

Baulüftung und -kühlung des Brenner-Basistunnels

Von Andreas Busslinger und Daniel Portmann

Einführung

Der Brenner-Basistunnel (Österreich-Italien) bildet einen zentralen Teil der geplanten Eisenbahnverbindung zwischen München und Verona und damit des europäischen Eisenbahnhochleistungsnetzes. Mit seiner Länge von mehr als 55 km wird er einer der längsten Tunnel der Welt sein (vgl. Bild 1). Das Projekt schließt den Ausbruch, Innenausbau sowie die bahntechnische Ausrüstung von mehr als 124 km Einspurtunneln (2 Haupt- und 4 Verbindungsröhren), 6 Spurwechseln, 2 Überholstrecken, 170 Querschlägen, einer großen Anzahl technischer Räume, 4 Zugangsstollen und etlicher Fluchtstollen ein.

Da der Bau des Brenner-Basistunnels mehrere Jahre dauern und die einzelnen Baustellen sich über mehr als 10 km erstrecken können, ist eine ausgereifte Planung der Lüftung und Kühlung für die Bauphase unabdingbar.

In den Jahren 2006/2007 erfolgt die Planung der Baulüftung und -kühlung des Brenner-Basistunnels für die Bauphasen Rohbau, Ausbau und bahntechnische Ausrüstung auf Stufe eines "UVE Projektes" in Österreich bzw. eines "Progetto Definitivo" in Italien.

Ziele der Baulüftung und -kühlung

Auf untertägigen Baustellen müssen gesetzlich vorgeschriebene arbeitsmedizinische Klimagren-

zen eingehalten werden (maximale Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK, vgl. 3, 4), Temperaturen, Luftgeschwindigkeiten, etc.). Die wesentlichen diesbezüglichen Richtlinien sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Des Weiteren müssen insbesondere im Brandfall Sicherheitsanforderungen berücksichtigt werden, wie z.B. die Gewährleistung rauchfreier Fluchtbereiche sowie Entrauchung. Generell dürfen die Lüftung und Kühlung den Baufortschritt nicht behindern.

Tabelle 1 Lüftungs- und kühlungsrelevante arbeitsmedizinische Richtlinien (gem. 1, 2)

Table 1 Ventilation and cooling relevant guidelines of occupational medicine (cf. 1, 2)

Richtlinie	Grenzwert	Relevanz für
Frischluf-zufuhr für Arbeiter	$\geq 2 \text{ m}^3/\text{min}/\text{Arbeiter}$	Baulüftung
Frischluf-zufuhr zur Abfuhr von Diesel-schadstof-fen	$\geq 4 \text{ m}^3/\text{min}/\text{kW}$ (Nenn-leistung)	Baulüftung
Luftge-schwindig-keit im Tunnel-querschnitt	$\geq 0.2 \text{ m/s}$ $\leq 5.0 \text{ m/s}$	Baulüftung
Trocken-temperatur	$\leq 30^\circ\text{C}$	Baulüftung, Baukühlung

Construction Ventilation and Cooling of the Brenner Base Tunnel

The Brenner Base Tunnel (Austria-Italy) with its length of more than 55 km will be amongst the world's longest tunnels.

During the construction climatic limits given by the authorities have to be fulfilled.

Since the construction of the Brenner Base Tunnel will last for several years and some of the working sites extend to a length of more than 10 km, a sophisticated design of the ventilation and cooling is needed.

In this paper, besides the general project approach a detailed view on the design of the ventilation and cooling systems during the construction phase of the Brenner base tunnel is given.

The design of ventilation and cooling requires to consider various aspects like different, highly transient heat sources and sinks, emissions and many interfaces, for example to the civil works.

The concept of venting and cooling features a high flexibility in terms of possible project changes.

Der Brenner-Basistunnel (Österreich-Italien) wird mit seiner Länge von mehr als 55 km einer der längsten Tunnel der Welt sein.

Während der Bauphase müssen gesetzlich vorgeschriebene klimatische Grenzen eingehalten werden.

Da der Bau des Brenner-Basistunnels mehrere Jahre dauern und die einzelnen Baustellen sich über mehr als 10 km Vortriebslänge erstrecken können, ist eine ausgereifte Planung der Lüftung und Kühlung unabdingbar.

Neben der allgemeinen Methodik zur Planung der Bauklimatisierung wird eine detaillierte Beschreibung des Baulüftungs- und Baukühlungssystems des Brenner-Basistunnels gegeben.

Zur Auslegung der Baulüftung und -kühlung mussten vielfältige Aspekte wie unterschiedliche, hoch instationäre Wärmequellen und -senken, Emissionen und zahlreiche Schnittstellen z.B. zur Bauleistik berücksichtigt werden.

Das erarbeitete Lüftungs- und Kühlungskonzept weist eine hohe Flexibilität gegenüber Projektänderungen auf.

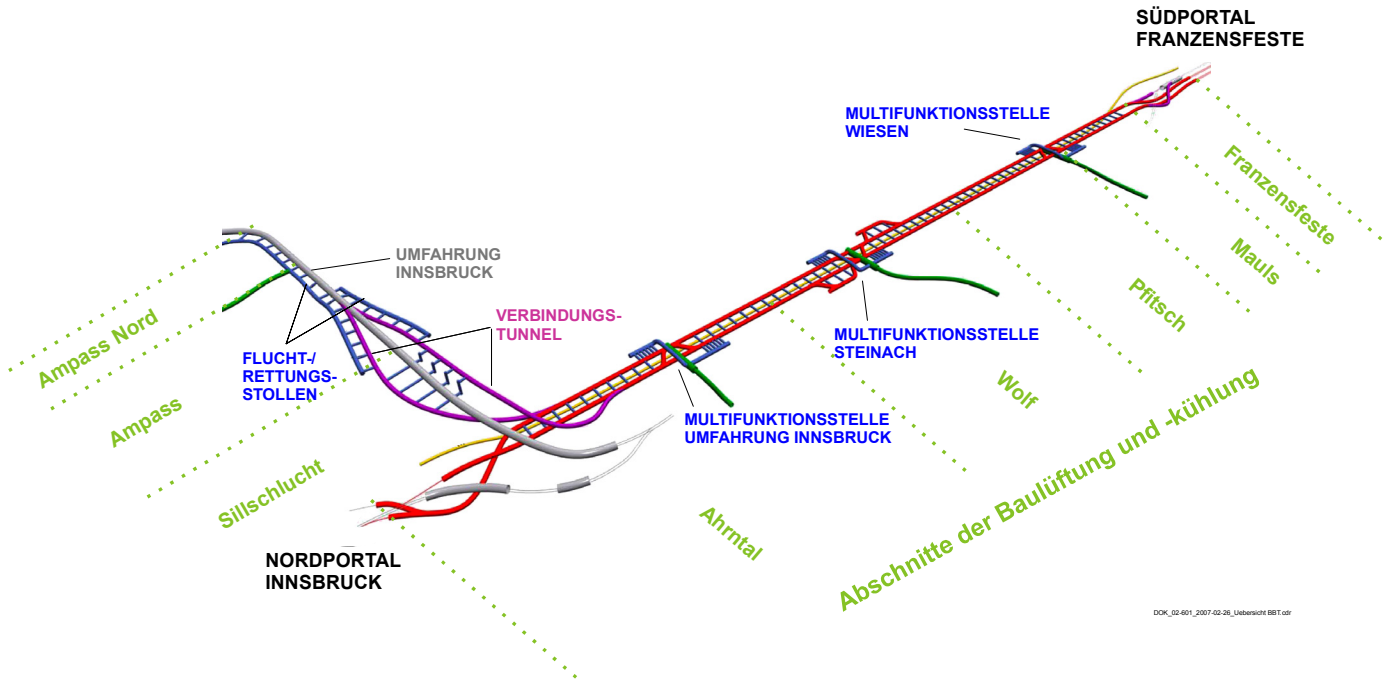


Bild 1 Schematische Übersicht Brenner-Basistunnel inkl. Abschnitte der Baulüftung und -kühlung
Fig. 1 Schematic overview Brenner base tunnel incl. sections of ventilation and cooling

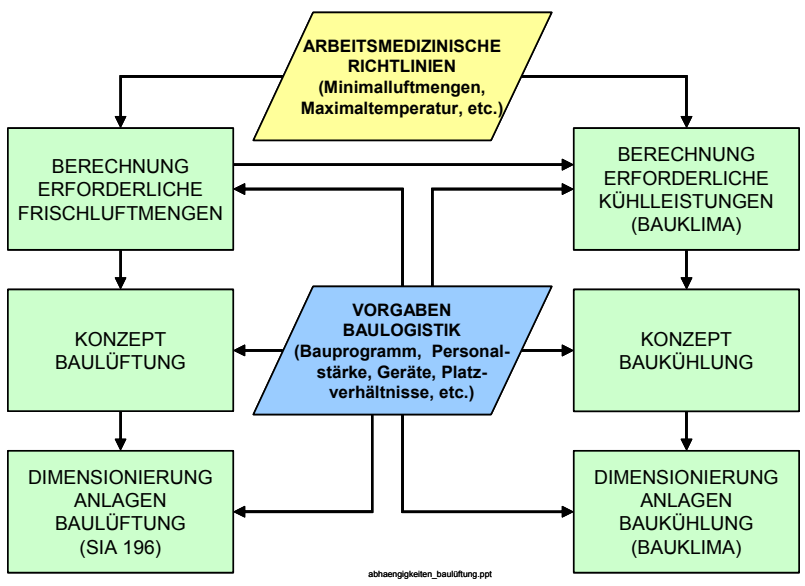


Bild 2 Methodik der Baulüftungs- und -kühlungsauslegung
Fig. 2 Method of the ventilation and cooling design

Während der Bauphasen des Brenner-Basistunnels sind in allen Arbeitsbereichen zu jeder Zeit diese klimatischen Anforderungen zu erfüllen.

Allgemeine Methodik

Die Projektierung von Baulüftungs- und -kühlungsanlagen lässt sich grob gemäß Bild 2 beschreiben:
 Ausgehend von den teilweise gesetzlich festgelegten, arbeitsmedizinischen Richtlinien für Untertagearbeiten werden die erforderlichen Frischluftmengen in den Tunnelbereichen berechnet. Hierbei muss von Seiten der Baulogistikplanung die vorgesehene Anzahl Arbeiter sowie der Einsatz der (dieselbetriebenen) Maschinen einfließen.

Unter Berücksichtigung dieser Luftmengen, der durch die Baulogistik vorgegebenen Abwärmen der eingesetzten Geräte sowie weiterer Faktoren (Fels-, Verdunstungswärme, Wechselwirkungen von Tunnelluft, Fels, Kühlwasser- und Luttenleitungen, etc.) werden die zur Einhaltung der arbeitsmedizinischen Klimagrenzwerte erforderlichen Kühlleistungen berechnet. Hierzu müssen geeignete Rechenmodelle eingesetzt werden (z.B. das numerische Simulationstool BAUKLIMA).

Mit der erforderlichen Zuluftmenge und Verteilung der Frischluft sowie der durch die Baulogistik vorgegebenen Randbedingungen (Platzverhältnisse, Verfügbarkeit untertage, etc.) können zunächst das Konzept der Baulüftung (Verteilung und Menge der Anlagen) und schließlich die Anlagen (Ventilatoren, Luttenleitungen, etc.) ausgelegt werden. Diese Dimensionierung erfolgt rechnergestützt basierend auf der im Untertagebau bewährten Richtlinie des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA, vgl. 5).

Die berechnete Verteilung und Leistung der Kühlung sowie die oben erwähnten Vorgaben der Baulogistik werden zuerst zur Erstellung des Konzepts der Baukühlung und in der Folge zur Auslegung der Anlagen (Wetterkühler, Kühlrohre, Pumpen, Kühltürme, etc.) eingesetzt. Diese Spezifikationen erfolgen ebenfalls mehrheitlich computergestützt.

Wie in Bild 2 ersichtlich, hat die Baulogistikplanung bei der Projektierung der Baulüftung und -kühlung eine große Bedeutung.

Konzepte

Das Bauprogramm des Brenner-Basistunnels beinhaltet den Tunnelvortrieb von mehreren Zwischenangriffen und Portalen aus. Die laufend ändernden Vortriebs- und Ausbauarbeiten beanspruchen mehrere Jahre.

Um einen nahtlosen Baubetrieb zu gewährleisten, werden 8 Lüftungs- und Kühlungsabschnitte mit bis zu 5 individuellen Phasen unterschieden. Die Definition der Abschnitte erfolgte in Abhängigkeit der geplanten Baulose bzw. Zwischenangriffe an den Fußpunkten der Zugangsstollen Ampass, Siltschlucht, Ahrntal, Wolf, Pfitsch und Mauls sowie im Bereich des Portals Franzensfeste. In Bild 1 werden diese Abschnitte in einer Übersicht schematisch dargestellt.

Für jeden dieser Abschnitte und jede Phase wurde ein individuelles Konzept für die Baulüftung und -kühlung entworfen.

Baulüftung

Allen Baulüftungskonzepten sind die folgenden Grundsätze gemeinsam:

- Die Baulüftung erfolgt für jeden Abschnitt individuell. Nach dem Tunneldurchbruch zu benachbarten Bauabschnitten müssen zu diesem Zweck die Bauabschnitte mittels Schleusen aerodynamisch voneinander getrennt werden.
- Die maximale Leistung bzw. der maximale Anlagenbedarf der Baulüftung richtet sich nach der maximalen Bautätigkeit und Vortriebslänge (d.h. z.B. größte, gleichzeitig eingesetzte Maschinenleistung untertage).
- Alle verfügbaren Verbindungen des Tunnelsystems zur Oberfläche (Portale der Haupttunnelröhren, Zufahrtstunnel, Zwischenangriffe, Erkundungstollen) werden für die Luftzu- und -abfuhr genutzt.
- Der Grenzwert der maximalen und minimalen

Luftgeschwindigkeit in allen Bauabschnitten und -phasen wird eingehalten.

- Die minimal erforderlichen Luftmengen in den Arbeitsbereichen werden in allen Bauabschnitten und -phasen erreicht.
- Die Positionierung der Anlagen der Baulüftung (Lutten, Ventilatoren, etc.) führt zu keinen wesentlichen Einschränkungen des Bauablaufs.

In der Folge setzen sich alle definierten Lüftungskonzepte aus drei Grundtypen zusammen:

- **Blasende Lüftung:** Die Frischluft wird durch Lutten bis in den Ausbruchsbereich geführt. Die Abluft wird im Tunnelquerschnitt zum Portal geführt.
- **Umluft:** Die Frischluft wird über Lutten bis zum Beginn einer Röhre geführt. Von hier gelangt die Frischluft im Tunnelquerschnitt bis in den Vortriebsbereich. Über einen ausgebrochenen Querschlag werden die Frisch- und Abluft in die zweite Röhre geführt. Die Frischluft wird über Lutten zum dortigen Ausbruchsbereich geführt, während die gesamte Abluft beider Röhren im Tunnelquerschnitt Richtung Portal strömt.
- **Koppeln mehrerer Luttenstränge:** Für die langen, zeitlich vorgezogenen Vortriebe des Erkundungstollens werden mehrere Luttenstränge mit zwischengeschalteten Einzelventilatoren gekoppelt. Die Förderdrücke der Einzelventilatoren sowie Luttedrücke lassen sich dadurch, verglichen mit einer blasenden Belüftung mit einem Luttenstrang, massiv reduzieren.

Die Konzepte aller Abschnitte und Phasen können in diesem Artikel nicht dargestellt werden. Beispielhaft wird in Bild 3 das Konzept der Baulüftung für den Abschnitt Wolf (vgl. Bild 1) während der Phase maximaler Bautätigkeit gezeigt. Deutlich ersichtlich ist die innige Verflechtung und Massierung der Luftführungen für die gleich-

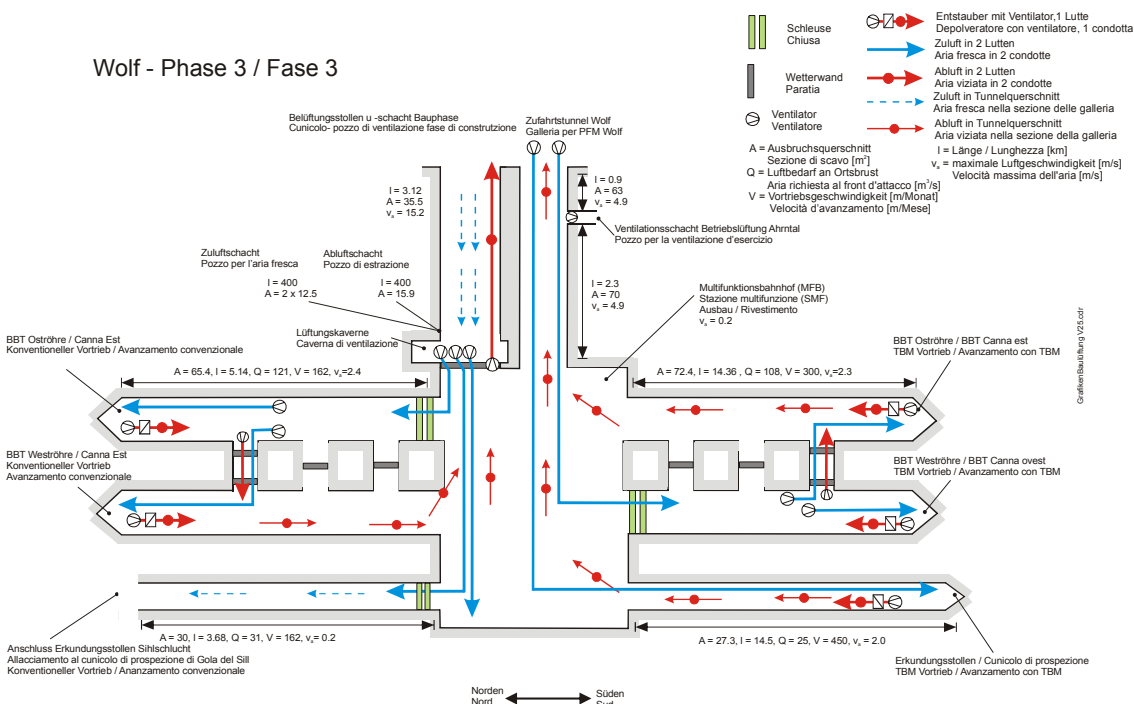


Bild 3 Konzept der Baulüftung für den Abschnitt Wolf (Bereich der Multifunktionsstelle Steinach)

Fig. 3 Concept of the ventilation for section Wolf (vicinity of the multifunctional station Steinach)

Wolf - Phase 3 / Fase 3

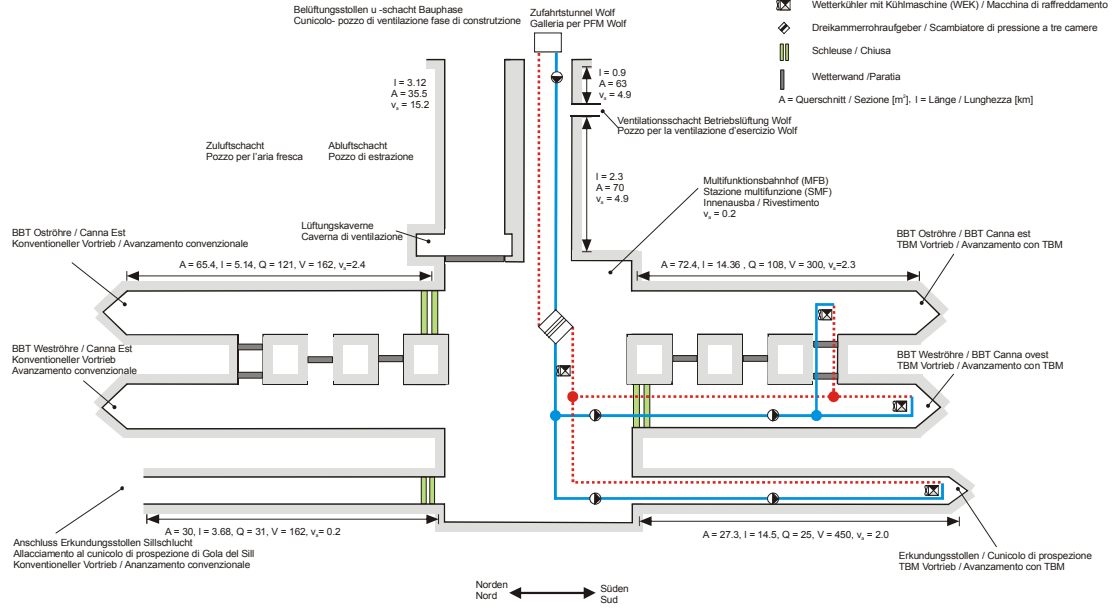


Bild 4 Konzept der Baukühlung für den Abschnitt Wolf (Bereich der Multifunktionsstelle Steinach)
Fig. 4 Concept of the cooling for section Wolf (vicinity of the multifunctional station Steinach)

zeitigen Vortriebe der Haupttunnelröhren nach Nord und Süd, der Multifunktionsstelle und des Erkundungsstollens.

Aufgrund des großen Frischluftbedarfs wurden zusätzliche Baulüftungs-Tunnelbauwerke erforderlich: 1 Lüftungsstollen und 3 Lüftungsschächte für Zu-/Abluft sowie 1 Lüftungskaverne für 8 Ventilatoren.

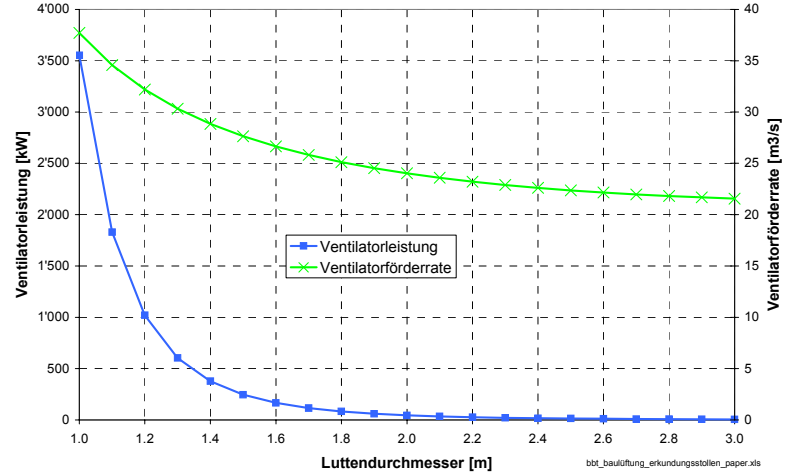
Für das gesamte Basistunnelprojekt sind zur ausschließlichen Nutzung durch die Baulüftung 2 Lüftungsstollen und 3 Lüftungsschächte für Zu-/Abluft, 2 Lüftungskavernen mit je mehr als 8 Ventilatoren, 4 Streckenkavernen mit Ventilatoren zur Kopplung langer Luttentränge vorgesehen.

Baukühlung

Alle Konzepte der Baukühlung beinhalten die folgenden Grundelemente:

- **Lokaler Wärmeentzug** (dezentrale Kühlung): Am Entstehungsort der Wärme (Maschinenabwärme im Vortriebsbereich, etc.) werden Wetterkühler platziert. Sie entnehmen der Tunnel-luft Wärme und geben diese an das Kühlwasser

Bild 5 Luttendurchmesser und Ventilatorleistung/förderrate für einen Erkundungsstollenvortrieb mit 17.5 m³/s Frischluftbedarf an der Ortsbrust
Fig. 5 Air duct diameter and fan power/volume rate in case of a pilot tunnel excavation with 17.5 m³/s fresh air demand at the working face



ab.

- **Wärmetransport:** Das erwärmte Kühlwasser wird über Kühlrohre aus dem Tunnel transportiert. Dieses Kühlrohrsystem verfügt über einen Vor- (Zufuhr kaltes Wasser) und Rücklauf (Abfuhr erwärmtes Wasser).

- **Wärmeentsorgung:** Die Tunnelabwärme muss an den Portalen an die Umgebung abgegeben werden. In Kühltürmen findet der Wärmeaustausch zwischen Umgebungsluft und Kühlwasser statt.

Da auf die oben beschriebene Weise weder größere Wassermengen zu- noch abgeführt werden, spricht man von einer geschlossenen Kühlwasserzirkulation. Diese hat die folgenden Vorteile:

- geringer Wasserbedarf
- geringe Umweltbelastung (geringe Wassernahme, Wärmeabgabe von/an Vorfluter)
- weitgehend unabhängig von Umwelteinflüssen (Wassermangel, etc.)

Als Beispiel wird in Bild 4 das Konzept der Baukühlung für den Abschnitt Wolf (vgl. Bild 1) während der Phase maximaler Bautätigkeit gezeigt. Aufgrund der Kühlwirkung der Baulüftung sind nicht in allen Bereichen Kühlmaßnahmen vorzusehen.

Dimensionierung der Anlagen

Baulüftung

Die konzeptgemäße Spezifikation der Ventilatoren und Lutteneitungen erfolgte mittels eines Rechenmodells auf Basis der SIA 196 (5).

Bild 5 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit zwischen Luttendurchmesser und Ventilatorleistung bzw. Förderrate bei einer erforderlichen Frischluftmenge von 17.5 m³/s an der Ortsbrust eines

Erkundungsstollenvortriebs im Abschnitt Wolf mit blasender Belüftung. Mit Vergrößerung des Luttdurchmessers lässt sich somit die erforderliche Leistung der Ventilatoren verringern. Allerdings gilt es stets, die Rohbaumhülle bzw. die verfügbaren Platzverhältnisse im Tunnelquerschnitt zu berücksichtigen.

Über die gesamte Länge des Basistunnels und

die gesamte Rohbaudauer betrachtet sind maximal 44 Großventilatoren (an Portalen, in untertätigen Zentralen), 68 Hilfsventilatoren (im Vortriebsbereich), 95 km Luttenleitungen, 170 Wetterwände (in Querschlägen und in Tunnelröhren) und 15 Schleusen (in Tunnelröhren) vorgesehen.

Die Großventilatoren weisen eine maximale Anschlussleistung von 50 MW auf und fördern

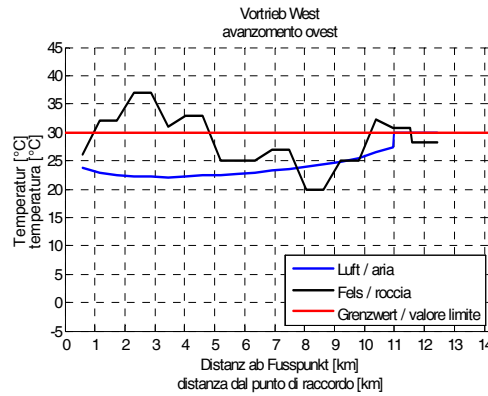
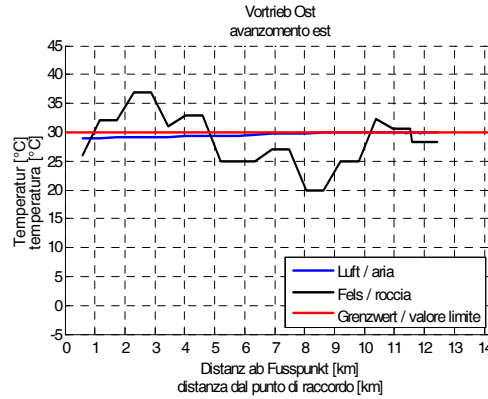
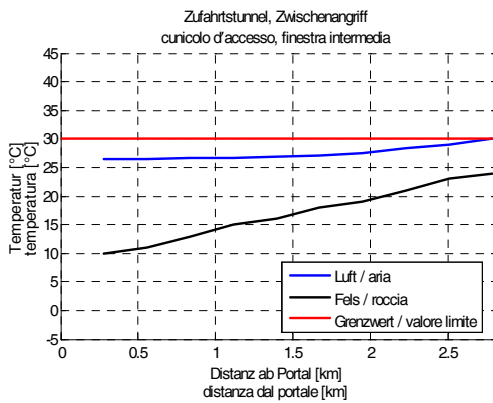


Bild 7 Berechnete Temperaturverteilung (BAUKLIMA) in den Südvortrieben des Abschnitts Wolf bei Einsatz der Baukühlung

Fig. 6 Calculated temperature distribution (BAUKLIMA) in southward headings of section Wolf with cooling operation

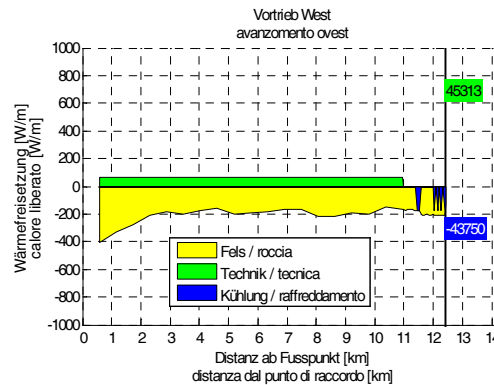
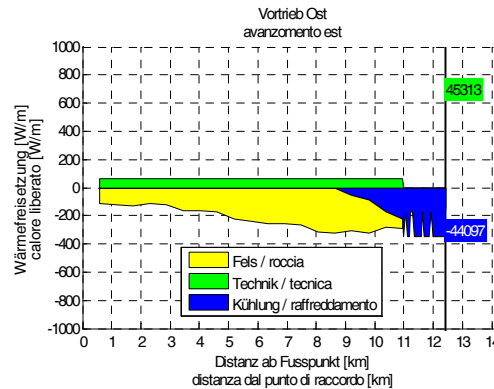
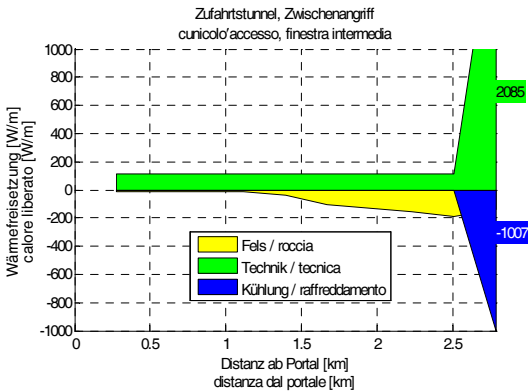


Bild 6 Vorgegebene/berechnete Verteilung der Wärmequellen/-senken (BAUKLIMA) in den Südvortrieben des Abschnitts Wolf bei Einsatz der Baukühlung

Fig. 7 Assumed/calculated distribution of heat sources/sinks (BAUKLIMA) in southward headings of section Wolf with cooling operation

maximal 2'300 m³/s Frischluft in die Tunnelbereiche.

Baukühlung

Ausgehend von den oben erläuterten Baukühlungskonzepten wurden die Anlagen der Baukühlung dimensioniert. Die Spezifikation der lokal eingesetzten Wetterkühler, des Kühlrohrsystems, der Kühlwasserpumpen und der Kühltürme an den Portalen wurde mit dem numerischen Simulationsprogramm BAUKLIMA berechnet.

In Bild 7 und Bild 6 werden am Beispiel der Südvortriebe im Abschnitt Wolf die berechneten Temperaturen und Kühlleistungen gezeigt. Unter Berücksichtigung der Vortriebsgeschwindigkeiten und der Abwärme der gemäß Logistikplanung eingesetzten Maschinen wurde mit dem numerischen Prognoseprogramm BAUKLIMA die Größe und Verteilung der erforderlichen Kühlleistung zur Einhaltung des Temperaturgrenzwertes gemäß Tabelle 1 sowie die resultierende Temperaturverteilung in den Tunnelabschnitten berechnet. Hierbei wurde die thermische Wechselwirkung zwischen Lüftung und Kühlung (z.B. Wärmeaustausch von Luttenleitungen und Kühlrohren mit der Tunnelluft) ebenso wie der Wärmetransport im umliegenden Gestein einberechnet.

Das Beispiel zeigt, dass eine Wärmeabfuhr mit Kühlanlagen in den Vortriebsbereichen sowie streckenweise im bereits erwärmten Abluftbereich des Umluftsystems (vgl. Bild 3) erforderlich wird.

Mit den oben genannten Konzepten sowie den berechneten Kühlleistungen werden maximal 6 Kühltürme (an Portalen), 32 Zirkulationspumpen, 105 km Kühlwasserleitungen (Vor- und Rücklauf), 104 Wetterkühler (Luft Wasser Wärmetauscher inkl. Kühlmaschine und Ventilator in Tunnelröhren) und 1 Dreikammerrohraufgeber (Druckschleuse für Kühlwasserzirkulation im Bereich des MFB Steinach) vorgesehen.

Die maximale Anschlussleistung der Wetterkühler beträgt ca. 30 MW. Maximal werden 60 MW Kühlleistung benötigt.

Schlussfolgerung

Die oben erläuterte Konzeption und Auslegung der Baulüftung und Baukühlung während der Rohbauphasen des Brenner-Basistunnels haben kurz folgende Punkte an den Tag gefördert:

- Die geplante Bündelung der Vortriebsarbeiten bedingt eine große Frischluftzufuhr unertage bei gleichzeitig beschränkten Zugängen.
- Um diesem Frischluftbedarf zu genügen, sind zusätzliche, ausschließlich für die Baulüftung bestimmte Bauwerke, wie z.B. Baulüftungsstollen einzuplanen.
- Die unabdingbare, nahtlose Baulüftung und -kühlung muss mit Hilfe einer sorgfältigen Abschnitts- und Phasenplanung sichergestellt werden.

- Neben der Arbeitsmedizin bildet das Bauphysik-Konzept die wesentliche Grundlage für die Bemessung der Baulüftung- und -kühlung.
- Bei der Auslegung der Anlagen bzw. Überprüfung der Konzepte sind rechnergestützte Verfahren notwendig (z.B. BAUKLIMA), die insbesondere die Wechselwirkung zwischen Lüftung und Kühlung berücksichtigen.

- Die modulartige Auslegung der Baulüftung und -kühlung ist bzgl. möglicher Änderungen im Bauablauf anpassbar bzw. erweiterbar gehalten.

Neben der beschriebenen Rohbauphase gilt es, die Baulüftung und -kühlung in der Phase des Einbaus der bahntechnischen Ausrüstung des Brenner-Basistunnels zu betrachten. Die Erfahrung aus vergleichbaren Projekten (Gotthard- und Lötschberg-Basistunnel) zeigen, dass diese Phase eine analoge ingenieurtechnische Herausforderung darstellt.

Quellennachweis

1. DPR 20 marzo 1956, n. 320: Norme per la prevenzione degli infortuni e l'igiene del lavoro sotterraneo.
2. Bauarbeiterschutzverordnung – BauV, BGBl. Nr. 340/1994 idF BGBl. Nr. 706/1995, BGBl. II Nr. 121/1998 und BGBl. II Nr. 368/1998
3. Österr. Bundesgesetzblatt 253/2001 vom 27. Juli 2001: Grenzwerteverordnung 2001 – GKV 2001
4. Österr. Bundesgesetzblatt 184/2003 vom 18. März 2003: Änderung der Grenzwerteverordnung 2001 (GKV 2003)
5. SIA-Empfehlung 196: Baulüftung im Untertagebau. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 1998

Autoren

Dr. Andreas Busslinger, Dipl. Erdwissenschaftler ETH, HBI Haerter AG, Thunstrasse 9, CH-3000 Bern 6, Schweiz, E-Mail andreas.busslinger@hbi.ch
 Daniel Portmann, Dipl. Maschineningenieur ETH, HBI Haerter AG, Thunstrasse 9, CH-3000 Bern 6, Schweiz, E-Mail daniel.portmann@hbi.ch