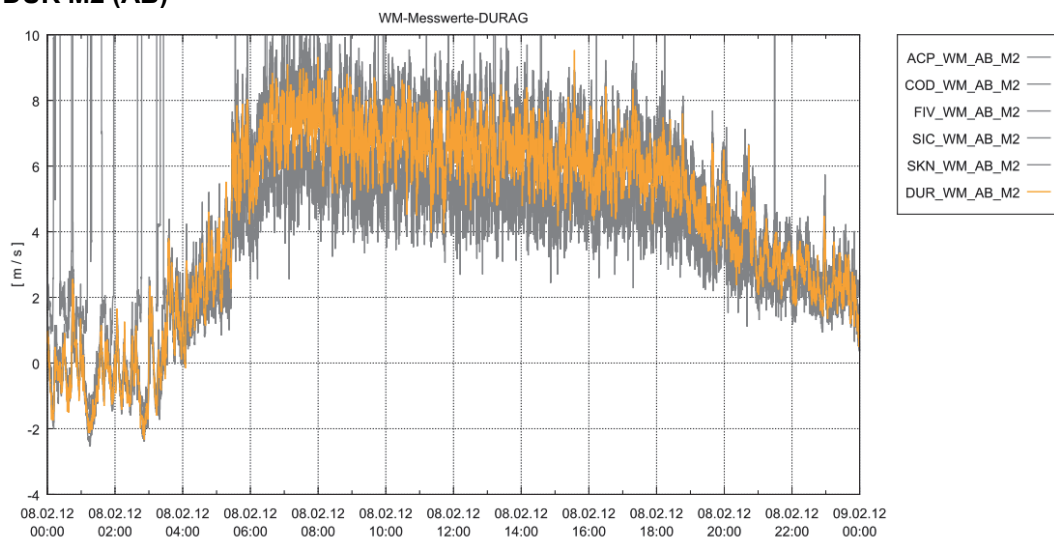
COD M2 (A, B, AB)



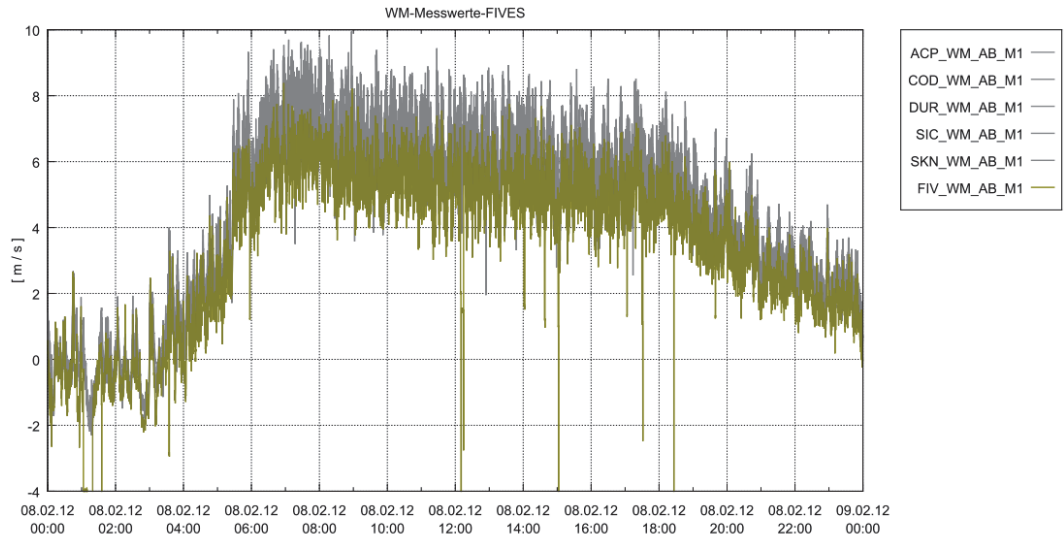
DUR M1 (AB)



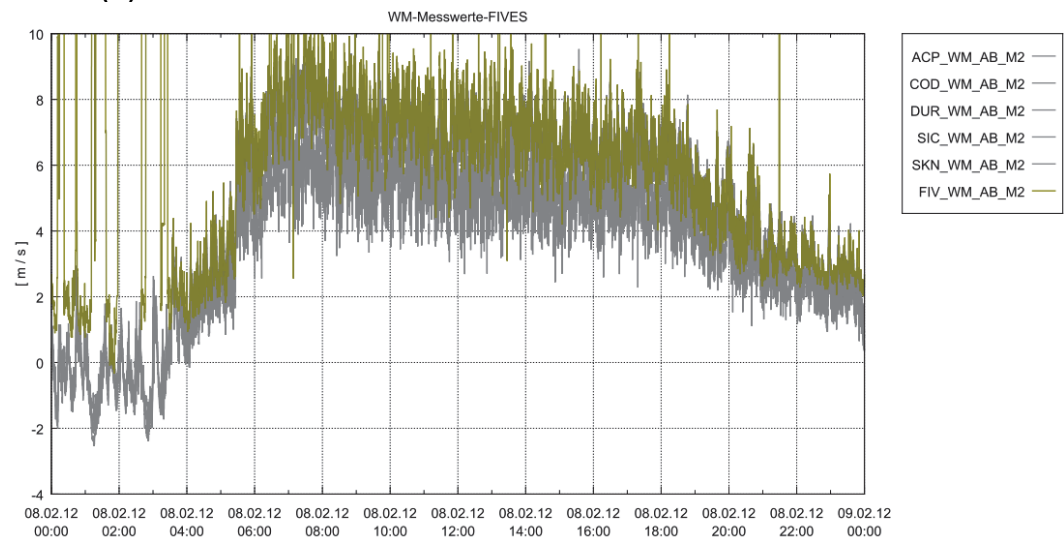
DUR M2 (AB)



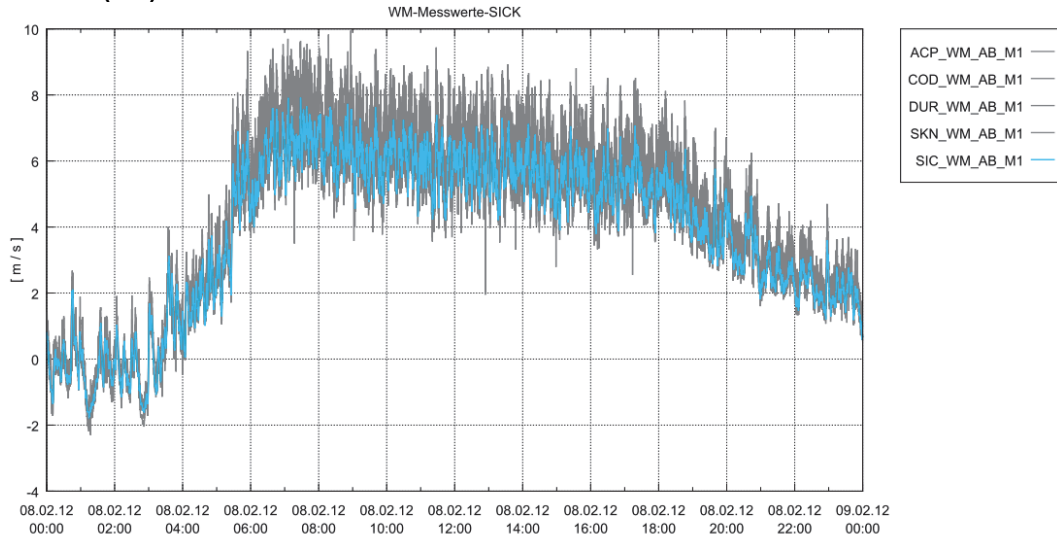
FIV M1 (A)



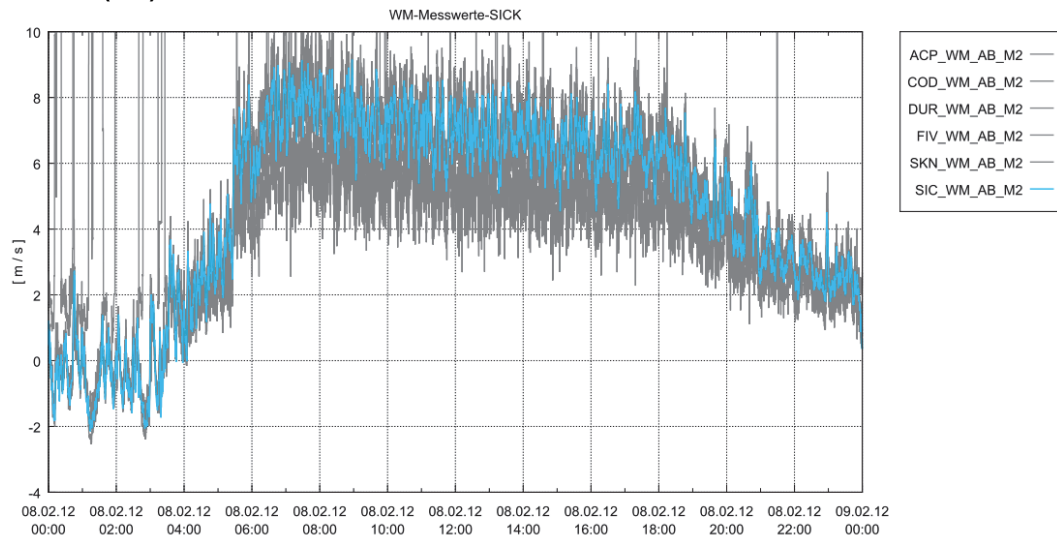
FIV M2 (A)



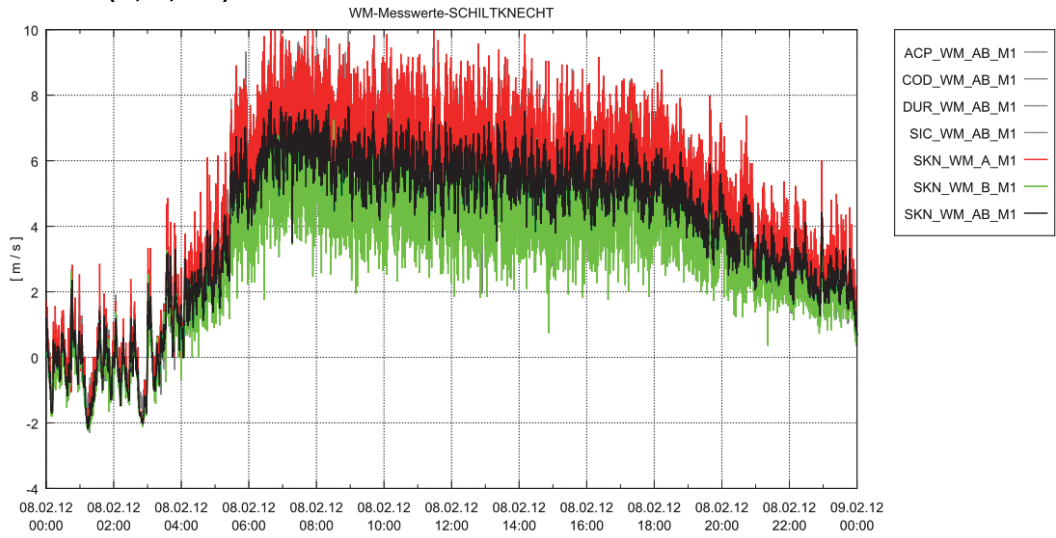
SIC M1 (AB)



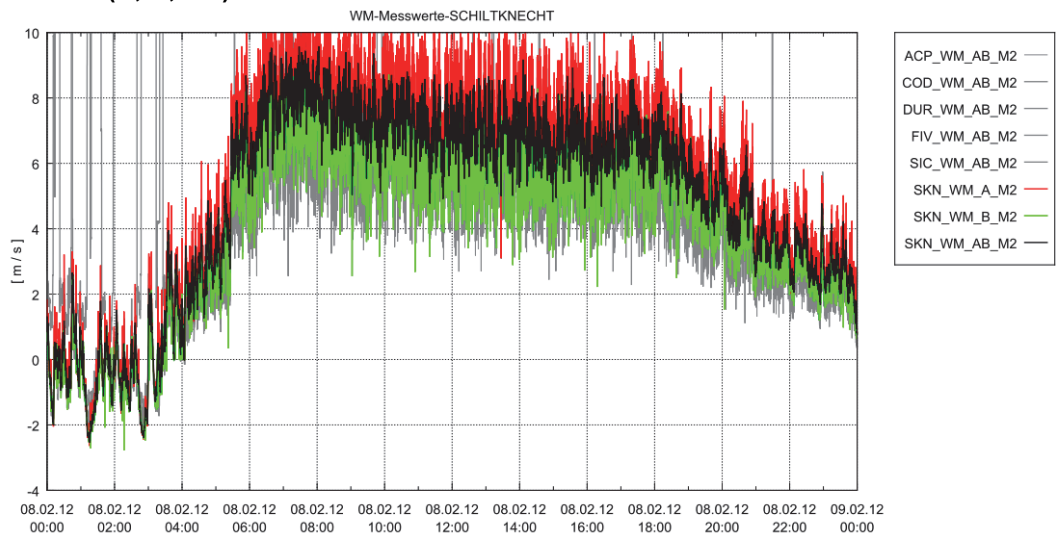
SIC M2 (AB)



SKN M1 (A, B, AB)

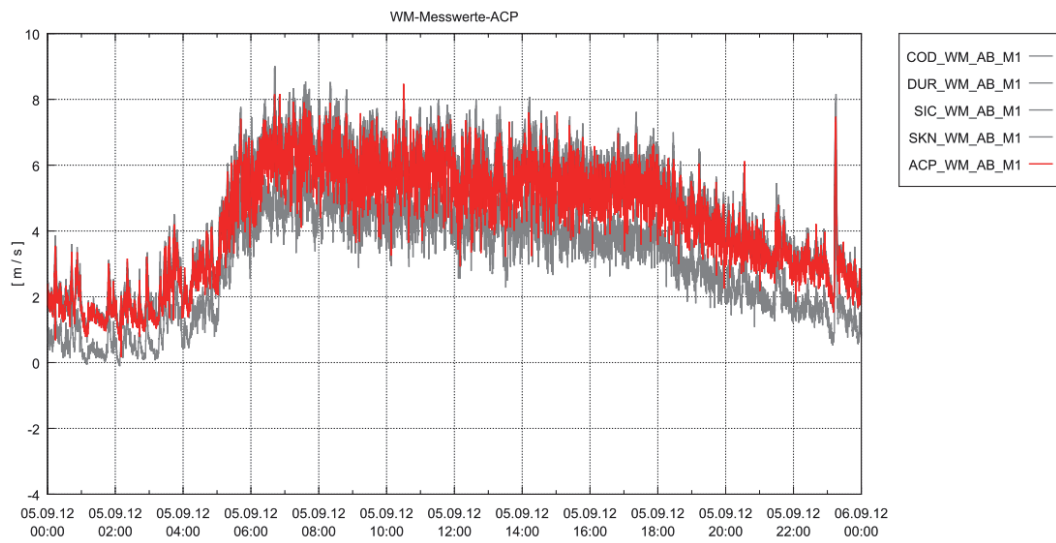


SKN M2 (A, B, AB)

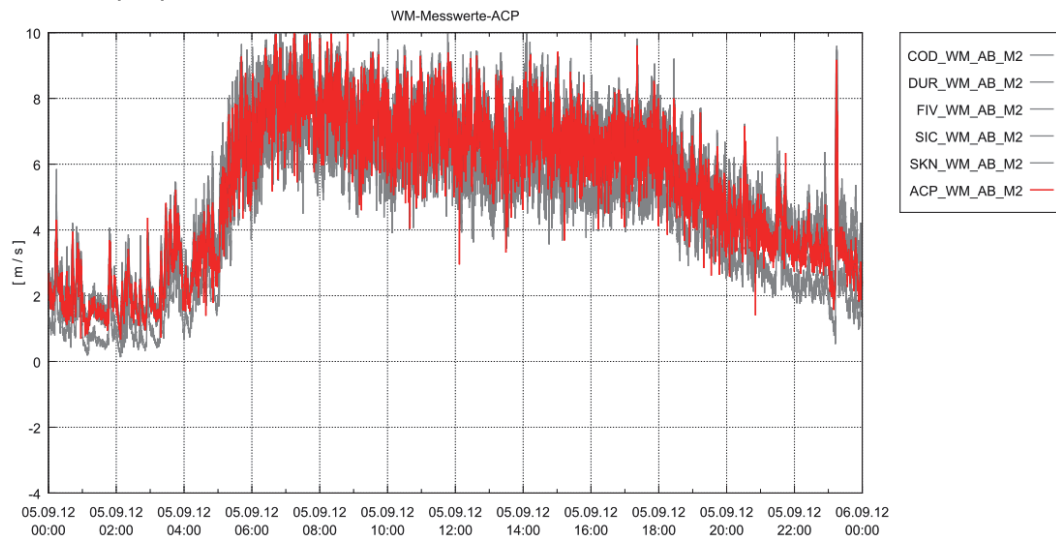


IV.2 Tunnel Bözberg 05.09.2012

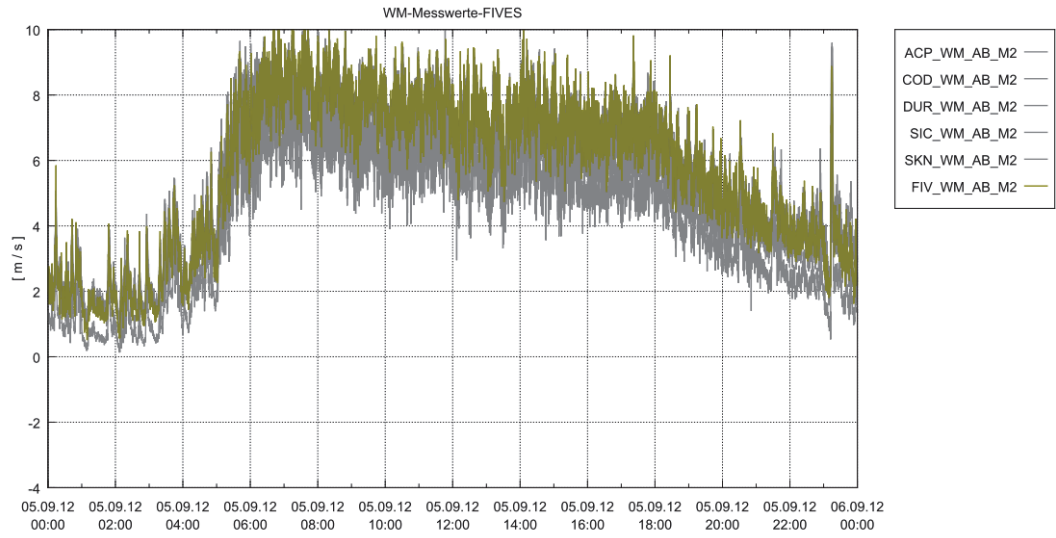
ACP M1 (AB)



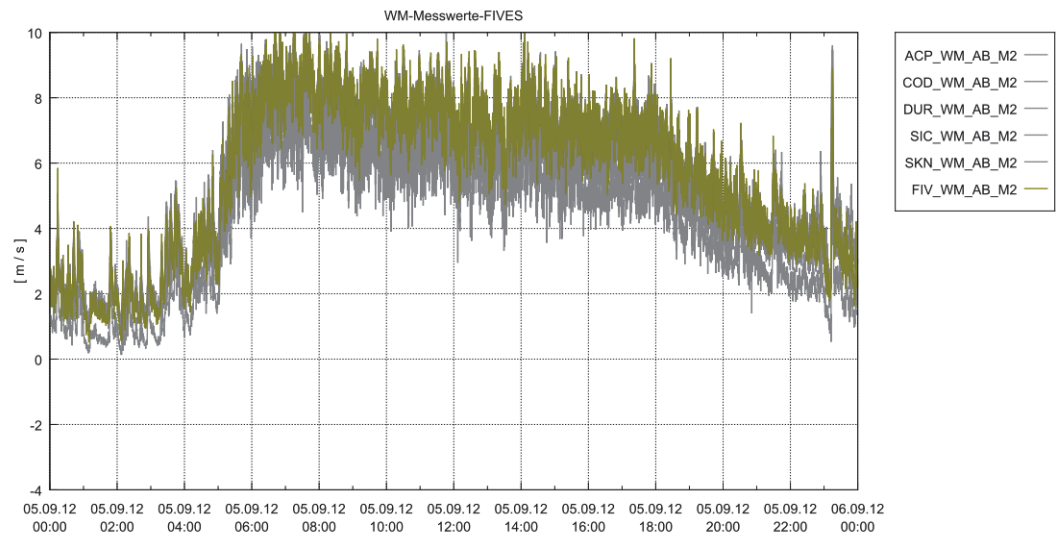
ACP M2 (AB)



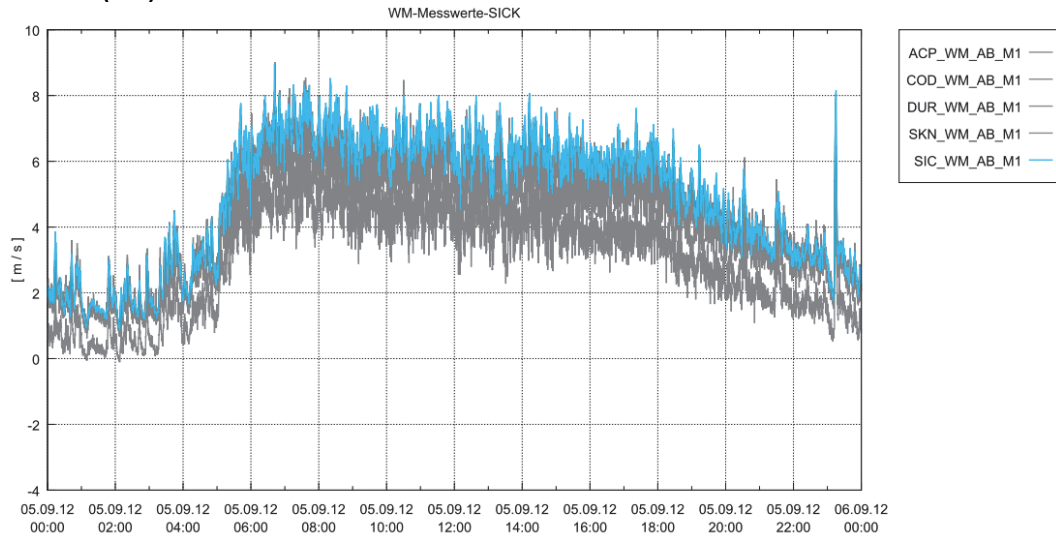
FIV M1 (A)



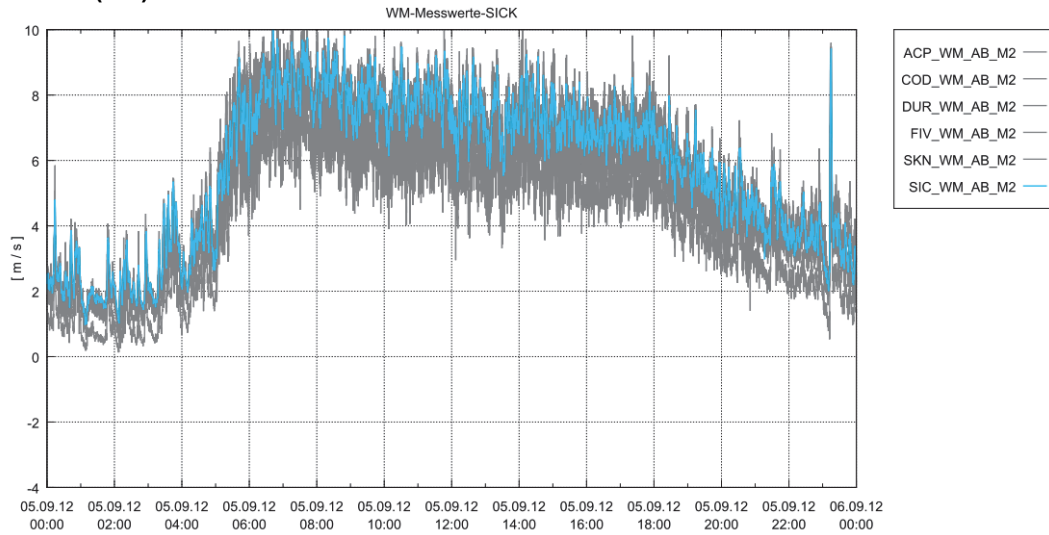
FIV M2 (A)



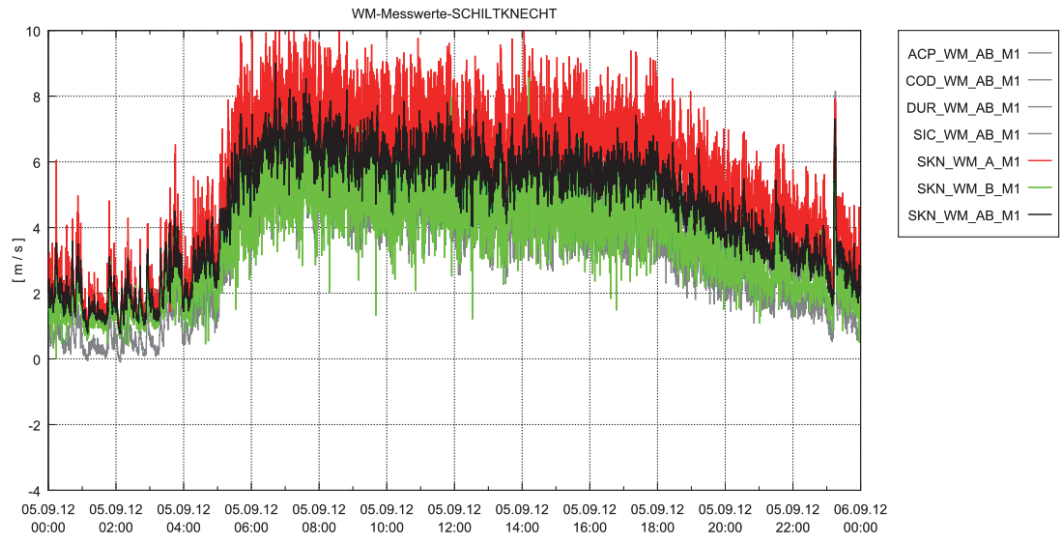
SIC M1 (AB)



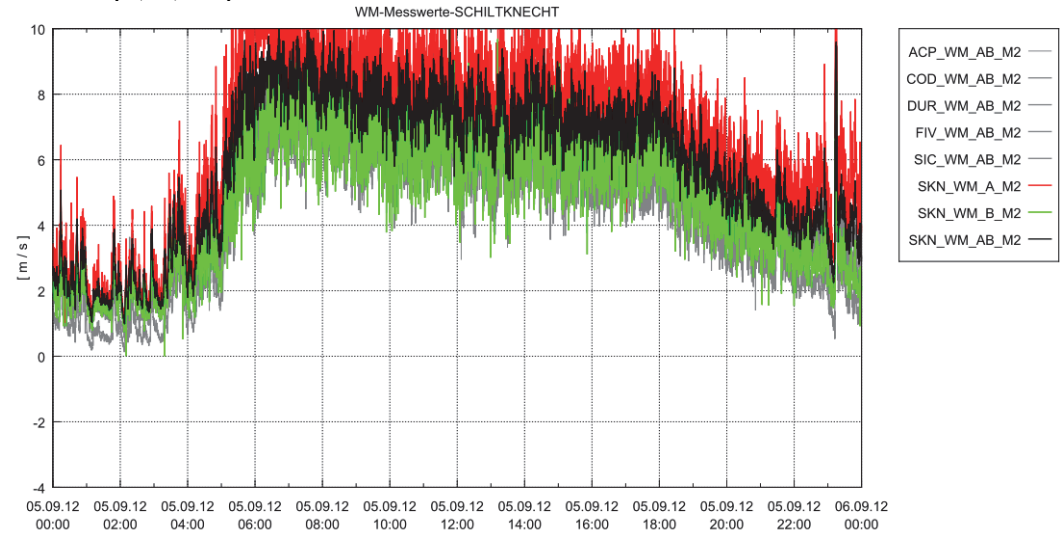
SIC M2 (AB)



SKN M1 (A, B, AB)

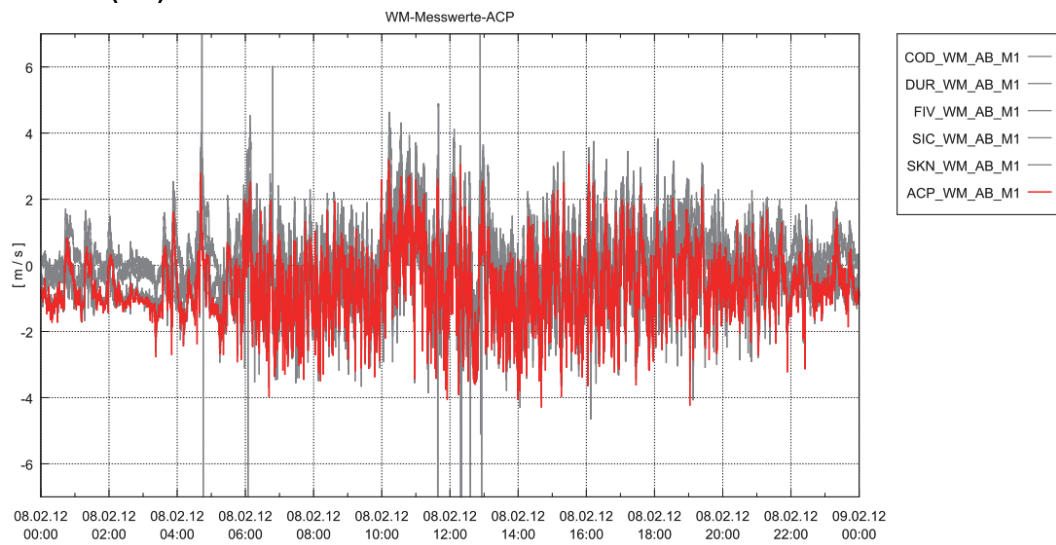


SKN M2 (A, B, AB)

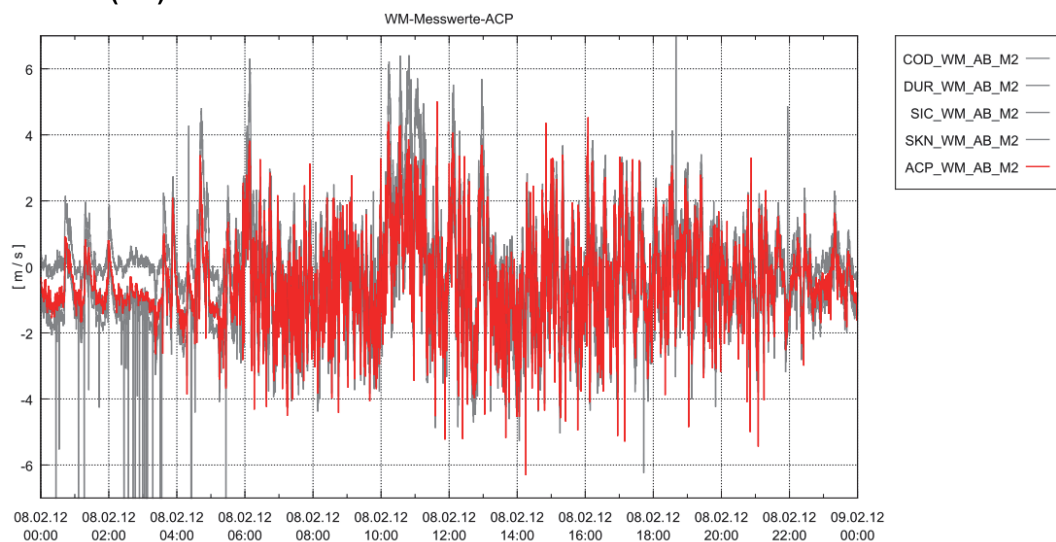


IV.3 Tunnel Flüelen 08.02.2012

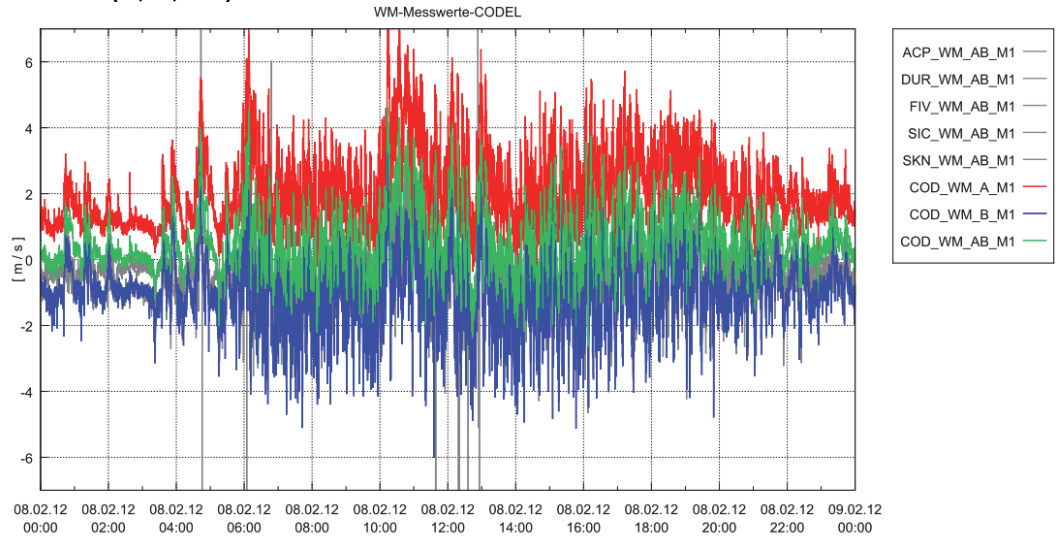
ACP M1 (AB)



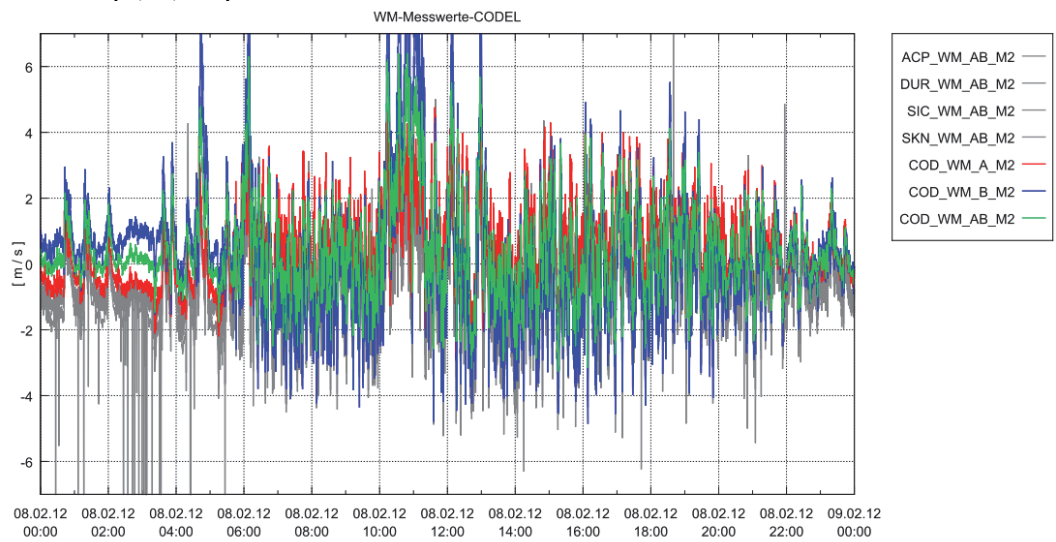
ACP M2 (AB)



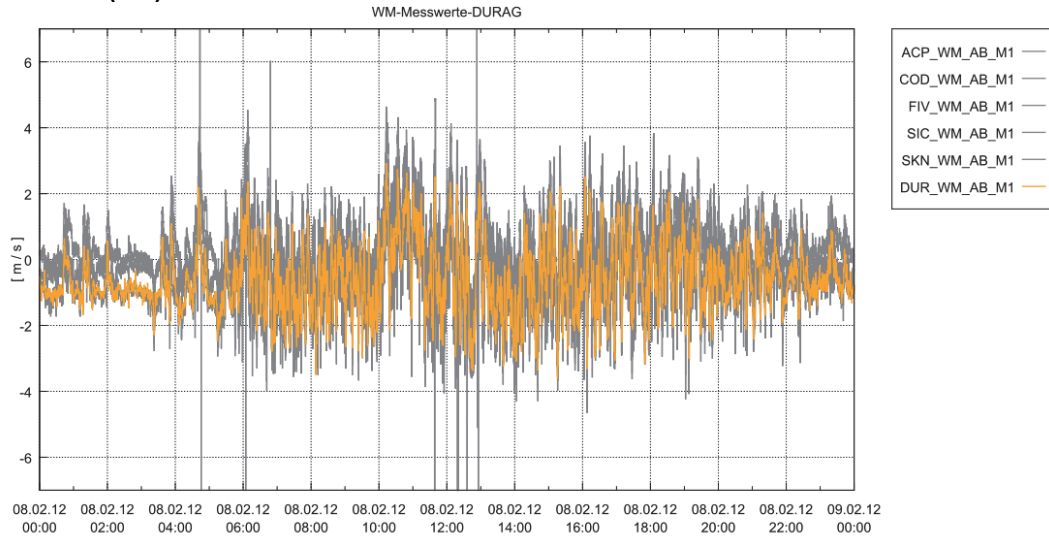
COD M1 (A, B, AB)



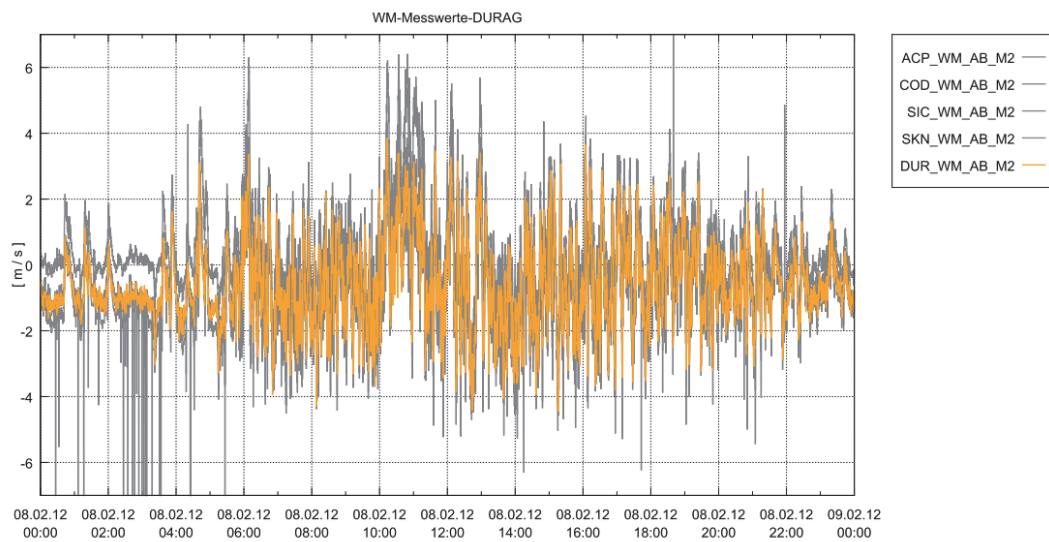
COD M2 (A, B, AB)



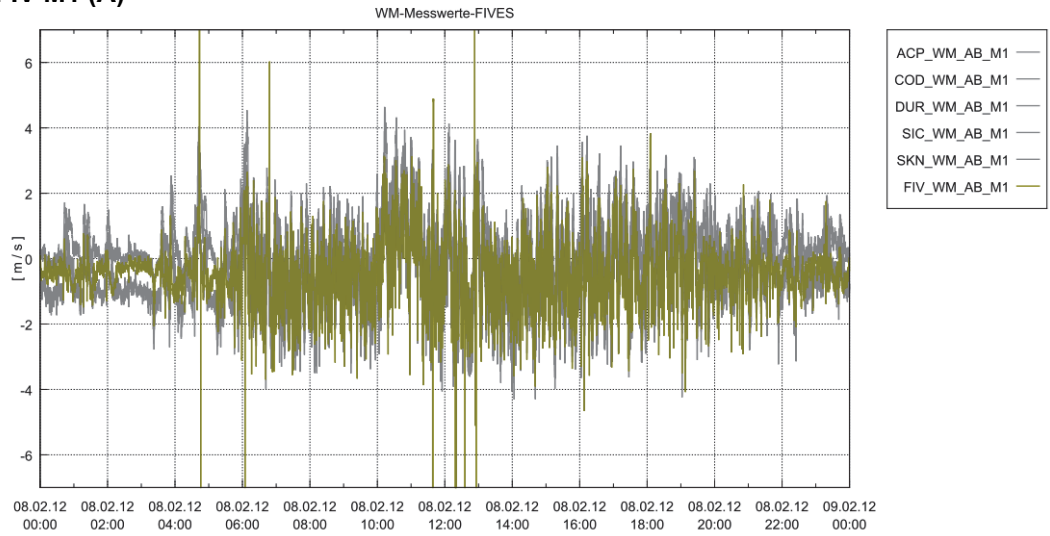
DUR M1 (AB)



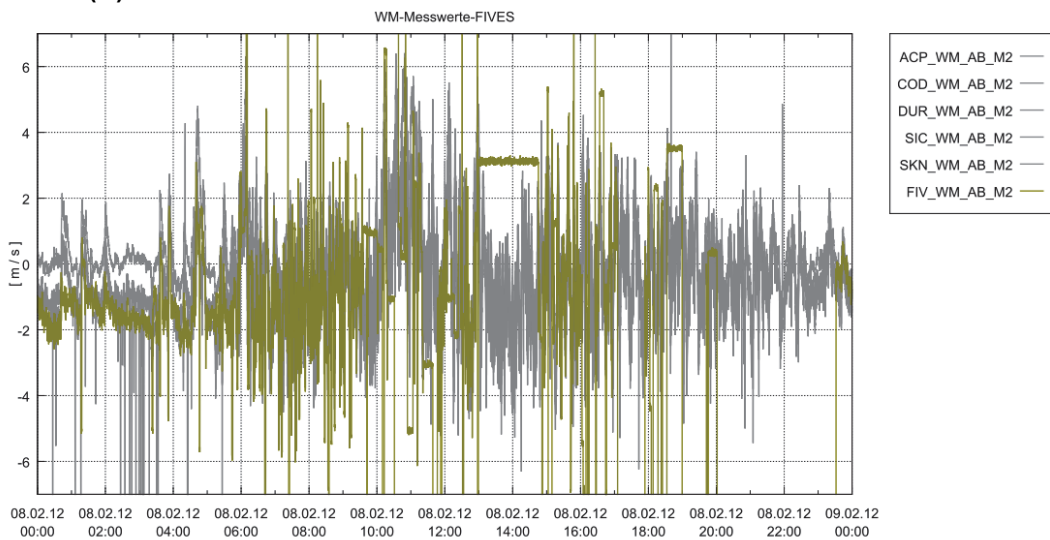
DUR M2 (AB)



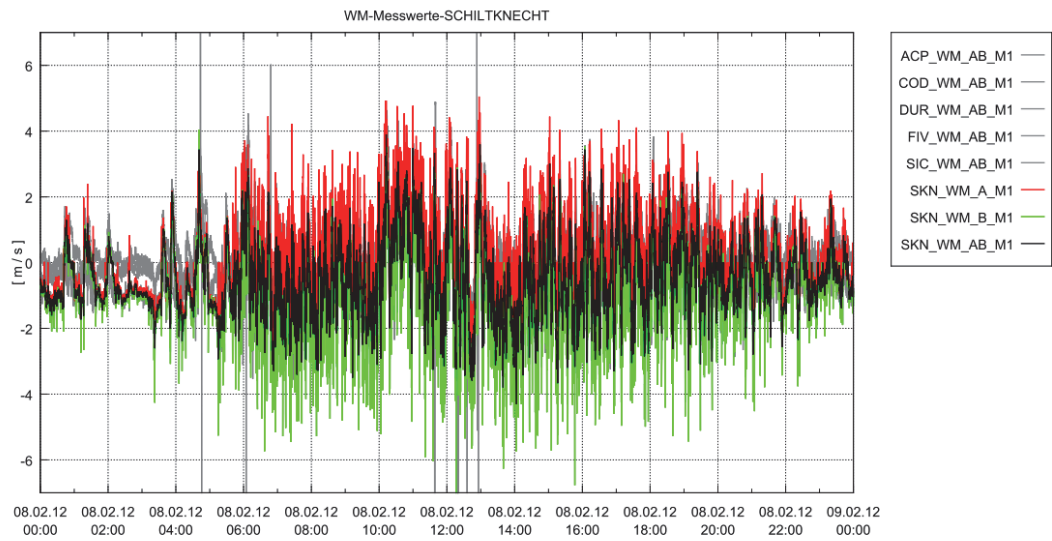
FIV M1 (A)



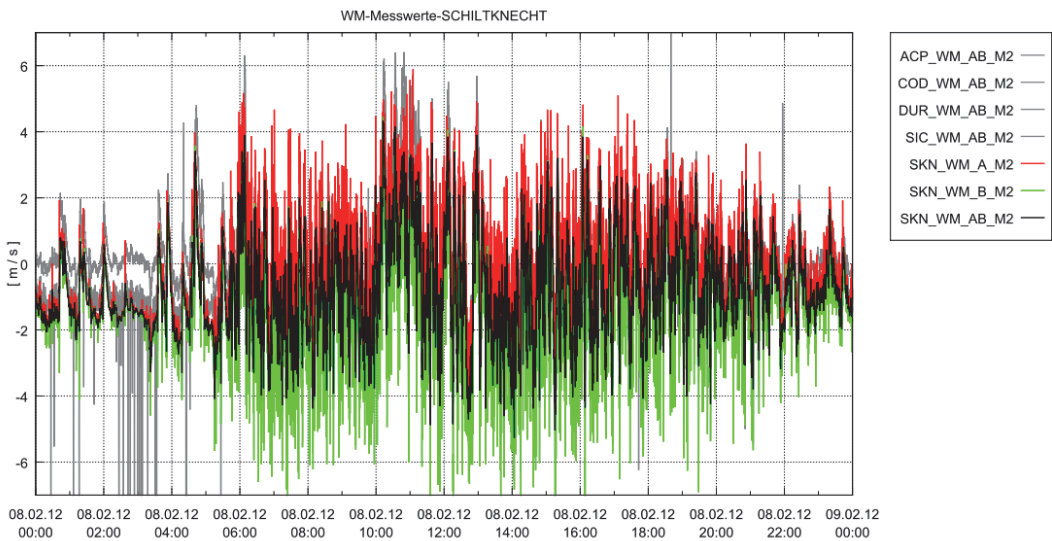
FIV M2 (A)



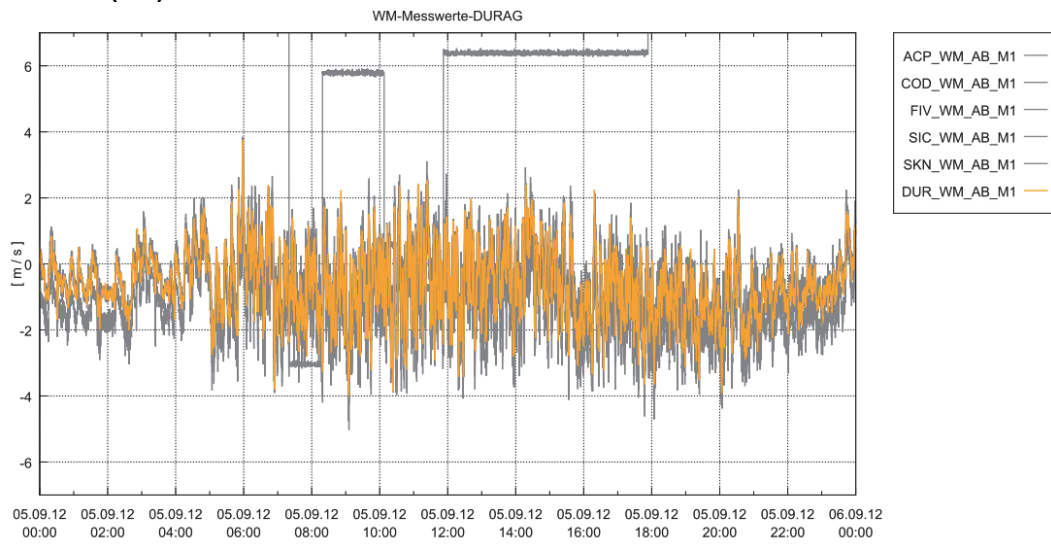
SKN M1 (A, B, AB)



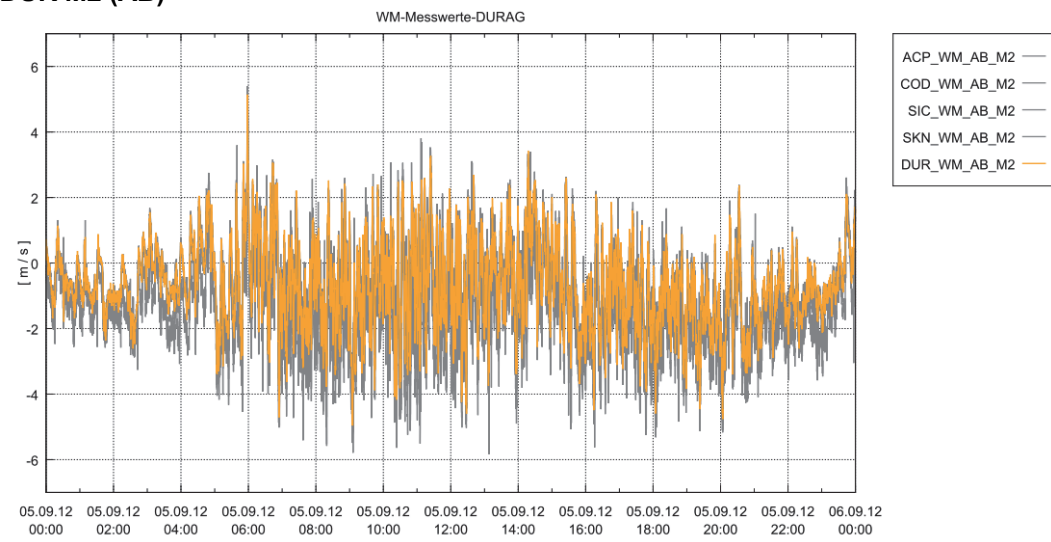
SKN M2 (A, B, AB)



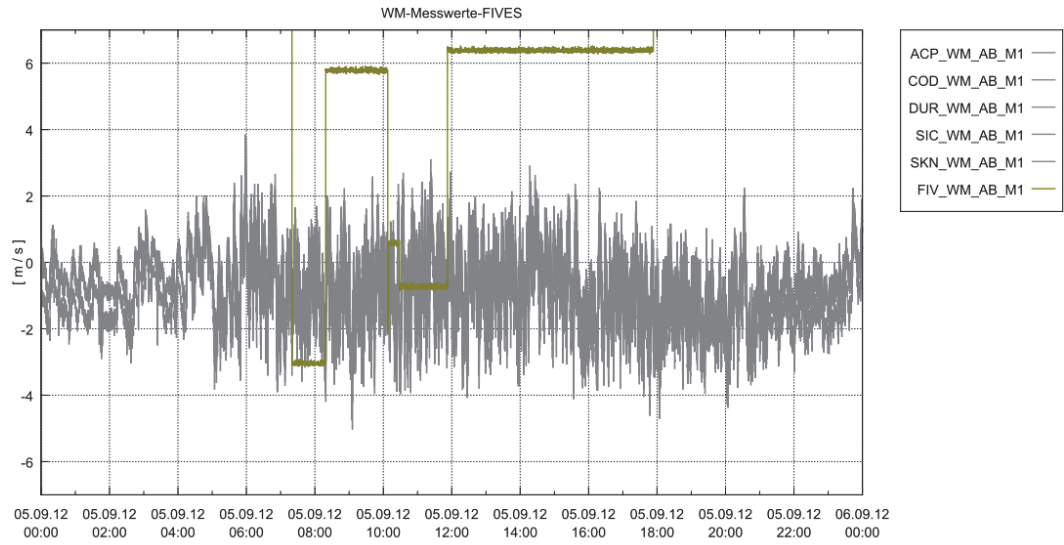
DUR M1 (AB)



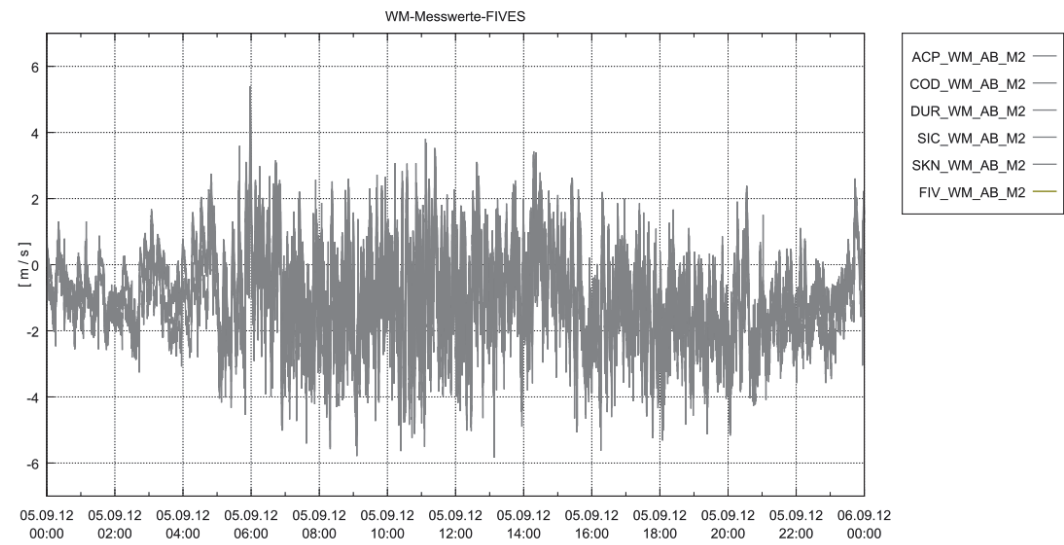
DUR M2 (AB)



FIV M1 (A)

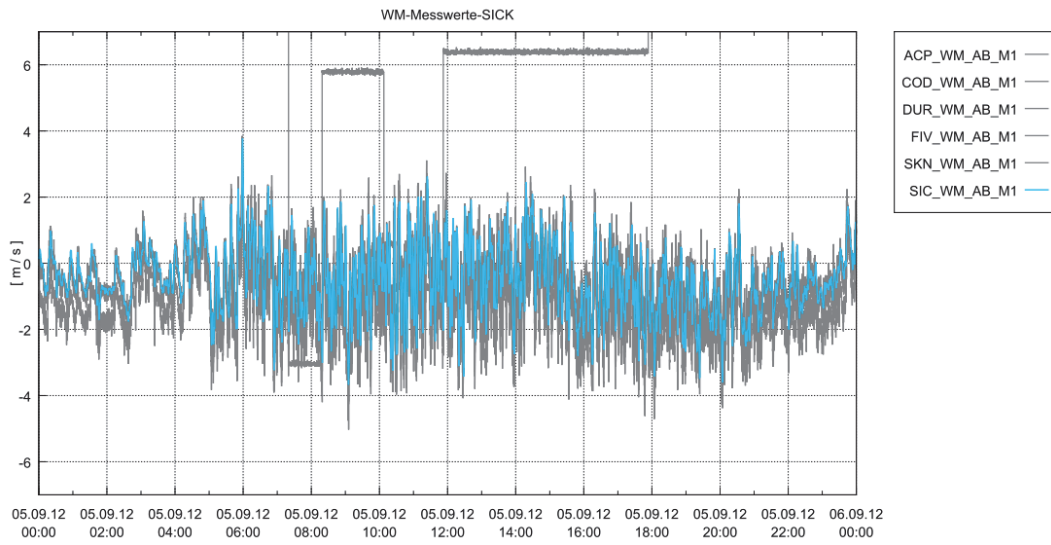


FIV M2 (A)

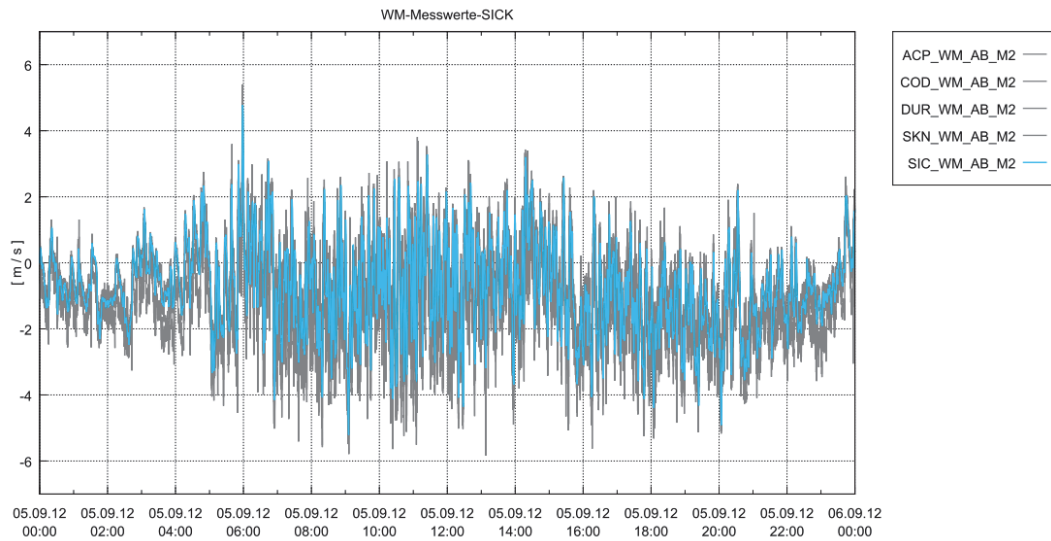


Alle Messwerte ausserhalb ± 7.0 m/s

SIC M1 (AB)

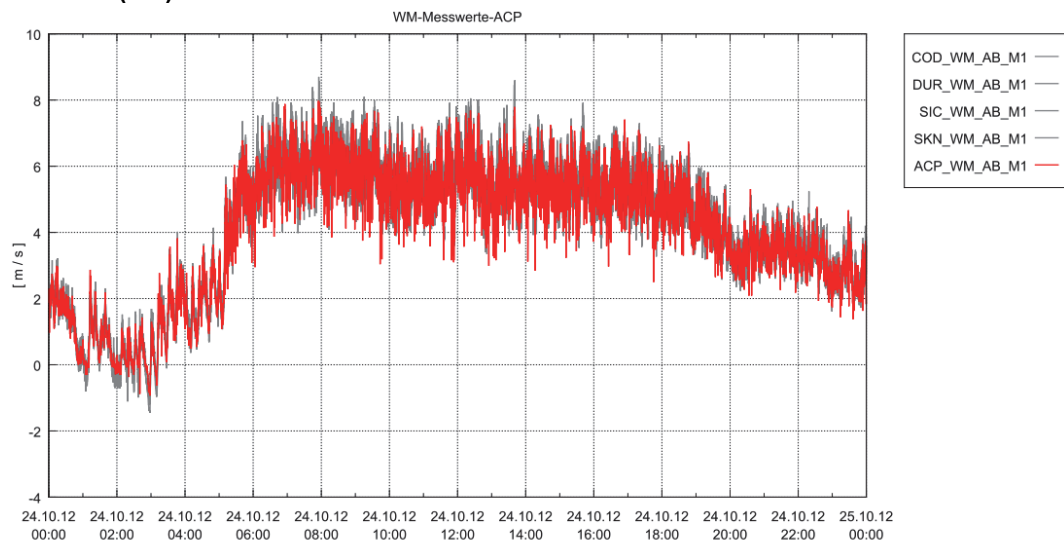


SIC M2 (AB)

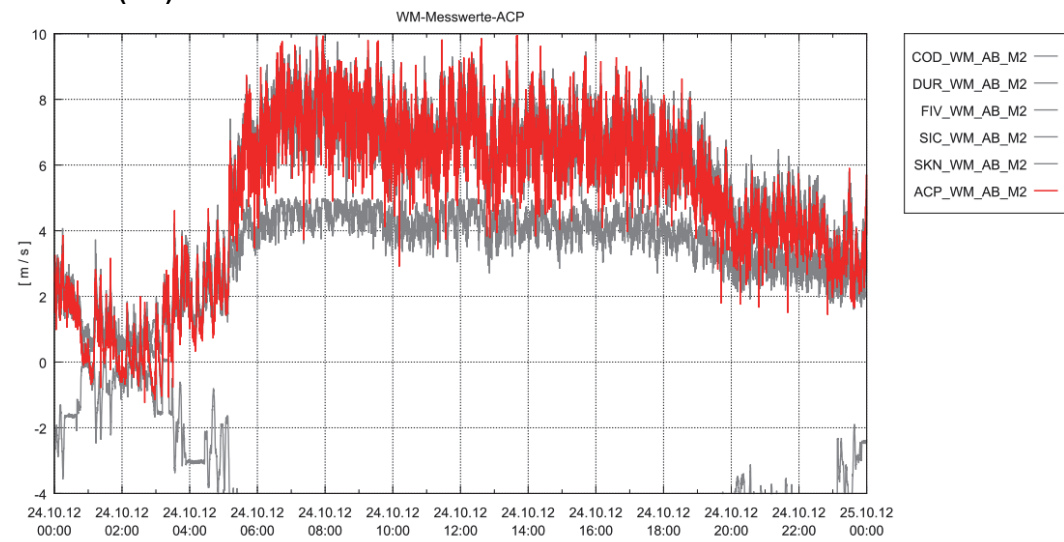


IV.5 Tunnel Bözberg 24.10.2012

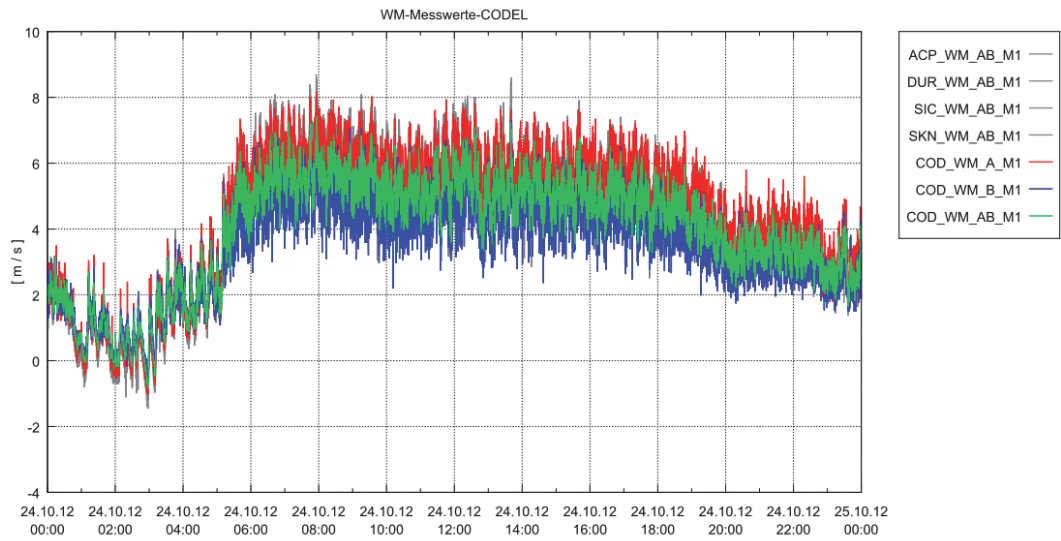
ACP M1 (AB)



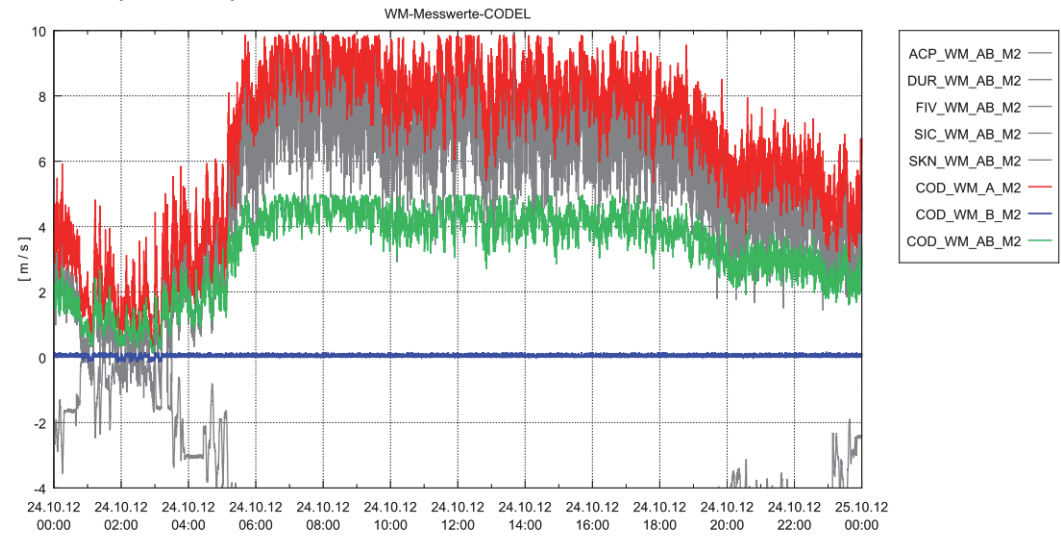
ACP M2 (AB)



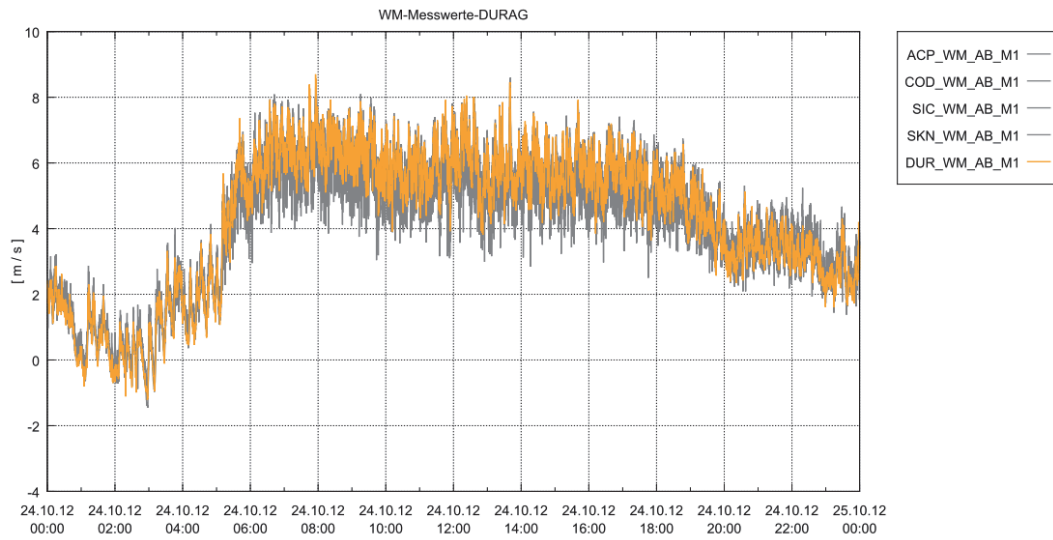
COD M1 (A, B, AB)



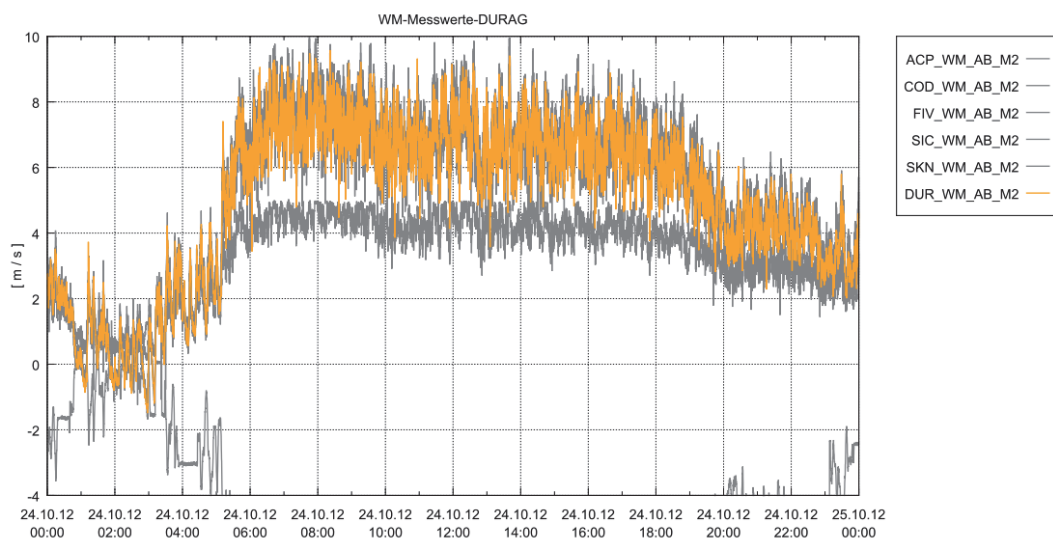
COD M2 (A, B, AB)



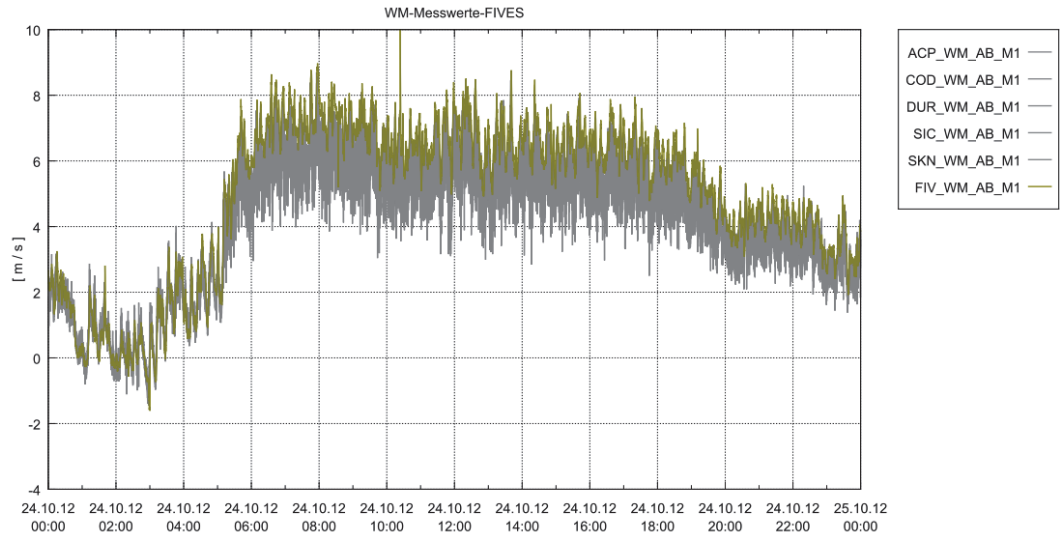
DUR M1 (AB)



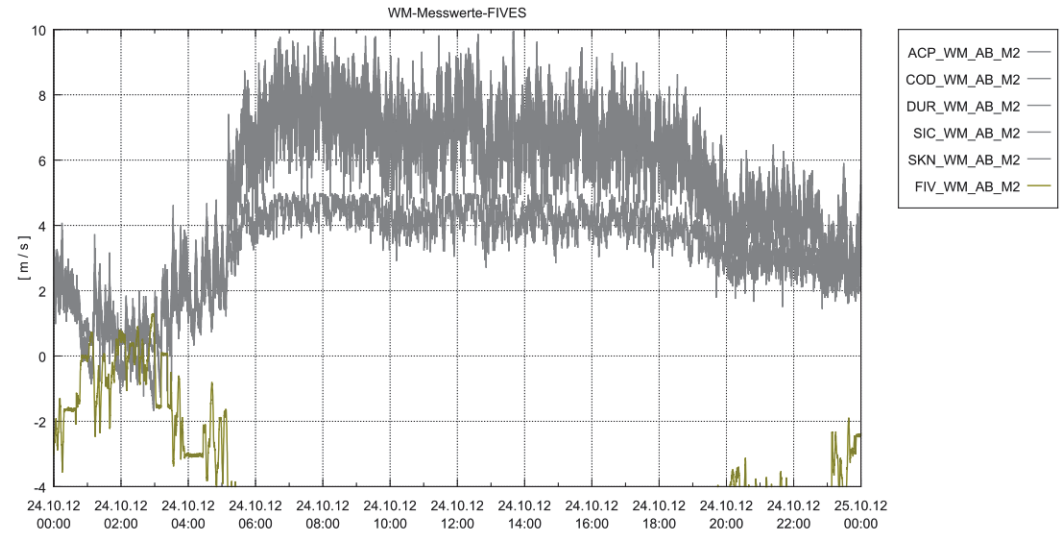
DUR M2 (AB)



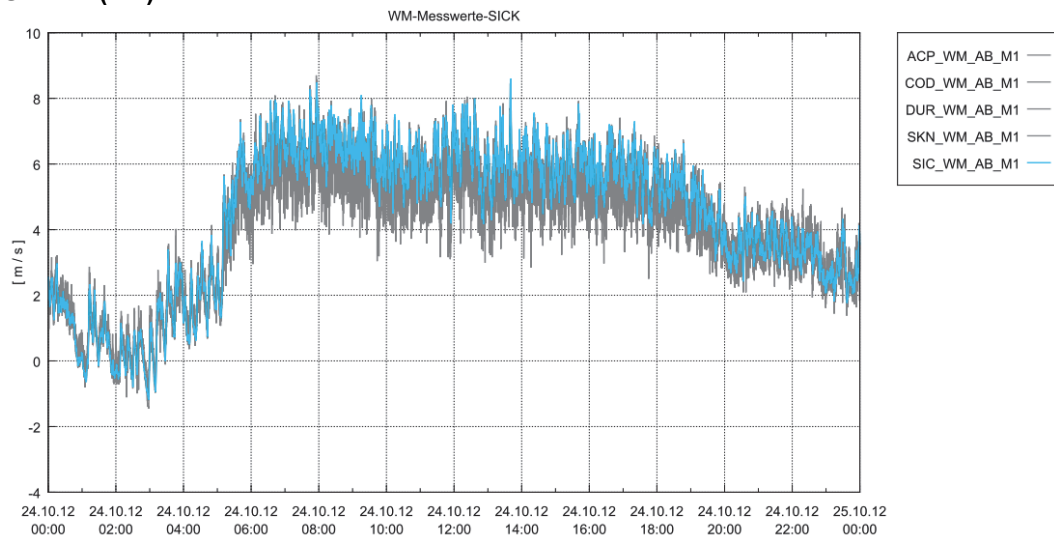
FIV M1 (A)



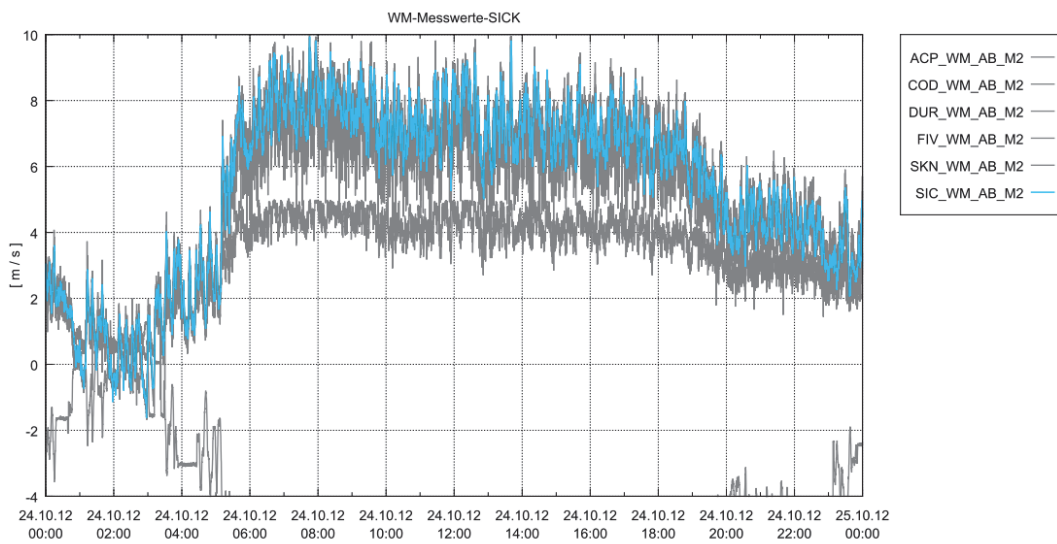
FIV M2 (A)



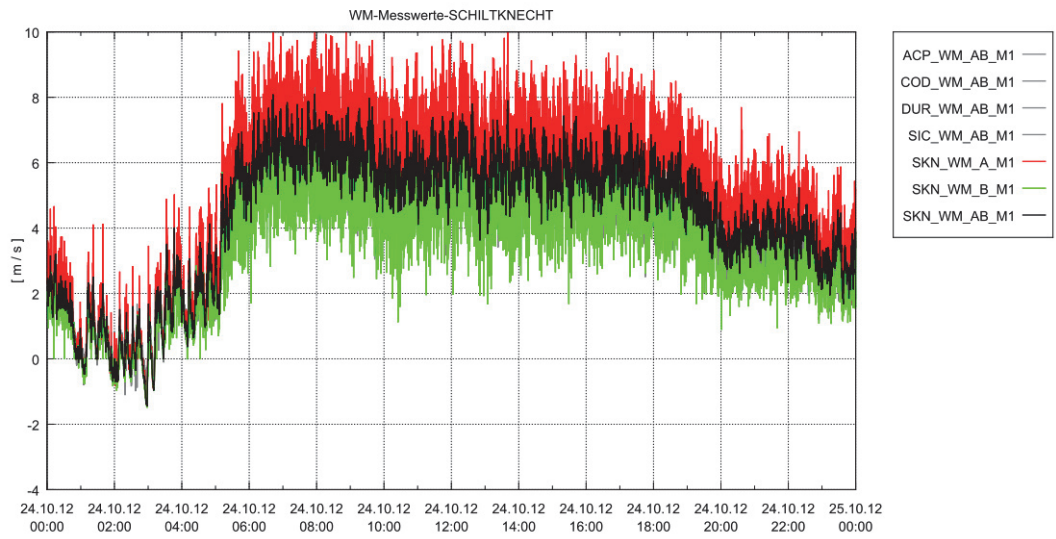
SIC M1 (AB)



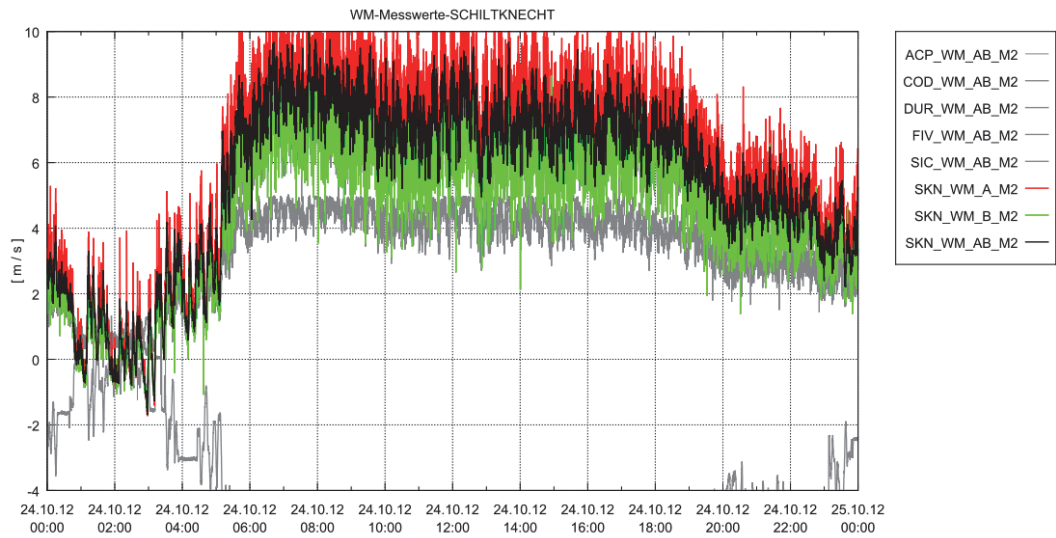
SIC M2 (AB)



SKN M1 (A, B, AB)

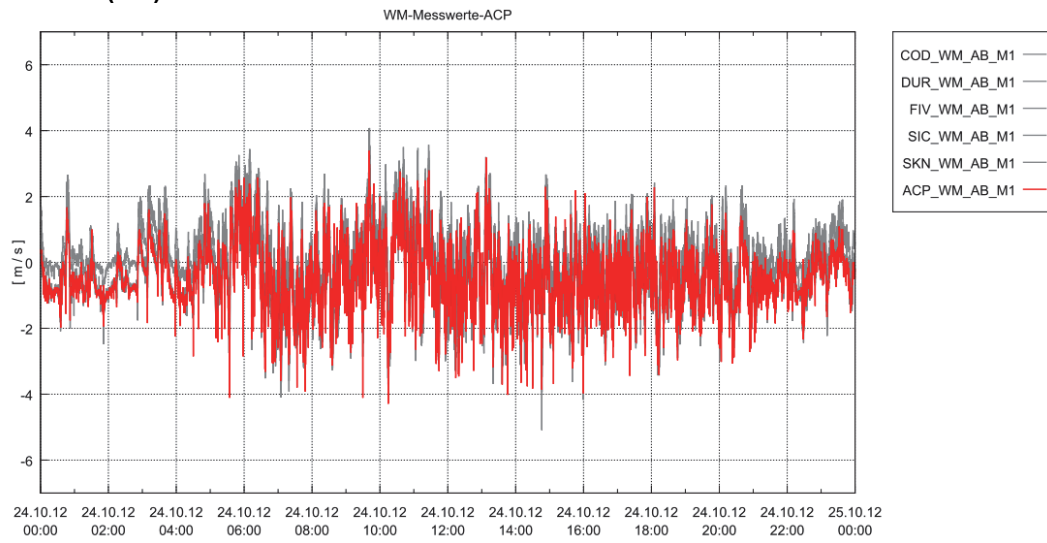


SKN M2 (A, B, AB)

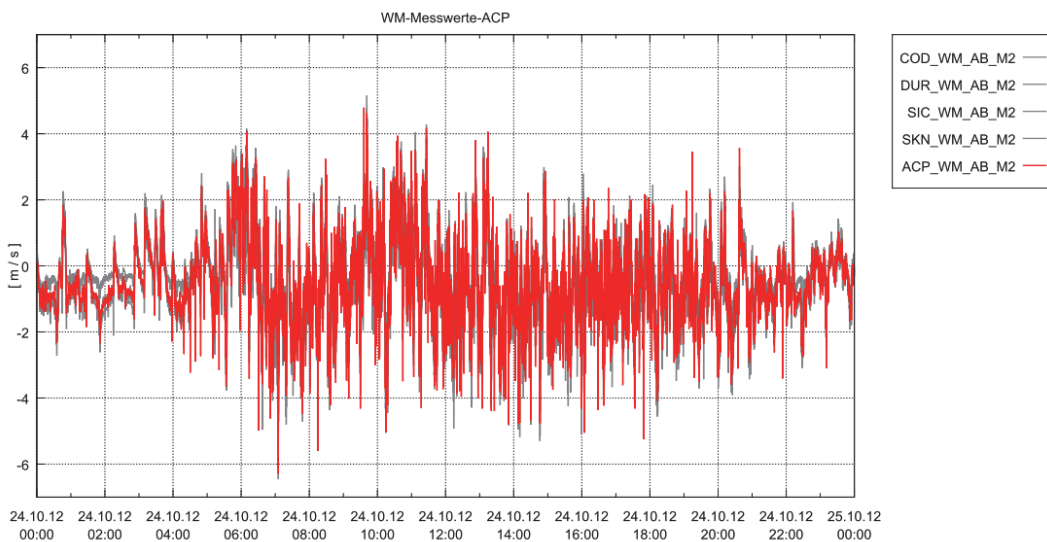


IV.6 Tunnel Flüelen 24.10.2012

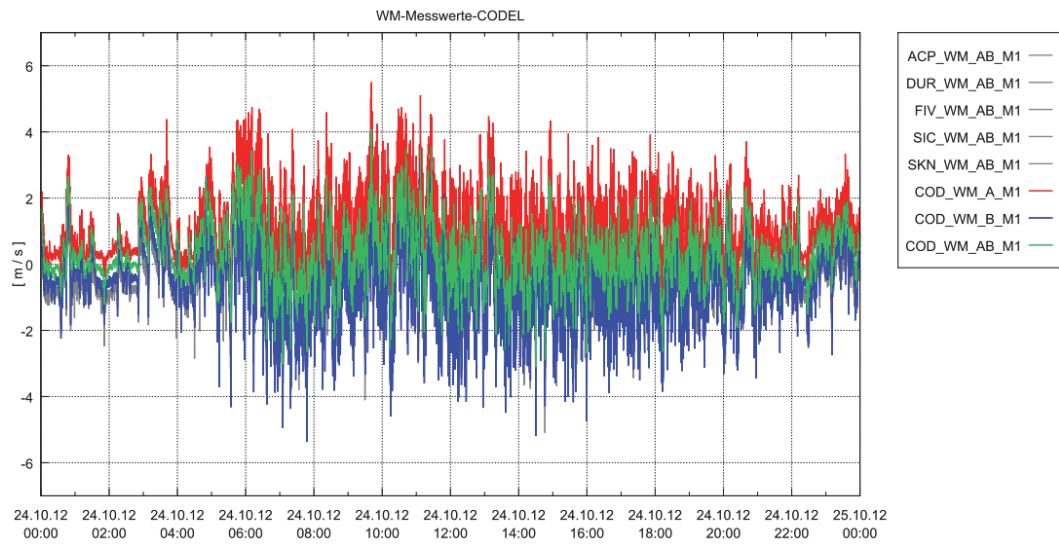
ACP M1 (AB)



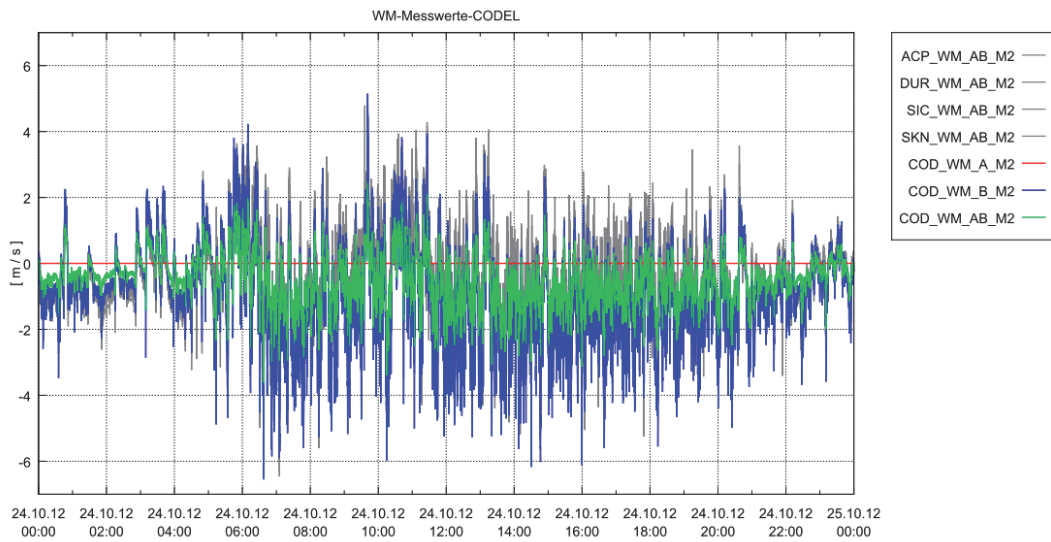
ACP M2 (AB)



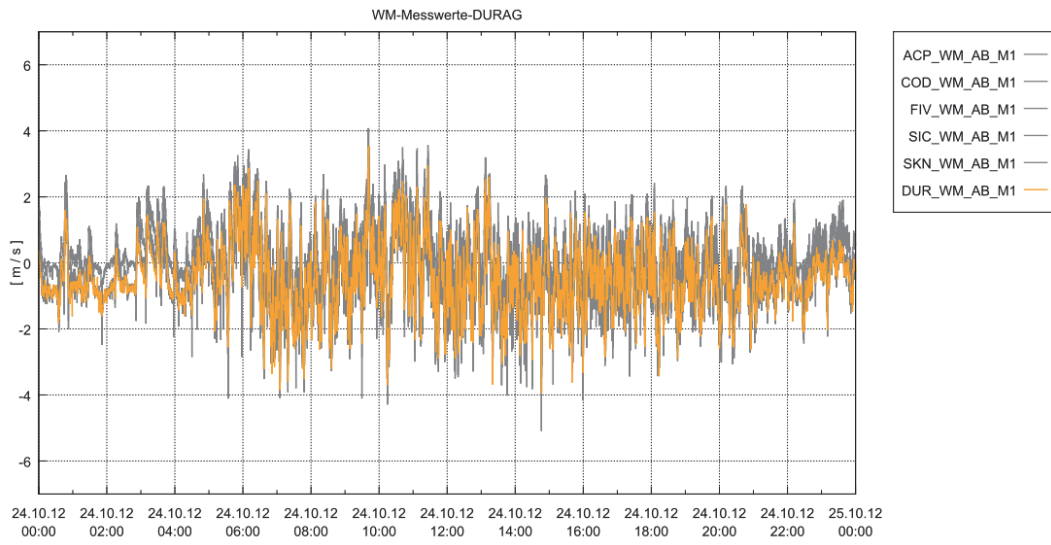
COD M1 (A, B, AB)



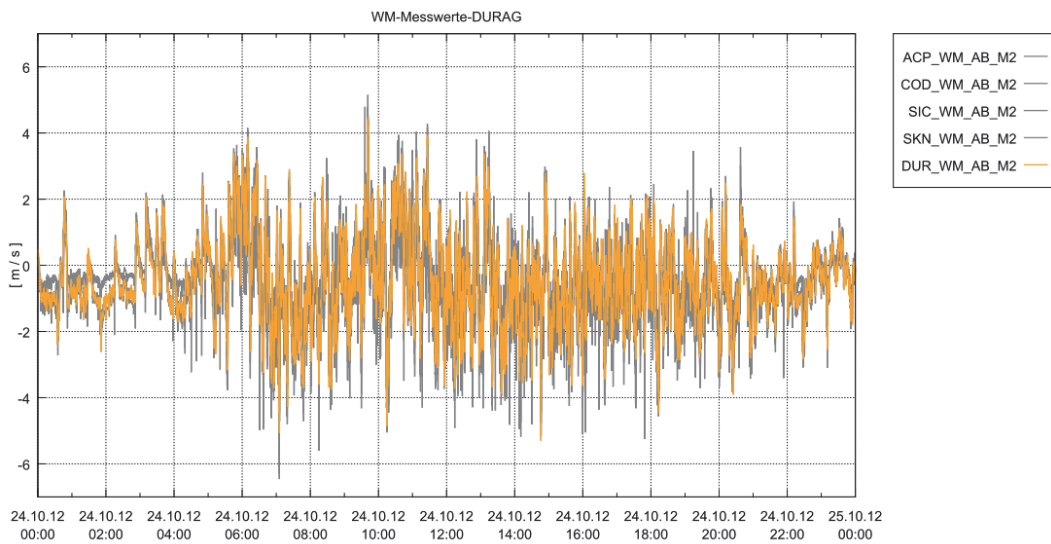
COD M2 (A, B, AB)



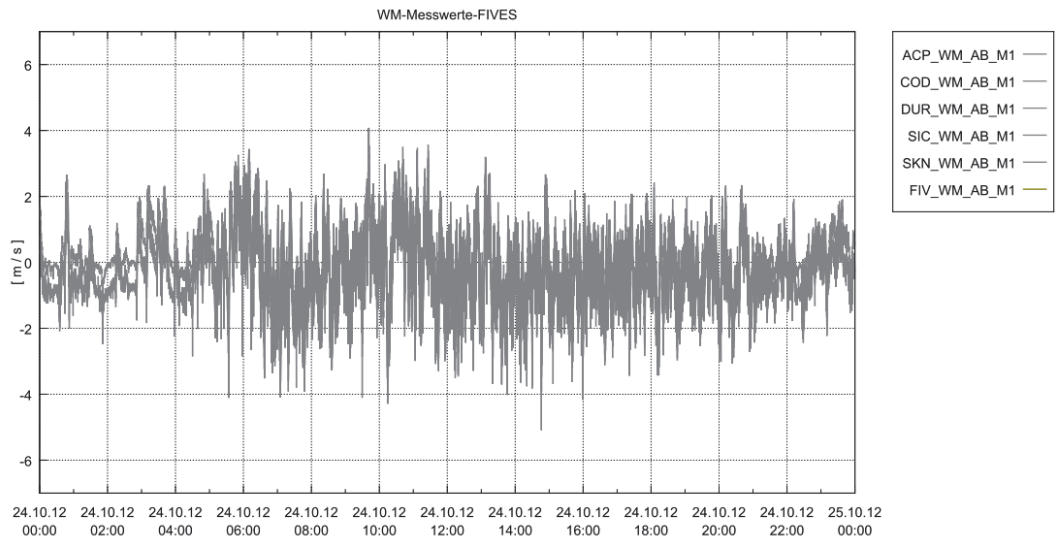
DUR M1 (AB)



DUR M2 (AB)

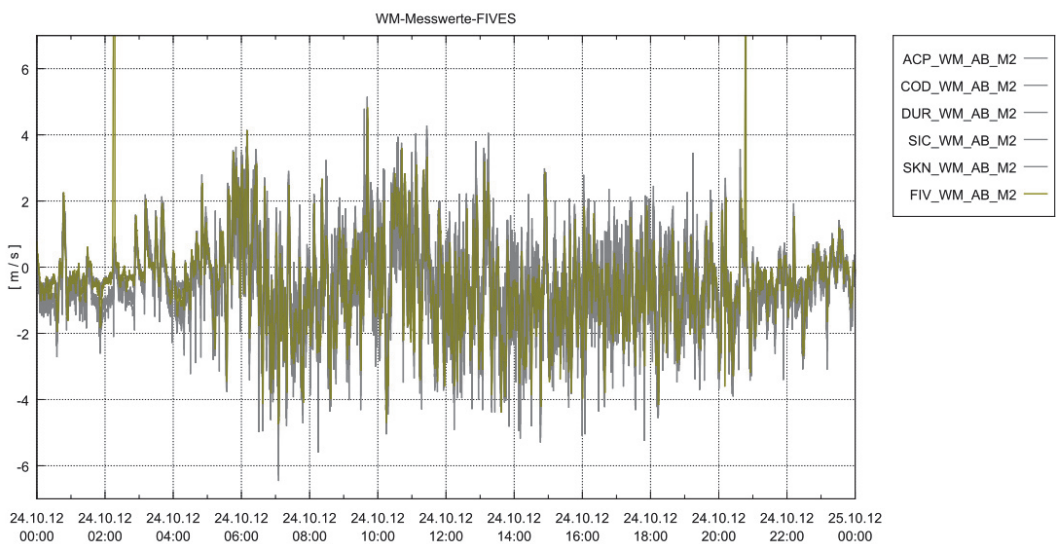


FIV M1 (A)

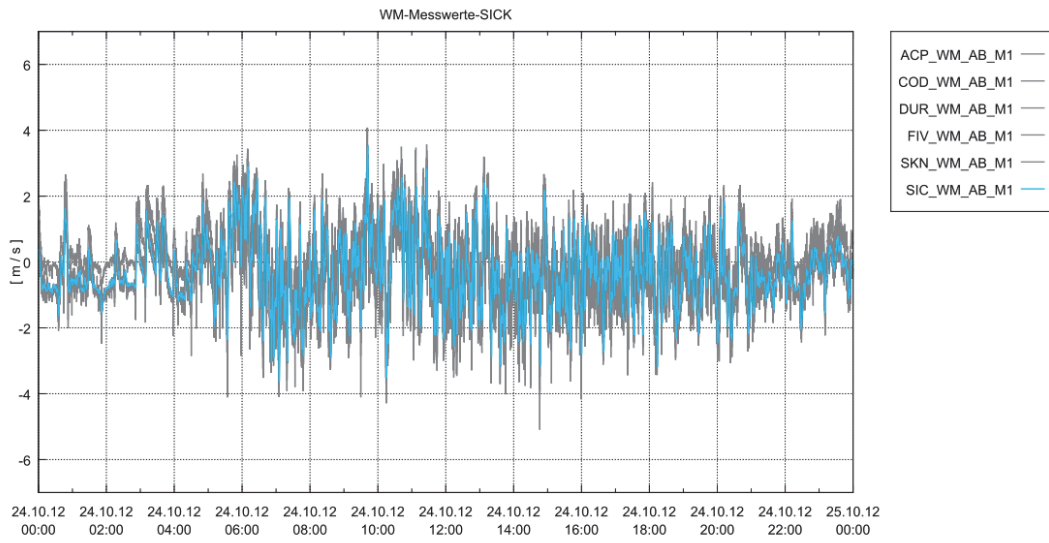


Messgerät ausgefallen

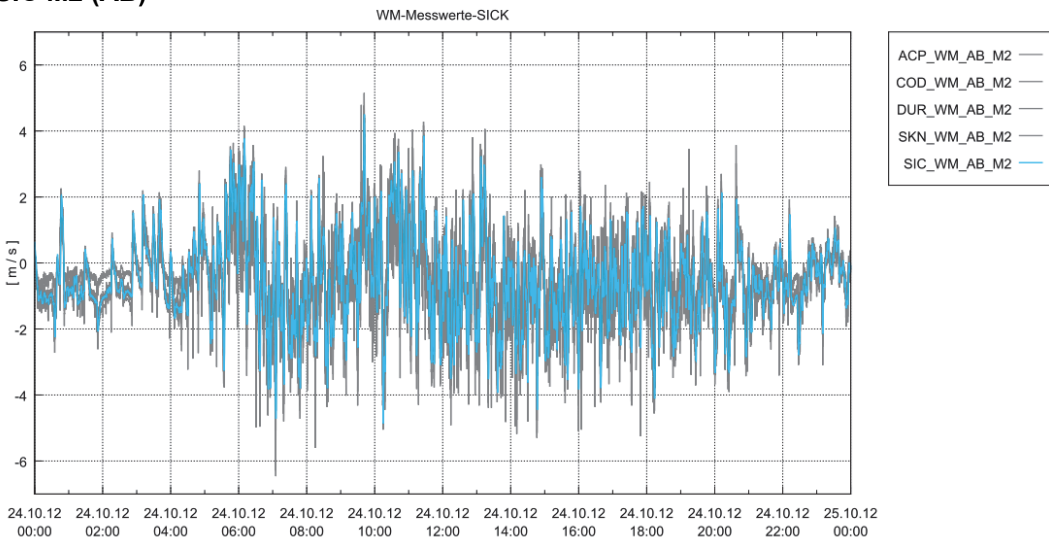
FIV M2 (A)



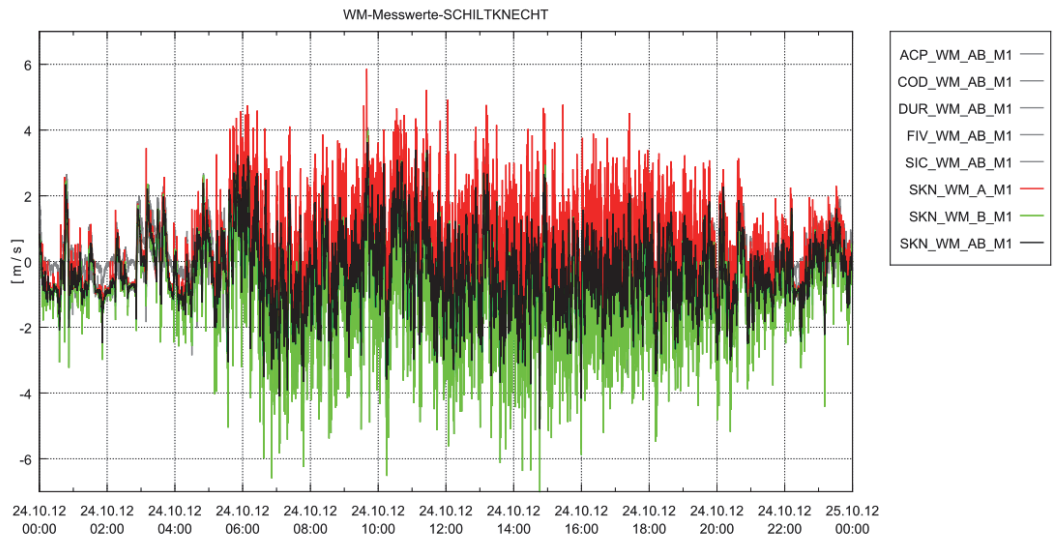
SIC M1 (AB)



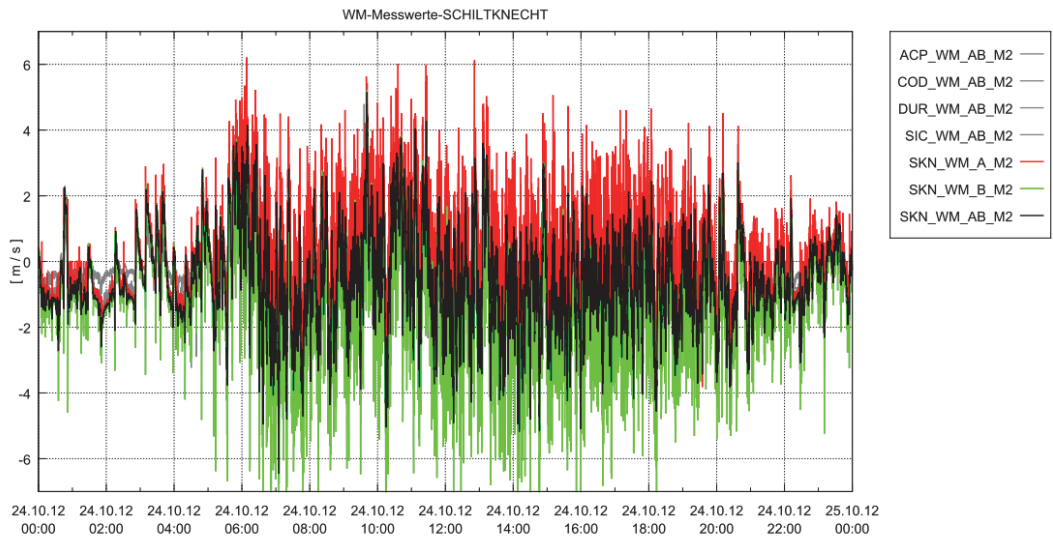
SIC M2 (AB)



SKN M1 (A, B, AB)



SKN M2 (A, B, AB)



V Vergleichsfaktoren

Im Kapitel 5.6.2 wurden die Resultate des Vergleichs zwischen der mit der Tracergasmessung bestimmten, mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der über die gleiche Zeitspanne ohne Korrekturfaktoren lokal gemessenen, mittleren Strömungsgeschwindigkeit über alle Messgeräte als prozentuale Abweichungen dargestellt.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Resultate dieses Vergleichs der einzelnen Strömungsmessgeräte tabellarisch als Korrekturfaktor und Abweichung in m/s dargestellt. Zur korrekten Interpretation dieser Tabellen muss darauf hingewiesen werden, dass die Messwerte die lokale Strömungsgeschwindigkeit darstellen und dass die Messunsicherheit der Tracergasmessung ca. $\pm 4.9\%$ beträgt. Im weiteren werden in dieser Betrachtungsweise Ausreisser und in einem gewissen Masse auch Messwertfehler kompensiert. Massgebend sind die Graphiken mit dem Verlauf im Kapitel 5 dargestellt.

V.1 Bözberg 18.01.2012 - 18:00 – M1

BOZ 18.01.2012 18:00 - Vergleich Tracergas - SMG und Bestimmung Korrekturfaktor								
	ACP_WM_AB_M1	COD_WM_AB_M1	DUR_WM_AB_M1	FIV_WM_AB_M1	SIC_WM_AB_M1	SKN_WM_AB_M1		Mittelwert M1
Anzahl Messwerte	747	747	747	747	747	747		747
Total	3626.72	3602.04	3948.07	3847.07	4103.96	4095.29		3873.27
Mittelwert m/s	4.86	4.82	5.29	5.15	5.49	5.48		5.19
Mittelwert HSLU	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93		4.93
NDIR								
Faktor	0.986	0.979	1.073	1.046	1.115	1.113		1.053
Korrektur m/s	-0.07	-0.10	0.36	0.22	0.57	0.56		0.26

V.2 Bözberg – 18.01.2012 – M2

BOZ 18.01.2012 18:00 - Vergleich Tracergas - SMG und Bestimmung Korrekturfaktor								
	ACP_WM_AB_M2	COD_WM_AB_M2	DUR_WM_AB_M2	FIV_WM_AB_M2	SIC_WM_AB_M2	SKN_WM_AB_M2		Mittelwert M2
Anzahl Messwerte	747	747	747	747	747	747		747
Total	4720.86	4504.46	4637.93	5011.88	4917.93	5176.85		4831.99
Mittelwert m/s	6.32	6.03	6.21	6.71	6.58	6.93		6.47
Mittelwert HSLU	6.04	6.04	6.04	6.04	6.04	6.04		6.04
NDIR								
Faktor	1.046	0.998	1.028	1.111	1.090	1.147		1.071
Korrektur m/s	0.28	-0.01	0.17	0.67	0.54	0.89		0.43

V.3 Bözberg – 18.01.2012 – 22:00 – M1

BOZ 18.01.2012 22:00 - Vergleich Tracergas - SMG und Bestimmung Korrekturfaktor								
	ACP_WM_AB_M1	COD_WM_AB_M1	DUR_WM_AB_M1	FIV_WM_AB_M1	SIC_WM_AB_M1	SKN_WM_AB_M1		Mittelwert M1
Anzahl Messwerte	781	781	781	781	781	781		781
Total	1885.87	1909.29	2011.23	1962.97	2081.89	2262.90		2019.03
Mittelwert m/s	2.41	2.44	2.58	2.51	2.67	2.90		2.59
Mittelwert HSLU	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75		2.75
NDIR								
Faktor	0.88	0.89	0.94	0.91	0.97	1.05		0.94
Korrektur m/s	-0.34	-0.31	-0.18	-0.24	-0.08	0.15		-0.17

V.4 Bözberg – 18.01.2012 – 22:00 – M2

BOZ 18.01.2012 22:00 - Vergleich Tracergas - SMG und Bestimmung Korrekturfaktor								
	ACP_WM_AB_M2	COD_WM_AB_M2	DUR_WM_AB_M2	FIV_WM_AB_M2	SIC_WM_AB_M2	SKN_WM_AB_M2		Mittelwert M2
Anzahl Messwerte	781	781	781	781	781	781		781
Total	2435.95	2216.63	2456.01	2568.26	2480.05	2804.56		2493.58
Mittelwert m/s	3.12	2.84	3.14	3.29	3.18	3.59		3.19
Mittelwert HSLU	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37		3.37
NDIR								
Faktor	0.92	0.84	0.93	0.97	0.94	1.06		0.95
Korrektur m/s	-0.25	-0.53	-0.23	-0.08	-0.20	0.22		-0.18

V.5 Flüelen – 26.09.2012 – 15:00 – SMG (M1/M2)

TUF 26.09.2012 15:00 - Vergleich Tracegas - SMG und Bestimmung Korrekturfaktor								
Datum	COD_WM_AB_M1	ACP_WM_AB_M2	DUR_WM_AB_M2	FIV_WM_M2	SIC_WM_AB_M2	SKN_WM_AB_M2		Mittelwert SMG
Anzahl Messwerte	647.00	647.00	647.00	647.00	647.00	647.00		647.00
Total m/s	1804.93	1831.02	2014.36	2196.19	2059.18	2057.98		1993.94
Mittelwert m/s	2.79	2.83	3.11	3.39	3.18	3.18		3.08
Mittelwert HSLU	3.48	3.48	3.48	3.48	3.48	3.48		3.48
NDIR								
Faktor	0.80	0.81	0.90	0.98	0.92	0.91		0.89
Korrektur m/s	-0.69	-0.65	-0.36	-0.08	-0.29	-0.30		-0.40

VI Stellungnahmen Lieferanten SMG

VI.1 ACP - Arias Environement AG

VI.1.1 Fragenkatalog

Abb. VI.1 Fragen – Antworten von Arias Environement AG

	Fragen	Antworten
1	Vom Instrument ausgegebener Temperaturwert: Gemessen oder virtuell berechnet?	Gemessen
2	Wenn Temperaturmessungen durchgeführt werden, z. B. mit on-board PT100: Wird dieser Messwert intern genutzt? Wenn ja, wozu?	PT100. Der Messwert wird bei der Ultraschallberechnung angewandt
3	Beschreibung der Methodik zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Beschreibung aller erforderlichen Messgrößen, um die Strömungsgeschwindigkeit ableiten zu können.	Laufzeitdifferenz Frequenz, Distanz, Temperatur Bis 200 Messzyklen pro Sekunde
4	Interne Messwertglättung: Welches Prinzip wurde angewandt (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert)? Wie lang war die Mittlungszeit? Mit welcher Frequenz ändert sich der 4-20 mA Wert am analogen Ausgang?	gleitender Mittelwert 10 sec. Stetig
5	Im Gerät hinterlegter Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Nein
6	Wurde eine Kalibrierung im Werk durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	Ja, Windkanal. 3 Lüfterstufen positiv und negativ
7	Wurde eine Kalibrierung vor Ort durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	Ja, Nullpunkt.
8	Wie und wann bzw. in welchem Intervall erfolgt der Nullpunktgleich?	Bei Wartung der Windmessköpfen.
9	Bei Punktmessungen: In welchem Abstand befand sich der Messkopf/Messbereich von der Tunnelwand?	30 cm
10	Finden interne Plausibilitätskontrollen statt, welche z. B. zum Ausschluss von Messwertfehlern führen?	Ja, die Frequenz der Schallgeber wird überwacht. Aussertoleranz der Frequenz führt zum Ausschluss.
11	Liste der Argumente für eine Störungsmeldung	Schallfrequenz ausser Toleranz +/-10% Interne Spannung ausser Toleranz Kommunikation zwischen Messkopf und Auswerteeinheit Übermässige Verschmutzung der Schallgeber
12	Liste der Argumente für eine Alarmmeldung	Dito Pkt. 11
13	Listenpreis des Geräts und typische Montagekosten	Ohne Gewähr Fr. 3000.00 bis Fr. 5000.00 je nach Ausführung. Montage und IBN-Kosten Fr. 150.00 (inklusive Befestigungen in V4A)
14	Empfohlene Wartungsintervalle	2mal pro Jahr
15	Beschreibung der Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten, einschliesslich Nachkalibrierungen	Elektrische und mechanische Kontrolle, Reinigung und Nullpunktkalibrierung. Laptop mit Programm und eine Kartonhaube für die Abdeckung des Messkopfes (keine Strömung). Kontrolle der Luftgeschwindigkeit mit einem zertifizierten

Anemometer (3 Punktmessung – Mittelwert über min. 60 sec.). Bei Neuanlagen werden auch die WM-Messgeräte mittels Netzmessungen kalibriert und dementsprechende Korrekturfaktoren bestimmt.

VI.1.2 **Stellungnahme ACP zu den Messwertauswertungen**

Die ACP Environment AG verbessert stetig Ihre Produkte und dies dank dem Feedback solcher Projekten und Erfahrung auf bestehenden Anlagen. Seit letztem Jahr laufen bei der ACP Langzeittests bezüglich übermässige Verschmutzungen der Schallgeber. Hier wird speziell die ideale Anordnung der Schallgeber gesucht.

Weiter ist seit Dezember 2012 den Aufbau einer Prüfvorrichtung im Gange, wo die Schallgeber vor dem Einbau ausgemessen werden (Frequenzmessung und Paarung gleicher in der Toleranz liegende Schallgeber). Dies soll gemäss unserem Verantwortlichen Entwicklungs-Ing. der Langzeitdrift minimieren bzw. in einer akzeptablen Toleranz bringen, Störungen wie; Schallgeber ausser Toleranz vermeiden. Bezüglich Temperaturschwankungen wurden die Sensoren im Labor der METAS Schweiz untersucht und einem Metas-Zertifikat 2008 beschrieben (Keine Messwertänderung bei Temperaturschwankungen).

Verbesserung von Messwerten (Ausreisser) von der Ausgabe: Die Anzahl sich wiederholender Vorgänge bezogen auf eine bestimmte Zeit > 200 Messzyklen pro Periodendauer, darunter soll eine minima und eine maxima Grenze gesetzt werden, welche Ausreisser ausscheiden soll. Im Gange seit Dezember 2012.

Die ACP Environment AG ist dauernd bestrebt in allen Bereichen der Tunnelsensorik Ihre Leistungen effizient und qualitätsbewusst auf dem besten Stand zu halten. Einen „No Way gibt es nicht“.

VI.2 COD - Codel International Ltd

VI.2.1 Fragenkatalog

Abb. VI.2 Fragen – Antworten von Codel International Ltd

	Fragen	Antworten
1	Vom Instrument ausgegebener Temperaturwert: Gemessen oder virtuell berechnet?	The temperature measurement is direct by pt100 resistance thermometer
2	Wenn Temperaturmessungen durchgeführt werden, z. B. mit on-board PT100: Wird dieser Messwert intern genutzt? Wenn ja, wozu?	The measured value is used internally to compensate for the variation of the speed of sound with temperature
3	Beschreibung der Methodik zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Beschreibung aller erforderlichen Messgrößen, um die Strömungsgeschwindigkeit ableiten zu können.	See Attachment for principle of operation
4	Interne Messwertglättung: Welches Prinzip wurde angewandt (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert)? Wie lang war die Mittlungszeit? Mit welcher Frequenz ändert sich der 4-20 mA Wert am analogen Ausgang?	Measurement smoothing is applied in software by an exponential smoothing algorithm with a response T90 time constant selectable in the range from 10seconds to 10 minutes. The instruments for the trial were set with a T90 response time of 15seconds Every second
5	Im Gerät hinterlegter Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	The answer is no
6	Wurde eine Kalibrierung im Werk durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	The monitors are calibrated on a factory wind tunnel against a calibrated rotating vane anemometer
7	Wurde eine Kalibrierung vor Ort durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	No field calibration was carried out
8	Wie und wann bzw. in welchem Intervall erfolgt der Nullpunktgleich?	There is no automatic zero point calibration facility. Zero calibration must be conducted manually.
9	Bei Punktmessungen: In welchem Abstand befand sich der Messkopf/Messbereich von der Tunnelwand?	The ultrasonic measurement sensor area was located 140mm from the tunnel wall
10	Finden interne Plausibilitätskontrollen statt, welche z. B. zum Ausschluss von Messwertfehlern führen?	Internal diagnostics test for failure of both ultrasonic transmitter and receivers and will trigger a data invalid condition
11	Liste der Argumente für eine Störungsmeldung	There is no high or low flow alarm indication.
12	Liste der Argumente für eine Alarmmeldung	There is no high or low flow alarm indication.
13	Listenpreis des Geräts und typische Montagekosten	EUR 4200 single Air Flow Monitor
14	Empfohlene Wartungsintervalle	There is no recommended maintenance other than period zero calibration checks on a 6 or 12 monthly basis
15	Beschreibung der Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten, einschliesslich Nachkalibrierungen	See attached procedure for zero check

VI.2.2 Stellungnahme zu den Resultaten

2. Principles of Operation

2.1. Air Flow Monitor

2.1.1. Measurement Principle

The CODEL Air Flow Monitor uses ultrasonic technology to measure air velocity. A single transmitter and two receivers are contained in one combined unit, as illustrated in Figure 4.

Sound pulses from the transmitter (Tx) are received by the receivers (Rx), along path lengths A and B. In the arrangement shown, the air velocity increases the effective sound velocity on path A, but on path B, the effective sound velocity decreases. The phase difference between the received sound pulses is proportional to the shift in transit times of the sound to each of the receivers. This in turn is proportional to the air velocity.

The unit contains all necessary analogue processing and micro-processing to produce an output directly calibrated in m/sec air velocity.

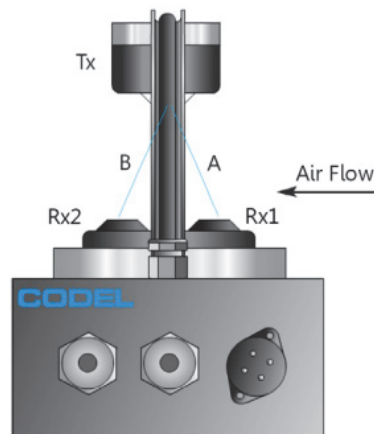
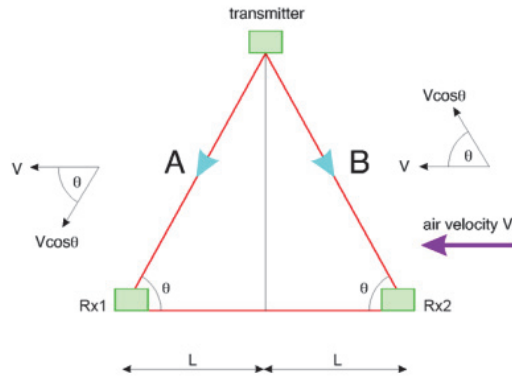


Figure 4 : AFM - Transmitter and Receiver Array

2.1.2. Calculations



$$\text{Sound transit time } t = \frac{\text{distance}}{\text{velocity}}$$

for path A :

$$\begin{aligned} \text{distance} &= L/\cos\theta \\ \text{velocity} &= C + V\cos\theta \end{aligned}$$

for path B :

$$\begin{aligned} \text{distance} &= L/\cos\theta \\ \text{velocity} &= C - V\cos\theta \end{aligned}$$

where C is the velocity of sound in still air.

$$\text{Sound transit time } t_A = \frac{L/\cos\theta}{C + V\cos\theta}$$

$$\text{and transit time } t_B = \frac{L/\cos\theta}{C - V\cos\theta}$$

Since phase shift $\Delta t = t_B - t_A$

$$\Delta t = \frac{L/\cos\theta}{(C - V\cos\theta)} - \frac{L/\cos\theta}{(C + V\cos\theta)}$$

$$\Delta t = \frac{[(C + V\cos\theta) - (C - V\cos\theta)] L/\cos\theta}{C^2 - V^2\cos^2\theta}$$

$$\Delta t = \frac{2VL}{C^2 - V^2\cos^2\theta}$$

But since over the operating range of the instrument :

$$V \ll C$$

$$C^2 - V^2 \cos^2 \theta = C^2$$

$$\text{and so phase shift } \Delta t = \frac{2LV}{C^2}$$

$$\text{or air velocity } V = \frac{\Delta t C^2}{2L}$$

By measuring the phase shift between the pair of ultrasound sensors, a linear measurement of air velocity is obtained.

$$\text{Velocity of Sound in a Gas} = \sqrt{\frac{\delta RT}{m}}$$

..... for air R = 8.314 (J/molK)

 δ = 1.4 (adiabatic constant)

 m = 28.95 (gm/mol)

 T = temperature (Kelvin)

The measure of air velocity is corrected for temperature according to the above calculation.

CODEL International Ltd
Station Building, Station Road,
Bakewell, Derbyshire DE45 1GE
England

Tel : +44 (0) 1629 814 351
Fax : +44 (0) 1629 814 619
e-mail : codel@codel.co.uk
website : www.codel.co.uk

Reg. in England No. 1606652
VAT Reg. No. GB 379 1096 23
EORI No. GB379109623000

Temperature Sensitivity of Codel Tunnel Flow Monitors.

During recent tests using 8 Codel Tunnel Flow Monitors in Bozberg and Fluellen tunnels in Switzerland, the sensors exhibited a negative zero drift with temperature up to 1m/sec for a temperature change of +20degC. Subsequent factory tests on the sensors have identified that in all sensors the drift resulted from a key electronic component having an out of tolerance temperature coefficient. Replacement of that component with correct temperature specification and subsequent retesting resulted in a shift in zero of less than 0.15m/sec for a temperature variation between -20 and +50 degC.

Additional quality checks under ISO 9000 have now been implemented to ensure that electronic assemblies are temperature tested prior to final product completion.

C. D. Coe
Managing Director
Codel International Ltd.
15/02/2013

— Total Solutions - Total Confidence —



Directors : M Makey (Chairman)
: C D Coe (Managing)
: P J Webb
: D W Fairbrother
: F Forbes
: N Forbes
: M Kantrai



VI.3 DUR - Durag GmbH

VI.3.1 Fragenkatalog

Abb. VI.3 Fragen – Antworten von Durag GmbH

Fragen	Antworten
1 Vom Instrument ausgegebener Temperaturwert: Gemessen oder virtuell berechnet?	Die Temperatur wird indirekt aus dem Ultraschalllaufzeitmessergebnis berechnet.
2 Wenn Temperaturmessungen durchgeführt werden, z. B. mit on-board PT100: Wird dieser Messwert intern genutzt? Wenn ja, wozu?	Neben der Lufttemperatur (siehe Punkt1) werden die Temperatur des Ultraschallwandlers und die Temperatur im Elektronikgehäuse gemessen. Die Ultraschallwandlertemperatur und die Temperatur im Elektronikgehäuse werden nur überwacht. Bei Über-/Unterschreitung von Grenzen wird eine Warnung ausgegeben.
3 Beschreibung der Methodik zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Beschreibung aller erforderlichen Messgrößen, um die Strömungsgeschwindigkeit ableiten zu können.	Formel zur Strömungsgeschwindigkeit (v): $v = \frac{L}{2 * \cos \alpha} * \frac{t_- - t_+}{t_- * t_+}$ v: Strömungsgeschwindigkeit L: Entfernung zwischen den Messköpfen α: Einbauwinkel zur Strömungsrichtung t: Schalllaufzeitmessergebnis gegen die Strömung t.: Schalllaufzeitmessergebnis mit der Strömung
4 Interne Messwertglättung: Welches Prinzip wurde angewandt (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert)? Wie lang war die Mittelungszeit? Mit welcher Frequenz ändert sich der 4-20 mA Wert am analogen Ausgang?	Es wird ein linearer, gleitender Mittelwert gebildet. Mittelungszeit = 10sec 4-20mA Änderungsfrequenz 1/sec
5 Im Gerät hinterlegter Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Kein Korrekturfaktor
6 Wurde eine Kalibrierung im Werk durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	nein
7 Wurde eine Kalibrierung vor Ort durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	nein
8 Wie und wann bzw. in welchem Intervall erfolgt der Nullpunktgleich?	Nullpunktgleich ist nicht nötig.
9 Bei Punktmessungen: In welchem Abstand befand sich der Messkopf/Messbereich von der Tunnelwand?	-
10 Finden interne Plausibilitätskontrollen statt, welche z. B. zum Ausschluss von Messwertfehlern führen?	– Es wird geprüft ob die die gemessene Schalllaufzeit innerhalb von theoretisch berechneten (möglichen) Grenzen liegt. – Interne Selbstüberwachungsrountinen
11 Liste der Argumente für eine Störungsmeldung	– kein gültiger Messwert für die Zeit >t _{Störungsunterdrückung} (default t _{Störungsunterdrückung} =10sec) – Datenverbindung zwischen Messkopf A/B gestört – Geräteparametrierung ungültig
12 Liste der Argumente für eine Alarmmeldung	– Ultraschallsignalqualität kritisch – Selbsttestwarnung – Temperaturüberschreitung der Elektronik oder

		des Ultraschallwandlers
13	Listenpreis des Geräts und typische Montagekosten	EUR 6'100 pro Messstelle EUR 300 für Montage
14	Empfohlene Wartungsintervalle	In der Regel nicht häufiger als 2x pro Jahr
15	Beschreibung der Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten, einschliesslich Nachkalibrierungen	Die Sensoren sind ohne Werkzeug austauschbar; ebenso ist beim Austausch eine Neuausrichtung nicht notwendig. <ul style="list-style-type: none"> – Reinigung der Sensoren – Kalibrierungen sind nicht nötig

VI.3.2 Stellungnahme zu den Resultaten



Seite 1 von 1

Lombardi AG

z. Hd. Herrn Urs Grässlin
Via R. Simen 19
Postfach 1535

CH - 6648 Minusio

DURAG Ansprechpartner Tobias R. Grupp
Rufnummer +49 / 7164 / 91225-15
E-Mail tobias.grupp@durag.de
Ihre Zeichen MEMO -09 6093.0
Unsere Zeichen 130304_CH_Lombardi_Forschungsprojekt
2010_25_DVS.docx
Datum 25.03.2013

ASTRA-Forschungsprojekt 2010-25 „Lüftstrommessungen in Strassentunnels“

Sehr geehrter Herr Grässlin,

an dieser Stelle bedanken wir uns gerne bei Ihnen für die Teilnahmemöglichkeit zum ASTRA-Forschungsprojekt 2010-25 „Lüftstrommessungen in Strassentunnels“.

Gerne nehmen wir, wie von Ihnen gewünscht, zu dem erfolgten Test der Tunnelsensorik abschließend Stellung. Aufgrund der durchweg äußerst positiven Testergebnisse (bester Teilnehmer im Test) möchten wir lediglich die folgenden drei Punkte erwähnen:

- Beim Test in den Tunneln Bözberg und Flüelen wurde eine Version des D-FL 220 T verwendet, die in der Klemmenbox (an der Tunnelwand montiert) mit einem Netzgerät 230VAC / 24VDC arbeitet. Alternativ hierzu ist auch die Versorgung der Klemmenbox mit 24VDC möglich, so dass die im Bericht erwähnte, zusätzliche 230VAC-Speiseleitung entfallen kann.
- Wie bereits von Ihnen richtig dokumentiert, konnten leider nach den schweren Gewittern im Großraum Zürich am 01.07.2012 die Werte unseres Systems nicht mehr empfangen und aufgezeichnet werden (Tunnel Bözberg). Der Fehler lag nicht auf unserer Seite. Auf der SPS-Seite waren leider alle vier Eingangs-Ports defekt. Nach dem Tausch der analogen Eingangskarte der SPS konnten die Signale unserer Sensoren wieder korrekt empfangen und aufgezeichnet werden.
- Zum Thema „Verschmutzungen und Flugrostspuren insbesondere an den Aufhängungen und den Befestigungselementen (Abrieb von Fahrzeugen)“ möchten wir Ihre generelle Feststellung, dass bei keinem der Strömungsmessgeräte Materialkorrosion aufgetreten ist, mit folgenden Angaben untermauern: Bei der Halterung werden ausschließlich V4A-Teile verwendet (auch Blech und Schrauben); beim Schweißen kommt immer eine höherwertige Elektrode zum Einsatz. Auf den Fotos ist deutlich erkennbar, dass die Schweißnähte selbst nicht angegriffen sind, sondern dass es sich lediglich um Flugrostspuren und Verschmutzungen handelt.

Abschließend danken wir Ihnen und Ihren Mitarbeitern herzlich für die Unterstützung bei den Tests, sowie für die angenehme und professionelle Zusammenarbeit. Wir hoffen, dass durch den Test die gewonnenen Erkenntnisse und den künftig vermehrten Einsatz von DURAG-Tunnel-Sensorik die Sicherheit in Tunneln weiter verbessert werden kann!

Mit freundlichen Grüßen

i.V. Dipl.-Ing. Tobias R. Grupp

DURAG Sales & Marketing GmbH & Co KG
Niederlassung Süd
Weidenweg 16 • DE 73087 Bad Boll
Tel.: +49/7164/91225-0 • Fax - 50
Mail: durag-sued@durag.de

DURAG Sales & Marketing GmbH & Co. KG
Kollastrafße 105
22453 Hamburg, Germany
Tel.: +49 40 55 42 18 0
Fax: +49 40 58 41 54

Hamburg HRA 115539
Persönlich haftende
Gesellschafterin:
DURAG GmbH
Hamburg HRB 39787

Geschäftsführung:
Rainer Böcher,
Antonius Hamelteers,
Axel Kumm,
Lars Platzhoff

Steuernummer/
Tax ID:
31/284/72307
USt.-Id.-Nr.:
DE286510733

Bank: Commerzbank AG
Konto: 5884440 - BLZ: 22141628
IBAN: DE84221416280588444000
Swift-Code: COBADEHHXXX

A member of
DURAG GROUP
www.durag.de
E-Mail: sales@durag.de

VI.4 FIV - Fives Pillard

VI.4.1 Fragenkatalog

Abb. VI.4 Fragen – Antworten von Fives Pillard

	Fragen	Antworten
1	Vom Instrument ausgegebener Temperaturwert: Gemessen oder virtuell berechnet?	La mesure de température est réalisée à l'aide d'une sonde présente sur le dessus du coffret. C'est une valeur «vraie» mesurée et non le résultat d'un calcul
2	Wenn Temperaturmessungen durchgeführt werden, z. B. mit on-board PT100: Wird dieser Messwert intern genutzt? Wenn ja, wozu?	Chaque mesure de température apporte une correction au résultat du calcul de la vitesse.
3	Beschreibung der Methodik zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Beschreibung aller erforderlichen Messgrößen, um die Strömungsgeschwindigkeit ableiten zu können.	La vitesse du vent se calcule en deux temps: <ul style="list-style-type: none"> – Mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonique de gauche à droite et droite à gauche. – Soustraction des deux valeurs précédentes et division par un facteur de correction (température distance entre transducteur, altitude...). – Dans la configuration de chaque appareil, on peut entrer la valeur de l'altitude, une correction sera donc appliquée
4	Interne Messwertglättung: Welches Prinzip wurde angewandt (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert)? Wie lang war die Mittelungszeit? Mit welcher Frequenz ändert sich der 4-20 mA Wert am analogen Ausgang?	L'appareil est équipé d'un système de lissage par moyenne glissante. Cette moyenne est réglable à l'aide de la console de paramétrage de 1s à 100s. La sortie 4-20 mA qui est le reflet de la mesure est modifiée toute les 500ms. Les valeurs sans intégration sont données toutes les 0,5 seconde, si l'utilisation souhaite intégrer le signal, la valeur d'intégration est réglable d'une seconde jusqu'à 100 secondes. Oui les appareils étaient bien programmés avec une intégration de 10 secondes.
5	Im Gerät hinterlegter Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Il n'y a pas de facteur de correction applicable. La valeur donnée est celle mesurée à l'endroit d'implantation de l'anémomètre.
6	Wurde eine Kalibrierung im Werk durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	Oui chaque appareil est individuellement étalonné, Nous vérifions chaque appareil et le comparons à un appareil étalon. Cette procédure est systématique et effectuée sur notre banc de calibration en nos ateliers (soufflerie de 10 mètres de long) Une fois cet étalonnage fait il n'est plus nécessaire de réétalonner l'appareil
7	Wurde eine Kalibrierung vor Ort durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	Nous contrôlons l'étalonnage de chaque appareil sur un banc de contrôle de 10 mètres linéaires. Ce banc est équipé d'un anémomètre de référence étalonné par le Cofrac. Chaque appareil est individuellement étalonné. L'étalonnage sur site n'est pas nécessaire
8	Wie und wann bzw. in welchem Intervall erfolgt der Nullpunktgleich?	Aucune ré-calibration du point zéro est nécessaire. De par la technologie utilisée et en l'absence de facteur de correction, la valeur 0 est une valeur physique.
9	Bei Punktmessungen: In welchem Abstand befand sich der Messkopf/Messbereich von der Tunnelwand?	La distance entre le capteur et la paroi du tunnel est de 300mm.

10	Finden interne Plausibilitätskontrollen statt, welche z. B. zum Ausschluss von Messwertfehlern führen?	Oui il y a un traitement d'incohérence de valeurs lors du traitement du signal.
11	Liste der Argumente für eine Störungsmeldung	L'appareil n'est plus capable d'effectuer une mesure si : <ul style="list-style-type: none"> - La mesure la température est impossible ou erronée (défaillance du capteur de température) - la distance entre les transducteurs est modifiée (torsion des bras qui portent les capteurs. - La liste des arguments qui génèrent un défaut est la même que celle qui génère une alarme (§12)
12	Liste der Argumente für eine Alarmmeldung	Une alarme est déclenchée sur un contrôle négatif des points suivants: <ul style="list-style-type: none"> - valeur de température transducteurs incohérente - valeur de la température ambiante incohérente - Un ou deux transducteurs usés ou encrassés
13	Listenpreis des Geräts und typische Montagekosten	Cout des fournitures: Windcheck: 2'800 euros Console RC5: 850 euros
14	Empfohlene Wartungsintervalle	Nous recommandons un nettoyage des transducteurs semestriel. Cet intervalle de nettoyage pourra être modifié en fonction des conditions d'utilisation à une période donnée : Trafic important ou exceptionnel Conditions météorologiques particulières (neige en abondance qui entraîne un salement des routes)
15	Beschreibung der Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten, einschliesslich Nachkalibrierungen	Nous préconisons un nettoyage des transducteurs avec un chiffon humide sans produit agressif. Ce nettoyage doit être enregistré et validé à l'aide de la console de paramétrage RC5. Nous préconisons un contrôle de l'état des transducteurs qui ne doivent pas être altérés par l'ambiance saline.

VI.4.2 Stellungnahme zu den Resultaten

Ces essais étaient destinés à comparer les différentes technologies:

- Simplicité d'installation
- Simplicité de paramétrage et mise en service
- Comportements dans le temps
- Tests des performances métrologiques et techniques.

Ces essais ont mis en évidence la simplicité et la rapidité de pose et de mise en service de nos anémomètres.

Par ailleurs ils ne demandent aux techniciens de maintenance aucunes qualifications particulières pour intervenir dessus.

Tout a été pensé pour la facilité de maintenance.

Lors de ces essais, nous avons rencontré deux types de problèmes qui nous ont permis d'évoluer et de développer une technologie beaucoup plus fiable dans le temps.

Blocage de la mesure

Nous avons modifié le traitement informatique du signal qui prend en compte l'enveloppe du signal et non plus la plus la valeur moyenne comme dans la précédente version.

Oxydation des transducteurs due à l'ambiance saline importante

Nous avons résolu le problème d'oxydation grâce à:

- 1 Nous avons fait fabriquer par un spécialiste en peinture et revêtement un vernis spécifique.
Il est appliqué sur chaque transducteur et a comme caractéristique, une parfaite tenue aux ambiances salines.
Cela signifie donc une protection supplémentaire et par conséquent un espacement des interventions de nettoyage.
- 2 Nous avons équipé chaque transducteur d'un cône de protection qui a pour effet d'atténuer les dépôts de sel. En effet, les transducteurs sont exposés à l'ambiance humide et saline.
Afin de fonctionner dans une grande plage de température, les transducteurs sont individuellement équipés d'une résistance chauffante ainsi que d'une sonde de température. Ces résistances qui chauffent en permanence les transducteurs, accélèrent l'évaporation de l'eau sur ces derniers, ce qui forme un dépôt de sel. Ce sel corrode alors les transducteurs.
Pour pallier à ce phénomène, nous avons équipé chaque transducteur d'un cône. Il a pour conséquence de créer un tampon d'air devant chaque transducteur évitant ainsi les dépôts. Des tests comparatifs sont effectués depuis quatre mois avec succès dans le tunnel d'Orelle en Haute Savoie.
Nous avons comparé un anémomètre équipé de cônes avec un appareil sans cônes et les résultats se révèlent très satisfaisants. Alors que l'anémomètre sans cône commençait à s'oxyder, celui équipé des cônes n'a pas été affecté par la corrosion. L'efficacité des cônes de protection est réelle et nous sommes très optimistes sur l'avenir de ce procédé.
Cela résoudra la majorité des problèmes rencontrés à ce jour.

Ci-dessous les photos du test "Avant- Après".

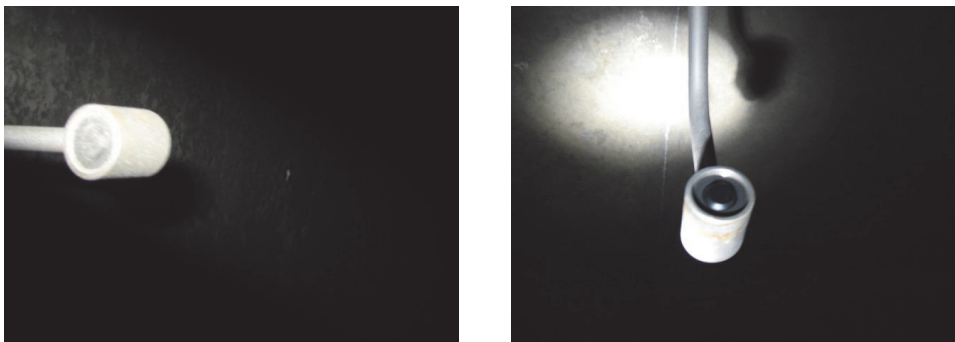


Abb. VI.5 Avant Après

VI.5 SIC - Sick SA

VI.5.1 Fragenkatalog

Abb. VI.6 Fragen – Antworten von Sick AG

	Fragen	Antworten
1	Vom Instrument ausgegebener Temperaturwert: Gemessen oder virtuell berechnet?	Virtuell berechnet aus der mittleren Schallg ⁶ 1e-schwindigkeit (siehe auch Beschreibung in der Betriebsanleitung).
2	Wenn Temperaturmessungen durchgeführt werden, z. B. mit on-board PT100: Wird dieser Messwert intern genutzt? Wenn ja, wozu?	Kein on-board Temperatursensor beim FLOWSIC 200.
3	Beschreibung der Methodik zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Beschreibung aller erforderlichen Messgrößen, um die Strömungsgeschwindigkeit ableiten zu können.	Aus der Laufzeitdifferenz (in BA ersichtlich); = Messstrecke * Laufzeitdifferenzterm / cos Installationswinkel
4	Interne Messwertglättung: Welches Prinzip wurde angewandt (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert)? Wie lang war die Mittlungszeit? Mit welcher Frequenz ändert sich der 4-20 mA Wert am analogen Ausgang?	Gestaffelte Glättung und Filterung: <ul style="list-style-type: none"> • Gleitender Mittelwert der Signale (Standard 10 Werte) • Medianfilter mit anteiliger Mittelung der Focus-Werte (Standard) • 21 Werte mit 70 % im Focus) • Gleitender Mittelwert als T90 in der MCU (Standardeinstellung) • T90 ab Werk ist 1s. Einstellung war hier bei Test 10 Sekunden.) • Die Aktualisierung des Analogausgangs erfolgt alle 2 Sekunden.
5	Im Gerät hinterlegter Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Es wurden keine Korrekturfaktoren parametrier.
6	Wurde eine Kalibrierung im Werk durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	Standard Qualitätsprüfung im Werk: Nullpunktüberprüfung und Prüfung der Laufzeitmessung auf Basis von Schallgeschwindigkeit und Temperatur. Keine Kalibrierung im Werk weil das nur im eingebauten Zustand im Tunnel möglich ist.
7	Wurde eine Kalibrierung vor Ort durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	Nein
8	Wie und wann bzw. in welchem Intervall erfolgt der Nullpunktgleich?	Der Nullpunktgleich erfolgt im Rahmen des im Gerät integrierten Kontrollzyklus. Dieser kann jederzeit manuell oder automatisch in definierten Zeitabständen ausgelöst werden (Parametrierung Automatik über Bediensoftware).
9	Bei Punktmessungen: In welchem Abstand befand sich der Messkopf/Messbereich von der Tunnelwand?	-
10	Finden interne Plausibilitätskontrollen statt, welche z. B. zum Ausschluss von Messwertfehlern führen?	Ja, im Rahmen des automatischen oder manuellen Kontrollzyklus. Die Ultraschallsignale werden bezüglich Maximum, Minimum, Position d. Maximums, Rauschanteil < parametrierbaren Limits bewertet und gegebenenfalls verworfen. Die berechneten Geschwindigkeiten müssen unterhalb eines parametrierten Grenzwertes liegen.
11	Liste der Argumente für eine Störungsmeldung	Kommunikationsfehler zwischen den Sonden

		<ul style="list-style-type: none"> • Fehlparametrierung • Rauschen über Limit (dauerhaft) • kein Signal (dauerhaft) • Messbereich (plausibel) überschritten
12	Liste der Argumente für eine Alarmmeldung	<ul style="list-style-type: none"> • Rauschen über Limit (kurzzeitig) • zu geringe Signal-Amplitude • Nullpunktoffset ausser Limit
13	Listenpreis des Geräts und typische Montagekosten	Listenpreis pro Messstelle ca. CHF 8'000.-- plus Montage ca. CHF 300.-- pro Messstelle.
14	Empfohlene Wartungsintervalle	Applikationsabhängig. Das typische Wartungsintervall für das verwendete FLOWSIC 200-H (Edelstahl/Titanausführung) beträgt mehr als 5 Jahre.
15	Beschreibung der Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten, einschliesslich Nachkalibrierungen	<ul style="list-style-type: none"> • Sichtkontrolle. Bei Bedarf Reinigung der Systemteile von äusserer Verschmutzung. • Funktionskontrolle mittels Kontrollzyklus (ggf. Aufzeichnung Diagnosefile) • Erstellung Parameterprotokolle bei eventuellen Parameteroptimierungen/-änderungen.

VI.5.2 Stellungnahme zu den Resultaten



SICK AG • Breitenweg 6 • 6370 Stans • Schweiz

Lombardi AG
Beratenden Ingenieure
Herr Urs Grässlin
Via R. Simen 19
Postfach 1535
CH-6648 Minusio

Stellungnahme

Angebotsnummer	78722 (E1247AHO-4CH0069)
Anfrage	Schlussbericht zur Stellungnahme
Applikation	Strömungsmessung in Strassentunnel
Projektbez.	FOP 2010-025
Datum	28. Januar 2013
Ihre Ansprechpartner	André Holliger Tel: +41 41 619 29 09 Mobil: +41 79 756 91 74 Fax: +41 41 619 29 21 Mail: andre.holliger@sick.ch Urs Baruffol Tel: +41 41 619 29 39 Mobil: +41 79 414 92 52 Fax: +41 41 619 29 21 Mail: urs.baruffol@sick.ch

SICK AG • Breitenweg 6 • 6370 Stans • Schweiz
Tel. +41 41 619 29 09 • Fax +41 41 619 29 21 • contact@sick.ch • www.sick.ch



1. Kommentare zum Dokument "FOP 2010-025 UN – SIC" und auszugsweiser Bericht 6093.0-R-008

Seite 33, Kap. 3.1.5, Thema Messwertglättung

Um bei den Ausgabewerten die geforderte Mittelung über 10 Sekunden zu erreichen, müssten am FLOWSIC 200 u.a. die Parameter „Measuring cycle“, „Multiburst“ etc. modifiziert werden (siehe Bilder unten). Ausserdem muss die Dämpfungszeit für den Sensor auf 0 gestellt werden.

Device Identification

MCU Selected variant Mounting Location

Value Damping Time

Damping time for Sensor 1 sec

Signal Processing

Lower fraction %

Upper fraction %

Number of avg. signals

Median buffer size

Average median %

Measuring cycle ms

Transmit delay B ms

Multiburst

First max

Leider konnten diese Parameter anlässlich des leider durch den Betreiber abgebrochenen Einsatzes (siehe Kapitel 3) nicht mehr eingestellt und getestet werden.



Seite 59, Abb. 4.24

Die offizielle Gerätebezeichnung lautet FLOWSIC 200 (nicht FLOWSICK).

Seite 59-60, Abb. 4.25 & Abb. 4.26

Bezüglich der „Ausreisser“ möchten wir auf das Kapitel 3 dieser Stellungnahme verweisen.

Bezüglich der Abweichungen der „virtuellen Temperatur“ möchten wir auf das Kapitel 4 dieser Stellungnahme verweisen.

Seite 60, Abb. 4.27

Bezüglich der Abweichungen der virtuellen Temperatur möchten wir auf das Kapitel 4 dieser Stellungnahme verweisen.

Seite 61, Abb. 4.28

Hier gibt es einen Widerspruch zu den Ergebnissen in Dokument „FOP 2010-025 Detail statistische Auswertungen“. Auf S. 9, Abb.9. wird festgestellt, dass im September keine Ausreisser mehr aufgetreten sind.

Auch wurden wir nach dem abgebrochenen Serviceeinsatz nicht darüber informiert, dass nochmals Ausreisser festgestellt worden sind.

2. Kommentare zum Dokument “FOP 2010-025 Detail statistische Auswertungen“

Seite 9, Abb. 9

Hier wird festgestellt, dass bei der SICK Messung zu Beginn der Aufzeichnung ausgeprägte Ausreisser-Werte auftraten.

Ein ähnliches Bild ist aus unserer Sicht hier auch für die DURAG Messung am 08.02.12 erkennbar, so man durchaus ein annähernd gleiches Verhalten der durchstrahlenden Messungen feststellen kann.

3. Statement zum Thema „Ausreisser“

Das bei der FOP Testmessung beobachtete Phänomen einzelner Messwertausreißer wurde bei der Geräteserie FLOWSIC 200 mit einer weltweit installierten Basis von mehreren Tausend Messstellen nicht in dieser Art beobachtet.



Die Messwertausreisser waren aufgrund ihres seltenen Auftretens schwer erfassbar. Im Ergebnis intensiver Untersuchungen durch den Gerätehersteller wurde das Verhalten reproduziert und eine Lösung durch Anpassung der Sensoren erarbeitet.

Ein Nachweis im Rahmen des FOP Testprogrammes konnte leider nicht mehr erbracht werden da der hierfür vorgesehene Serviceeinsatz am 11.09.2012 durch den Tunnelbetreiber nach nur 2 Stunden ohne erkennbaren Grund abgebrochen wurde. Der geplante Austausch der Messköpfe und die Anpassung der Parametrierung war deshalb leider nicht möglich. Im Rahmen des Serviceeinsatzes konnte aus Zeitgründen lediglich eine fehlende Abschlussterminierung gesetzt und die Berechnung der „virtuellen Temperatur“ (auch „akustische Temperatur“) optimiert werden.

4. Allgemeine Erklärung zur Berechnung der „virtuellen Temperatur“ bei Ultraschallmesstechnik

Die sogenannte „virtuelle“ oder auch „akustische“ Temperatur ist ein Nebenprodukt der Ultraschalltechnik und wird aus der gemessenen Laufzeit von Schallsignalen bestimmt. Wesentliche Einflussgrößen der virtuellen Temperatur sind die Luftdichte und die Messdistanz (Abstand Wandler-Wandler). Letztere geht quadratisch in die Berechnung ein, weshalb bereits geringe Abweichungen zwischen parametrierter und tatsächlicher Messdistanz den Wert der virtuellen Temperatur nachhaltig beeinflussen können. SICK empfiehlt gemäss Betriebsanleitung aus diesem Grund eine Kalibrierung der virtuellen Temperaturmessung gegen einen externen Temperatursensor.

Ausreisser bei der virtuellen Temperatur sind eine direkte Folge der Ausreisser bei der Luftströmungsgeschwindigkeitsmessung.

Statement Kalibrierung FLOWSIC200

Kalibrierung

Die Messeinrichtung FLOWSIC200 misst die Laufzeitdifferenz von Ultraschallsignalen entlang eines „Schallpfades“ (Schallstrahl zwischen den beiden Sende-/Empfangseinheiten). Unter Berücksichtigung von Installationswinkel und Länge der Messstrecke wird die Strömungsgeschwindigkeit auf dem Schallpfad bestimmt → „Pfadgeschwindigkeit“. Siehe hierzu auch BA FL200, S. 14-15.

Berechnung der Signallaufzeiten zwischen zwei Sende-/Empfangseinheiten (A/B)

$$t_{AB} = \frac{L}{c + v_p \cos(\alpha)}$$

$$t_{BA} = \frac{L}{c - v_p \cos(\alpha)}$$

Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit auf dem Schallpfad (Pfadgeschwindigkeit)

$$v_p = \frac{L}{2 \cos(\alpha)} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right)$$

Die tatsächlich im Tunnel existierende Strömung wird durch ein 3-dimensionales Strömungsprofil beschrieben und kann als „Flächengeschwindigkeit“ bezeichnet werden. Die Abweichung der Laufzeitmessung vom tatsächlichen Strömungsprofil kann näherungsweise durch das Verhältnis von Pfadgeschwindigkeit zu Flächengeschwindigkeit beschrieben werden:

$$\rightarrow VP/VF=K$$

Aus dem Verhältnis resultiert der Korrekturfaktor K.

In jedem Tunnel gibt es ausgeprägte Strömungsprofile, die durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren wie Tunnelprofil, Einbauten, Lüfter, Temperatur, Druck, Dichte usw. beeinflusst werden. Die daraus resultierende Strömungssituation hat einen entsprechenden Einfluss auf die Abweichung zwischen Pfad- und Flächengeschwindigkeit.

Die Korrektur der gemessenen Pfadgeschwindigkeit kann durch Bestimmung eines Korrekturfaktors (lineares Verhalten) oder durch Bestimmung einer Korrekturfunktion 2. Ordnung erfolgen. Dafür ist eine Strömungskalibrierung durch Vergleichsmessung mit geeignetem Referenzmessgerät erforderlich. Eine solche Kalibrierung ist nur direkt an der Einbaustelle des FLOWSIC200, also in der Tunnelinstallation und deshalb nicht beim Hersteller möglich. Siehe hierzu auch BA FLOWSIC200 S.24, Kapitel 2.3.1.

Eine Kalibrierung der Temperaturmessung des FLOWSIC200 ist bei exakter Bestimmung der Messstrecke im Allgemeinen nicht erforderlich, kann aber bei Bedarf durch Vergleichsmessung mit einem separaten Temperaturfühler (z.B. Pt100) durchgeführt werden.

Werkseitige Prüfung/Einstellung des FLOWSIC200

Prüfung der korrekten Laufzeitmessung der Ultraschallsignale auf dem Schallpfad

- Parametrierung des Messgerätes.
- Prüfung der Messgerätefunktion unter Umgebungsluftbedingungen mit definierter Messstrecke und exakt gemessenen Umgebungsbedingungen (externe Sensoren)
- Vergleich der vom FLOWSIC200 auf Basis der Laufzeitmessung ermittelten Schallgeschwindigkeit mit der für die aktuellen Umgebungsbedingungen berechneten Schallgeschwindigkeit in Luft.
- Vergleich der vom FLOWSIC200 auf Basis der Schallgeschwindigkeit ermittelten Lufttemperatur mit dem extern gemessenen Temperaturwert.

- Liegen die Abweichungen dieser beiden Vergleiche (Schallgeschwindigkeit und akustische Temperatur) innerhalb eng definierter Grenzen ist die ordnungsgemäße Funktion der Laufzeitmessung und die korrekte Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit auf dem Schallpfad (Pfadgeschwindigkeit) sichergestellt.
- Zusätzlich wird werksseitig geprüft und dokumentiert:
 - Signal-Empfangsverstärkung
 - Signal-Rausch-Abstand
 - Mechanische Festigkeit
 - Dichtheit

Kontrollzyklus

Siehe hierzu BA FLOWSIC200, S. 25, Kapitel 2.4.

Die zyklische oder manuelle Prüfung der Gerätefunktion mittels Kontrollzyklus ist jederzeit, also auch im eingebauten Zustand im Tunnel, möglich.

Verweis auf die Eignungsprüfung der Geräteserie FLOWSIC100

Das Messsystem FLOWSIC200 unterscheidet sich in Bezug auf Messprinzip und Signalauswertung nicht vom Gerät FLOWSIC100, welches als eignungsgeprüfte Messeinrichtung zur behördlich vorgeschriebenen Emissionsmessung an industriellen Anlagen eingesetzt wird. Bei der Eignungsprüfung des FLOWSIC100 wurde die Geräte Kennlinie in einem Windkanal ermittelt und eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten des FLOWSIC100 und den tatsächlichen Geschwindigkeiten in der Messachse nachgewiesen.

VI.6 SKN - Schiltknecht AG

VI.6.1 Fragenkatalog

Abb. VI.7 Fragen – Antworten von Schiltknecht AG

Fragen	Antworten
1 Vom Instrument ausgegebener Temperaturwert: Gemessen oder virtuell berechnet?	Effektiv an den Messpunkten im Fahrraum gemessen. Pro Messpunkt ein eigener PT100-Fühler.
2 Wenn Temperaturmessungen durchgeführt werden, z. B. mit on-board PT100: Wird dieser Messwert intern genutzt? Wenn ja, wozu?	Temperatur wird zwingend zur Berechnung der Dichte der Fahrraumluft verwendet. Fühler ragt vom Messumformer in den Fahrraum.
3 Beschreibung der Methodik zur Berechnung der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Beschreibung aller erforderlichen Messgrößen, um die Strömungsgeschwindigkeit ableiten zu können.	$V = \sqrt{2p_{\text{dyn}} / \rho}$ Rho: Dichte der Luft im Fahrraum, wird berechnet aus: Temperatur, statischer Druck, Gaskonstante für Luft und rel. Feuchte. Die beiden ersteren werden gemessen.
4 Interne Messwertglättung: Welches Prinzip wurde angewandt (z. B. linearer, gleitender Mittelwert oder gewichteter, gleitender Mittelwert)? Wie lang war die Mittlungszeit? Mit welcher Frequenz ändert sich der 4-20 mA Wert am analogen Ausgang?	Jeder Messumformer erfasst ca. 1000 Messwerte pro Sekunde. Von je 100 Werten wird das lineare Mittel bestimmt. Es stehen somit pro Sekunde 10 berechnete Werte zur Verfügung, die für die Strömungsausgänge gleitend gemittelt werden. Eingestellte Mittelung: wie verlangt 10s Die 4...20mA-Werte werden alle 0.1s aktualisiert.
5 Im Gerät hinterlegter Korrekturfaktor(en) zur Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum aus den Messwerten.	Kalibrierwerte für Druckmesszellen Kalibrierwerte für PT100-Fühler (0°C) Keine Korrekturfaktoren für die Strömungsgeschwindigkeit
6 Wurde eine Kalibrierung im Werk durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	Ja, Kalibrierung der Druckmesszellen und des PT100-Temperaturfühlers.
7 Wurde eine Kalibrierung vor Ort durchgeführt? Wenn ja, welcher Art?	Nein, eine solche ist nicht erforderlich.
8 Wie und wann bzw. in welchem Intervall erfolgt der Nullpunktgleich?	Nach Aufwärmprozess des Gerätes alle 5 Minuten.
9 Bei Punktmessungen: In welchem Abstand befand sich der Messkopf/Messbereich von der Tunnelwand?	360 mm (Achse Differenzdruckstaurohr)
10 Finden interne Plausibilitätskontrollen statt, welche z. B. zum Ausschluss von Messwertfehlern führen?	Ja, laufend. Elektrische Anschlüsse, interne Referenzen, Messbereiche, A/D-Wandler, Software, siehe auch 11 & 12
11 Liste der Argumente für eine Störungsmeldung	Die Liste ist sehr lang. Alle relevanten Fehler führen zu einer Störungsmeldung.
12 Liste der Argumente für eine Alarmmeldung	Siehe Punkt 11
13 Listenpreis des Geräts und typische Montagekosten	Listenpreis ist ca. CHF 5000...9000, je nach Ausführung, Montagekosten pro Anlage ca. CHF 1500.
14 Empfohlene Wartungsintervalle	5 Jahre
15 Beschreibung der Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten, einschliesslich Nachkalibrierungen	Reinigen der Staurohre, Prüfen der pneum. Dichtigkeit, ggf. Austausch der Filter, Messgenauigkeit der Druckmesszellen

VI.6.2 Stellungnahme zu den Resultaten

Der Bericht ist aus unserer Sicht korrekt und die Messwerte für uns nachvollziehbar, insofern ergibt sich hier für uns kein weiterer Bedarf eines Kommentars. Gerne nehmen wir aber Stellung zu den aufgetretenen Störungen.

Beim Fehler am PT100-Messfühler handelte es sich, wie im Bericht vermerkt um einen Wackelkontakt. Ursache dafür war eine bedauerliche Unachtsamkeit unsererseits bei der Installation des Fühlers, eine Klemmverbindung wurde nicht sauber ausgeführt. Der Messfühler an sich war nicht defekt. Somit ergibt sich keine Notwendigkeit, eine Änderung an unserem Produkt vorzunehmen.

Weiter haben Sie festgestellt, dass sich Flugrost an den Schweissstellen der Aufhängung und der Staurohre gebildet hat. Dies beeinträchtigt die Funktionstüchtigkeit der Messgeräte in keiner Weise, es handelt sich um ein rein „kosmetisches“ Problem. Durch eine verbesserte Oberflächenbehandlung, die wir in den Folgeserien bereits vorgenommen haben, wird der Ansatz von Flugrost minimiert.

Dr. Immo Reinhold
CEO

Oliver Ueckert
Sales



Bemerkungen zum Astra-Forschungsprojekt "Strömungsmessgeräte"

Aus den Erfahrungen des Forschungsprojektes wurden folgende Verbesserungen an den Geräten eingeführt:

1. Der einzige Ausfall eines Gerätes war auf eine Lötstelle an einem Pt100-Fühler zurückzuführen, die bleifrei ausgeführt und daher in erhöhtem Masse störanfällig war. Ab sofort wird diese Lötstelle wieder mit verbleitem Zinn ausgeführt. Dies führt zu einer erheblich reduzierten Ausfallwahrscheinlichkeit.
2. Für die verbesserte Handhabung bei der Überwaschung sind ab sofort abklappbare Staurohe lieferbar (ohne Mehrpreis).
3. Für eine deutlich einfachere und schnellere Installation ist jetzt eine Kompaktversion lieferbar, die ausschliesslich elektrische Verkabelung (keine pneumatische Verrohrung) erfordert. Mit der Kompaktversion geht eine deutliche Preisreduktion einher.
4. Wir sind neu akkreditiert für die Parameter Strömungsgeschwindigkeit und Druck (nach ISO 17025). Die von uns angegebenen Genauigkeiten werden also von einer staatlichen Stelle bestätigt, nämlich dem Eidgenössischen Institut für Metrologie METAS, Bern.

VII Produktbeschreibung der Strömungsmessgeräte

VII.1 Strömungsmessgerät ACP TK 300



Ultraschall Strömungs-Messgerät Typ ACP TK 300

Das Strömungsmessgerät ACP TK 300 nutzt die Ultraschalltechnologie zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung. Eine Mess-Einheit besteht aus 2 Sende- und 1 Empfängersensor.

Die Messung erfolgt punktuell an der Tunnelwand und bleibt vom Verkehr und durch Luftturbulenzen unbeeinflusst, da nur die Strömung in Längsrichtung erfasst wird und das Signal z.B. durch stehenden Verkehr nicht unterbrochen wird. Dank der festen Anordnung ist die Geometrie eindeutig definiert, wodurch die Montage und Inbetriebnahme erheblich vereinfacht wird.

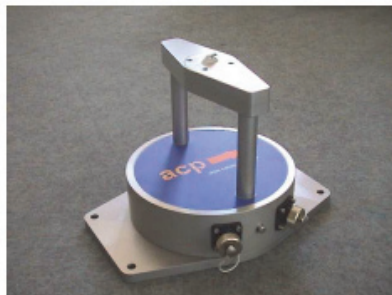
Der Messkopf hat keine beweglichen Teile und weist einen Schutzgrad von IP 67 auf. Die Messeinrichtung benötigt nur eine minimale jährliche Wartung.

Die Messköpfe werden seitlich an der Tunnelwand angeordnet, wobei eine Messstelle aus 2 Messköpfen besteht. Die Auswertung erfolgt in einer Steuereinheit CDU.

Der Messwertausgang kann wahlweise aus den 2 Einzel- oder einem Mittelwert über die beiden Messköpfen bestehen.

Eine Mittelungszeit kann beliebig eingestellt werden.

Geräteaufbau



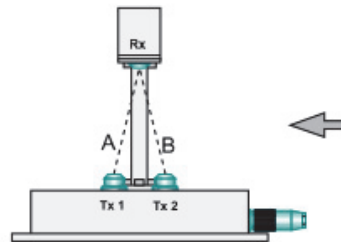
ACP TK 300 Ultraschall Strömungsmesser für Windrichtung und Geschwindigkeit bestehend aus:
2 Sender und 1 Empfänger
Kommunikation via RS 485 mit CDU



CDU, Auswerteeinheit
Anschluss bis zu 64 Sensoren über serielle Schnittstelle möglich
4 x 4-20mA Ausgänge, erweiterbar bis 8
4 x Relaisausgänge, erweiterbar bis 8
serielle Schnittstelle RS 485 oder ProfiBus DP
Stahl-Wandgehäuse oder als 19" Rack erhältlich



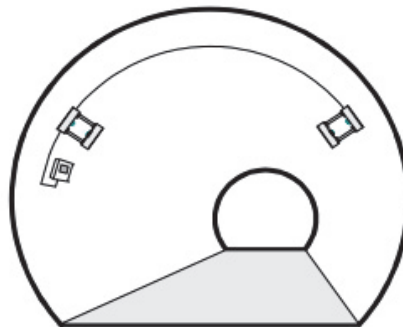
Messprinzip



Die Sender (Tx1 und Tx2) emittieren abwechslungsweise Schallwellen in Richtung des Empfängers (Rx). Im dargestellten Beispiel (Strömung von rechts), wird die Laufzeit der Schallwellen auf der Strecke B beschleunigt und entsprechend auf der Strecke A verringert. Aus der Laufzeit-Differenz resultiert schliesslich die Strömungsgeschwindigkeit und Richtung. Die so ermittelten Messsignale werden ausgewertet und zu einem Messwertausgang in m/s verarbeitet. Eine integrierte Temperaturmessung kompensiert zudem eventuelle Temperatureinflüsse. Diese Messung kann auch zusätzlich als Messwert ausgegeben werden.

2 Messköpfe bilden jeweils eine Messstelle, wobei das arithmetische Mittel aus den beiden Einzelwerten verwendet wird.

Messeinrichtung mit 2 Messköpfen



Montage und Installation

Die Messköpfe werden seitlich an der Tunnelwand in einer Höhe von 4 bis 4,5m montiert. Durch die Bauweise der Messköpfe, ist die Geometrie eindeutig definiert und somit ist keine aufwendige Ausrichtung oder Parametrierung notwendig. Die Messköpfe sind in einem Windkanal ab Werk kalibriert und sind nach dem Motto "Anschluss-fertig-los" betriebsbereit.

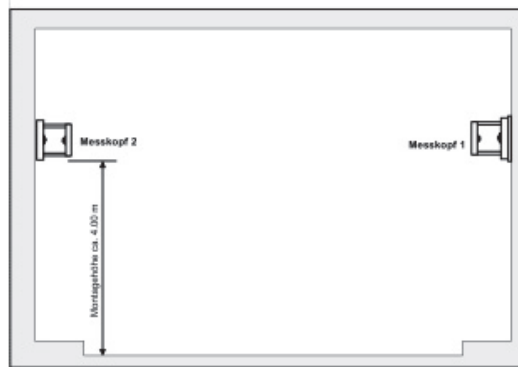
Mit Hilfe von Lüftungsversuchen und Vergleichsmessungen, können allfällige Korrekturen, z.B. aufgrund von baulichen Gegebenheiten, direkt am Messkopf korrigiert werden.

ACP Environment AG Längfeldweg 115b 2504 Biel Tel 032 341 67 31 Fax 032 341 67 39



Die Messköpfe werden mit 1m Kabel, Anschlussdose und Steckverbindung geliefert und können somit z.B. bei einem Ausfall oder für die Tunnelreinigung einfach und schnell demontiert werden.

Ein Montagehalter gehört zum Lieferumfang, sodass die Installation vorgängig vorbereitet werden kann. Zudem wird dadurch eine allfällige Demontage oder ein Austausch vereinfacht.



Montagebeispiel



Messkopf mit Montagehalter und Anschlussdose



Wartung und Unterhalt

Die Windmessung erfolgt direkt im Fahrraum. Demzufolge sind die Messköpfe einer erhöhten Verschmutzung ausgesetzt. Um eine korrekte Funktion gewährleisten zu können, sind diese mindestens 1x jährlich zu kontrollieren und zu reinigen.

Die Reinigung beschränkt sich hauptsächlich auf die Schallgeber. Diesen können mit einem weichen Tuch und einem Reinigungsmittel abgerieben werden. Je nach Art der Verschmutzung eignet sich auch die Verwendung eines Oxydationslöser.

Die Überprüfung der Messwerte kann z.B. mit einem portablen Anemometer erfolgen oder mit Hilfe einer Schachtel, welche über den Messkopf gehalten wird, um eine „Nullströmung“ zu erzeugen. Treten Abweichungen > 0.2m/s auf, können diese direkt über die RS232 Schnittstelle am Messkopf kompensiert werden.

Tunnelreinigung

Die Messköpfe sind so konstruiert, dass diese dem Druck der Waschbürsten standhalten.

Vorteile gegenüber der Quermessung

Die Punktmessung bietet gegenüber der Quermessung einige wesentliche Vorteile.

Ausfall eines Messkopfes:

Sollte bei der Anordnung mit 2 Messköpfen ein Messwert ausfallen, so steht nach wie vor noch der 2. Messwert zur Verfügung, da jeder Messkopf autonom ist.

Unterbruch der Messtrecke:

Die Windmessung ist vor allem bei einem Brand von grosser Bedeutung. Da sich in so einem Fall der Verkehr staut, besteht bei einer Quermessung die Möglichkeit, dass die Messtrecke durch hohe Fahrzeuge unterbrochen wird. Um dies zu verhindern, werden diese Geräte oftmals z.T. knapp unter der Decke montiert, was zu Verfälschungen aufgrund von Schallreflexionen an der Decke führen kann. Zudem kann dies auch zu unrepräsentativen Resultaten führen, da hier der direkte Luftstrom der Strahlventilatoren stärker wirkt.

Montage und Installation:

Die Punktmessung ist einfach zu installieren und kann zudem ohne grossen Aufwand ausgetauscht werden. Die Quermessung hingegen muss ausgerichtet und genau ausgemessen werden.

Messwerte:

Die Quermessung ist weit verbreitet und sehr beliebt, da diese einen Mittelwert über das Tunnelprofil bildet (jedoch nur auf der entsprechenden Montagehöhe).

Bei mehreren Lüftungsversuchen wurde jedoch nachgewiesen, dass eine seitlich angeordnete Punktmessung mit 2 Messköpfen, praktisch identische Messwerte liefert. Zudem muss die Quermessung von Fachpersonen installiert und vor allem genau parametrisiert werden.

VII.2 Strömungsmessgerät Codel TunnelCraft 3

Product Data Sheet

CODEL Tunnel Atmosphere Monitoring

TunnelCraft 3 - Air Flow Monitor (S) Air Flow & Direction

Low-cost Precision Tunnel Sensors

- Single point ultrasonic measurement technology, uninterrupted by traffic flow and sound reflections
- No moving components providing maintenance free operation
- Stainless steel construction, designed to withstand the harshest of tunnel environments
- Measurement precision of +/- 0.2m/sec
- Integral temperature measurement



Tunnel Atmosphere Monitoring www.codel.co.uk

Doc I/d : 100047 Issue : A Rev : 6 Date : 2/11/2011 © 2010 CODEL International Ltd. We reserve the right to modify designs without prior notice.

TunnelCraft 3 - Air Flow Monitoring in Road Tunnels

The TunnelCraft 3 Air Flow Monitor (AFM-S) is CODEL's industry proven tunnel air flow monitor.

Tunnel ventilation systems are designed to enable a sufficient throughput of air to be maintained to ensure a safe operating environment. These systems consume large amounts of power and need to be operated as efficiently as possible. To do this it is necessary to know the effectiveness of the system in terms of air flow and direction developed within the tunnel.

Three decades of development, knowledge and practical experience have been utilised to produce this advanced technology tunnel sensor that combines the reliability of ultrasonic technology whilst delivering superb accuracy and reliability at a very competitive price.

An ultrasonic transmitter and 2 receivers are contained in a single compact unit that can be mounted on the tunnel wall.

Sound waves from the transmitter Tx are received by the two receivers Rx1 & Rx2 as shown in figure 2. With no air flow the sound transmission time to the receivers Rx1 and Rx2 will be equal. The sound wave received at Rx1 will be exactly in phase with that at Rx2. When air flow exists as shown in figure 2 the air flow opposes the sound transmission to receiver 1 along path A thereby increasing the sound transmission time, while sound transmission to receivers 2 along B is enhanced thus reducing transmission time. The result is that a phase shift develops between Rx1 and Rx2.

This phase shift is directly proportional to air velocity and direction. These phase shifts can be measured extremely accurately to provide a continuous and very reliable measurement of air velocity over a range -20 to +20m

The sensor contains no moving components and requires no routine maintenance.

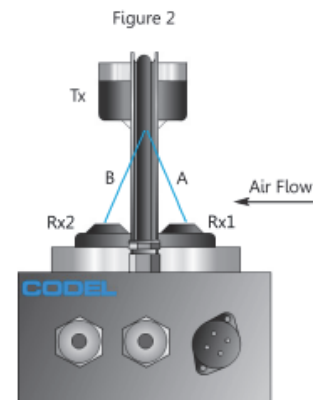
Fully configurable analogue and alarm outputs are provided. An RS485 link can be utilised to deliver MODBUS protocol to a SCADA system located in the tunnel control centre.

Over the last 15 years CODEL tunnel sensors have been supplied to more than 400 road and rail tunnels throughout the world. Our impressive reference list includes Eurotunnel France, Mont Blanc Tunnel France, Dartford Tunnel UK, Lane Cove Tunnel Australia, Snow Mountain Tunnel Taiwan and the SMART Tunnel in Malaysia, plus many others throughout China, Italy, Switzerland and South Korea placing CODEL as a world leader in tunnel atmosphere monitoring.

CODEL's tunnel sensor range is further extended by additional sensors for the measurement of CO, NO, Visibility and NO₂.

Please see additional product data sheets:-

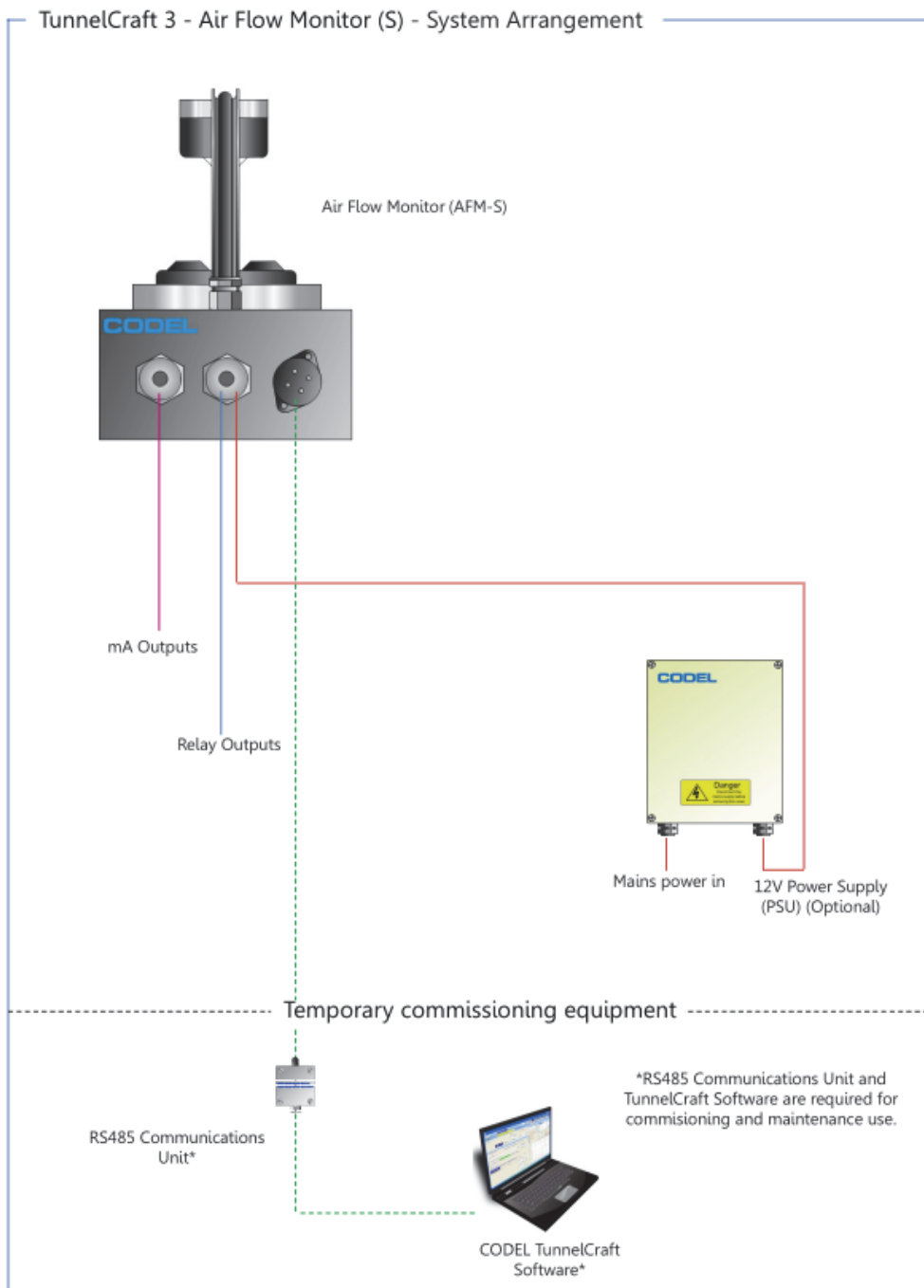
- TunnelCraft Air Quality Monitor
For the measurement of Carbon Monoxide, Nitric Oxide & Visibility.
- TunnelCraft NO₂ Monitor
For the measurement of Nitrogen Dioxide.



Tunnel Atmosphere Monitoring

www.codel.co.uk

Doc i/d : 100047 Issue : A Rev : 6 Date :2/11/2011 © 2010 CODEL International Ltd. We reserve the right to modify designs without prior notice



Tunnel Atmosphere Monitoring

www.codel.co.uk

Doc id : 100047 Issue : A Rev : 6 Date : 2/11/2011 © 2010 CODEL International Ltd. We reserve the right to modify designs without prior notice

TunnelCraft Software

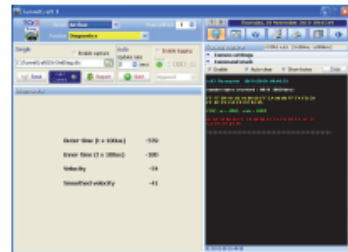
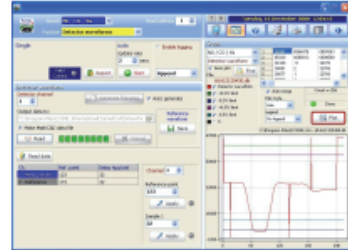
- Easy installation and set-up
- Will operate on any Windows based operating system
- Allows sensor's configuration settings to be adjusted
- Fault diagnostic logging for sensor troubleshooting

TunnelCraft 3 Software is supplied with all CODEL Tunnel Sensor's as standard for the purpose of commissioning and maintenance of the sensors. With simple installation and set-up routine to any Windows based laptop PC, the program takes only minutes to load and configure and comes with a comprehensive on-board help feature.

The software enables the sensor's complete data and control functions to be accessed via a PC using an RS485 communications box.

Zero calibrations can be initiated via the software after commissioning or during a maintenance period. Should it be necessary to alter the initial factory-set current and relay output configuration then this can also be carried out with ease.

For maintenance the software includes short-term logging and trending of diagnostic data for fault analysis.



Communication Interfaces



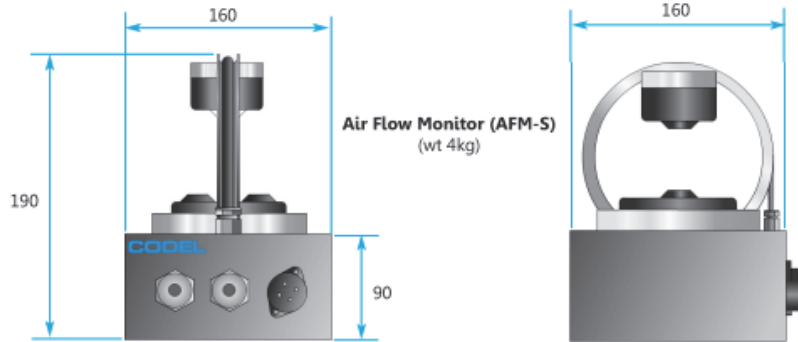
RS485 Unit

Tunnel Atmosphere Monitoring

www.codel.co.uk

Doc i/d : 100047 Issue : A Rev : 6 Date :2/11/2011 © 2010 CODEL International Ltd. We reserve the right to modify designs without prior notice

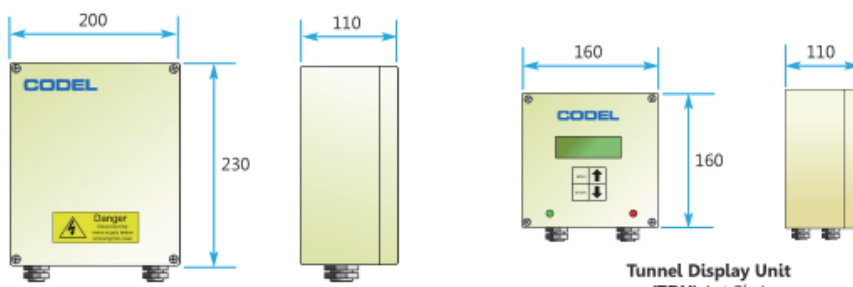
TunnelCraft 3 - Air Flow Monitor (S) - Overall Dimensions



Air Flow Monitor (AFM-S)
(wt 4kg)

Note: All dimensions are in mm

Overall Dimensions - Power Supply Unit & Tunnel Display Unit (Optional)



Power Supply Unit (PSU)
(wt 4kg)

Tunnel Display Unit (TDU)
(wt 2kg)

Note: All dimensions are in mm

Tunnel Atmosphere Monitoring

www.codel.co.uk

Doc i/d : 100047 Issue : A Rev : 6 Date : 2/11/2011 © 2010 CODEL International Ltd. We reserve the right to modify designs without prior notice

TunnelCraft 3 Air Flow Monitor (S) - Technical Specification

Sensor Unit

Measurements	Air flow, direction and temperature
Flow Units	m/sec
Measurement Technique	Ultrasonic
Measurement range (typical*)	-20 to +20m/sec
Accuracy	+/- 0.2m/sec
Response Time	10 Seconds
Temperature Units	°C
Measurement Technique	PT100
Measurement range (typical*)	-25°C to +50°C
Accuracy	0.1°C
Response Time	10 Seconds
Ambient Temperature	-20°C to +50°C
Power supply requirement	9 to 36V DC, 1% pk-pk, 20 MHz bandwidth (3VA Max) from separate power supply
Construction	Stainless Steel 316 to IP67

Compliances

EMC	EN61326-1:2006 & EN50270:2006 directive compliant
Low Voltage	73/23/EEC directive compliant

Communications & Outputs

Flow Analogue outputs	1 x 4-20mA current output, 400Ω max load, range 0 to 20m/sec
Temp Analogue outputs	1 x 4-20mA current output, 400Ω max load, range -25°C to +50°C
Relay Outputs	2 x volt-free SP contacts, 50V 400mA max, for flow direction and fault condition
Communications Port	RS485 for local communication with laptop or modbus protocol

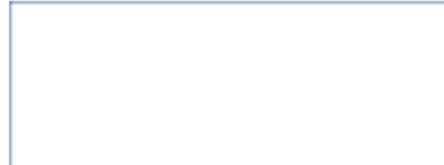
Optional Items

Power Supply	90/264V AC, 47-63Hz, 60W 12V DC @5A (or 24V DC @ 2.5A)
Tunnel Display Unit	For local display of sensors outputs
Serial Data	RS485 Modbus Protocol

CODEL International Ltd
 Station Building
 Station Road
 Bakewell
 Derbyshire
 DE451GE
 United Kingdom

Tel : +44 (0)1629 814351
 Fax : +44 (0)8700 566307
 Web : www.codel.co.uk
 Email : sales@codel.co.uk

Distributor



Tunnel Atmosphere Monitoring

www.codel.co.uk

Doc I/d : 100047 Issue : A Rev : 6 Date : 2/11/2011 © 2010 CODEL International Ltd. We reserve the right to modify designs without prior notice

VII.3 Strömungsmessgerät Durag D-FL 220T

DURAG GROUP

Tunnel Monitoring

- Visibility
- Air speed,
- Direction of air flow
- Temperature
- Trace gas concentration (CO, NO, NO₂)

DURAG GROUP smart solutions for combustion and environment

Tunnel Monitoring

DURAG GROUP

Application

Ventilation in tunnels shall provide for adequate breathing air for drivers and maintenance staff in tunnels as well as for sufficient visibility in the tunnel atmosphere which is contaminated with exhaust and dust. Also emission of pollutants to the environment shall be minimized and in case of fire it shall reduce the effect of heat and smoke.

DURAG produces service reduced sensors and analysers, which precisely and reliably transmit the data of tunnel atmosphere to the ventilation control system.

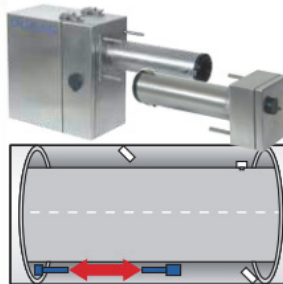
2004/54/EC "tunnel" guideline as well as the national specifications for installations in tunnels are included in the design of DURAG sensors.

Redundancy and system stability are essential. Therefore DURAG offers separated sensors. This allows the ventilation control system to effectively perform the mandatory plausibility checks of the sensor signals. Separated sensors can be placed at the ideal mounting positions.

The sensors are rugged and will withstand corrosive tunnel atmosphere as well as tunnel cleaning procedures. The units can be mounted quickly. Maintenance is minimized and units can be exchanged in case of malfunction immediately.

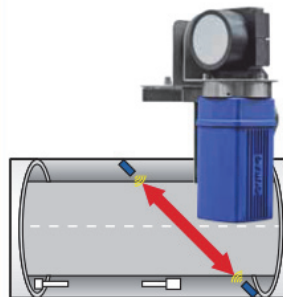
The DURAG delivery program includes sensors and analysers for

- Visibility
- Air speed and direction of air flow
- Trace gas concentration (CO, NO, NO₂)
- Particulate measurement (PM 2.5 and PM 10).



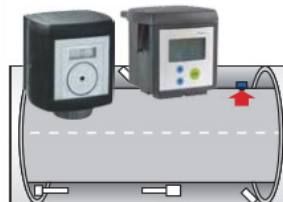
D-RV 290 Visibility Monitor

- Continuous measurement of visibility parallel to tunnel axis
- Representative measurement along a 10-12m measuring path
- Suitable for early fire detection
- Easy installation and menu-driven operation
- Window contamination correction performed automatically
- Long maintenance intervals
- Rugged SS316Ti stainless steel housing, IP65 enclosure rating



D-FL 220T Ultrasonic Air Flow Monitor

- Continuous measurement of flow velocity, direction and temperature
- Representative measurement across the tunnel profile
- Principle follows the evaluation of differential transition times of ultrasonic pulses
- Automatic zero-point and span test
- No separate control unit required
- Minimized maintenance requirements
- Corrosion resistant
- No influence of smoke on the system in case of fire.



D-G 102 PM / D-G 105 PA Trace Gas Sensor Systems

- Modular stationary system for local measurement of trace gases CO or NO or NO₂
- System consists of docking station, transmitter electronics and a sensor as consumable item
- The docking station is mounted and wired
- No wiring work is required when the transmitter is mounted or dismounted to the docking station
- Transmitter available for signal transfer as 4-20mA signal (D-G 102 PM) or via Profibus PA (D-G 105 PA)
- Electrochemical sensors include memory with sensor data and are plugged to transmitter
- Electrochemical sensors are available for CO or NO or NO₂.

©DURAG GROUP 04/2010 - ASubject to change without notice

DURAG

DURAG GmbH
Kollastrasse 105,
22453 Hamburg, Germany
Tel. +49 (0)40 55 42 18-0
E-Mail: info@durag.de

DURAG France S.a.r.l.
Parc GIP Charles de Gaulle
49, rue Léonard de Vinci
95691 Goussainville CEDEX
France
Tel. +33 (0)1 301 811 80
E-Mail: info@durag-france.fr

DURAG UK Office
Suite 17, Brookside Business Park
Cold Meece, Stone, Staffordshire
ST15 0RZ, United Kingdom
Tel: +44 (0)1785 760 007
E-Mail: durag.uk@durag.de

DURAG, Inc., USA
1355 Mendota Heights Road
Suite 200, Mendota Heights
MN 55120, USA
Tel. +1 651 451-1710
E-Mail: durag@durag.com

DURAG India
Instrumentation Ltd
#143/16, Ground Floor
4th Main Road
Industrial Town, Rajajinagar
Bengaluru 560 044, India
Tel. +91 (0)80 23 14 56 26
E-Mail: info@duragindia.com

DURAG

DURAG data systems
Kollastrasse 105,
22453 Hamburg, Germany
Tel. +49 (0)40 55 42 18-0
E-Mail: info@durag.de

DURAG process & systems
technology gmbh,
Kollastrasse 105,
22453 Hamburg, Germany
Tel. +49 (0)40 55 42 18-0
E-Mail: info@durag-process.de

Hegwein

Hegwein GmbH,
Am Boschwerk 7
70469 Stuttgart, Germany
Tel. +49 (0)711 135 788-0
E-Mail: info@hegwein.de

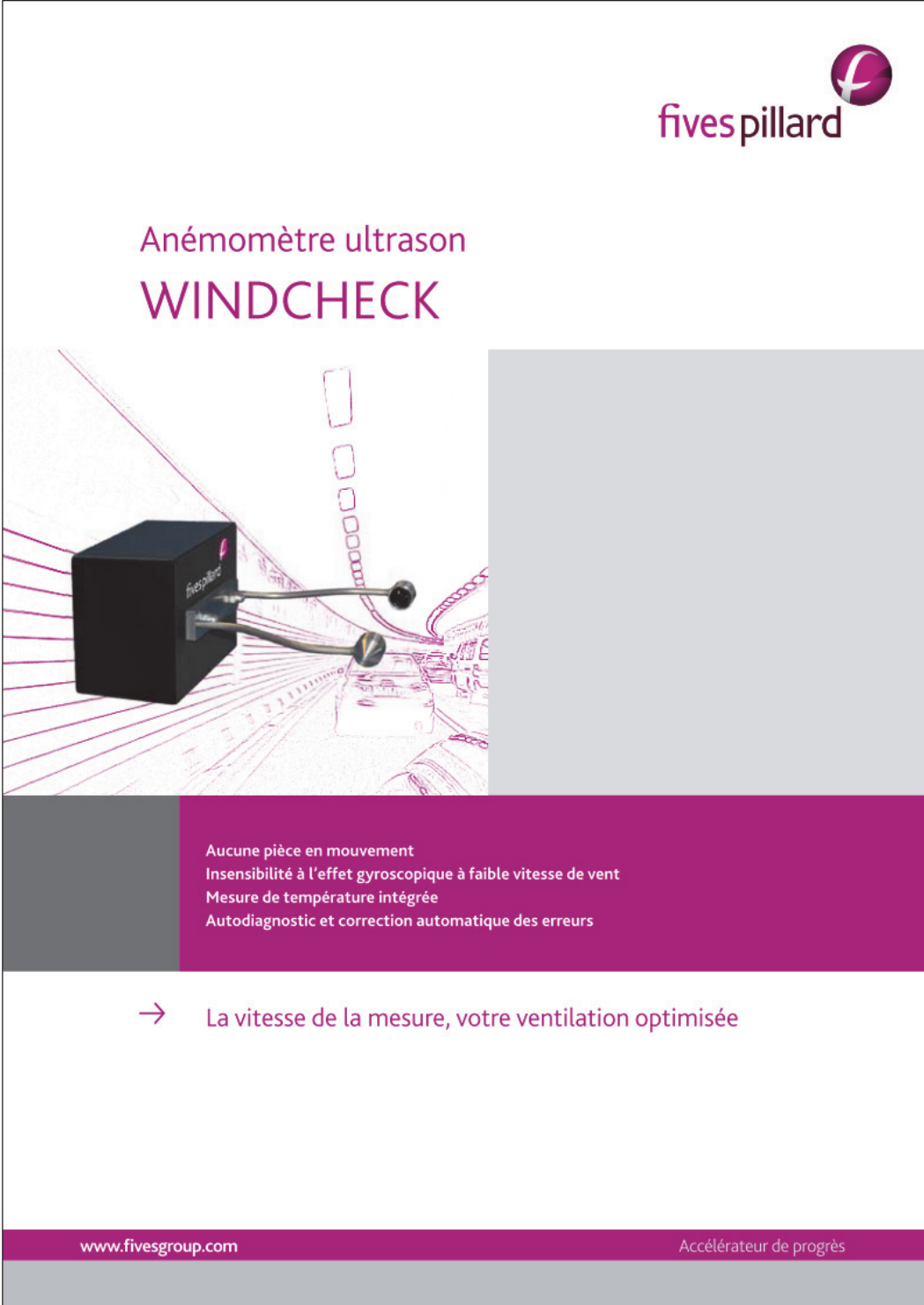
SMITSVONK
Smitsvonk Holland B.V.
Loodstraat 57
2719 RV Zoetermeer
Netherlands
Tel. +31 (0)79 361 35 33
E-Mail: sales@smitsvonk.nl

VEREWA

VEREWA GmbH
Kollastrasse 105
22453 Hamburg
Germany
Tel. +49 (0)40 55 42 18-0
E-Mail: verewa@durag.de

www.durag.de

VII.3.1 Strömungsmessgerät Fives Pillard



The advertisement features a central image of the WINDCHECK ultrasonic anemometer, a black rectangular device with two sensors extending from its front. The background is a stylized, wireframe illustration of a tunnel with cars, overlaid with red lines representing airflow or sensor beams. The Fives Pillard logo is in the top right corner. A purple banner at the bottom contains the product name and key features.

fivespillard

Anémomètre ultrason
WINDCHECK

Aucune pièce en mouvement
Insensibilité à l'effet gyroscopique à faible vitesse de vent
Mesure de température intégrée
Autodiagnostic et correction automatique des erreurs

→ La vitesse de la mesure, votre ventilation optimisée

www.fivesgroup.com Accélérateur de progrès



La mesure de la vitesse et de la direction du vent dans un tunnel routier permet d'optimiser la stratégie de ventilation. Il est important de limiter la dépense énergétique due à la consommation importante des ventilateurs tout en répondant aux objectifs suivants :


- assurer aux personnes qui empruntent l'ouvrage, une qualité de l'air satisfaisante avec une concentration des gaz toxiques inférieure aux dispositions réglementaires,
- assurer une transparence de l'air, garant de confort et de sécurité,
- extraire les fumées en cas d'incendie afin de protéger les usagers,
- assurer une bonne visibilité pour faciliter les interventions des services de secours et de lutter contre l'incendie,
- obtenir une vitesse nulle de l'air sur le point d'un incendie afin d'éviter d'alimenter le foyer en oxygène.

Fort de son expérience dans le domaine de l'instrumentation, Fives Pillard a développé un appareil de nouvelle génération utilisant la technologie ultrasonique pour mesurer la vitesse du vent sur un axe. Le principe est basé sur la mesure de déplacement d'une onde ultrasonique. Deux transducteurs sont alternativement émetteurs et récepteurs. Les temps de transit aller et retour, induit par le flux de l'air, sont mesurés. Le calculateur interne, par différence des temps, établit la vitesse et le sens du vent par rapport à son axe de référence. La valeur, exprimée en mètre par seconde, est disponible au moyen d'une sortie analogique (4/20mA).

CARACTERISTIQUES	
Capteur	
Plage vitesse	-20 à +20 m/s
Résolution vitesse	0,1 m/s
Précision vitesse	0,5%
Direction du vent	bidirectionnel
Plage température	-40 à +60 °C
Résolution température	0,1 °C
Précision température	±1 °C
Caractéristiques générales	
Température d'utilisation	-40 à +70°C
Alimentation	24 VDC -15%/+10%
Consommation	3 W
Sortie analogique	4 – 20 mA / Défaut < 4mA
Sortie numérique	oui
Protection	IP66
Dimensions	310 x 120 x 300 mm (boîtier + capteur)
Masse	2 Kg
Console	
Affichage	LCD
Commandes	4 boutons
Connexion	câble 4/20 mA
Normes et agréments	
En conformité avec	EN 61000-6-1 , EN 61000-6-3 , EN 60947-1


VII.4 Strömungsmessgerät Sick Flowsic200

PRODUCT INFORMATION



FLAWSIC200
Flow Velocity Measuring Device

Measuring flow velocity and
air temperature in tunnels



SICK
Sensor Intelligence.

FLAWSIC200

The measuring titan in the tunnel for long-term operation

AREAS OF APPLICATION

- Measuring the air velocity and flow direction as well as optionally the temperature for
 - ventilation control in road and railway tunnels or similar structures
 - detection of smoke propagation during tunnel fires for efficient fire fighting

FLAWSIC200 M

- For tunnel diameters up to 20 m
- Aluminium version with die-cast enclosure for tunnels with low road salt usage or minimal corrosive atmospheres
- Stainless steel version for tunnels with road salt usage or corrosive atmospheres
- Maintenance interval: typically 1 to 2 years
- Ultrasonic transducers made of aluminium


FLAWSIC200 H

- High acoustic power for large tunnel diameters up to 35 m
- Stainless steel version
- Maintenance interval: typically up to 5 years
- Ultrasonic transducers from long-lasting titanium – for highly corrosive tunnel atmospheres

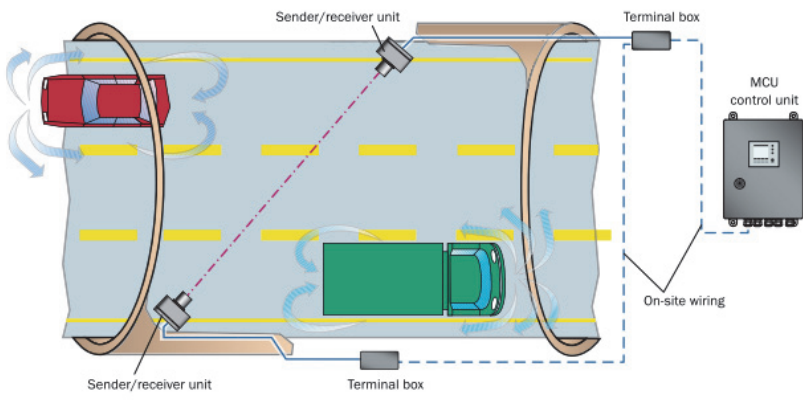
PERFORMANCE FEATURES

- Non-contact measuring system without any moving parts for lowest operating costs and long maintenance intervals
- Integral measurement over the full tunnel width for representative measuring results – imperative according to tunnel experts, especially when the system is designed for fire hazards
- Precise measurement also for very low flow velocities; therefore perfectly suitable for the assessment of portal emissions





SYSTEM COMPONENTS

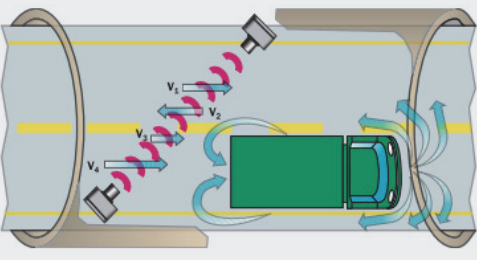


ULTRASONIC MEASUREMENT PRINCIPLE

Two ultrasonic transducers typically installed at an angle of 45° to the tunnel axis operate alternately as sender and receiver. The transit time of each sonic pulse depends on air velocity and direction, with the transit time being shorter in forward and longer in reverse direction. Air velocity is calculated from the ultrasonic transit time difference.

Advantages of this method:

- Measured and actual air velocity (averaged over the complete tunnel cross-section) are very much in agreement. Large differences can occur with single-point measurements – even indication of the wrong flow direction.
- Independent of pressure and temperature
- Acoustic temperature measurement possible



FLAWSIC200 | SICK 3

8012624-2008-10/V2.0 - D/03/WE - Printed in Germany (2008-10) - Subject to change without notice - The specified product features and technical data do not represent any guarantee

Technical Data		FLAWSIC200			
Type of models	FLAWSIC200 M	FLAWSIC200 H			
Measuring Parameters					
Measuring principle	Measurement of difference in ultrasonic transit time				
Measuring components	Air velocity, direction and temperature				
Measuring ranges	-20 m/s ... +20 m/s; continuously variable				
Active measuring path	5 ... 25 m with FLSE200-M and -MSS	5 ... 40 m with FLSE200-H; longer on request			
Accuracy	±0.1 m/s (depending on calibration, installation, flow profile, temperature and measuring distance)				
Ambient Conditions					
Ambient temperature	-40 ... +60 °C				
Approvals					
Compliances	<ul style="list-style-type: none"> • RABT 2006 • ASTRA "Guideline - Ventilation of Road Tunnels", 2004, V1.2 • RVS 09.02.22¹⁾ 				
Protection class	<ul style="list-style-type: none"> • IP 66 for FLSE • IP 65 for MCU 				
Electrical safety	CE				
Control Unit Inputs and Outputs					
Analog outputs ²⁾	1 output: 0/2/4 ... 22 mA, max. load 750 Ω				
Analog inputs ²⁾	2 inputs: 0 ... 5/10 V or 0 ... 20 mA				
Digital outputs ²⁾	5 outputs: 30 V DC/2 A or 120 V AC/1 A; potential-free Status signals: Operation/malfunction, maintenance, function check, service requirement, limit value				
Digital inputs ²⁾	4 inputs for the connection of potential-free contacts				
Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> <li style="width: 50%;">• USB (service) <li style="width: 50%;">• RS485 with optional interface module <li style="width: 50%;">• RS232 <li style="width: 50%;">• Ethernet with optional interface module 				
Bus protocol	<ul style="list-style-type: none"> • TCP/IP via Ethernet (optional interface module) • PROFIBUS DP via RS485 (optional interface module) • Modbus via RS485 or Ethernet on request 				
General					
System components	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • 2 sender/receiver units FLSE200-M or FLSE200-MSS • 1 MCU control unit (19" rack, option) • 2 terminal boxes • 2 connection cables (FLSE200 - terminal boxes) • 2 mounting brackets </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • 2 sender/receiver units FLSE200-H • 1 MCU control unit (19" rack, option) • 2 terminal boxes • 2 connection cables (FLSE200 - terminal boxes) • 2 mounting brackets </td> </tr> </table>			<ul style="list-style-type: none"> • 2 sender/receiver units FLSE200-M or FLSE200-MSS • 1 MCU control unit (19" rack, option) • 2 terminal boxes • 2 connection cables (FLSE200 - terminal boxes) • 2 mounting brackets 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 sender/receiver units FLSE200-H • 1 MCU control unit (19" rack, option) • 2 terminal boxes • 2 connection cables (FLSE200 - terminal boxes) • 2 mounting brackets
<ul style="list-style-type: none"> • 2 sender/receiver units FLSE200-M or FLSE200-MSS • 1 MCU control unit (19" rack, option) • 2 terminal boxes • 2 connection cables (FLSE200 - terminal boxes) • 2 mounting brackets 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 sender/receiver units FLSE200-H • 1 MCU control unit (19" rack, option) • 2 terminal boxes • 2 connection cables (FLSE200 - terminal boxes) • 2 mounting brackets 				
Operation	Via the display on the MCU control unit or the SOPAS ET software				
Control function	Internal function check (zero and control point test)				

¹⁾ Only version with stainless steel enclosure
²⁾ Extensible by additional I/O modules

SICK MAIHAK GmbH | Analyzers and Process Instrumentation
 Nimbunger Str. 11 | D-79276 Reute | Germany | www.sick-maihak.de
 Phone +49 7641 469-0 | Fax +49 7641 469-1149 | info.pa@sick.de



VII.5 Strömungsmessgerät Schiltknecht TMS 3000



LUFTSTRÖMUNGSMESSUNG
ZUR VENTILATIONSREGELUNG
IN AUTOBAHNTUNNELN



LUFTSTRÖMUNGS-
MESSSYSTEM TMS 3000

- Optimale Anpassung an die jeweiligen baulichen Gegebenheiten durch abgesetzte Bauform
- Robuste Sensormechanik ohne bewegte Teile
- Praktisch wartungsfrei
- Einwandfreie Messung auch im Brandfall
- Stufenlose Gebläsesteuerung möglich
- Messung in Tunnellängsrichtung

LUFTSTRÖMUNGS-MESSSYSTEM TMS 3000

Die Belüftung von Autobahntunneln sorgt dafür, dass Abgase (vor allem Kohlenmonoxid) und Schmutzpartikel aus der Tunnelröhre herausgebracht werden. Effizient und wirtschaftlich wird die Belüftung, wenn man sie über die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in der Tunnelröhre steuern oder regeln kann. Strömungsmessgeräte TMS 3000 messen genau die (allein interessierende) Strömungsgeschwindigkeit in Tunnel längsrichtung. Lokale Verwirbelungen, die der Autoverkehr durch die Tunnelröhre stets mit sich bringt, bleiben unberücksichtigt.

TMS 3000 mitteln die Strömungsgeschwindigkeit v_z in Tunnel längsrichtung (z – Richtung) über den Tunnelquerschnitt und geben somit den wirklichen Volumendurchfluss des Fluids Luft durch die Tunnelröhre an.

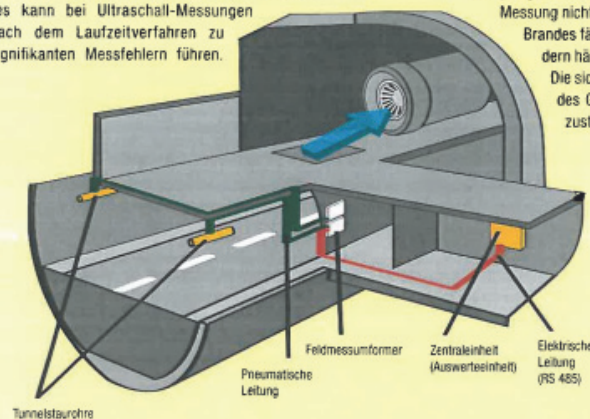
Die Transversalkomponenten v_x und v_y , die nicht zum Lufttransport in Tunnel längsrichtung z beitragen, bleiben unberücksichtigt.

Auch ein hohes Verkehrsaufkommen in einem Tunnel kann die Messung nicht beeinträchtigen. Letzteres kann bei Ultraschall-Messungen nach dem Laufzeitverfahren zu signifikanten Messfehlern führen.

Die Messung wird verwirklicht durch zwei spezielle Wirkdruckkammern aus Edelstahl, die auf Grund ihrer Form die Strömungsgeschwindigkeit in z -Richtung messen. Der nach der Bernoulli-Gleichung dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit proportionale Differenzdruck (Wirkdruck) wird über Druckleitungen dem getrennt montierten oder in der Zentraleinheit integrierten Messumformer zugeleitet, wo der Geschwindigkeitswert ermittelt wird.

Die hochgenaue Differenzdruckmessung basiert auf einer periodischen automatischen Nullung (Autozero-Verfahren) sowie einer hochauflösenden Analog-/Digital-Umwandertechnik. Die Strömungsgeschwindigkeit kann somit in sehr hoher Auflösung ($< 0,1$ m/s) gemessen werden.

Die Differenzdruckmessung erfolgt entweder in dem abgesetzten Feldmessumformer oder in der zentralen Auswerteeinheit. Das bedeutet, dass sich im Fahrraum keinerlei bewegte mechanische Teile oder elektronische Bauelemente befinden. Dies ist von grossem Vorteil für die Servicefreundlichkeit: die Stauraure werden so ausgelegt, dass eindringender Schmutz oder Wasser die Messung nicht beeinträchtigen. Im extremen Fall eines Brandes fällt die Messung ebenfalls nicht aus, sondern hält heissen Gasen bis über 1200 °C stand. Die sichere und quasikontinuierliche Steuerung des Gebläses unter praktisch allen Betriebszuständen ist also gewährleistet.

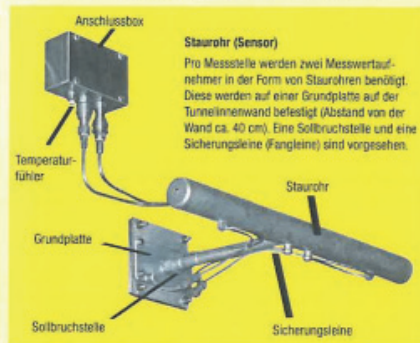


Das Bild zeigt eine typische Installation in einem Tunnel mit Deckenauslass. Die Tunnelstauraure befinden sich in ca. 3 m Höhe links und rechts auf der Tunnelwand (Abstand ca. 40 cm). Die Feldmessumformer sind in räumlicher Nähe zu den Staurauren geschützt montiert. Die elektronische Auswerteeinheit ist z. B. in einem Schaltschrank des Kontrollzentrums ausserhalb der Tunnelröhre untergebracht.



Luftströmungs-Messgeräte TMS 3000 sind speziell für die in Strassentunneln herrschenden Bedingungen konzipiert. Im Fahrraum befinden sich nur robuste mechanische Sensoren aus Edelstahl, die Auswertelektronik wird im separaten Schaltraum untergebracht. Die hochauflösende Messung gestattet eine stufenlose Gebläseregelung und damit eine wirksame Optimierung der Ventilatoren und des Energieverbrauchs.

Unsere Geräte sind seit Jahren erfolgreich im Einsatz in längeren (z.B. Gotthard, Schweiz, oder Plabutsch, Österreich) oder kürzeren Tunneln (z.B. Universitäts-Tunnel Düsseldorf, Deutschland).



Die Messung beruht auf einem hochpräzisen Wirkdruckverfahren und der damit möglichen genauen Durchflussmessung des Fluids Luft durch die Tunnelröhre. Die Daten von dem abgesetzten Feldmessumformer werden in die Zentraleinheit digital übertragen (RS 485).

Messumformer

Der Differenzdruck-Messumformer MU3000D kann entweder im abgesetzten Feldgehäuse montiert werden oder als Modul in das 19"-Rack der Zentraleinheit eingebaut sein.

Feldmessumformer (Bei Bauform A)



Messumformermodul zum Einbau in die Zentraleinheit (Bei Bauform B)



Zentraleinheit (Auswerteeinheit)

Für verschiedene Module wie Messumformermodul, Barometermodul, Temperaturmodul in 19"-Rack von 42 TE.



Bei Erstausrüstung und Nachrüstung von Tunneln ergeben sich wesentliche und teilweise unschlagbare Vorteile:

- **Optimale Anpassung an die jeweiligen baulichen Gegebenheiten durch abgesetzte Bauform.**
- **Robuste Sensoren aus Edelstahl.**
- **Keine bewegten Teile.**
- **Im Fahrraum gibt es keine aktiven Elektronikkomponenten.**
- **Das Mess-System ist praktisch wartungsfrei (empfohlenes Inspektionsintervall 5 Jahre).**
- **Auch im Brandfall bleibt eine einwandfreie Messung gewährleistet.**
- **Hohe Auflösung in beiden Strömungsrichtungen von unter 0.1 m/s.**
- **Kalibrierung durch unsere akkreditierte Messstelle für Luftströmungsgeschwindigkeiten (ISO 17025).**
- **Mittelung der Strömungsgeschwindigkeit über den Tunnelquerschnitt führt zu einer genauen Durchflussmessung ohne Beeinträchtigung durch den Strassenverkehr.**
- **Absolute Nullpunktstabilität durch Autozero-Verfahren (automatische periodische „Nullung“ der Differenzdruck-Messzellen).**
- **Luftdruckmessung bereits enthalten.**
- **Der Messwertempfänger in Form eines Stauraohrs ragt nur ca. 40 cm in den Fahrraum.**
- **Einfachste und ohne Werkzeuge realisierbare Demontage der Stauraohre bei periodischen Reinigungen der Tunnelwände.**



DIE WICHTIGSTEN TECHNISCHEN DATEN:

Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit durch die Tunnelröhre (in Längsrichtung)

2 Differenzdruck-Staurohre pro Messstelle, gegenüberliegend montiert

MESSBEREICHE: -10 ... 0 ... +10 m/s
 -15 ... 0 ... +15 m/s
 -20 ... 0 ... +20 m/s

GENAUIGKEIT: <0,1 m/s

AUSGÄNGE: 4 ... 20 mA für die Parameter:
 - Strömungsgeschwindigkeit bei Staurohr A inkl. Polarität
 - Strömungsgeschwindigkeit bei Staurohr B inkl. Polarität
 - Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit inkl. Polarität
 - Lufttemperatur an der Messstelle (-30 ... +140 °C, wahlweise -30 ... +600 °C)
 - Barometerdruck an der Messstelle (600 ... 1100 mbar)
 - Statussignale zur Fehlerüberwachung

EINGÄNGE: Verringerung der Mittelwertbildung im Ereignisfall

SERVICE- UND PARAMETRIER-SCHNITTSTELLE: PC, an der Vorderseite der Auswerteeinheit

Schiltknecht
 swiss precision

Schiltknecht Messtechnik AG
 Industriestrasse 13
 CH-8625 Gossau / ZH
 Tel. 0041 43 833 77 10
 Fax 0041 43 833 77 11
 sales@schiltknecht.com
 www.schiltknecht.com

Schiltknecht Messtechnik AG
 Niederlassung Deutschland
 Johann-von-Bever-Strasse 1
 D-57482 Wenden
 Tel. 0049 2762 40 07 79
 Fax 0049 2762 40 09 65
 sales-de@schiltknecht.com
 www.schiltknecht.com

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
ACP	ACP TK 300, Strömungsmessgerät der ACP Environment AG
AfBN	Amt für Betrieb Nationalstrassen, 6454 Flüelen
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BK	Begleitkommission
BOZ	Tunnel Bözberg
BSA	Betriebs und Sicherheitsausrüstung
c	Schallgeschwindigkeit [m/s]
CDF	Computational fluid dynamics
COD	TunnelCraft 3, Strömungsmessgerät der Codel International Ltd
CSV	Comma Separated Values, Dateiformat
dp	Differenzdruck
DTV	Durchschnittlicher, täglicher Verkehr
DUR	D-FL-200T, Strömungsmessgerät der Durag GmbH
FEDRO	Federal Roads Office
FIV	Windcheck, Strömungsmessgerät der Fives-Pillard
FOP	Forschungsprojekt
GSM	Global System for Mobile Communications, Standard für voll-digitale Mobilfunknetze
GV	Gegenverkehr
HSLU	Hochschule Luzern
HU	Tunnel mit Hufeisenprofil
IPC	Industrieller Personal-Computer
KSR	Kabelschutzrohr
KW	Kalenderwoche
LUE	Lüftung, Lüftungsanlage
M	Machzahl [-]
M1	Messprofil 1
M2	Messprofil 2
mA	Milliampere
NaCl	Natriumchlorid
NSNW	Nationalstrassen Nordwestschweiz, 4450 Sissach
OFRU	Office fédéral des routes
p	Druck [Pa]
R	Spezifische Gaskonstante [J/kg K]
RV	Richtungsverkehr
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SIC	Flowsic200, Strömungsmessgerät der Sick AG
SKN	TMS 3000, Strömungsmessgerät der Schiltknecht Messtechnik AG
SMG	Strömungsmessgerät
SPS	Speicher-Programmierbare-Steuerung
T	Temperatur [K]
T90	Antwortzeit bis zum Erreichen von 90% des Endwertes
TUF	Tunnel Umfahrung Flüelen
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Energie und Kommunikation
v	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen – und Verkehrsfachleute
ZD	Tunnelprofil mit Zwischendecke

Begriff	Bedeutung
Latein	
ρ	Dichte [kg/m ³]
κ	Isentropenexponent [-]

Literaturverzeichnis

-
- [1] ASTRA Richtlinie 13 001 , Lüftung der Strassentunnel, Ausgabe 2008, V2.01
-
- [2] ASTRA Fachhandbuch BSA, Technisches Merkblatt Bauteile Lüftung 23001-11320, Sensorik, 30.04.2012, V1.01
-
- [3] HBI Haerter AG, Umfahrung Flüelen, Tunnellüftung Ausführungsprojekt
-
- [4] Sick Maihak GmbH Germany, Flowsic200 – Betriebsanleitung - 8013270 V1.2
-
- [5] HSLU Bericht Nr. : HP-111084 Bestimmung der Referenzvolumenströmen mit der Tracer-gasmethode zur Ermittlung von mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in zwei Strassentunnel, 2013-02-27
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 14.08.2013

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA SBT / ASTRA2010/025_OBF

Projekttitel: Luftströmungsmessung in Strassentunneln

Enddatum: 30.09.2013

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Das Erfassen der Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum eines Strassentunnels und die Einbindung der Messwerte in die Leittechnik kann mit erheblichen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden sein. Das Ziel des Forschungsprojekts war es, diese schon immer als wichtig angesehenen Aspekte zu untersuchen und die entsprechenden Fragen zu beantworten.

Das Projekt wurde mit unerwarteten, funktionellen Störungen der Messgeräte konfrontiert, welche das Endergebnis nicht unwesentlich beeinflussten. So mussten zwei von den sechs Strömungsmessgeräten wegen Messwertfehlern und Drift bei den vergleichenden, statistischen Auswertungen ausgeklammert werden. Auch die übrigen vier Messgeräte wiesen im Verlaufe des Projektes verschiedene, funktionelle Probleme auf.

Trotzdem konnten die wesentlichen Ziele des Forschungsprojektes erreicht werden. So konnten insbesondere das Langzeitverhalten der Strömungsmessgeräte und die Plausibilität der Messwerte detailliert untersucht und dokumentiert werden.

Über den Zeitraum der Messkampagne zeigte sich, dass einige Messgeräte hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Stabilität noch Optimierungspotential aufweisen. Dieser Umstand wurde von mehreren Lieferanten in ihrer Stellungnahme nach Abschluss der Messkampagne auch bestätigt und dürfte zukünftigen Messgeräten zu Gute kommen.

Die tägliche, vergleichende Analyse der verschiedenen Messwerte hat gezeigt, dass regelmässige, automatisierte Plausibilitätskontrollen der Messwerte erforderlich sind, um die Zuverlässigkeit eines Strömungsmesssystems dauerhaft zu gewährleisten. Derartige, automatisierte Plausibilitätskontrollen sollten in die Leittechnik implementiert werden, um Messwertfehler frühzeitig zu erkennen und beheben zu können.

Zielerreichung:

Die wesentlichen definierten Ziele des Forschungsprojektes konnten erreicht werden. Insbesondere konnten die Messverfahren, Staudruckmessung und Ultraschallmessung sowie die Anordnung als Punkt und Linienmessung verglichen werden. Dies betrifft insbesondere:

- Die Kalibrierung und Inbetriebsetzung
- Der Einfluss von Störgrössen am Installationsort
- Der Einfluss von Umgebungsdruck, Temperaturen
- Die Behandlung der Messwerte wie Mittelwertbildung, Integrationszeiten, Messwertglättung
- Die Bestimmung des Volumenstromes und Messgenauigkeit
- Die Kontrolle und Plausibilisierung der Messwerte
- Das Langzeitverhalten der Messgeräte

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Erfahrungen des FOP mit der Installation, Inbetriebnahme und detaillierten Analyse über neun Monate erlauben es spezifische Empfehlungen an die Hersteller und Fabrikanten der Strömungsmessgeräte, an die Planer von Tunnelanlagen und Lüftungssysteme, an die Softwareentwickler, sowie an die Betreiber der Strömungsmessgeräte zu formulieren.

Publikationen:

U. Grässlin, U. Drost, GP. Nodiroli. Luftströmungsmessungen in Strassentunneln. Forschungsauftrag ASTRA2010/025_OBF

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Grässlin

Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Lombardi AG, Beratende Ingenieure

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:





Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Im Rahmen des FOP wurden insgesamt 14 BK-Sitzungen durchgeführt. Es wurde jeweils der aktuelle Stand des Forschungsprojekts präsentiert, speziell der Ablauf der Messkampagne. Die Diskussionen und Anregungen der Mitglieder der Begleitkommission haben massgebend zum Erreichen der Projektergebnisse beigetragen.

Die erfolgreiche Durchführung der Messkampagne mit den Strömungsmessgeräten, die statistischen Auswertungen, die Mitarbeit der 6 Lieferanten der Messgeräte sowie die anschliessende Zusammenstellung der Forschungsergebnisse und Empfehlungen wurden von der Begleitkommission positiv beurteilt.

Umsetzung:

In einem Strassentunnel verursacht der Verkehr stark variierende Strömungsverhältnisse. Die Referenzmessungen des Volumenstromes mit der Tracergas-Methode haben es nicht vollumfänglich erlaubt einen neutralen, zuverlässigen Referenzwert gegenüber den Strömungsmessgeräten zu bestimmen. Die systembedingte Trägheit der Gasanalysatoren und die zeitliche Verzerrung der Messwerte infolge der räumlich versetzten Eindüsung des Tracergases zur Konzentrationsmessstelle waren gegenüber den sehr schnell reagierenden Strömungsmessgeräten zu gross.

weitergehender Forschungsbedarf:

Entwicklung und Vereinheitlichung von automatisierten Plausibilitätskontrollen und Prüfmethode für die Messwerte von Luftströmungsmessgeräten in Strassentunneln. Definition eines einheitlichen Funktionsnachweises für die Luftströmungsmessgeräte.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Vorgaben in der Richtlinie ASTRA 13 001 „Lüftung der Strassentunnel“ und dem Technischen Merkblatt 23001-11320 "Sensorik" sollten überprüft respektive ergänzt werden.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Steinemann Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: US+FZ Beratende Ingenieure

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs Activity oriented analysis of induced travel demand Analyse orientée aux activités du trafic induit	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung Approches innovantes de la gestion du stationnement Innovative approaches to parking management	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel Acoustical guidance in road tunnels Guidage acoustique dans les tunnels routiers	2012
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining? De nouvelles découvertes sur le comportement de mobilité par Data Mining? New findings on the mobility behavior through Data Mining?	2011
1359	SVI 2004/003	Wissens- und technologientransfer im Verkehrsbereich Know-how and technology transfer in the transport sector Transfert de savoir et de technologies dans le domaine des transports	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten Pronostics de trafic avec des données en temps réel Traffic forecast with real-time data	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen Principes de bases concernant la conception, la construction et la durabilité de voies de raccordement Basic Principles on the Design, Construction and Sustainability of Sidings	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betongranulat aus Betongranulat	2011
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften <i>Potential du covoiturage</i> <i>Potential of Car Pooling</i>	2011
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schwiessnähte von KDB <i>Développement d'une méthode d'essais non-déstructif pour des soudures de membranes polymères d'étanchéité</i> <i>Development of a nondestructive test method for welded seams of polymeric sealing membranes</i>	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen <i>Signalisations dynamiques sur des routes principales</i> <i>Dynamic signalling at primary distributors</i>	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau <i>Expériences dans la construction de ponts en Suisse</i> <i>Experiences in Swiss Bridge Construction</i>	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Harmonisation of procedures and user interface in Tunnel-Process Control Systems</i> <i>Harmonisation des processus et des interfaces utilisateurs dans les systèmes de supervision de tunnels</i>	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität <i>Mode of action and potential of combined mobility</i> <i>Mode d'action et le potentiel de la mobilité combinée</i>	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr <i>Bénéfices liés à une réduction des temps de parcours du trafic voyageur</i> <i>Benefits of travel time savings in passenger traffic</i>	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel <i>Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Chienberg</i> <i>Influence of groundwater flow on the swelling of the Gipskeuper formation in the Chienberg tunnel</i>	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich <i>Réflexions du trafic routier aux ouvrages d'art</i> <i>Noise reflections on structures in the street</i>	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Data storage in tunnel process control systems</i> <i>Enregistrement ds données de systèmes de supervision de tunnels</i>	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen <i>Exigences par rapport à la résistance à la carbonatation des bétons</i> <i>Requirements for the carbonation resistance of concrete mixes</i>	2012
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen <i>Résistance à la corrosion des aciers d'armature inoxydables</i> <i>Use of stainless steels in concrete structures</i>	2012