

Tunnel als Tor nach Europa – Modellbasierte Simulationen am Semmering-Basistunnel mit Schwerpunkt Energie, Klima und Sicherheit

Manuel Frey¹, Daniel Dümmler¹, David Akeret¹, Verena Langner²

¹ Bauklimatik DACH, Gruner AG, Schweiz, E-Mail: david.akeret@gruner.ch

² HDS Safety and Tunnel Ventilation, Gruner GmbH, Wien, E-Mail: verena.langner@gruner.at

Kurzfassung

Im Jahr 2025 soll der Rohbau des Semmering-Basistunnels fertiggestellt werden, der auf einer Länge von 27 Kilometer die nördliche Alpenkette unterquert und so den Schienenverkehr zwischen Wien, Graz und Klagenfurt mit der voraussichtlichen Inbetriebnahme im Jahr 2030 entscheidend ausbauen wird.

Baumassnahmen dieses Ausmasses bringen besondere Herausforderungen, aber auch Chancen mit sich, wobei Gruner die Gelegenheit bekam, die Planungsleistungen für die Notfalllüftung und Aerodynamik zu übernehmen. Dieser Auftrag wurde anschliessend um die Entwicklung einer optimalen Klimatisierungsstrategie für die zahlreichen Versorgungsräume innerhalb des Tunnels erweitert. Hierzu wurden Lüftungskonzepte, Rückkühlkonzepte, Raumkonzepte und Hydraulikkonzepte entwickelt und durch die Anwendung von Simulationsmodellen vorab geprüft, um kritische umgebungsbedingte Einflüsse auf die innerhalb des Tunnels herrschende Temperatur und Luftqualität im Normalfall, aber auch im Ausnahmefall mittels BIM2SIM-Methode zu beurteilen.

Abstract

The drilling of the Semmering Base Tunnel is scheduled to be completed in 2025. With a length of 27 kilometres, it crosses the northern Alps and significantly improves rail connections between Vienna, Graz and Klagenfurt, scheduled to open in 2030.

Construction projects of this magnitude present special challenges, but also opportunities, and Gruner was given the opportunity to provide the planning services for the emergency ventilation system. This contract was subsequently extended to include the development of an optimum ventilation and cooling strategy for the numerous supply rooms within the tunnel. To this end, recooling concepts, room concepts and

hydraulic concepts were developed and tested in advance using simulation models in order to assess critical environmental influences on the temperature and air quality inside the tunnel in normal and exceptional cases while making use of the BIM2SIM-method.

Einleitung und Einsatz BIM2SM

Der Semmering-Basistunnel wird aus zwei parallel verlaufenden eingleisigen Röhren bestehen, welche in einem Abstand von circa 20 bis 70 Meter zueinander verlaufen. Um im Ereignisfall die Flucht zwischen den beiden Röhren zu ermöglichen und zur Unterbringung der erforderlichen technischen Anlagen für eine durchgängige Strom- und Internetversorgung innerhalb des Tunnels, werden die beiden Röhren durch insgesamt 56 Querschläge mit Abständen von rund 500 Meter zueinander verbunden, siehe Abbildung 1.

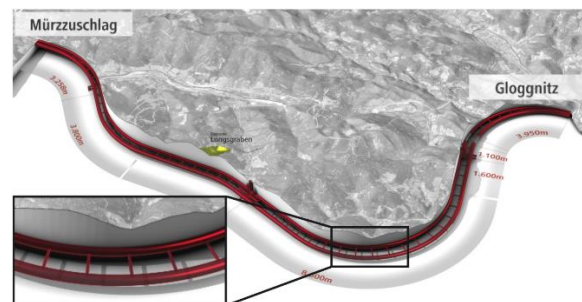


Abbildung 1: Verlauf des Semmering-Basistunnels

Inmitten des Tunnelsystems befindet sich zudem eine Nothaltestelle in einer Tiefe von rund 450 Meter, die aus einem Rettungs- und Wartebereich inzwischen zwei gegeneinander versetzten Notbahnsteigen besteht. Da sich viele der Querschläge in ihrer Länge und ihren Umgebungsbedingungen voneinander unterscheiden, war es notwendig, vorab Analysen zum Bestand und zu Risikofaktoren entlang des gesamten Tunnelsystems durchzuführen. Abbildung 2 zeigt den allgemeinen Aufbau eines Querschlags.

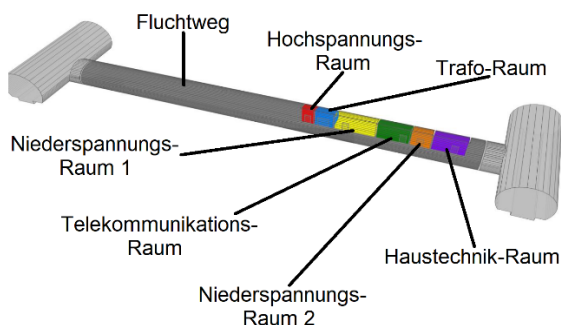


Abbildung 2: Querschlag Nr. 8 mit farblich dargestellten Versorgungsräumen

Um einen Überblick über die Gesamtsituation und somit ein Gefühl für alle Querschnitte zu erhalten, wurde das natürliche Rückkühlpotenzial der umgebenden Gesteinsschicht im Kontext der Querschnittslänge und der zu erwartenden internen Lasten analysiert. Somit entstand die Grundlage zur Entscheidungsfindung, welche Querschnitte als Referenz für weitere modellbasierte Studien genutzt werden sollen. Die Ergebnisse der Analyse werden in Abbildung 3 dargestellt, die gelb hervorgehobenen Querschnitte wurden aufgrund ihrer typologischen Eigenschaften für die modellbasierten Studien selektiert.

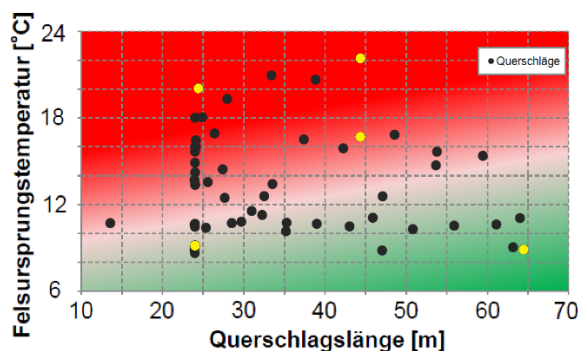


Abbildung 3: Risikoanalyse zur Überhitzung der Querschnitte

Im Vordergrund der detaillierten Variantenuntersuchung stand die Bewertung des Potenzials möglicher Wärmesenken, die sich aus den besonderen Gegebenheiten im Tiefbau ergeben, wie die Nutzung der Felsursprungstemperatur, des konstant kalten Bergwassers, aber auch der Tunnelluft. Ebenso mussten aber auch Risiken wie die erhöhte Gefahr der Beeinträchtigung der Geräte durch den im Tunnel unvermeidbaren Feinstaub und aerodynamische Druckschwankungen, die durch den Verkehr der Hochgeschwindigkeitszüge innerhalb des Tunnels entstehen, genau betrachtet werden. Hierzu wurden die vier Anwendungsfälle

(1) Dimensionierung, (2) Optimierung, (3) Nachweisführung und (4) Sensitivitätsanalyse bzw. "Stresstest" eingesetzt und mittels modellbasierter Analysen für die Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen angewendet. Für die modellbasierten Analysen wurde der methodische Ansatz nach BIM (Building Information Modelling) mit den drei Prozessschritten Preprocessing, Kernprozess und Postprocessing nach Abbildung 4 angewendet, um die komplexen Geometrien der Querschnitte detailgetreu modellieren zu können. Dabei wurden wesentliche Teile des Preprocessings in den Modellierungswerkzeugen Autodesk Revit und Sketchup durchgeführt, die zu analysierenden Querschnitte detailliert modelliert und mittels IFC-Schnittstelle (Industry Foundation Class) in das Simulationswerkzeug IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) von EQUA Simulation AB übergeben. Diese Schnittstelle zwischen Modellierungs- und Simulationssoftware wird auch BIM2SIM genannt.¹

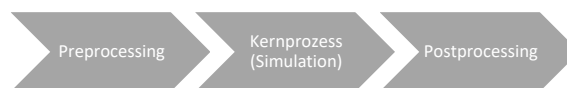


Abbildung 4: Schematische Abbildung des BIM2SIM-Prozesses

Die vorgängig notwendigen Parametrisierungen, die eigentlichen Simulationen sowie Plausibilitätsprüfungen wurden als Teil des Kernprozesses direkt in der Simulationsumgebung IDA ICE durchgeführt.² Die umfangreiche Datenanalyse, Datenvisualisierung und die Aufbereitung der Ergebnisse als adressatengerechte Entscheidungsgrundlagen wurden mit Python und Microsoft Excel erstellt.

Simulationen als zentraler Bestandteil der Beratungs- & Ingenieursleistung

Um das Felsreich, das die Querschnitte umgibt, als Faktor zu erfassen, wurde zuerst ein Ansatz mit eindimensionaler Wärmeleitung gewählt. Dabei wurde der umgebende Fels mit einer ein Meter starken, homogenen Schicht und einer gleichmässigen Felsursprungstemperatur im Simulationsmodell hinterlegt. Die ermittelten Temperaturwerte des Felsreichs wurden dann als Randbedingung für den Wärmetransport durch das erdberührte Bauteil herangezogen, mit variablem Zeitschritt simuliert und zu Stundenmittelwerten zusammengefasst. Besonders für die Erhaltung der Lebensdauer der Telekom-

¹ Vgl. (Zwahlen, M. et al., 2018)

² Vgl. (Preuss, J. et al., 2019)

munikationsanlagen war dies von hoher Relevanz, da diese eine Temperatur von etwa 18-22 Grad sowie eine Luftfeuchtigkeit von 20-60% erfordern und somit im Vergleich zu den weiteren technischen Anlagen nur geringe Toleranz zulassen. Abbildung 5 zeigt eine aus den Ergebnissen von Bohrungen berechnete Prognose der Felsursprungstemperatur entlang des gesamten Semmering-Basistunnels als Inputdaten für die Simulationsrechnungen, wonach besonders im mittleren Abschnitt des Tunnels bereits Temperaturen von bis zu 22 Grad bestehen und somit kaum Spielraum gegeben ist.

Anforderungen an die Luftqualität müssen zwecks Instandhaltungsarbeiten durch die Beurteilung der Kohlenstoffdioxidkonzentration eingehalten werden. Hinzu kommen Randbedingungen für den Luft- und Wasserdruck, sowie Gegebenheiten zur Konvektion innerhalb des Tunnelsystems. Zudem muss bei einem Tunnelsystem dieser Dimension von einer erhöhten Feinstaubbelastung ausgegangen werden, weshalb ein geschlossenes Kühlsystem priorisiert wurde, um die Beeinträchtigung der Geräte durch den Feinstaub zu minimieren.

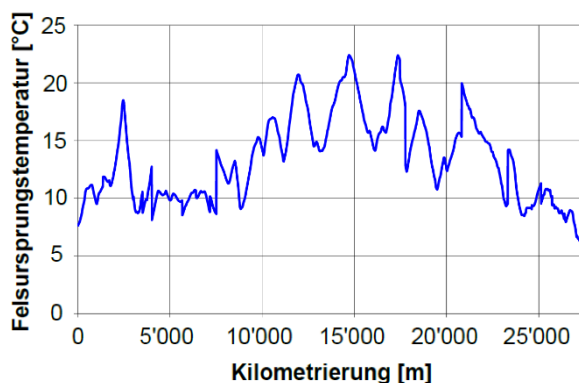


Abbildung 5: Prognostizierte Felsursprungstemperatur

Die Bearbeitung des Projekts wurde in drei Phasen unterteilt:

- > Phase 1: 1D-Grobkonzepte
- > Phase 2: Konzeptvarianten
- > Phase 3: Simulation des Klimakonzepts

Im Rahmen der ersten Phase entschied man sich dazu, basierend auf der vorherigen Risikoanalyse und aufgrund der hohen Anzahl an individuellen Querschlägen lediglich vier der repräsentativen Standardquerschläge zu modellieren und mittels 1D-Simulationen zu betrachten, sowie einen Sonderquerschlag der Nothaltestelle (vgl. Abbildung 6) und einen Sonderquerschlag (vgl. Abbildung 7) mit Funkbasisstation, durch die eine erhöhte technische Abwärme begründet ist.

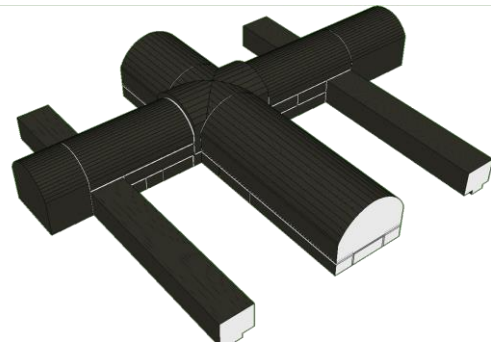


Abbildung 6: 3D-Modell Nothaltestelle in IDA ICE

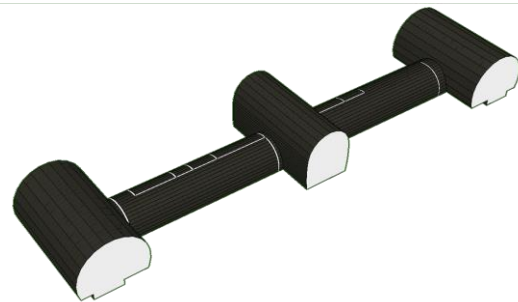


Abbildung 7: 3D-Modell Sonderquerschlag in IDA ICE

Alle Querschläge besitzen den gleichen Aufbau aus Bauteilkomponenten, welcher in Abbildung 8 als Querschnitt dargestellt ist und somit als bauphysikalische Grundlage dient.

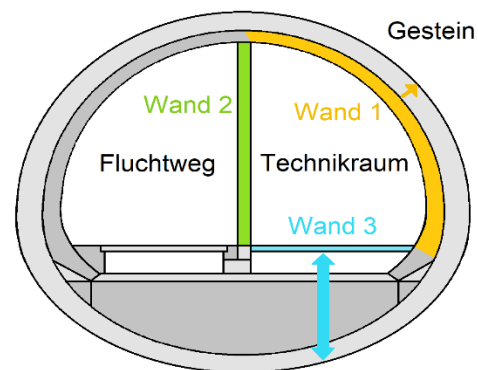


Abbildung 8: Schnitt Regel-Querschlag mit Bauteilen

Hierbei wurden der Aufbau der Innenwände, des Bodens und der Aussenwände gegen das Felsreich nach Tabelle 1 berücksichtigt und im Simulationswerkzeug IDA ICE parametrisiert.

Bei der Betrachtung dieser Daten in Verbindung mit den Ergebnissen der Felsursprungstemperaturmessungen stellte sich im Rahmen des Anwendungsfalls **(1) Dimensionierung** heraus, dass in jedem der Versorgungsräume eine Klimatisierung potenziell notwendig sein wird. Besonders wirkte sich diese Erkenntnis auf die Flächeneinteilung innerhalb der Querschläge aus, denn das ursprünglich bestehende Flächenkonzept der Querschläge sah fixe Längen für die

Mittelspannungs- und Niederspannungsräume vor, während die Versorgungsräume die verbleibende variable Fläche belegen.

Tabelle 1: Aufbau der Bauteile aus Abb. 8

Wand 1				
Schicht	Material	Dicke	Lambda	Dicke / Lambda
[-]	[-]	[m]	[W / mK]	[m²K / W]
1	Gewölbebeton	0.30	1.65	0.18
2	PVC-Folie	0.002	0.15	0.01
3	Vlies	0.001	0.03	0.04
4	Abdichtungsträger	0.05	1.15	0.04
5	Beton	0.60	1.65	0.36
Total				0.64
Wand 2				
Schicht	Material	Dicke	Lambda	Dicke / Lambda
[-]	[-]	[m]	[W / mK]	[m²K / W]
1	Beton	0.2	1.65	0.12
Total				0.12
Wand 3				
Schicht	Material	Dicke	Lambda	Dicke / Lambda
[-]	[-]	[m]	[W / mK]	[m²K / W]
1	Bodenbelag	0.05	1.65	0.03
2	Hohlboden (Luft)	0.73	0.15	4.87
3	WDI-Beton	0.30	1.65	0.18
4	Sohlfüllbeton	1.31	1.65	0.80
5	Beton	0.60	1.65	0.36
Total				6.24

Nach ersten statischen Analysen musste aufgrund der hohen Abwärmeleistungen im Telekommunikationsraum bereits frühzeitig davon ausgegangen werden, dass eine mögliche Wärmeabgabe über den umgebenden Felsen selbst bei möglichst langen Räumen, und dadurch entstehend grossen Oberflächen zur Wärmeübertragung, ohnehin nicht ausreichend sein wird. Somit stand die Notwendigkeit einer aktiven Klimatisierung des Telekommunikationsraumes im Rahmen eines Worst-Case-Ansatzes fest, weshalb nun allen Versorgungsräumen zur Vereinheitlichung fixe Längen zugeteilt wurden. Nichtsdestotrotz wurden in der zweiten Phase innovative Konzepte für Variantenstudien zur Klimatisierung im Rahmen des zweiten Anwendungsfalls (2) **Optimierung** in Betracht gezogen. Davon werden ausgewählte Konzepte in den Abbildungen 9 bis 12 vorgestellt.

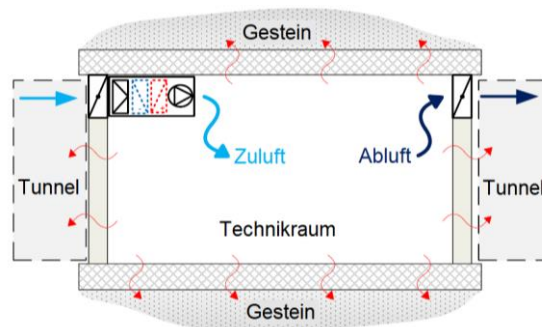


Abbildung 9: Konzept zur direkten Kühlung mittels Querlüftung mit Tunnelnluft und Brandschutzklappe

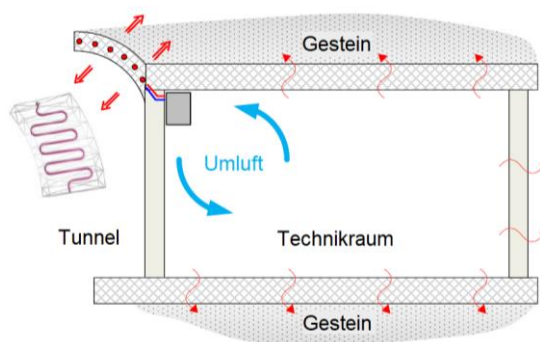


Abbildung 10: Konzept mit Kühlung durch Tunnelnluft durch Bauteilaktivierung der Tunneldecke und Klimatisierung durch Freecooling mittels Umluft

Jedoch haben diese Konzepte bei der gegebenen Abwärme der technischen Anlagen in Hinsicht eines Kosten-Nutzen-Vergleichs keinen Vorteil gegenüber einer einfachen Klimatisierung mittels Umluftkühlgeräten gezeigt, weshalb letzteres als Grundlage für die in Phase 3 eingesetzten Simulationen eingesetzt wurde. Hierfür wurden sowohl technische Rückkühlkonzepte als auch Raumklimakonzepte diskutiert.

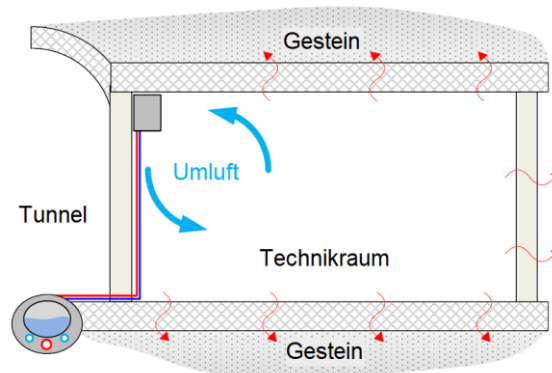


Abbildung 11: Konzept mit Kühlung durch Bergwasser mittels Wärmetauscher im Drainagekanal der Tunneldecke und Klimatisierung durch Freecooling mittels Umluft

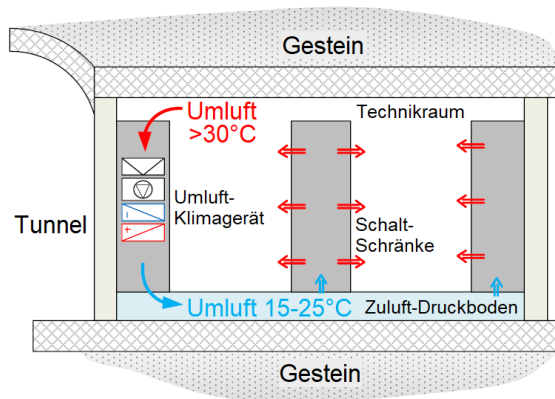


Abbildung 12: Konzept mittels dezentraler Klimatisierung und Wärmeabfuhr über Doppelboden / Rechenzentrumsarchitektur, kompatibel mit unterschiedlichen Wärmesenken.

Simulationen als Grundlage datengetriebener Entscheidungsfindung

In der dritten Phase wurden entsprechend der Anwendungsfälle die Bedingungen des finalen Klimakonzeptes simuliert, um die **Dimensionierung** der Umluftkühlgeräte und Ventilatoren festzulegen, die **Optimierung** der Auslegung sowie des Gesamtsystems durchzuführen, die jeweiligen **Nachweise** für die Bauherrschaft zu erbringen sowie das System einer **Sensitivitätsanalyse / Stresstest** mit veränderter Randbedingungen zu unterziehen. So konnte die Verhaltensweise bei unterschiedlichen Betriebs-szenarien (u.a. Szenario Regelbetrieb und Szenario Ereignisfall mit Tunnelbrand und Ausfall Kühlung aufgrund von technischem Defekt) eingeschätzt, ggf. aufkommende Risiken aufgezeigt, bewertet und eingeordnet werden.

Bei der Betrachtung der Querschläge ist zudem aufgefallen, dass die Versorgungsräume verhältnismässig nur einen geringen Anteil der Grundrissfläche ausmachen und der Anteil des Fluchtwegs als Verbindungsbereich zwischen den Bahntunneln ohne signifikante Wärmequellen dementsprechend gross ist. Daher wurden diese Verbindungsbereiche unter anderem aufgrund des Luftaustausches (Einsatz IDA ICE Luftknotenmodell) zwischen Querschlag und Bahntunnel, aber auch aufgrund von Fugenundichtigkeiten ebenfalls detailliert modelliert.

Neben der thermisch-energetischen Modellierung wurde auch das integrierte Luftknotenmodell in IDA ICE (vgl. Abbildung 13) eingesetzt, um den Einfluss der Fugenundichtigkeiten und der zugehörigen äquivalenten Querschlagsflächen zum Luftaustausch sowie des Einflusses der sich einstellenden Differenzdrücke aufgrund

Zugbewegung im Fahrtunnel auf das thermisch-energetische Verhalten im Querschlag zu berücksichtigen. Der Querschlag wurde hierzu in sechs Zonen segmentiert, um das thermische Verhalten des Querschlags entlang des Fluchtwegs detaillierter zu analysieren.

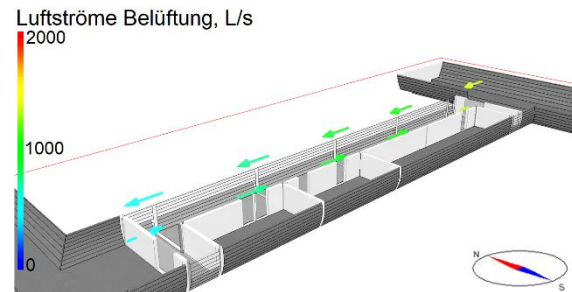


Abbildung 13: Darstellung Luftknotenmodell in IDA ICE

Basierend auf dem 3D-Simulationsmodell wurden unter anderem folgende Technikkonzepte zur Klimatisierung der Querschläge untersucht:

- > Basiskonzept Querlüftung mit Tunnelluft zur direkten Klimatisierung des Querschlags
- > Technische Rückkühlkonzepte mit unterschiedlichen Wärmesenken (Tunnelluft, Bergwasser, Bergmassiv)
- > Technische Raumkonzepte zur Wärmeabfuhr innerhalb der Querschläge bzw. Versorgungsräume

Folgend eine Auswahl an Betriebsszenarien, welche durch die Simulationsstudien analysiert wurden:

- > **Normalbetrieb:** Das Szenario Normalbetrieb dient als Grundlage sowie zur Langzeitbetrachtung des thermisch-energetischen Verhaltens.
- > **Ereignisfall:** In den Ereignisfallszenarien wurden unter anderem der Ausfall von Klimageräten sowie unterschiedliche Brand-szenarien analysiert.

Einblick in ausgewählte Erkenntnisse

Folgend werden einige ausgewählte Simulationsergebnisse sowie die daraus resultierenden Erkenntnisse diskutiert. Hierfür wurden die Ergebnisdaten im Rahmen des Postprocessings mittels Python-Skripten und Business-Intelligence-Umgebungen (BI), also Tools zur Aggregation, Aufbereitung und Visualisierung der Daten, analysiert. Als Beispiel wird der Verlauf der Raumlufttemperatur (RAL) dargestellt.

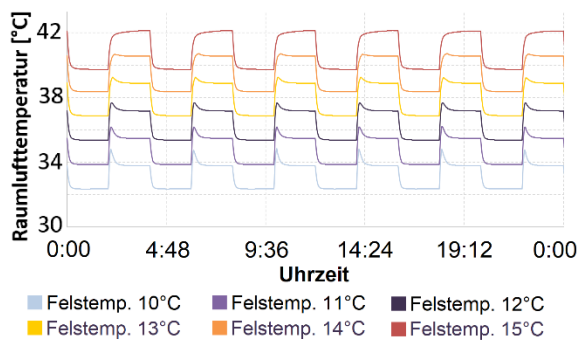


Abbildung 14: SimRes Verlauf der RAL im Fluchtweg in Abhängigkeit der Felsursprungstemperatur

Die Analyse der RAL für den Querschlag 51 im Kontext der Felsursprungstemperatur (vgl. Abbildung 14) während des Normalbetriebs im Fluchtweg hat dem Projektteam ein gutes Eingangsverständnis zum thermisch-energetischen Verhalten der Energieflüsse ermöglicht.

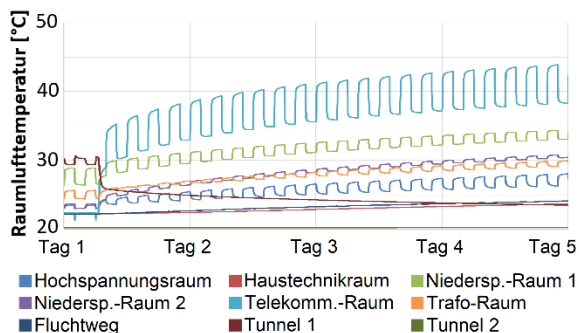


Abbildung 15: SimRes Verlauf der RAL in unterschiedlichen Räumen bei Ausfall der Rückkühlung im Bahntunnel

Abbildung 15 visualisiert den Einfluss des Ausfalls der Rückkühlung im Bahntunnel auf den Verlauf der RAL. Dabei kann festgehalten werden, dass sich die resultierenden RAL ohne weitere Massnahmen im besonders schützenswerten Telekommunikationsraum innerhalb von drei Tagen auf über 40°C erwärmen. Dies hat zur Konzeptoptimierung mit passiven Massnahmen (Aktivierung weitere Räume) geführt.

Im Rahmen der Analyse des Einflusses eines Zugbrands mit 1'200°C direkt vor einem Querschlag wurde die resultierende RAL bei intakter Rückkühlung und bei Ausfall selbiger analysiert, um geeignete Massnahmen vorschlagen zu können. Dabei konnte im Ereignisfall (vgl. Abbildung 16) nachgewiesen werden, dass im Betrachtungszeitraum bei intakter Kühlung keine kritischen Temperaturen im Querschlag

auftreten. Die Messungen wurden nach der zuvor erwähnten Segmentierung in sechs Zonen vorgenommen, wobei Zone 1 die grösste Distanz und Zone 6 die niedrigste Distanz zum Brandfall aufweist. Die Temperatur des Tunnelbrands bezieht sich auf die Linie "Tunnel 2", in welchem der Tunnelbrand stattfand.

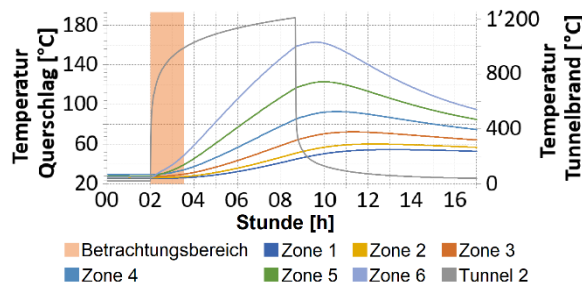


Abbildung 16: SimRes Verlauf der RAL im Fluchtweg bei Brand im Bahntunnel

Abschliessend zeigen die durchgeführten modellbasierten Simulationen am Semmering-Basistunnel, dass die präzise Planung und Optimierung der Klimatisierung sowie der Lüftungskonzepte entscheidend für die Aufrechterhaltung der Betriebs- und Sicherheitsanforderungen in einem solch komplexen Tunnelbauwerk sind. Durch die Anwendung der BIM2SIM-Methode konnten potenzielle Risiken frühzeitig erkannt und wirksame Massnahmen zur Gewährleistung der Funktionalität und Sicherheit des Tunnels erarbeitet werden. Diese Erkenntnisse bilden eine wertvolle Grundlage für zukünftige Projekte im Tunnelbau und tragen massgeblich zum Erfolg und zur Sicherheit europäischer Infrastrukturen bei.

Literatur

Funk, P. (2013): Wärme im U-Bahn-Tunnel als Energie einsetzen. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereich/energie/waerme-im-u-bahn-tunnel-energie-einsetzen/>

Preuss, J.; Blattmann, L.; Frey, M. (2019): Building Performance Simulation and Result Visualization in BIM. Building Simulation 2019, Rom. https://www.researchgate.net/publication/342389587_Building_Performance_Simulation_and_Result_Visualization_in_BIM

Zwahlen, M.; Frey, M.; Loux, J.; Akeret, D. (2018): "BIM" als Grundlage für Gebäude- und Anlagensimulationen – Zusammenarbeit am digitalen Bauwerksmodell. BauSIM 2018, Karlsruhe. https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bausim2018_5