

Probleme der Klimatisierung bei Vortrieb und Betrieb von Tunneln mit hoher Überdeckung: Lösungskonzepte für den Gotthard-Basistunnel

P. Zbinden, A. Sala, Dr. Busslinger

Kernstück der NEAT ist der Gotthard-Basistunnel mit größtenteils hoher Überdeckung. Besondere Beachtung erfordert daher aus verschiedenen Gründen die Klimatisierung bei Vortrieb und Betrieb des Tunnels. Es werden Lösungskonzepte zur Klimatisierung vorgestellt.

1 Projektübersicht

Der Gotthard-Basistunnel (GBT) ist das Kernstück der Neuen Eisenbahn Alpen-transversalen Zürich-Lugano. Die beiden parallelen Einspurrohre des GBT mit einer Länge von je 57 km sind ca. alle 325 m mit begehbaren Querschlägen ver-

bunden. In den Drittelpunkten, d. h. am Schachtfuß in Sedrun und am Fußpunkt des Zugangstollens Faido, sind Spurwechsel und Nothaltestellen vorgesehen, sog. Multifunktionsstellen (MFS) (Bild 1).

Der Tunnel durchfährt mehrheitlich kristalline Gesteine, unterbrochen von wenigen schmalen Sedimentzonen. Die kristallinen Gesteine können in die drei großen geologischen Einheiten Aar-Massiv im Norden, Gotthard-Massiv im mittleren Teil und Penninische Gneiszone im Süden gegliedert werden.

Die zwischen 1994 und 1998 durchgeführten Sondierungen im Bereich der

Dipl.-Ing. Peter Zbinden, Vorsitzender der Geschäftsleitung, AlpTransit Gotthard AG, Luzern/CH
Dipl.-Ing. Alex Sala, Vorsitzender der Geschäftsleitung, Amberg Engineering AG, Regensdorf/CH
Dr. Andreas Busslinger, HBI Haerter AG, Bern/CH

Air-conditioning Problems during Excavation and Operation of Tunnels with high Overburden: Conceptional Solutions for the Gotthard Base Tunnel

P. Zbinden, A. Sala, Dr. Busslinger

The Gotthard Base Tunnel with mainly high overburden represents the core of the NEAT. For various reasons air-conditioning aspects during driving and operating the tunnel require particular attention to be paid to them. Conceptional solutions for air-conditioning are presented.

1 Project Overview

The Gotthard Base Tunnel (GBT) represents the core of the Zurich-Lugano new rail Alpine crossing. The GBT's two parallel single-track tubes each 57 km in length are connected with accessible crosscuts approx. every 325 m. At points a third of the way along the tunnel, at the bottom of the Sedrun shaft and the Faido access tunnel crossovers and emergency halts are to be set up, so-called multifunctional points (MFS) (Fig. 1).

The tunnel mainly passes through crystalline rocks, interspersed by a number of narrow sedimentary zones. These crystalline rocks can be divided up into three major

geological units – Aar massif in the north, Gotthard massif in the central part and the Penninic gneiss zone in the south.

Explorations under in the Piora basin between 1994 and 1998 revealed that the feared, sugary dolomite does not extend to tunnel level. There the Piora basin consists of dry,

Dipl.-Ing. Peter Zbinden, Chairman of Management Board, AlpTransit Gotthard AG, Lucerne (CH)
Dipl.-Ing. Alex Sala, Chairman of Management Board, Amberg Engineering AG, Regensdorf (CH)
Dr. Andreas Busslinger, HBI Haerter AG, Berne (CH)

Piora-Mulde haben gezeigt, dass der gefürchtete zucker-körnige Dolomit nicht bis auf das Tunnelniveau reicht. Die Piora-Mulde besteht dort aus trockenem, standfestem Dolomit-/Anhydrit-Marmor.

Dem Felsportal vorgelagert sind in Bodio ein 400 m langer Tagbautunnel und eine ca. 400 m lange Locker-gesteinsstrecke, die hauptsächlich aus Bergsturzablagerungen besteht.

Der Großteil der geologischen Strukturen steht in den Tunnelabschnitten mit mächtiger Überlagerung nahezu senkrecht und wird mit den Vortrieben querschlägig, d. h. senkrecht zur Schichtung, durchfahren. Einzig im wenig überlagerten Südabschnitt werden die subhorizontalen Schichten der Leventina-Gneise durchfahren.


Um den längsten Tunnel der Welt in vernünftiger Zeit realisieren zu können sowie aus Gründen der Betriebslüftung, ist er in fünf Bauabschnitte – nämlich die Baulose Erstfeld, Amsteg, Sedrun, Faido und Bodio – unterteilt worden (Bild 2). Dazu sind drei Zwischenangriffe in Amsteg, Sedrun und Faido nötig.

Die vier Abschnitte Bodio, Faido, Sedrun und Amsteg sind bereits im Bau. Außer dem Abschnitt Sedrun, welcher sprengtechnisch aufgeföhren wird, werden alle Abschnitte mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) aufgeföhren. Nur die MFS in Faido und Sedrun werden gesprengt.


2 Baukühlung während des Vortriebs in den Teilabschnitten Bodio und Faido

Die Vorgaben der SUVA (Schweizerische Unfallversi-

Problèmes de climatisation dans le percement et l'exploitation de tunnels recouverts d'une haute épaisseur de roche: Concepts de solution pour le tunnel de base du Saint-Gothard

 L'élément central de la NEAT est le tunnel de base du Saint-Gothard recouvert en majeure partie d'une haute épaisseur de roche. C'est la raison pour laquelle la climatisation du tunnel lors son percement et son exploitation exige qu'on lui porte une attention particulière. Divers concepts de solution pour la climatisation sont ici présentés.

Problemi di condizionamento dell'aria all'avanzamento e all'esercizio delle gallerie con grande copertura: concetti di soluzione per la galleria di base del San Gottardo

 Il nucleo della NEAT è la galleria di base del San Gottardo in gran parte ampiamente coperta. Per molteplici motivi, il condizionamento dell'aria all'avanzamento e all'esercizio della galleria richiede quindi particolare attenzione. Vengono presentati concetti di soluzione per il condizionamento dell'aria.

cherungs-Anstalt) für Arbeiten unter Tage bei feuchtwarmem Klima sind klar formuliert: Die Lufttemperatur darf im Bereich der Hauptarbeitsstellen jederzeit nicht höher als 28 °C Trockentemperatur (bei 100 % Luftfeuchtigkeit) sein. Dadurch können akute Hitzeerkrankungen bei achtstündiger Schwerarbeit unter Tage verhindert werden.

Das Baulüftungssystem dient zur Einhaltung der maximalen Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Werte), d. h.

stable dolomite/anhydrite marble.

In Bodio there is a 400 m long cut-and-cover tunnel and an approx. 400 m long soft ground section, which mainly comprises rock fall deposits in front of the rock portal.

The bulk of the geological structures stands practically perpendicular in the tunnel sections with high overburden and is crosscut by the drives, i.e. they run perpendicular to the strata. Only the sub-horizontal layers of Leventina gneiss are penetrated in the

southern section, which has shallower overburden.

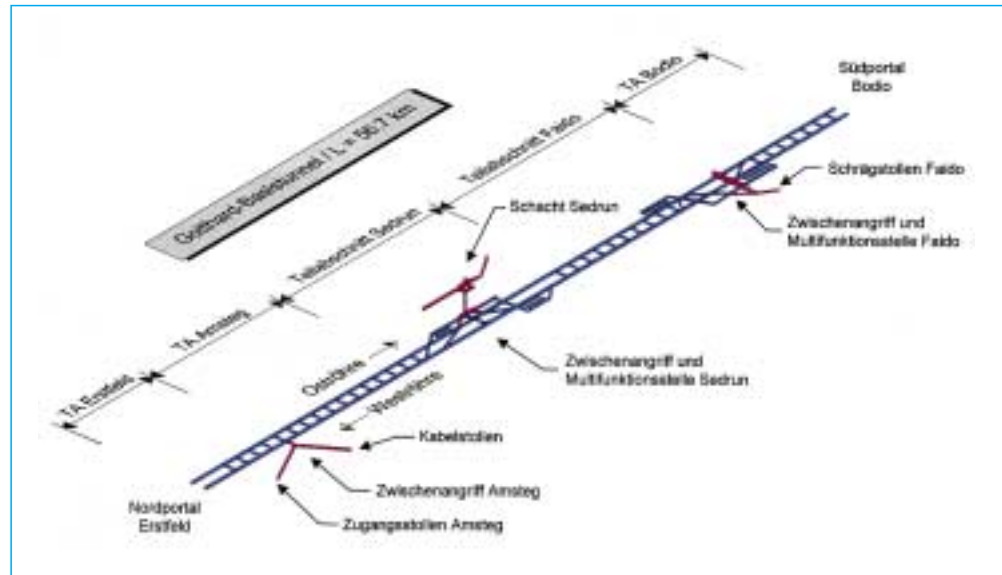
In order to complete the world's longest tunnel in a reasonable time frame as well as to provide proper air-conditioning, it is split up into five construction sections – namely the contract sections Erstfeld, Amsteg, Sedrun, Faido and Bodio (Fig. 2). Three intermediate points of attack – in Amsteg, Sedrun and Faido – are needed towards this end.

The four sections Bodio, Faido, Sedrun and Amsteg are already under construction. All sections are being driven with tunnel boring machines (TBMs) with the exception of Sedrun, which is being tackled via drill + blast. However, the MFS in Faido and Sedrun are also produced by drill + blast.

2 Air-Conditioning during the Drive in the Bodio and Faido Part-Sections

The SUVA (Swiss Accident Insurance Institute) lays down clear rules for underground work in a moist and hot climate. The air temperature in and around the main working points must never be higher than 28 °C dry temperature (given 100 % air humidity). In this way, acute heat afflictions during an 8-hour stint of hard underground work can be avoided.

The construction ventilation system ensures that maximum working point concentrations (threshold values) are adhered to, i.e. replacement of the spent air and dilution of the toxic substances produced underground – although not air-conditioning as such. The cooling function produced by the construction ventilation system does, however, represent a welcome side effect.



1 Gesamtübersicht des 56,7 km langen Gotthard-Basistunnels (GBT)
 1 Overview of the 56.7 km long Gotthard Base Tunnel (GBT)

dem Ersatz der verbrauchten Luft, und zur Verdünnung der unter Tage produzierten Schadstoffe, aber nicht direkt der Kühlung. Die Kühlfunktion der Baulüftung ist aber ein willkommener Nebeneffekt.

Zur Baulüftung der parallelen Tunnelvortriebe mit einer offenen TBM wird z. B. in den beiden Teilabschnitten Bodio und Faido jeweils ein Umluftsystem eingerichtet.

Frischlufte wird dabei ab dem Portal Bodio bzw. dem Zugangsstollen Faido im freien Querschnitt der Oströhre zum Vortrieb geblasen und über den vordersten Querschlag in die Weströhre zum Vortrieb geblasen, wo sie im freien Querschnitt zurückströmt (Bild 3). Im Bereich des vordersten Querschlags wird die Zuluft mit zwei Ventilatoren gefasst und direkt zum Vortrieb der Oströhre bzw. über den vordersten Querschlag zum Vortriebsbereich der Weströhre geblasen. Die Abluft strömt im freien Querschnitt der Weströhre zurück. Die Abluft ist rund 10 °C wärmer als die Zuluft.

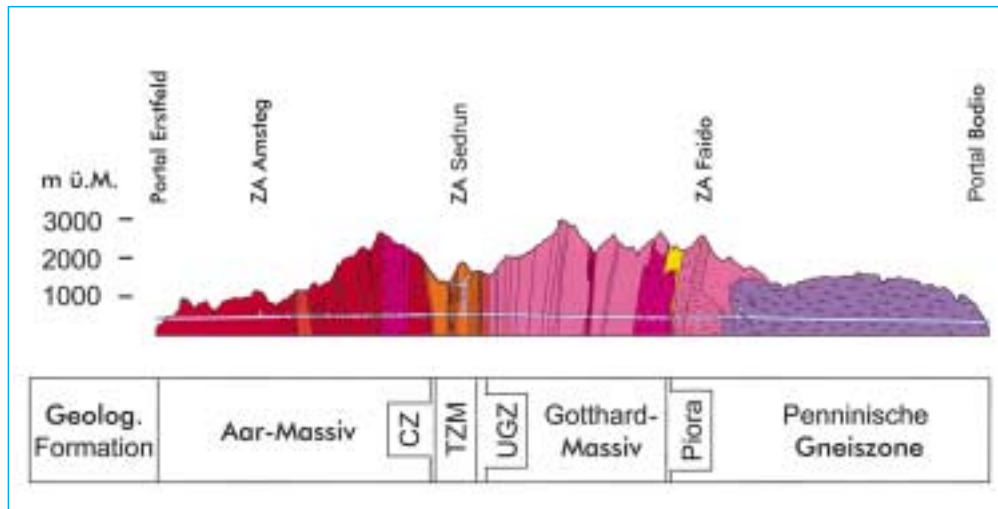
Verschiedene Wärmequellen beeinflussen die Lufttemperatur im Tunnel.

Gebirgswärme

Die massive Gebirgsüberlagerung bis 2300 m lässt auf Grund der geothermischen Tiefenstufen im Tunnelbereich mittlere Felsursprungstemperaturen von bis zu 41 °C (± 5 °C) erwarten (Bild 4). Die vor Beginn der Bauarbeiten herrschende Felsentemperatur wurde mit mathemati-

A recirculation system is set up e.g. in the two part-sections Bodio and Faido to provide air-conditioning for the parallel tunnel drives with an open TBM.

In this connection, from the Bodio portal and the Faido access tunnel fresh air is blown into the free cross-section of the eastern tube to the drive and conducted through the first crosscut into the western tube, where it returns to the free cross-section (Fig. 3). At



2 Geologisches Längenprofil mit den fünf Bauabschnitten
 2 Geological longitudinal profile with the five construction sections

the first crosscut the incoming air is taken over by two fans and blown directly to the drive in the eastern tube and to the driving zone of the western tube via the first crosscut. The spent air flows through the free cross-section of the western tube. The spent air is some 10 °C warmer than the fresh air.

Various sources of heat influence the tunnel air temperature.

Rock Heat

The massive rock overburden of up to 2,300 m indicates that average rock source temperatures of up to 41 °C (±5 °C) are to be anticipated on the basis of the geothermic depth stages in the tunnel zone (Fig. 4). The prevailing rock temperature prior to the start of construction work was established by means of mathematical models and calibrated with temperature measurements obtained through exploratory drilling. The measured rock temperatures at the bottom of the Sedrun shaft as well as those in the Faido MFS confirm these model calculations.

The course of the curve distinctly shows the cooling

schen Modellen ermittelt und an Temperaturmessungen von Sondierbohrungen geeicht. Die gemessenen Felsentemperaturen am Schachtfuss Sedrun sowie in der MFS Faido bestätigen die Modellrechnungen.

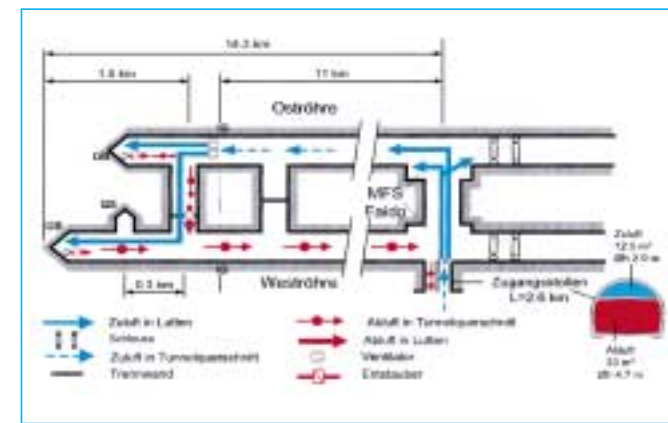
Im Kurvenverlauf deutlich sichtbar ist die Abkühlung im Bereich der Piöra-Mulde bei Tunnel-km 36.

Abwärme von Maschinen

Fast die gesamte durch die Baumaschinen im Tunnel verbrauchte Energie wird in Wärme umgesetzt.

Die im Vortrieb eingesetzte Tunnelbohrmaschine mit einer installierten Leistung von rund 6300 kW erwärmt durch die mechanische Arbeit der Rollenmeißel das Ausbruchmaterial und gibt weitere Abwärme an die Luft bzw. Kühlwasserkreisläufe ab. Das Schutterssystem hat ebenfalls großen Einfluss auf die sich einstellenden Lufttemperaturen: Auf offenen Förderbändern gibt das Ausbruchmaterial wesentlich mehr Abwärme an die Luft ab als in Schutterwagen oder geschlossenen Rollgurtförderern. Beim GBT kommen Schutterzüge zum Einsatz, die aber wiederum selbst eine installierte Leistung von jeweils bis 560 kW haben.

Das Abbinden des Spritzbetons zur Felssicherung ist ein exothermer Vorgang. Jedes Kilogramm Zement produziert bis zum vollständigen Abbinden 380 kJ Wärme. In einer offenen Baudränage fließendes Bergwasser, das in der Regel dieselbe Temperatur aufweist wie der Fels, heizt die Tunnelluft zusätzlich auf. Zu guter Letzt produzieren natürlich auch die Arbeiter selber Wärme, nämlich täglich etwa 20 000 kJ/Person.



3 Umluftsystem beim TBM-Vortrieb Faido
 3 Recirculation system for the Faido TBM drive

Die pro Zeiteinheit anfallende Abwärme ist maßgeblich von der Vortriebsleistung abhängig. Bei großen Vortriebsleistungen wird einerseits viel neue Felsfläche freigelegt, die Abwärme abgeben kann. Gleichzeitig ist die Abwärme aus den Installationen (TBM, Schutterung) sehr groß. Das Kühlsystem muss in der Lage sein, die Einhaltung der SUVA-Bedingungen auch bei hohen Vortriebsleistungen von bis zu 32 m pro Arbeitstag sicherzustellen.

effect of the Piöra basin at tunnel km 36.

Waste Heat produced by Machinery

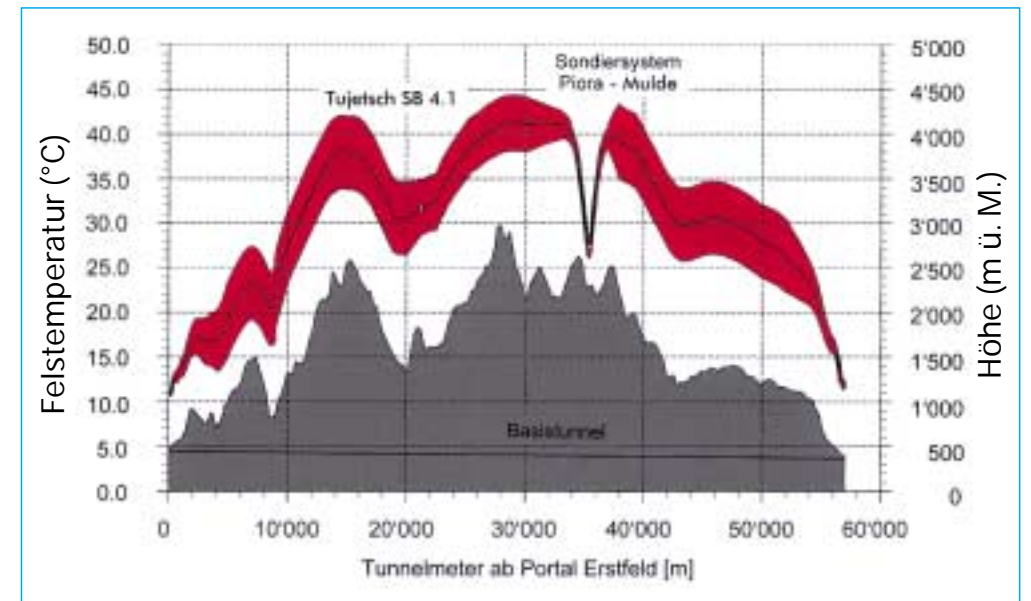
Practically the entire energy used by the construction machines in the tunnel is converted into heat.

The tunnel boring machine with an installed output of around 6,300 kW employed for the drive heats up the excavated material through the mechanical work of the roller bits and releases further waste heat into the air and

cooling water circuits. The mucking system also exerts a major influence on the resultant air temperatures. On open conveyor belts the excavated material releases substantially more heat into the air than when it is transported in mucking cars or closed roller belt conveyors. Mucking trains are used for the GBS, each of which has an installed output of 560 kW.

The setting of the shotcrete used for supporting the rock represents an exothermal process. Each kg of cement produces some 380 kJ of heat until it finally sets. Underground water in the construction drainage, which generally possesses the same temperature as the rock, heats up the tunnel air even further. Then of course, the workers themselves produce heat, namely around 20,000 kJ/person per day.

The waste heat released per time unit is largely determined by the rate of advance. In the event of high rates of advance, a great deal of new rock surface is exposed which can release waste heat. At the



4 Gebirgstemperaturen durch massive Gebirgsüberlagerung
 4 Rock temperatures through massive rock overburden

Jene Abwärme, die nicht über die Baulüftung abgeführt wird, muss durch eine Baukühlung heruntergekühlt werden.

Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten zur Kühlung des Vortriebes, nämlich mit einer

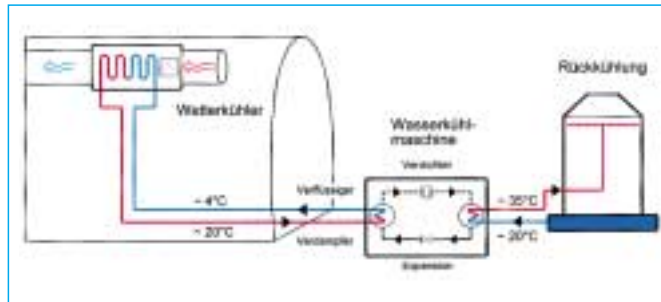
- zentralen oder einer
- dezentralen Kühlung.

Als Kälte-träger, der die Abwärme aus dem Tunnel transportiert, dient bei beiden Systemen reines Wasser ohne chemische Zusätze. Nur damit kann vermieden werden, dass bei undichten Stellen und bei unvermeidbaren Teilentleerungen beim Ausbau des Netzes gefährliche Stoffe freigesetzt werden. Auch die in den Kältemaschinen eingesetzten Kältemittel müssen den Anforderungen an die Umweltverträglichkeit genügen.

Beim **zentralen Baukühlungssystem** erfolgt die Kühlung des Kälte-trägers zentral, in der Regel beim Portal, mit einer Kaltwassermaschine (Bild 5). Diese besteht im Wesentlichen aus einem Verdampfer und einem Verdichter. Die Abwärme aus dem Kältekreisprozess wird in Kühltürmen an die Umgebung abgegeben. Die Vorlauf-temperatur beträgt ca. 5 °C. Will man eine Aufwärmung des Kühlwassers auf dem langen Weg zum Vortrieb vermeiden, kann es wirtschaftlich sein, die Vorlaufleitung zu isolieren.

In **so genannten Wetterkühlern** wird die Warmluft des Lüftungssystems über mit dem Kaltwasser gefüllte Kühlschlangen geführt und so abgekühlt (Bild 6). Sie sind an den Arbeitsstellen in Vortrieb und bei den Betonierbaustellen verteilt.

Beim **dezentralen Kühlungssystem** sind Wetterkühler und Kaltwasserma-



5 Zentrales Baukühlungssystem

5 Central construction cooling system

schinen in sog. Wasserkühlmaschinen kombiniert und direkt im Arbeitsbereich angeordnet (Bild 7). Die Rückkühlung erfolgt wiederum beim Portal. Das Temperaturniveau der Vorlauf- wie auch der Rücklaufleitungen ist deutlich höher (+10 bis 15 °C) als bei der zentralen Kühlung.

Eine Besonderheit stellt das Druckniveau dar. Das Portal Faïdo liegt rund 330 m höher als der Tunnelvortrieb. Sowohl die Kühlleitungen als auch die Kühlaggregate in den Tunnelröhren müssten auf einen höheren Wasserdruck ausgelegt werden. Deshalb wird ein Hochdruck- und ein Niederdruckkreislauf eingerichtet. An der Schnittstelle – in Faïdo am Fußpunkt des 2700 m langen Zugangsstollens – wird ein Hochdruck-Niederdruck-Wär-



6 Wetter- bzw. Luftkühler

6 Climate/air cooler

same time, the waste heat released by the installations (TBM, mucking equipment) is also very large. The cooling system must be capable of adhering to SUVA conditions even given high rates of advance of up to 32 m per working day.

Any waste heat, which is not removed via the construction ventilation system, must be cooled down by an air-conditioning system.

There are essentially two possibilities for cooling the drive, namely by means of a

- central or a
- decentral air-conditioning system.

Pure water with chemical additives serves as the cooling agent, which transports the waste heat from the tunnel. This is the only way of ensuring that toxic substances are not released in the event

of leakages and inevitable partial discharges when developing the network. The cooling agents used in the refrigerators must also comply with the demands of environmental compatibility.

In the case of the **central construction air-conditioning system**, the cooling agent is cooled centrally, usually at the portal, using a cold-water machine (Fig. 5). By and large, this comprises a vaporiser and a compressor. The waste heat produced by the cooling circuit process is released into the environment in cooling towers. The flow temperature amounts to roughly 5 °C. It is advisable to insulate the flow line if one wishes to avoid the cooling water heating up on the long way to the drive.

The hot air produced by the ventilation system is transferred to **so-called air coolers** via cooling coils that are filled with cold water and cooled in this manner (Fig. 6). They are set up at the working points in the drive and at the concreting points.

In the case of the **decentral cooling system**, air coolers and cold water machines are combined in so-called water cooling machines and set up directly where work is in progress (Fig. 7). Once again recirculation takes place at the portal. The temperature level for the flow and return lines is considerably higher (+10 to 15 °C) than for central air-conditioning.

The pressure level represents a special feature. The Faïdo portal is located some 330 m higher than the tunnel drive. Both the cooling lines as well as the cooling aggregates in the tunnel tubes had to be designed for a higher water pressure. As a consequence, a high pressure and a low-pressure circuit are installed. A high pressure/low pressure

metauscher installiert. Bei herkömmlichen Hochdruck-Niederdruck-Wärmetauschern entsteht ein Temperaturverlust von rund 4 °K.

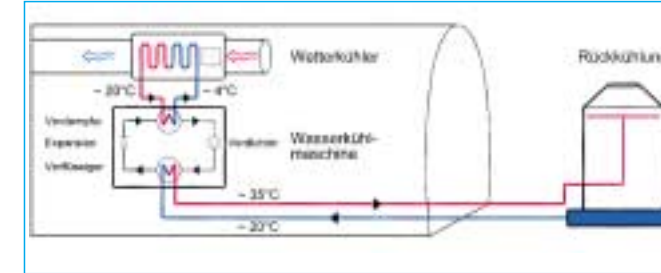
Alternativ dazu kann ein im Ankauf deutlich teurerer, aber im Betrieb effizienterer Dreikammerrohrhaube eingesetzt werden. Bei diesem resultiert lediglich ein Temperaturverlust von ca. 0,5 bis 1,0 °K. Dies kann sich auf das gesamte restliche System positiv auswirken (Leitungsdurchmesser, Wärmetauscher, Wassermengen).

Sowohl das Kühlsystem mit zentraler als auch jenes mit dezentraler Kühlung sind beim Teilabschnitt Bodio und Faïdo untersucht worden. Von der Arge TAT (Tunnel AlpTransit Ticino) wurde das dezentrale System vorgeschlagen. Auf Grund einer Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung über die volle Bauzeit konnte der Bauherr unter Berücksichtigung von Investitionen und Betriebskosten (inkl. Energie) diesem Vorschlag zustimmen. Vorteile gegenüber der zentralen Lösung sind vor allem:

- Gezieltere Zuführung der Kälte zu den Arbeitsstellen durch das höhere Temperaturniveau des Wasserkreislaufs
- Weiterverwendung der Installationen im TA Faïdo, die auf der TBM und bei den Betonierbaustellen bereits im TA Bodio vorhanden waren
- Etwas größere Flexibilität hinsichtlich des Zeitpunktes der erforderlichen Installation des modular aufgebauten Kühlsystems
- Geringere Gesamtkosten

3 Klima in der Betriebsphase

Gewisse Klimaanforderungen zum Schutz von Rei-



7 Dezentrale Kühlung

7 Decentral cooling

senden und Rollmaterial bei Normalbetrieb sowie von Erhaltungspersonal müssen im Tunnel gewährleistet werden. So sollte die Temperatur in der Tunnelröhre zwischen -20 °C und +35 °C liegen und die relative Luftfeuchtigkeit 70 % nicht überschreiten. Im Weiteren müssen im Bereich von elektromechanischer Ausrüstung strengere klimatische Verhältnisse eingehalten werden. Aus diesen Gründen ist für die Auslegung des Tunnels eine angemessene Vorhersage des Tunnelklimas notwendig. Im Speziellen beeinflusst die Prognose die Wahl von temporären Belüftungs- oder Klimaanlage für Erhaltungsarbeiten sowie von permanenten Belüftungs- und Klimasystemen im Bereich von elektromechanischer Ausrüstung. Zudem bildet die Klimaprognose die Basis für Maßnahmen im Falle von untolerierbaren Temperatur- und/oder Feuchtebedingungen während des Normalbetriebs in den Fahrtröhren.

Das Tunnelklima wird durch verschiedene, z. T. gekoppelte aerodynamische und thermodynamische Effekte charakterisiert. Die Aerodynamik des Gotthard-Basistunnels wird hauptsächlich durch den Zugfahrplan bestimmt. Die räumliche und zeitliche Verteilung der Luftgeschwindigkeiten und

heat exchanger is installed at the intersection point – in Faïdo at the bottom of the 2,700 m long access tunnel. There is a temperature loss of around 4 °K in the case of conventional high pressure/low pressure heat exchangers.

A three-chamber tube distributor, which is considerably more expensive to purchase but a lot more efficient in operation, can be used as an alternative. The resultant temperature loss here only amounts to some 0.5 to 1.0 °K. This can have a positive effect on the other system elements (line diameter, heat exchanger, water amounts).

Both the central air-conditioning system as well as the one with decentral cooling were tried out for the Bodio and Faïdo part-sections. The decentral system was proposed by the TAT (Tunnel AlpTransit Ticino) JV. The client was able to agree to this proposal on the basis of an overall economic appraisal over the entire construction time taking investments and operating costs (incl. energy) into account. Its main advantages compared with the central system are:

- More accurate transference of cold to the working points thanks to the higher temperature level of the water circuit
- Further use of the installations in the Faïdo part-section, which were already available

on the TBM and at the concreting sites in the Bodio part-section

- Somewhat greater flexibility regarding the point-in-time for the required installation of the modularly set-up cooling system
- Lower overall costs

3 Air-Conditioning during the Operating Phase

Certain demands on air-conditioning to protect passengers and rolling stock during normal services as well as maintenance staff must be met in the tunnel. This means for instance, that the temperature in the tunnel tubes should lie between -20 °C and +35 °C and the relative air humidity should not exceed 70 %. In addition, more strict climatic conditions should be adhered to for electro-mechanical equipment. Consequently, it is essential to have an accurate forecast of the tunnel climate for designing the tunnel. This forecast particularly influences the choice of temporary ventilation or air-conditioning units for maintenance work as well as permanent ventilation and air-conditioning systems in the vicinity of electro-mechanical equipment. Furthermore, the climate forecast forms the basis for resorting to measures in the event of intolerable temperature an/or humidity conditions during normal service in the running tunnels.

The tunnel climate is characterised by various, in some cases, coupled aerodynamic and thermodynamic influences. The aerodynamics of the Gotthard Base Tunnel will mainly be governed by the train timetable. The spatial and chronological distribution of air speeds and pressures is closely associated with the

Drücke ist eng an das verwendete Rollmaterial, die geplanten Geschwindigkeiten etc. gebunden. Die Tunnelaerodynamik ist eine entscheidende Eingabegröße für die thermodynamischen Simulationen.

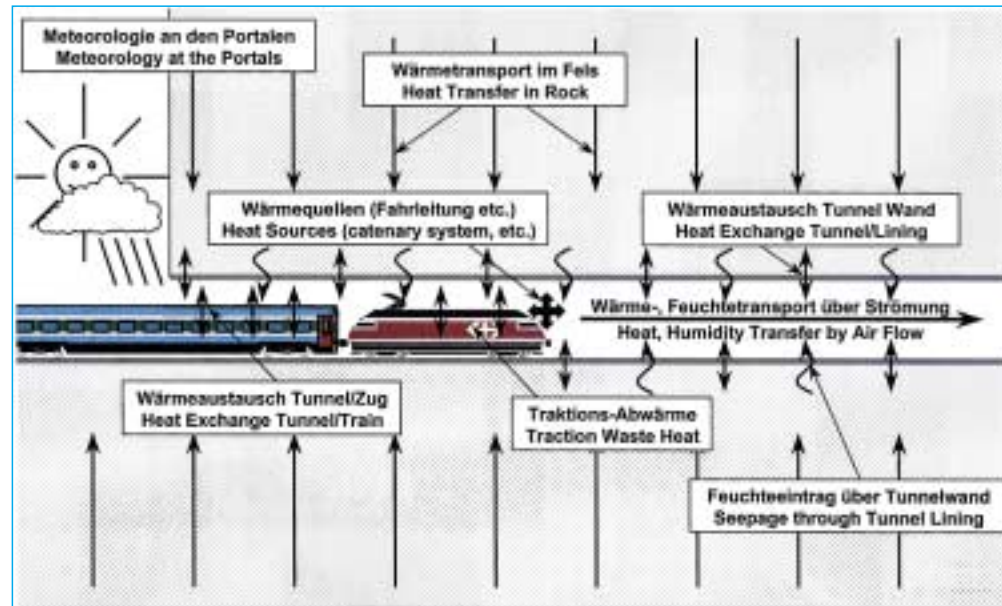
Die folgenden **klimabestimmenden Faktoren** sind untereinander auf komplexe Weise miteinander verbunden (Bild 8):

- meteorologische Bedingungen an den Portalen
- Wärmetransport im umliegenden Fels zum Tunnel hin/vom Tunnel weg
- Wärmeaustausch zwischen Tunnelluft und Fels über die Tunnelwand
- Feuchteintrag über die Tunnelwand
- Wassereintrag durch Züge
- Wärmeaustausch zwischen Tunnelluft und Zügen
- Abwärme von Lokomotiven in Abhängigkeit vom Traktionsaufwand
- technische Wärmequellen wie Fahrleitung, Beleuchtung, Signale, elektronische Ausrüstung etc.
- Wärmetransport über die Luftströmung
- Feuchteintrag über die Luftströmung

Ein Computerprogramm berücksichtigt diese Faktoren. Die Berechnungen beinhalten die detaillierte Simulation aller einzelnen Zugdurchfahrten über einen Zeitraum von mehreren Jahren.

Aktueller Stand der Prognose

Vorliegend steht das langfristige Klima des Gotthard-Basistunnels im Vordergrund (entsprechend einem „klimatischen Gleichgewichtszustand“). Kurzfristige Phänomene wie Druck-, Temperatur- oder Feuchteschwankungen bei Zugdurchfahrten, Erhaltungsarbeiten oder



8 Die auf komplexe Weise miteinander verbundenen klimabestimmenden Faktoren
 8 The climate determining factors which are linked with one another in a complex manner

täglichen Änderungen der Meteorologie werden nicht betrachtet. Wesentliche Eingabeparameter sind die Fels-temperatur, die Zuggeschwindigkeiten, die meteorologischen Verhältnisse an den Portalen und das thermische Verhalten der Züge. Die Werte dieser Parameter werden als wahrscheinlich eingestuft. Bei der Bestimmung von einigen dieser Parameter bestehen aber noch erhebliche Unsicherheiten.

rolling stock that is used, the planned speeds etc. The tunnel aerodynamics represents a decisive parameter for the thermodynamic simulations. The following **climate-determining factors** are linked with one another in a complex manner (Fig. 8):

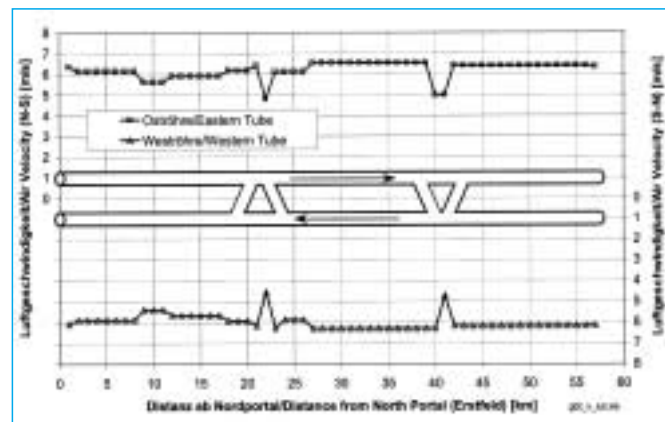
- Meteorological conditions at the portals
- Heat transport in the surrounding rock to and from the tunnel
- Heat exchange between the tunnel air and rock via the tunnel wall

- Moisture intake via the tunnel wall
- Water introduced by trains
- Heat exchange between tunnel air and trains
- Spent air released by locomotives depending on the traction expenditure
- Technical heat sources such catenary wire, lighting, signals, electronic equipment etc.
- Heat transport via the air stream
- Moisture transport via the air stream.

A computer programme takes all these factors into account. The calculations contain the detailed simulation of all individual trains passing through the tunnel over a period of several years.

Current Level of the Forecast

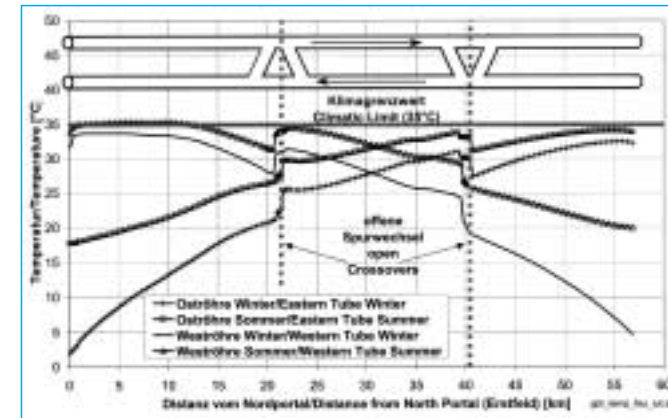
The long-term climate in the Gotthard Base Tunnel is accorded priority (corresponding to a "climatic state of equilibrium"). Short-term phenomena such as pressure, temperature or humidity fluctuations



9 Die durch den Zugverkehr induzierte Luftgeschwindigkeit
 9 Air speed induced by train traffic

Einer der wichtigsten Parameter für das Tunnelklima ist die durch den Zugverkehr induzierte Luftgeschwindigkeit. In Bild 9 wird die mittlere Luftgeschwindigkeit entlang der Ost- und Weströhre des Basistunnels illustriert. Die Richtung des Luftstroms (Oströhre N nach S, Weströhre S nach N) ist identisch mit der Richtung des Zugverkehrs. Der Gesamtmittelwert (Mittelwert über die Fahrplanperiode von 2 h) ist in beiden Röhren ca. 6 ms⁻¹. Die Schwankungen der Luftgeschwindigkeit entlang den Tunnelröhren werden durch Änderungen im Tunnelquerschnitt verursacht. Das Minimum kann im Falle von offenen Spurwechseln bei den Multifunktionsstellen Sedrun und Faido gefunden werden.

Die entsprechenden Lufttemperaturen entlang der Ost- und Weströhre des Basistunnels werden in Bild 10 gezeigt. Die täglichen Temperaturen werden für typische Sommer- und Wintertage gemittelt. Generell nimmt die Temperatur in beiden Röhren im Sommer und im Winter jeweils in Richtung des Zugverkehrs vom Einfahr- zum Ausfahrportal zu. Maximalwerte können im Bereich der Ausfahrportale beobachtet werden. Jede Kurve beinhaltet zwei Temperaturprünge entlang den Tunnelröhren bei den Multifunktionsstellen. Diese Stufen werden bei geöffneten Spurwechseln durch die Vermischung der Tunnelluft beider Röhren bei den Multifunktionsstellen herbeigeführt. Die saisonalen Schwankungen der Temperatur werden durch das Außenklima bestimmt. Die maximalen Temperaturen erreichen ca. 35 °C. Im Unterschied zu den gezeigten Temperaturen nimmt



10 Lufttemperaturen entlang der Ost- und Weströhre des Basistunnels
 10 Air temperatures along the eastern and western tubes of the Base Tunnel

die relative Luftfeuchtigkeit in Richtung des Zugverkehrs entlang beider Röhren und in beiden Jahreszeiten ab. Dies hängt mit dem starken Anstieg der Temperaturen zusammen. Die erwärmte Tunnelluft kann mehr Feuchtigkeit aufnehmen als durch den Wassereintrag über die Tunnelwand geliefert wird. Folglich muss die relative Feuchtigkeit abnehmen. Maximalwerte liegen in der Umgebung der Einfahrportale.

Zwei Parametergruppen sind ausschlaggebend für die Prognose des Tunnelklimas:

- Parameter im Zusammenhang mit dem umliegenden Fels (Wärmeleitfähigkeit des Felses, ursprüngliche Fels-temperatur, Wasserfluss im Fels, Wassereintrag über die Tunnelwand)
- Parameter im Zusammenhang mit dem Rollmaterial (Fahrplan, Luftreibungskoeffizient der Züge, Wärmeübergangskoeffizient Zug/Tunnelluft, thermisch wirksame Masse der Züge, thermisch wirksame Oberfläche der Züge, Zugeintrittstemperatur, Zugeintrittsfeuchte)

Im folgenden Kapitel werden Maßnahmen vorgestellt,

tuations in the event of trains passing through the tunnel, maintenance work or daily changes in the weather are not taken into consideration. The essential input parameters are the rock temperature, the train speeds, the meteorological conditions at the portals and the thermal behaviour of the trains. The values of these parameters are assessed as probable. However, there are still considerable uncertainties in establishing some of these parameters.

One of the most important parameters for the tunnel climate is the air speed induced by travelling trains. The average air speed along the eastern and western tubes of the Base Tunnel is displayed in Fig. 9. The direction of the air current (N to S in the eastern tube, S to N in the western one) is identical with the direction of traffic. The overall average value (average value over the time table period of 2 h) is approx. 6 ms⁻¹ in both tubes. The fluctuations in air speed along the tunnel tubes are caused by changes in the tunnel cross-section. The minimum is to be found in the case of open crossovers at the Sedrun and Faido multifunctional stations.

The corresponding air temperatures along the eastern and western tubes of the Base Tunnel are shown in Fig. 10. The daily temperatures are determined for typical summer and winter days. Generally speaking, the temperature increases in both tubes in summer and in winter in the direction of train traffic from the access to the exit portal. Maximum values can be observed at the exit portals. Each curve signifies two temperature leaps along the tunnel tubes at the multifunctional points. These increases result from the tunnel air from both tubes mixing at the multifunctional points where there are open crossovers. The seasonal temperature fluctuations are caused by the outside climate. Maximum temperatures reach about 35 °C.

In contrast to the displayed temperatures the relative air humidity decreases in the direction of train traffic along both tubes and in both summer and winter. This is due to the pronounced increase in temperatures. The heated up tunnel air is capable of accepting more moisture than supplied by the water introduced via the tunnel wall. As a result, the relative humidity has to drop. Maximum values are to be found in the vicinity of the access portals.

Two groups of parameters are decisive for forecasting the tunnel climate:

- Parameters in conjunction with the surrounding rock (heat conductivity of the rock, original rock temperature, flow of water in the rock, water intake via the tunnel wall)
- Parameters in conjunction with the rolling stock (timetable, air friction coefficient of the trains, heat transition coefficient train/tunnel air, thermally active mass of the trains, thermally active sur-

um die Genauigkeit dieser Parameter und der Klimaprognose zu erhöhen.

Weitere Arbeiten

Abgesicherte Basisparameter sind notwendig. Zur Datensammlung während des Tunnelbaus wurde ein Monitoringkonzept entwickelt. Das laufende Monitoring enthält die folgenden Maßnahmen:

- Messung der ungestörten Felstemperatur mindestens alle 2 km in Bohrlöchern senkrecht zum Tunnelverlauf
- Messung diskreter Wasserzutritte bei Quellen/Bruchstellen
- Messung des Gesamtwasserzuflusses aus dem Fels für verschiedene geologische Einheiten im Dränagesystem
- Messung der Wärmeleitfähigkeit von Felsproben mindestens alle 2 km
- Messung der Wärmekapazität von Felsproben mindestens alle 2 km
- Messung der Dichte von Felsproben mindestens alle 2 km
- Messung des Wassereintrags über die Tunnelwand für verschiedene geologische Einheiten mittels Änderung der Luftfeuchtigkeit
- Simulation mit validierten Parametern

Seit Beginn der Bauarbeiten an den Haupttunneln des Gotthard-Basistunnels 2001 wird das Monitoring durchgeführt.

Die zum Rollmaterial gehörigen Parameter werden durch Messungen in bestehenden Tunneln eingegrenzt. Zudem wird das Simulationsmodell verfeinert.

Klima-Rückfallebenen

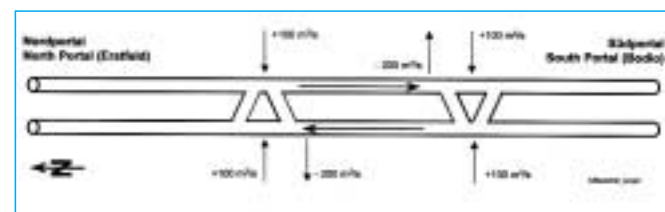
Falls das prognostizierte Klima die gewählten Grenzwerte für Temperatur und/oder Feuchtigkeit über-

schreitet, sind verschiedene Maßnahmen geplant. An erster Stelle sind Lufttauscher vorgesehen. Die Vorarbeiten zur Realisierung der Lufttauscher sind in die Tunnelauslegung eingeflossen. Die Vorkehrungen für die Installation dieser Lufttauscher sind im Gange. An drei verschiedenen Stellen, den Zugangstollen Amsteg, Sedrun und Faido, ließe sich feuchte und warme Tunnelluft durch frische und kalte Außenluft ersetzen. Eine mögliche Anordnung eines solchen Lufttauschersystems wird schematisch in Bild 11 gezeigt. Die Luftmenge, welche bei jeder dieser Stellen ausgetauscht würde, beträgt $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Obwohl der Temperatureinfluss dieser Maßnahme mit der Distanz zu den Lufttauschern abnimmt, könnte sie die Klimasituation unter bestimmten Umständen verbessern.

Eine weitere denkbare Möglichkeit, das Klima zu verbessern, sind Kühlrohre entlang der Tunnelbereiche, in denen die Klimagrenzwerte überschritten werden (vgl. Kanaltunnel). Der Einfluss derartiger zusätzlicher Klimasysteme auf das Tunnelklima wurde untersucht. Wenn notwendig, können auch diese weiteren Maßnahmen genutzt werden.

Zusammenfassung

Mit der dezentralen Kühlung in den Teilabschnitten



11 Schema einer möglichen Anordnung eines Lufttauschersystems
11 Schematic drawing of a possible set-up for an air exchange system

face of the trains, train temperature upon entry, train humidity upon entry)

In the following chapter, measures will be presented designed to increase the accuracy of these parameters and the climatic forecast.

Further Work

Substantiated basic parameters are essential. A monitoring concept was developed for collecting data during the construction of the tunnel. The ongoing monitoring programme contains the following measures:

- Measuring the undisturbed rock temperature at least every 2 km in holes drilled perpendicular to the course of the tunnel
- Measuring discrete water inflows in the case of springs/breaks
- Measuring the overall water inflow from the rock for various geological units in the drainage system
- Measuring the heat conductivity of rock samples at least every 2 km
- Measuring the heat capacity of rock samples at least every 2 km
- Measuring the density of rock samples at least every 2 km
- Measuring the water intake via the tunnel wall for various geological units through changing the air humidity
- Simulation with validated parameters

Monitoring has been carried out since construction work on the main tubes of the Gott-

hard Base Tunnel started in 2001.

The parameters that belong to the rolling stock are delimited through measurements in existing tunnels. Furthermore the simulation model is being refined.

Climate Reversion Levels

Should the predicted climate exceed the selected limit values for temperature and/or humidity, various measures are planned. First and foremost, air exchangers are foreseen. The preliminary work designed to realize the air exchangers has been included in the tunnel design. The provisions for installing these air exchangers are in progress. At three different points, at the access tunnels Amsteg, Sedrun and Faido, moist and hot tunnel air can be replaced by fresh and cold air from the outside. Fig. 11 presents a schematic drawing of the possible set-up of such an air exchange system. The air quantity, which is exchanged at each of these points, amounts to $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Although the temperature influence of this measure decreases as the distance from the air exchangers grows, it could improve the climate situation under certain circumstances.

Cooling pipes set along the tunnel areas, in which the climatic limit values are exceeded represent a further conceivable possibility of improving the climate (please see the Channel Tunnel). The influence of such additional air-conditioning systems on the tunnel climate was investigated. Should it be necessary, these further measures could also be utilized.

Summary

Thanks to the decentral cooling system in the Bodio

Bodio und Faido wird es möglich sein, für die Belegschaft im Tunnel während des Vortriebs jederzeit akzeptable Arbeitsbedingungen sicherzustellen.

Die aktuelle Prognose des Tunnelklimas während des Betriebs kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Basierend auf den derzeit bekannten Parametern liegt das Tunnelklima innerhalb der akzeptierbaren Grenzen

für Temperatur und Feuchtigkeit.

■ Unsicherheiten verbleiben für einzelne Parameter.

■ Um diese Unsicherheiten (ungünstiges Abweichen der Parameter von den Annahmen) zu eliminieren, resp. frühzeitig die Rückfallebenen (Lufttauscher) planen zu können, wird während des Vortriebs der Tunnelröhren das Monitoring umgesetzt.

and Faido part-sections, it will be possible to ensure there are acceptable working conditions for the labour force in the tunnel at any time during the drive.

The current forecast for the tunnel climate during its operation can be summed up as follows:

- Based on the currently conceivable parameters the tunnel climate lies within the ac-

ceptable limits for temperature and humidity

■ Uncertainties remain for individual parameters

■ In order to eliminate these uncertainties (unfavourable fluctuation of the parameters from the assumptions), and to be in a position to plan the reversion levels (air exchangers), monitoring is applied when the tunnel tubes are being driven.