

Lüftungssystem für den Tunnel Giswil

Dr. Ingo Rieß, M. Lempp

Mit der Eröffnung der A8 Umfahrung Giswil im Kanton Obwalden wurde eine Lücke im Schweizer Nationalstraßennetz geschlossen. Einen wesentlichen Teil der Umfahrung stellt der 2066 m lange, einröhrige Tunnel Giswil dar. Er wurde als einer der ersten in der Schweiz nach den neuen Richtlinien des Bundesamtes für Straßen ausgeführt und ist mit einem leistungsfähigen Lüftungssystem für Normalbetrieb und Brand ausgestattet.

Zusätzlich wurde erstmals ein paralleler Sicherheitsstollen gebaut, der mit einer Überdruckbelüftung versehen ist. Damit ist der Tunnel Giswil wegweisend für die Ausstattung von neuen Straßentunneln. Heute gilt er als einer der sichersten Tunnel der Schweiz.

Betriebslüftung: Absaugung in Tunnelmitte

Mit der Betriebslüftung werden die Schadstoffkonzentrationen im Tunnel kontrolliert und die Frischluftzufuhr sichergestellt. Im Normalbetrieb wird die Lüftung als Längslüftung mit Absaugung in Tunnelmitte betrieben (Bild 1, oben). Die Axialventilatoren laufen mit halber Nenndrehzahl und för-

dern dabei zusammen 80 m³/s Abluft aus dem Tunnel. Die Abluft wird durch den Kamin ausgestoßen. Da in der Mitte des Tunnels abgesaugt wird, strömt an den Portalen Frischluft nach.

Die Luftmenge 80 m³/s ist relativ klein, wenn man sie mit anderen Tunneln vergleicht, die mit einer Absaugung in Tunnelmitte ausgestattet sind. Die Auslegung auf diese Luftmenge ist möglich, da die mechanische Lüftung nur bei sehr ausgeglichenem Verkehr und damit geringer Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel notwendig ist. Über die Auslegung dieser Lüftung wurde bereits in Tunnel 5/99 [1] berichtet.

In den meisten Situationen sollte die natürliche Lüftung für die Frischluftversorgung genügen. Das heißt, dass die Lüftung meist als durchgehende Längslüftung betrieben wird – angetrieben vom Verkehr und vom natürlichen Auftrieb. In den ersten Monaten des Betriebs hat sich diese Prognose bestätigt. Die mechanische Lüftung ist nur selten und stets nur für kurze Zeit in Betrieb.

Dr.sc.techn.Ingo Rieß,
HBI Haerter AG, Zürich/CH
Dipl.-Ing. Matthias Lempp,
HBI Haerter AG, Zürich/CH

Ventilation System for the Giswil Tunnel

Dr. Ingo Rieß, M. Lempp

A gap in the Swiss national highway network was closed with the opening of the A8 Giswil Bypass in the Canton of Obwalden. The 2,066 m long, single-tube Giswil Tunnel represents an essential element of this Bypass. It is one of the first Swiss tunnels to be executed in keeping with the new guidelines of the Federal Office for Highways and is provided with a powerful ventilation system for standard operation as well as fire.

In addition, a parallel safety tunnel was set up for the first time. This is provided with overpressure ventilation. In this way the Giswil Tunnel is a trail blazer for how new road tunnels should be equipped. It is now rated as one of the safest in Switzerland.

Service Ventilation: suctioned off at Tunnel Centre

The service ventilation controls concentrations of toxic substances in the tunnel and the fresh air supply. In standard mode the ventilation is operated longitudinally with spent air removed at the tunnel centre (Fig. 1, above). The axial fans run at half the nominal speed and in the process jointly remove 80 m³/s of spent air from the tunnel. The spent air is expended through the chimney stack. Fresh air accesses through the portals as the spent air is removed at the tunnel centre.

The 80 m³/h amount of air is relatively small if it is compared with other tunnels, which are

equipped with an exhaust system at the tunnel centre. However, this amount of air could be selected as the mechanical ventilation is only needed in the event of extremely balanced traffic and in turn, a low current speed within the tunnel. Tunnel 5/99 [1] carried a report on how the ventilation system is designed.

In most situations the natural ventilation should suffice to supply fresh air. In other words, the ventilation is usually operated as continuous longitudinal ventilation – resulting from traffic and natural uplift. This prognosis was confirmed during the first few months in service. The mechanical ventilation is only used occasionally and then just for short periods.

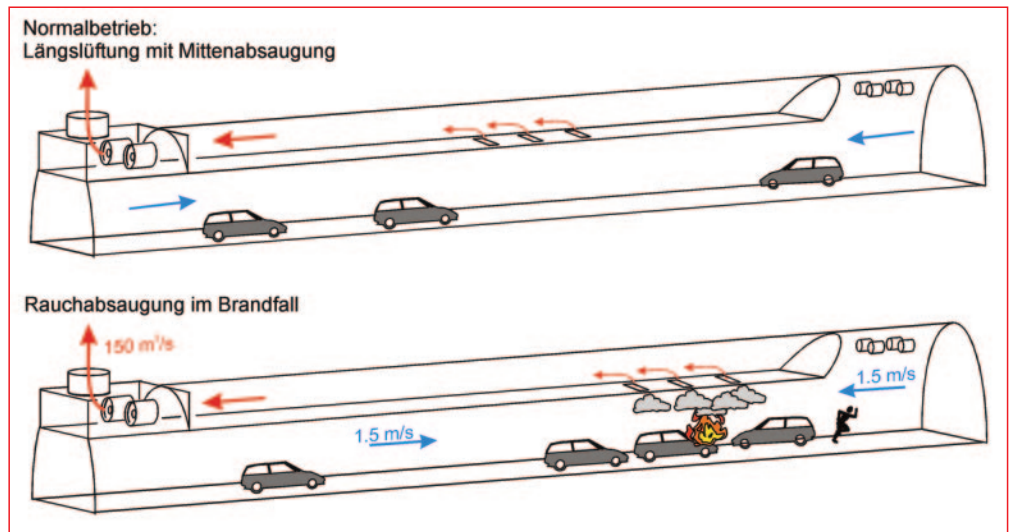
Dr.sc.techn.Ingo Rieß,
HBI Haerter AG, Zürich/CH
Dipl.-Ing. Matthias Lempp,
HBI Haerter AG, Zürich/CH

Lokale Rauchabsaugung bei Brand im Tunnel

Die Lüftung bei einem Brandereignis hat zum Ziel, zunächst die Selbstrettung der Tunnelbenutzer zu ermöglichen und anschließend den Zugang der Rettungsdienste zum Brand zu unterstützen. Der Tunnel Giswil ist in 28 Brandabschnitte unterteilt. Für die lokale Rauchabsaugung ist neben der Brandmeldung die Zuordnung des Ereignisses zu einem Brandabschnitt notwendig.

Die Branderkennung kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Bei der Heißdetektion über das Brandmeldekabel kann der Brandort sehr genau eingegrenzt werden. Bei einer Kaltdetektion (Rauchererkennung durch automatische Auswertung der digitalen Videobilder) ist jeder Kamera ein Brandabschnitt zugeordnet. Auch eine Feuerlöscherentnahme und das Signal eines SOS-Alarmtasters werden direkt einem Brandabschnitt zugeordnet. Beim Öffnen einer Fluchttür oder bei erhöhter Sichttrübung im Tunnel wird in der Leitstelle ein Alarm ausgelöst. Die Überprüfung des Alarms und die Zuordnung zu einem Brandabschnitt erfolgen manuell auf Grund der Videobilder.

Nach der Brandmeldung werden fünf Abluftklappen in der Nähe des Brandortes geöffnet. Gleichzeitig werden die Abluftventilatoren auf die höchste Stufe gefahren (Bild 1, unten). Sobald die Abluftventilatoren in der höchsten Stufe laufen, werden mindestens $150 \text{ m}^3/\text{s}$ Luft und Rauch aus dem Tunnel gesaugt. Wenn die Absaugung in der Nähe der Lüftungszentrale erfolgt, kann die geförderte Luftmenge mehr als $200 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen. Der Rauch wird durch den Abluftkanal zur Lüftungszentrale geführt und über den Kamin ausgestoßen.



1 Lüftungsschema Tunnel Giswil
1 Giswil Tunnel ventilation scheme

Eine Minute nach Beginn der Brandlüftung werden die Strahlventilatoren eingesetzt, um auf Grund der Messungen im Tunnel die Strömung am Brandort zu beschränken. Mit der Regelung wird erreicht, dass auf beiden Seiten des Brandes eine Strömung zum Brandort hin vorliegt. Damit wird die Rauchausbreitung im Tunnel wirksam begrenzt.

Ausrüstung der Tunnellüftung

Die Lüftungseinrichtungen bestehen im Wesentlichen aus dem Abluftkanal oberhalb des Fahrraums, aus Abluftklappen in der Zwischendecke, aus zwei parallel angeordneten Axialventilatoren und dem Abluftkamin. Vier Strahlventilatoren am Südportal werden für die Beeinflussung der Längsströmung bei einem Brandereignis eingesetzt. Die Steuerung der Betriebslüftung und der Rauchabsaugung erfolgt nach Schadstoff- und Strömungsmessungen im Tunnel.

Als Abluftklappen dienen 28 Lamellenklappen mit einem Querschnitt von etwa $1,4 \text{ m}^2$ (Bild 2). Die Klappen werden

Local Smoke Removal given Fire in the Tunnel

In the event of a fire incident in the tunnel, the ventilation initially has the task of enabling users to rescue themselves. The Giswil Tunnel is divided up into 28 fire sections. Apart from detecting the fire the incident must be allocated to a particular fire section prior to local smoke exhaustion.

Fire can be detected in a number of ways. The seat of the fire can be located with great accuracy through thermal detection. In the event of cold detection (smoke identification through automatic evaluation of the digital video pictures) each camera is allocated to a particular fire section. The removal of a fire extinguisher and the signal from a SOS alarm button are also directly allocated to a given section. An alarm is triggered in the control centre if an escape door is opened or if visibility in the tunnel worsens. The alarm is tested as well as its allocation to a fire section manually on the basis of the video pictures.

Five exhaust air flaps in the vicinity of the fire seat are

opened after the fire is reported. At the same time the spent air fans are operated in their highest mode (Fig. 1, below). As soon as the fans are operating at full power at least $150 \text{ m}^3/\text{s}$ of air and smoke is expelled from the tunnel. If removal occurs close to the ventilation control centre the amount of air that is exhausted can amount to more than $200 \text{ m}^3/\text{s}$. The smoke is transferred through the waste air duct to the ventilation control centre and expelled through the chimney.

Tunnel Ventilation Equipment

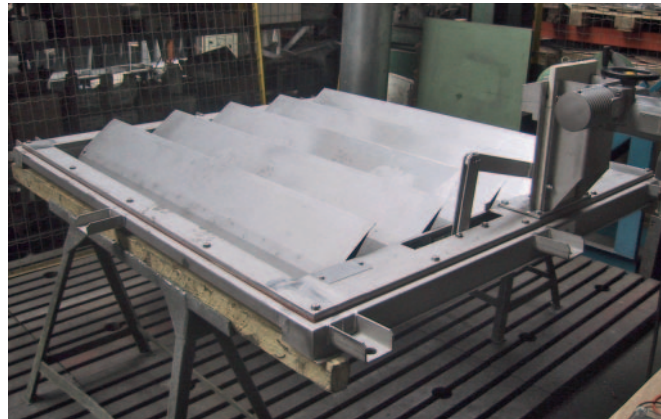
The ventilation equipment by and large consists of the waste air duct above the traffic zone, exhaust air flaps in the intermediate ceiling, two axial fans arranged in parallel and the exhaust chimney. Four jet fans at the south portal are utilized to influence the longitudinal flow in the event of fire. The service ventilation and the smoke removal are controlled in accordance with toxic substance and flow measurements in the tunnel.

über einen Drehantrieb geöffnet. Die Ansteuerung der Antriebe erfolgt über einen redundant ausgeführten Lichtwellenleiter.

Die Abluftventilatoren haben einen Laufraddurchmesser von 2000 mm (Bild 3). Die Fördermenge der Ventilatoren hängt von der Lage der geöffneten Abluftklappen ab, so dass sich bei 28 Klappen eine Vielzahl möglicher Betriebspunkte ergibt. Die Antriebsmotoren der Ventilatoren weisen eine Motor-Nennleistung von jeweils 260 kW auf. Sie werden über Frequenzumformer gesteuert. Bei Ausfall eines Frequenzumformers im Brandbetrieb werden die Ventilatoren über Anlaufwiderstände bzw. direkt am Netz betrieben. Die Ventilatoren verfügen jeweils über eine druckseitig angeordnete Abschlussklappe. Dies sind Lamellenklappen, die über einen Drehantrieb geöffnet werden.

Am Südportal sind vier Strahlventilatoren in zwei Zweiergruppen im Tunnelabschnitt ohne Zwischendecke angeordnet. Sie haben 1000 mm Laufraddurchmesser und erreichen jeweils 750 N Standschub. Die Antriebsmotoren der Ventilatoren haben 30 kW Nennleistung. Die Strahlventilatoren werden einzeln direkt angesteuert.

Für die Regelung der Strahlventilatoren bei einem Brandereignis ist eine besonders hohe Zuverlässigkeit der Strömungsmessungen Voraussetzung. Daher sind sechs Querschnittsmessungen im Tunnel installiert. Die Messungen sind in zwei Dreiergruppen 200 m bzw. 500 m von den Portalen entfernt angeordnet. Die Anordnung in Dreiergruppen erlaubt eine automatisierte Plausibilitätsprüfung der Messung. Bei Abweichungen wird eine Störungsmeldung ausgegeben. Im Brandbetrieb werden je-



2 Werkprüfung der Abluftklappen
2 Works test on the waste air flaps

weils die Strömungsmessungen am entfernten Portal für die Regelung der Strahlventilatoren ausgewertet.

Die Luftqualität wird im Normalbetrieb von vier Sichttrübungsmessgeräten überwacht. Im Brandbetrieb wird ein Messgerät eingesetzt, um sicherzustellen, dass die Strahlventilatoren vom Rauch nicht erreicht werden. Wenn das Messgerät Rauch in der Nähe der Strahlventilatoren meldet, werden die Ventilatoren abgeschaltet, damit sie eine eventuelle Rauchsichtung nicht zerstören.

28 lamellar flaps with roughly 1.4 m² cross-section each (Fig. 2) serve to remove the waste air. These flaps are opened by means of a rotating drive. The drives are controlled via a redundantly arranged beam waveguide.

The waste air fans have an impeller wheel diameter of 2,000 mm (Fig. 3). The capacity of the fans depends on the position of the opened waste air flaps so that there are a large number of possible operating stages. The fans' drive motors each possess a nominal output of 260 kW. They are operated by

means of frequency transformers. Should one of the transformers fail in fire mode the fans are operated via starting resistors or directly from the network. Each fan possesses a cut-off flap arranged at the pressure side. These are lamellar flaps, which are opened by means of a rotating drive.

Four jet fans in groups of two are installed at the south portal in the tunnel section without intermediate ceiling. They possess 1,000 mm impeller diameter and each attains 750 N static thrust. The drive motors of the fans have each 30 kW nominal output. The jet fans are each directly controlled.

It is essential that the flow measurements are extremely accurate in order to regulate the jet fans. As a consequence, six cross-sectional measuring units are installed in the tunnel. These units are arranged in two groups of three – 200 and 500 m from the portals. The arrangement in groups of three makes it possible to undertake an automatic plausibility test of these measurements. Any deviations trigger a fault report. In the event of fire, the flow measurements are evaluated at the distant portal for controlling the jet fans.

During standard operation, the air quality is monitored by four visibility measuring units. For a fire incident a measuring unit is employed in order to ensure that the jet fans are not affected by smoke. Should the measuring unit register smoke in the vicinity of the jet fans, these are shut down so that they do not destroy a possible smoke layer.



3 Abluftventilatoren
3 Exhaust fans

Ventilating the Safety Tunnel

The Giswil Tunnel is equipped with a 2,000 m long parallel safety tunnel. The main tunnel is

Lüftung des Sicherheitsstollens

Der Tunnel Giswil ist mit einem 2000 m langen parallelen Sicherheitsstollen ausgestattet. Der Tunnel ist über sieben Querstollen mit dem Sicherheitsstollen verbunden. Im Ereignisfall, insbesondere bei einem Brand, können Betroffene die Gefahrenzone im Tunnel schnell durch die Querstollen verlassen und über den Sicherheitsstollen ins Freie flüchten.

An den Portalen des Sicherheitsstollens sind Luftschleusen eingerichtet. An beiden Portalen ist ein Ventilator parallel zu dieser Schleuse angeordnet. Die Türen der Luftschleusen sind gegeneinander verriegelt, sodass stets nur eine der beiden Türen geöffnet werden kann. Die Querstollen sind zum Tunnel hin mit Flügeltüren verschlossen (Bild 4).

Im Normalbetrieb hält die Lüftung den Sicherheitsstollen unter Überdruck gegenüber dem Fahrraum. Damit wird eine minimale Luftzirkulation erreicht und eine Verschmutzung weitgehend vermieden. Ein Ventilator läuft dabei mit verminderter Drehzahl. Die Frischluft, die in den Stollen gefördert wird, entweicht durch einstellbare Öffnungen an den Fluchttüren in den Fahrraum.

Im Schutzbetrieb gewährleistet die Lüftung, dass der Sicherheitsstollen und die Querstollen rauchfrei bleiben. Dabei wird ein Ventilator in Volllast betrieben. Der zweite Ventilator steht für den Fall einer Störung zur Verfügung. Die Frischluft, die von diesem Ventilator gefördert wird, strömt über Druckausgleichklappen an der Schleuse wieder ins Freie. Wenn jedoch eine Tür zu einem Querstollen geöffnet wird, schließen sich die Druckausgleichklappen. Die geförderte Luft entweicht durch die



4 Beleuchtete Fluchttür zum Sicherheitsstollen

4 Illuminated escape door to the safety tunnel

geöffnete Tür in den Tunnel, womit ein Eindringen von Rauch verhindert wird.

Im Betrieb erfolgt keine Regelung der Lüftung. Der Betriebspunkt der Ventilatoren wird von der Stellung der Türen und Druckausgleichklappen bestimmt. Der Betrieb mit geschlossenen Fluchttüren ist bei der Auslegung der kritische Fall: Ohne Druckausgleichklappen entstünde im Sicherheitsstollen ein großer Druck, der ein Öffnen der Fluchttüren unmöglich machen würde. Andererseits müssen bei geöffneten Fluchttüren die Klappen geschlossen sein, damit die geforderte Luftmenge durch die Querstollen strömt.

Die strengen Anforderungen an die Türen (leicht zu öffnen, selbsttätig schließend) und an die Lüftung (große Luftmenge, kleiner Druck in allen Betriebszuständen) erforderten eine Auslegung des Gesamtsystems ohne Reserve. Beim Tunnel Giswil war nach der Installation eine feine Abstimmung der Ventilatoren, Überdruckklappen und Fluchttüren notwendig, um alle Bedingungen zu erfüllen.

linked with the safety tunnel by means of seven cross-passages. Should an incident occur, especially fire, those affected in the endangered zone can quickly escape through the cross-passages and get out into the open via the safety tunnel.

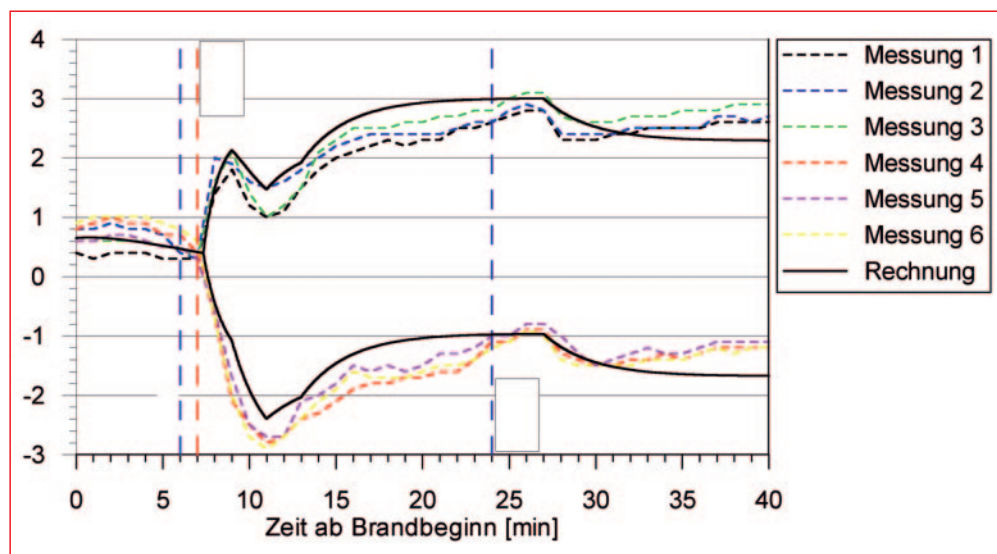
Air locks are installed at the portals of the safety tunnel. A fan is arranged parallel to the lock at each portal. The air locks' doors are secured in such a way that only one of the two doors can be opened at any given time. The cross-passages are closed off against the tunnel by means of double wing doors (Fig.4).

In standard operation the ventilation in the safety tunnel is sustained at over-pressure compared with the driving zone. In this way, minimum air circulation is arrived at and contamination largely avoided. In this connection, one fan runs at reduced speed. The fresh air, which is transferred into the safety tunnel, escapes through adjustable apertures on the evacuation doors into the driving zone.

In protected mode the ventilation ensures that the safety

tunnel and the cross-passages remain smoke-free. Towards this end one fan runs at full power. The second fan stands by for emergency purposes. The fresh air that is carried by this fan is transferred via pressure compensating flaps on the lock into the open. However, should a door to a cross-passage be opened, the pressure compensating flaps close. The air that is being carried escapes through the opened door into the tunnel to prevent smoke from penetrating.

The ventilation is not regulated during standard mode. The operating stage of the fans is governed by the position of the doors and the pressure compensating flaps. Operation with closed evacuation doors is critical and must be carefully designed: great pressure would build up in the safety tunnel without pressure compensating flaps, which would mean that the evacuation doors could not be opened. On the other hand, the flaps must be closed if the evacuation doors are opened in order to ensure that the required amount of air flows through the cross-passages.



5 Der Brandversuch bestätigt die Funktion der Steuerung

5 The fire test confirms the proper functioning of the control system

Brandversuch bestätigt die Funktionalität

Die Sicherheitseinrichtungen wurden vor der Tunneleröffnung mit zwei Brandversuchen geprüft. Die Feuerwehr entzündete jeweils zwei Brandtassen mit Benzin, Dieselöl, Styropor und Autoreifen. Im Folgenden ist der Versuch beschrieben, welcher etwa 1000 m vom Südportal entfernt durchgeführt wurde.

Bei Brandbeginn lag eine Strömung von etwa 0,7 m/s nach Norden vor. Der Rauch breitete sich in den ersten Minuten mit dieser Strömung aus. Die Rauchkonzentration stromab vom Brand war zunächst gering, sodass im Verkehrsraum noch gute Sichtverhältnisse herrschten. Etwa 6 min nach Brandbeginn zeigt die nächstgelegene Messstelle eine erhöhte Sichttrübung an. Kurz darauf wurde der Brand von der Kaltrauchdetektion über Video erkannt. Das Brandprogramm wurde automatisch gestartet.

Nach der Brandmeldung wurde die Absaugung sehr schnell wirksam. Die maximale

Abluftmenge beträgt am Ort des Versuchs etwa 190 m³/s. So lag bereits zwei Minuten nach Brandmeldung eine Strömung von beiden Seiten zum Brandort vor. Mit dem geregelten Einsatz der Strahlventilatoren wurde die Strömung am Brandort zusätzlich abgebremst. Durch die ausgeklügelte Regelung wurde mit wenigen Schaltvorgängen eine stabile Situation erreicht. Etwa sieben Minuten nach der Brandmeldung wurde der Rauch vollständig von der nächstgelegenen Abluftklappe erfasst.

Bild 5 zeigt den Verlauf der Strömungsmessungen im Tunnel ab Beginn des Versuchs. Die Messungen 1 bis 3 befinden sich südlich des Brandortes, d. h., bei positiver Geschwindigkeit ist die Strömung zum Brandort gerichtet. Die Messungen 4 bis 6 befinden sich nördlich des Brandes, d. h., bei negativer Geschwindigkeit ist die Strömung zum Brandort gerichtet. Zusätzlich ist das Ergebnis einer Vergleichsrechnung mit SPRINT dargestellt. SPRINT ist ein Simulationsprogramm zur Berechnung der Strömung und Rauchausbreitung im Tunnel [2]. Es wurde

The strict demands that are placed on the doors (easy to open, automatic closure) and the ventilation (large amount of air, low pressure in all operating modes) called for the overall system to be devised without any reserve. In the case of the Giswil Tunnel fine adjustments had to be undertaken on the fans, over-pressure flaps and evacuation doors, in order to be sure that all conditions were complied with.

Fire Test confirms proper Functioning

Prior to the tunnel being opened the safety installations were checked by means of two fire tests. In each case the fire brigade ignited two fire seats consisting of petrol, diesel oil, styropore and car tyres. The test undertaken some 1,000 m from the south portal is dealt with in the following.

When the fire started there was an air flow of roughly 0.7 m/s from the north. Smoke spread during the first few minutes together with this current. Initially the smoke concentration down tunnel from the fire was low so that good visibility

still prevailed in the traffic zone. Some 6 min after the fire began the nearest measurement point showed that visibility had been affected. Shortly thereafter the fire was registered on video by cold smoke detection. The fire programme was initiated automatically.

The smoke was removed very efficiently once the fire was reported. The maximum waste air amount at the seat of the test was roughly 190 m³/s. In other words, only two minutes after the fire was detected, the fire seat was affected by a flow emanating from both sides. The flow at the seat of the fire was additionally reduced thanks to the controlled application of the jet fans. A stable situation was attained by a few switching processes as a result of a sophisticated regulating system. The nearest waste air flap was capable of dealing with the smoke completely roughly seven minutes after the fire was detected.

Fig.5 shows the course of the flow measurements in the tunnel from the time the test started. Measurements 1 to 3 are located to the south of the fire seat, i.e. the flow is directed towards it given positive speed. Measurements 4 to 6 are located to the north of the fire, i.e. the flow is directed towards the fire given negative speed. In addition, the result was compared with SPRINT, which is a simulation programme for calculating the flow and smoke distribution in a tunnel [2]. It was also used for planning the ventilation control.

The six flow measurements possessed almost identical readings prior to the fire being traced. After fire was detected the influence of the air being exhausted very soon revealed itself. A stable flow of at least 0.9 m/s towards the fire seat was produced from both portals through removal. The compara-


bereits für die Planung der Lüftungssteuerung verwendet.

Vor der Branderkennung liegen die sechs Strömungsmessungen nahe beieinander. Nach der Brandmeldung zeigt sich sehr schnell der Einfluss der Absaugung. Durch die Absaugung wurde von beiden Portalen aus eine stabile Strömung von mindestens 0,9 m/s zum Brandort hin erzeugt. Die Vergleichsrechnung berücksichtigt die Schaltvorgänge der Strahlventilatoren, die im Ereignisprotokoll der Steuerung dokumentiert sind. Die Berechnung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen. So ist eine sehr detaillierte Interpretation der Messdaten möglich. Auch die Rauchausbreitung, die von einer Sichttrübungsmessung erfasst wurde, konnte mit

SPRINT nachvollzogen werden.

Schlussfolgerung

In den Brandversuchen entsprach das Verhalten der Lüftung vollumfänglich den Erwartungen. Die Sichtverhältnisse für die Personenrettung und für den Einsatz der Feuerwehr waren in beiden Versuchen sehr gut. Die Ergebnisse lassen erwarten, dass im Tunnel Giswil auch ein bedeutend größerer Brand sicher beherrscht werden kann.


Die leistungsfähige Rauchabsaugung und der separat belüftete Sicherheitsstollen haben großen Anteil daran, dass der Tunnel Giswil heute als einer der sichersten Straßentunnel in der Schweiz angesehen wird. 

tive analysis takes the switching processes of the jet fans into consideration, which are documented in the incident protocol for the control system. The calculation reveals extremely high accordance with the measurements. Thus very detailed interpretation of the measurement data is feasible. The distribution of smoke, which was registered by measuring the affected visibility, can be simulated thanks to SPRINT.

Conclusion

The behaviour of the ventilation completely complied with the expectations during the fire tests. The visibility conditions for rescuing persons and for de-

playing fire-fighters were very good in each case. The outcome would seem to indicate that a significantly bigger conflagration can be combated successfully in the Giswil Tunnel.

The efficient smoke removal system and the separately ventilated safety tunnel play a major part in ensuring that the Giswil Tunnel is now regarded as one of the safest road tunnels in Switzerland. 

Literatur

- [1] I. Riess, R. Brandt: Die Auslegung von Tunnellüftungen für den Normalbetrieb, Tunnel 5/99, Seite 38–42.
- [2] I. Riess, M. Bettelini, R. Brandt: Sprint: A Design Tool For Tunnel Ventilation, 10th ICAVVT, Boston, November 2000.