

## **Potenzial der Tunnelbaustrecke des Bahnprojektes Stuttgart 21 zur Wärme- und Kältenutzung**

### **Bearbeiter**

Dipl.-Ing. Thomas Schlosser, IGE

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, IGE

Dipl.-Geol. Marcus Schneider, IGS

Prof. Dr.-Ing. Pieter A. Vermeer, IGS

Institut für GebäudeEnergetik (IGE), Institut für Geotechnik (IGS)

Universität Stuttgart

**28. Juni 2007**

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>FORMELVERZEICHNIS .....</b>	<b>II</b>
<b>1. AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 EINFÜHRUNG.....	1
1.2 MOTIVATION.....	1
<b>2 MODELLBILDUNG .....</b>	<b>3</b>
2.1 MODELL WÄRMELEITUNG ERDREICH .....	3
2.2 MODELL TUNNEL .....	24
2.3 GESAMTMODELL.....	26
2.4 RANDBEDINGUNGEN .....	29
2.5 BERECHNUNGEN .....	39
2.6 ERGEBNISSE .....	45
<b>3 TECHNISCHE SYSTEME .....</b>	<b>48</b>
3.1 GEOTHERMIE UND ABSORBERTECHNIK .....	48
3.2 WÄRMEPUMPEN .....	55
3.3 GEBÄUDETECHNIK .....	58
<b>4 POTENZIALABSCHÄTZUNG.....</b>	<b>60</b>
4.1 TUNNEL .....	60
4.2 BAHNHÖFE.....	64
4.3 UMWELTSPEZIFISCHE RISIKEN .....	65
<b>5 ZUSAMMENFASSUNG / AUSBLICK.....</b>	<b>66</b>
<b>6 LITERATUR.....</b>	<b>69</b>
<b>A ANHANG .....</b>	<b>71</b>

## Formelverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$a$	Temperaturleitfähigkeit	$m^2/h$
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität	$MJ/m^3K$
$i$	Hydraulisches Gefälle	-
$k_f$	Durchlässigkeitsbeiwert	$m/s$
$m$	Masse	$kg$
$\dot{Q}_{abs}$	Wärmeleistung am Absorber	$W$
$\dot{Q}_{Luft}$	Wärmeleistung vom Tunnel zum Absorber	$W$
$\dot{Q}_{Erd}$	Wärmeleistung vom Erdreich zum Absorber	$W$
$\dot{q}$	Wärmestrom	$W/m^2$
$r_{abs}$	Radius Absorber	$m$
$r_a$	Außenradius	$m$
$r_i$	Innenradius	$m$
$T$	Absolute Temperatur, Temperaturdifferenz	$K$
$t$	Zeit	$s$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$m^3/s$
$v_f$	Filtergeschwindigkeit	$m/s$
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	$W/m^2K$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$W/mK$
$\vartheta_{Erd}$	Erdreichtemperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_{Luft}$	Lufttemperatur	$^{\circ}C$

## 1. Aufgabenstellung

### 1.1 Einführung

Um die im Kyoto-Protokoll festgelegten Zielwerte für die Reduktion der CO<sub>2</sub> – Emissionen realisieren zu können, ist eine deutliche Steigerung des Anteils regenerativer Energien am gesamten Energieumsatz im Vergleich zur derzeitigen Situation notwendig. Aus diesem Grund ist es von Bedeutung, neue und zukunftssträchtige regenerative Energiepotenziale ausfindig zu machen und diese auf energetisch sinnvolle Weise zu nutzen.

In der Schweiz werden zur Zeit ca. 6 Tunnelbauwerke geothermisch genutzt. Dabei werden weitgehend warme Tunnelwässer, die über das Drainagesystem nach draußen gefördert werden verwendet, um mit Hilfe von Wärmepumpen in der Nähe gelegene Siedlungen oder Betriebsgebäude mit Wärme zu versorgen. Beim Tunnel durch den 'Großen Sankt Bernhard' wird dagegen Energie aus der Tunnelluft gewonnen<sup>1</sup>.

Die geplanten umfangreichen Tunnelbaustrecken des Bahnprojektes Stuttgart 21 bieten ebenfalls ein großes und bislang ungenutztes Energiepotenzial das sich für eine regenerative Nutzung anbietet. In einem ersten Schritt wird geprüft, welche Systeme in realisierten Bauvorhaben eingesetzt werden und inwieweit sich die Technologie für den Einsatz in der geplanten Tunnelbaustrecke eignet. Ziel ist es, Systeme zur Nutzung des thermischen Energiepotenzials (als Wärme oder Kälte) vorzuschlagen. Diese Systeme werden auf ihre Realisierbarkeit innerhalb des bautechnischen Ablaufs geprüft.

### 1.2 Motivation

Bei bereits realisierten Demonstrationsvorhaben zum Thema Geothermie aus Tunnelbauten wurde die durch den Verkehr verursachte Wärmefreisetzung im Tunnel nicht berücksichtigt. Deshalb wird in diesem Projekt der Einfluss des Verkehrs auf die Lufttemperatur im Tunnel untersucht. Daraufhin wird das Energiepotenzial der Tunnelstrecke abgeschätzt. Angepasst an die nutzbare Energie werden unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit, beeinflusst beispielsweise durch die Tunnelbauweise, Systeme zur Erschließung dieses Energiepotenzials vorgeschlagen.

Ein weiterer Aspekt der Machbarkeit wird durch die energetische Betrachtung des Systems berücksichtigt, von der u.a. die Wirtschaftlichkeit der Energienutzung abhängt.

---

<sup>1</sup> <http://www.geothermie.de/oberflaechennahe/Notiz4.pdf#search=%22Tunnelgeothermie%22>

Durch die Energiebilanz der zu erwartenden nutzbaren und der aufzuwendenden Energie (z. B. Pumpenstrom) erfolgt eine Potenzialabschätzung.

Für die Erfolg versprechenden Systemvarianten kann im Zuge eines weiterführenden Projekts eine detaillierte Untersuchung für die Realisierung durchgeführt werden. Dabei sollte dann ein Gesamtenergiekonzept erstellt werden, bei dem das Energiesystem einschließlich Verteilung und Nutzung im Gebäude berücksichtigt wird, um die Erdwärme und ggf. -kälte möglichst rationell zu nutzen. Anwendungsmöglichkeiten sind beispielsweise größere Gewerbegebiete oder Neubaugebiete im Rahmen des Projekts Stuttgart 21, die in der nahen Umgebung des Energiesystems liegen. Durch eine solche Nutzung mit kurzen Verteilwegen ergibt sich eine bessere Wirtschaftlichkeit des Systems.

## 2 Modellbildung

In diesem Kapitel werden die Modelle und Randbedingungen für die durchgeführten Berechnungen erläutert. In einem ersten Schritt werden am Beispiel des Fildertunnels im Projekt Stuttgart 21 die geologischen Voraussetzungen erarbeitet. Anschließend erfolgt eine Betrachtung des Tunnelinneren und eine Verknüpfung der beiden Modelle. Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse dargestellt. Der Schwerpunkt der Betrachtungen ruht auf der geschlossenen Tunnelbauweise.

Maßgeblich für die rechnerische Modellbildung sind die thermodynamischen Vorgänge zwischen dem Erdreich, der Absorberfläche und der Tunnelluft. Der Wärmetransport beruht hierbei auf unterschiedlichen Transportmechanismen. Für die Modellbildung wurde die Annahme getroffen, dass der Tunnel in Spritzbetonbauweise errichtet wird und die Absorberfläche zwischen der Innen- und der Außenschale des Tunnels angeordnet ist.

Vom Erdreich zum Absorber in der Tunnelschale erfolgt der Wärmetransport über die Wärmeleitung. Von der Tunnelluft wird die Wärme zunächst über Konvektion an der Tunnelwand ausgetauscht und anschließend über Wärmeleitung zum Absorber übertragen. Ein Wärmetransport kann dabei in beiden Richtungen erfolgen. Dies hängt von den Temperaturdifferenzen zwischen der Absorberfläche und der umgebenden Bereiche (Erdreich, Tunnelluft) ab.

### 2.1 Modell Wärmeleitung Erdreich

Der Untergrund von Stuttgart weist im Vergleich zu anderen deutschen Großstädten einen relativ komplizierten geologischen Aufbau und somit Baugrund auf. Aufgrund der starken Reliefierung ist eine Vielzahl von Schichten bzw. geologischen Einheiten zu durchörtern, um die Verbindung zwischen Hauptbahnhof im Stuttgarter Talkessel und dem Bahnhof auf den Fildern herzustellen. So beträgt die Höhendifferenz der Gradienten zwischen Beginn und Ende des Fildertunnels rund 190 m.

Der Festgesteinsuntergrund wird im Projektierungsgebiet durch die Sedimentgesteine des Gipskeupers bis hinauf zum Schwarzen Jura  $\alpha$  aufgebaut. Unter diesen herrschen im Allgemeinen feinkörnige und gering wasserdurchlässige Sedimentgesteine wie Ton-, Schluff- oder Mergelsteine vor, die von besser durchlässigen und geringmächtigen Gesteinen wie Kalk- oder Sandstein unterbrochen werden. Eine Sonderstellung nimmt das Sulfatgebirge (Gipskeuper) ein, das teils ausgelaugt, jedoch weitgehend unausgelaugt vorliegt. Den Festgesteinen lagern jeweils quartäre Lockergesteinsschichten unterschiedlicher Genese auf.

Infolge tektonischer Gebirgsbewegungen im Laufe der Erdgeschichte kam es zur Ausbildung von staffelartig ausgebildeten Störungsbahnen und einer Zerlegung des Gebirges in einzelne Bruchschollen, einhergehend mit Gebirgszerrüttung im Stö-

rungsnahbereich. Markantestes Störungssystem ist der NW-SE streichende, ca. 10 - 14km breite Fildergraben mit seinen E - W streichenden Begleitstörungen.

Gesteinszusammensetzung, Relieferung und tektonische Beanspruchung bedingen ein sehr unterschiedliches hydrogeologisches Verhalten, das in einer so genannten Stockwerksgliederung zum Ausdruck kommt.

Im Folgenden werden die für den Bau des Fildertunnels maßgeblichen geologischen Einheiten im Hinblick auf ihr Gesteinsinventar sowie ihr hydrogeologisches Verhalten erläutert. Gesteinsausbildung (Petrographie) und Hydrogeologie sind maßgebliche Faktoren für die Bewertung der geothermischen Eigenschaften. Zur Veranschaulichung der Wechselhaftigkeit der unterschiedlichen Gesteinsausbildungen werden geologische Standardprofile den Gesteinsbeschreibungen ergänzend beigelegt.

### **2.1.1 Gipskeuper (Mittlerer Keuper 1, km1)**

Die stratigraphische<sup>2</sup> Einheit des Gipskeupers umfasst die Teileinheiten Unterer, Mittlerer und Oberer Gipskeuper.

Der Tunnel durchörtert über eine Länge von rund 4.600 m die Schichten des Gipskeupers<sup>3</sup>. Dessen Basis, die Grundgipsschichten, wird möglicherweise nur in einem begrenzten Teilbereich in der Sohle angeschnitten. Die Vortriebsarbeiten im Gipskeuper werden weitgehend im Mittleren Gipshorizont durchgeführt. Das ähnlich mächtige Schichtpaket der Estheriensichten wird aufgrund einer Versteilung der Gradienten auf kürzerer Strecke durchfahren.

Hinsichtlich des geohydraulischen Verhaltens ergeben sich innerhalb des Gipskeupers sehr starke Unterschiede, die ursächlich in der Eigenschaft der am Gesteinsaufbau beteiligten Sulfate in Lösung zu gehen, zu sehen ist.

---

<sup>2</sup> Stratigraphie: Einordnung der Gesteine in eine Zeitskala

<sup>3</sup> Betrachtungsniveau: Schienenoberkante

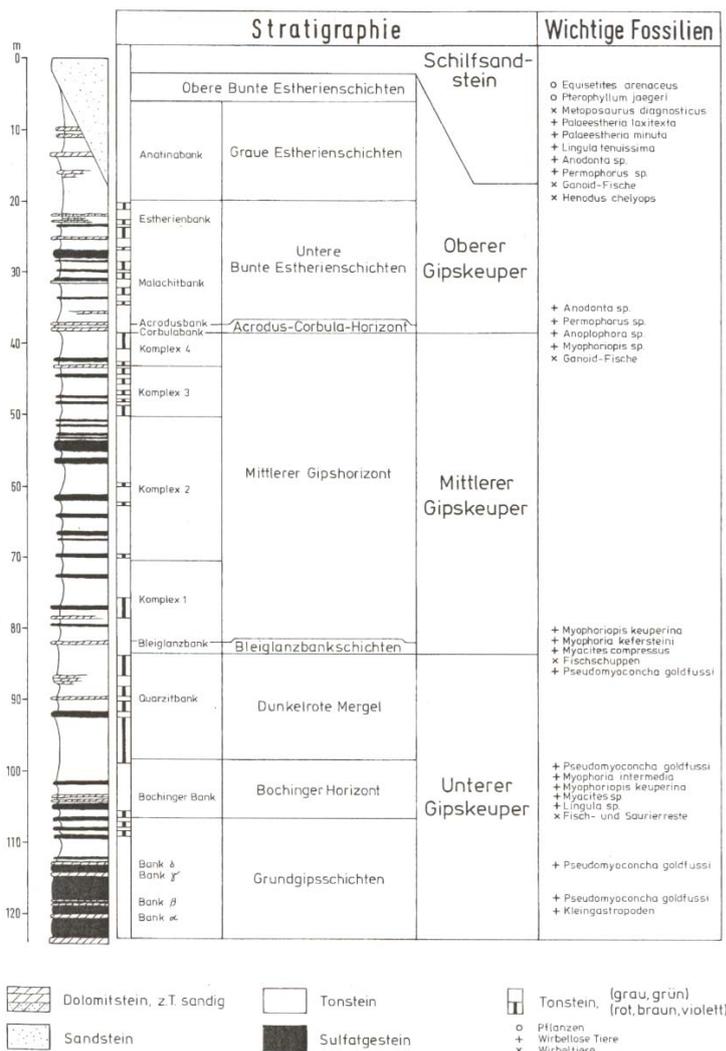


Abb. 2.1.1: Lithologisch-stratigraphisches Standardprofil des Gipskeupers im Raum Stuttgart.

### 2.1.1.1 Erläuterung zum Auslaugungsverhalten der Sulfatgesteine

Durch die lösende Tätigkeit des Wassers einerseits und die hohe Löslichkeit des Sulfatgesteins andererseits hat sich das Sulfatgebirge verändert. Man unterscheidet dabei zwischen 5 Zonen, die am Beispiel des süddeutschen Gipskeupers kurz erläutert werden:

**Ausgelaugte Gipskeuperzone:** Leichtlösliche Sulfatbestandteile sind aus dem Gesteinsverband gelöst und abtransportiert. Das Residualgebirge (GAR = Gipsauslaugungsreste) ist zerlegt und besteht aus verwitterten Mergel- und Tonsteinen. Parallel haben sich Hohlräume oder Dolinen (Erscheinungen des Sulfatkarstes) gebildet. Das Gebirge ist sehr gut wasserdurchlässig.

**Gipsspiegel (Ablaugungsfront):** Grenze zwischen ausgelaugtem Gipskeuper und Übergangszone bzw. unausgelaugtem Gipskeuper, gleichzeitig Grenze der Auslaugungsfront. Mit hohen Wasserzuflüssen ist zu rechnen.

Übergangszone: Grenzhorizont zwischen Gipsspiegel und Anhydritspiegel, unterhalb der aktiven Auslaugungsfront gelegen. Übergang zum rein anhydritführenden Gebirge. Geringe hydraulische Leitfähigkeit und geringe Wasserführung.

Anhydritspiegel: Unterkante der Übergangszone, nur wenige Meter unterhalb des Gipsspiegels, Grenze zum nicht ausgelaugten Gipskeuper

Nicht ausgelaugter Gipskeuper: Sulfate sind nicht gelöst, Gestein weist tw. hohe Festigkeiten auf, Gebirge nahezu undurchlässig, nicht wasserführend.

Auslaugungsbedingt stehen somit in einem kurzen, anfänglichen Teilbereich der Tunnelstrecke feinkörnige, meist mürbe, stark verwitterte Gesteine mit Gipsauslaugungsresten (GAR) an, die unregelmäßige Grundwasserverhältnisse mit bisweilen hohem Grundwasserandrang erwarten lassen. Diesen GAR folgt in Kilometrierungsrichtung über eine sehr große Distanz ein sehr trockenes, relativ festes, unausgelaugtes Sulfatgebirge.

### 2.1.1.2 Hydrogeologische und geothermische Parameter

Die hydrogeologische Einheit im Gipskeuper ist als ein heterogenes System mit stark wechselnden Eigenschaften zu verstehen. Als Grundwasserleiter mit relativ unterschiedlichen Durchlässigkeiten wirkt das ausgelaugte und verwitterte, mitunter hohlraumführende Residualgebirge. Der Hauptgrundwasserstrom wird in [4] entlang der Auslaugungsfront prognostiziert. Eine Grundwasserführung im sulfatführenden Gebirge ist allenfalls zwischen Auslaugungsfront und Anhydritspiegel zu erwarten, darunter ist das Gebirge dicht. Der Grundwasserleiter im ausgelaugten Gebirge zeigt die Merkmale eines Karstgrundwasserleiters, insbesondere im Bereich der Gipsauslaugungsfront [13].

Die Basis des Grundwasserleiters bilden in Abhängigkeit der Tiefenlage die Tonsteine des Unterkeupers bzw. die teilweise relativ unregelmäßig verlaufende Gipsauslaugungsfront. Das sulfatführende, nicht ausgelaugte Gebirge ist als Grundwassergering- bzw. Grundwassernichtleiter zu bezeichnen. Eine Grundwasserführung ist auf die wenigen Bereiche mit klüftigen Karbonathorizonten beschränkt.

#### Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$

Stratigraphische Einheit	Unausgelaugt			Ausgelaugt		
	$k_f$ [m/s] max	$k_f$ [m/s] min	$k_f$ [m/s] MW	$k_f$ [m/s] max	$k_f$ [m/s] min	$k_f$ [m/s] MW
Estheriensichten km1ES	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$8,2 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Mittlerer Gipshorizont km1MGH	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$7,9 \cdot 10^{-10}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$
Bleiglanzbank km1BG	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
Dunkelrote Mergel km1DRM	$3,6 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$

Bochinger Horizont km1BH	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Grundgipsschichten km1GG	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	k.A.	k.A.

Tab. 2.1.1: Durchlässigkeitsbeiwerte im Gipskeuper

### Hydraulisches Gefälle i

Stratigraphische Einheit	i [°] unausgelaugt	i [°] ausgelaugt	Bemerkungen
Estheriensichten km1ES	k.A.	k.A.	
Mittlerer Gipshorizont km1MGH	k.A.	k.A.	
Bleiglanzbank km1BG	k.A.	0,02 ... 0,03	Randbereich Nesenbachtal
Dunkelrote Mergel km1DRM	k.A.	0,02 ... 0,03	Randbereich Nesenbachtal
Bochinger Horizont km1BH	k.A.	0,01 (0,03 ... 0,04)	Von Talkessel bis Stö- rung Nähe Wagenburg- tunnel, danach 3-4%
Grundgipsschichten km1GG	k.A.	k.A.	

Tab. 2.1.2: Hydraulische Gradienten im Gipskeuper

### Filtergeschwindigkeit $v_f$

Die Filtergeschwindigkeit des Grundwassers ergibt sich nach dem DARCY – Gesetz aus dem Verhältnis des Volumenstroms  $V$  zu dem durchflossenen Filter-Querschnitt  $A$ , bzw. aus dem Produkt von Durchlässigkeitsbeiwert und hydraulischem Gradienten:

$$v_f = \frac{\dot{V}}{A} = k_f \cdot \frac{h}{l} = k_f \cdot i \quad (2.1.1)$$

Unter Zugrundelegung der ermittelten extremalen Durchlässigkeiten und mittlerer hydraulischer Gradienten ergeben sich für den ausgelaugten Gipskeuper folgende Filtergeschwindigkeiten:

Stratigraphische Einheit	[m/s] unausgelaugt	[m/s] ausgelaugt
Estheriensichten km1ES	$< 1 \cdot 10^{-12}$	k.A.
Mittlerer Gipshorizont km1MGH	$< 1 \cdot 10^{-12}$	k.A.
Bleiglanzbank km1BG	$< 1 \cdot 10^{-12}$	$2,5 \cdot 10^{-7} \dots 8,0 \cdot 10^{-11}$
Dunkelrote Mergel km1DRM	$< 1 \cdot 10^{-12}$	$5,3 \cdot 10^{-7} \dots 4,8 \cdot 10^{-11}$
Bochinger Horizont km1BH	$< 1 \cdot 10^{-12}$	$3,4 \cdot 10^{-6} \dots 2,3 \cdot 10^{-8}$ $1,2 \cdot 10^{-5} \dots 1,2 \cdot 10^{-8}$
Grundgipsschichten km1GG	$< 1 \cdot 10^{-12}$	k.A.

Tab. 2.1.3: Filtergeschwindigkeit

Das unausgelaugte Gebirge des Gipskeupers wird als Grundwassergering- bis Nichtleiter bewertet. Es ist daher mit keinem nennenswerten Grundwasserstrom zu rechnen. Für Berechnungen wird daher die Annahme getroffen, dass die Filtergeschwindigkeit auf einem sehr niedrigen Niveau in der Größenordnung von  $< 1 \cdot 10^{-12}$  m/s liegt.

### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Die Gipsführung bewirkt eine starke Verringerung der Wärmeleitung relativ zu anderen Gesteinsarten. Die Wärmeleitfähigkeit des Anhydrits nimmt dagegen ein sehr breites Spektrum mit hohem Maximalwert ein.

Geologie	$\lambda$ [W/m K] [10]	c [MJ/(m <sup>3</sup> K)] [16]
Ausgelaugte Tonsteine	1,7 ... 2,3	1,6 ... 3,4
Teilausgelaugte Tonsteine	1,5 ... 2,2	2,1 ... 2,4
Gips	1,3 ... 1,6	2,5
Anhydrit	1,5 ... 4,1	

Tab. 2.1.4: Thermische Kennwerte des Gipskeupers

Gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) und Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) weisen in ihrem thermischen Verhalten große Unterschiede auf. Aufgrund der relativ detaillierten mineralogischen Untersuchungen in der Erkundungsphase können folgende ergänzenden Angaben zur Sulfatführung gemacht werden:

Stratigraphische Einheit	Gesamtsulfat-gehalt [%]	Gipsanteil qualitativ	Anhydritanteil qualitativ	Vorkommen
Estheriensichten km1ES	1		überwiegend	Knauern, Flasern, Knollen, untergeordnet in engständiger Wechsellagerung
Mittlerer Gipshorizont km1MGH	25 ... 30		überwiegend	dito
Bleiglanzbank km1BG	< 5	überwiegend		Fasergips
Dunkelrote Mergel km1DRM	10 ... 15		überwiegend	Knauern, Flasern, Knollen, untergeordnet in engständiger Wechsellagerung, sekundäre Fasergipslagen
Bochinger Horizont km1BH	< 5	überwiegend		Fasergips
Grundgipsschichten km1GG	30 ... 40		überwiegend	

Tab. 2.1.5: Mineralogische Angaben zur Sulfatverteilung im Gipskeuper. Quantitativ/qualitative Angaben aus [1 / 2].

### Spezifische Wärmekapazität $c_p$

Die Wärmekapazität ist das Maß für die thermische Speicherkapazität des Untergrunds. Die Datenbasis für  $c_p$  ist ebenfalls gering. Die VDI 4640 [22] nennt hier volumenbezogene Schätzwerte. Anhand der wenigen vorhandenen Angaben und

aufgrund von Internetrecherchen wird der Versuch unternommen, entsprechende Angaben für den Stuttgarter Untergrund zu leisten (vgl. Tab. 2.1.4).

### Bewertung

Anhand der hydrogeologischen und geohydraulischen Daten wird der Wärmeübergang im ausgelaugten Gipskeuper als konvektiv – konduktiv mit Schwerpunkt auf konvektiven Vorgängen und im unausgelaugten Gipskeuper als rein konduktiv eingeschätzt.

#### **2.1.2 Schilfsandstein-Formation (Mittlerer Keuper 2, km2)**

Der ca. 10 ... 35 m mächtige mittlere Keuper 2 gliedert sich in die nachfolgend dargestellten Untereinheiten, die dem Gipskeuper konkordant (schiefwinklig, unregelmäßig) aufliegen. Die Schilfsandstein-Formation hat einen Anteil an der Tunnelstrecke von ca. 370 m.

Der Schilfsandstein (km2s) an sich besteht aus einem Wechsel von gleichmäßigen, dickbankigen, unverwitterten bis angewitterten, schluffig-tonigen Sandsteinen und feinsandigen Ton-/Schluffsteinen. Vereinzelt werden karbonatische bzw. dolomitische Bänke angetroffen. In den Klüften finden sich teilweise Gipsfüllungen.

Die überlagernden Dunklen Mergel (km2DM) bestehen aus z.T. sandigen Ton-/Schluff- und Mergelsteinen. In Teilbereichen der Dunklen Mergel tritt Gips- bzw. Anhydritführung auf, die sowohl feindispers als auch knollig ausgebildet ist. Die Dunklen Mergel liegen im Bereich des Fildertunnels nur im unausgelaugten Zustand vor.

Darüber folgt der Hauptsteinmergel (km2H) als Top der Schilfsandsteinfolge. Er baut sich aus einer Wechsellagerung aus teils dolomitischen Ton-/Schluffsteinen und bis 0,8m mächtigen Gips-/Anhydritlagen auf. Die Hauptsteinmergel treten sowohl unausgelaugt als auch ausgelaugt auf. Sie sind dann in der Regel stark verwittert, die ehemaligen Sulfatlagen durch GAR ersetzt.

Im Zuge der Erkundungskampagnen wurde in den Schichten des Schilfsandsteins eine Methangasführung festgestellt.

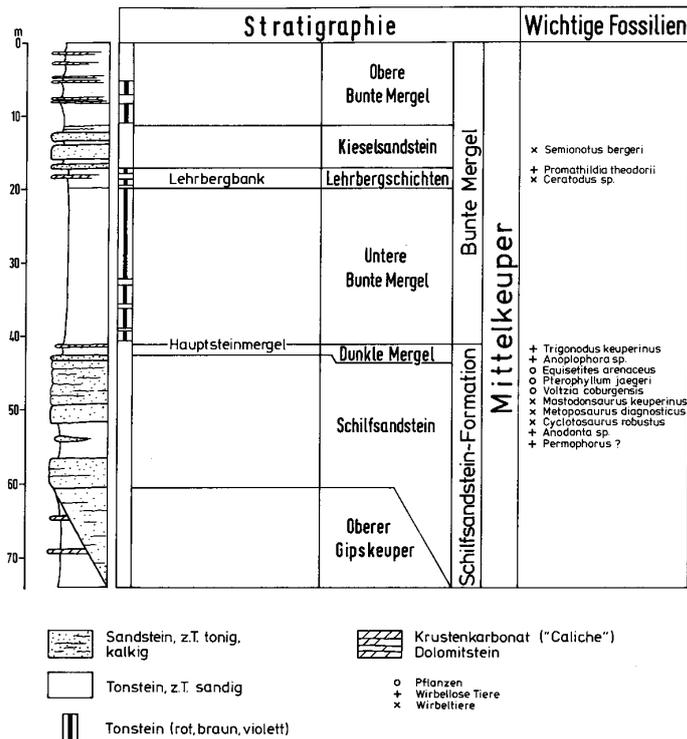


Abb. 2.1.2: Lithologisch-stratigraphisches Standardprofil des Mittleren Keupers 2 und 3 im Raum Stuttgart. Aus: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:50.000, Blatt Stuttgart und Umgebung.

### 2.1.2.1 Hydrogeologische und geothermische Parameter

Der Schilfsandstein ist aufgrund der Wechsellagerung von Feinkörnigen mit gröbereren Gesteinen als vertikal zonierter Kluftgrundwasserleiter aufzufassen. Die Wasserführung konzentriert sich auf die höher durchlässigen Zonen der geklüfteten Hartgesteinsbänke (Sandstein, Kalkstein).

Der Schilfsandstein zählt zur hydrogeologischen Einheit des Höheren Mittelkeupers [13], die bis zum Knollenmergel (km5) reicht, also auch die Schichten des Stubensandsteins (km4) und des Kieselsandsteins (km3s) enthält. Diese hydrogeologische Einheit verfügt im Allgemeinen über ein geringes bis mittleres Dargebot. Die Ergiebigkeit wird in [4] als eher gering bewertet.

#### Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$

Die Durchlässigkeit variiert im Schilfsandstein mit einer Spannweite von 7 Zehnerpotenzen sehr stark.

Stratigraphische Einheit	$k_f$ [m/s] max	$k_f$ [m/s] min	$k_f$ [m/s] MW
Dunkle Mergel km2D Hauptsteinmergel km2H	/	/	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Schilfsandstein km2S	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$

Tab. 2.1.6: Durchlässigkeitsbeiwerte im Schilfsandstein

### Hydraulisches Gefälle i

Stratigraphische Einheit	i [‰]	Bemerkungen
Dunkle Mergel km2D Hauptsteinmergel km2H	k.A.	Praktisch undurchlässig
Schilfsandstein km2S	0,02 ... 0,05	Nördlich Bau-km 3,7: 2 – 4% Rtg. W – NW Südlich Bau-km 3,7: 2 – 5% Rtg. SW

Tab. 2.1.7: Hydraulische Gradienten im Schilfsandstein

### Filtergeschwindigkeit $v_f$

Unter Zugrundelegung der ermittelten extremalen Durchlässigkeiten und eines mittleren hydraulischen Gradienten ergeben sich für den Schilfsandstein folgende Filtergeschwindigkeiten:

Stratigraphische Einheit	[m/s]
Dunkle Mergel km2D Hauptsteinmergel km2H	Praktisch undurchlässig
Schilfsandstein km2S	$7,7 \cdot 10^{-5} \dots 3,5 \cdot 10^{-13}$

Tab. 2.1.8: Ermittelte Filtergeschwindigkeiten im Schilfsandstein.

### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ , Wärmekapazität $c_p$

Geologie	$\lambda$ [W/m K] [10]	c [MJ/(m <sup>3</sup> K)] [16]
Sandstein	1,8 ... 2,6	1,6 ... 2,8
Tonstein	1,7 ... 2,2	2,1 ... 2,4

Tab. 2.1.9: Thermische Kennwerte des Schilfsandsteins

### Bewertung

Anhand der hydrogeologischen und geohydraulischen Daten wird der Wärmeübergang im Schilfsandstein als konvektiv – konduktiv und in den beiden anderen Schichtgliedern, Dunkle Mergel und Hauptsteinmergel, als konduktiv eingeschätzt.

#### **2.1.3 Bunte Mergel Formation (Mittlerer Keuper 3, km3)**

Die Bunten Mergel haben einen Anteil von ca. 560 m an der aufzufahrenden Strecke des Haupttunnels. Die Mächtigkeit der Formation beträgt zwischen 38 und 50 m.

Die Basis dieser Formation bilden die 20 ... 25 m mächtigen Unteren Bunten Mergel (km3u). Diese bestehen aus schwach sandigen, lokal karbonatischen, Ton-/Schluffsteinen. Die Gips-/Anhydritführung liegt dispers als auch knollig verteilt sowie in Form von Kluffüllungen vor. Im Tunnelbereich liegen die Gesteine weitgehend in ausgelaugter Form als GAR<sup>4</sup> vor.

<sup>4</sup> Gipsauslaugungsreste: Meist feinsandiger Schluff, steifer bis halbfester Konsistenz

Die überlagernden, eher geringmächtigen Lehrbergsschichten (km3L) bestehen i.d.R. aus Ton-/Schluffsteinen. Die namensgebende dolomitische Lehrbergbank ist 10 ... 20 cm mächtig.

Die darüber folgenden Kieselsandsteinschichten (km3s) bestehen aus etwas mächtigeren (6 ... 8 m) Sandsteinpaketen, die in der Lateralen in Ton-/Schluff- bis Tonmergelsteine übergehen können.

Die Oberen Bunten Mergel (km3o) bauen sich durch schwach sandige Ton-/Schluff-/Tonmergelsteine auf, in die dünnbankige Dolomitbänke eingeschaltet sind. Sie können im Raum Stuttgart 12 ... 17 m mächtig werden.

### 2.1.3.1 Hydrogeologische und geothermische Parameter

Die Wechsellagerung von feinkörnigen, relativ dichten Ton-/Schluffsteinen mit Sandsteinen und Dolomitbänken bewirkt auch in dieser stratigraphischen Einheit eine vertikale Zonierung der Grundwasserführung. Diese findet im wesentlichen im klüftigen Kieselsandstein (km3s) statt. Die Bunten Mergel zeigen ebenso die Eigenschaften der hydrogeologischen Einheit „Höherer Mittelkeuper“.

#### Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$

Die Durchlässigkeit variiert im Kieselsandstein mit einer Spannweite von ebenfalls 7 Zehnerpotenzen sehr stark.

Stratigraphische Einheit	$k_f$ [m/s] max	$k_f$ [m/s] min	$k_f$ [m/s] MW
Obere Bunte Mergel km3o	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$3,9 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-10}$
Kieselsandstein-schichten km3s	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$
Untere Bunte Mergel km3u	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-13}$	$5,5 \cdot 10^{-11}$

Tab. 2.1.10: Durchlässigkeitsbeiwerte der Bunten Mergel

#### Hydraulisches Gefälle $i$

Stratigraphische Einheit	$i$ [l]	Bemerkungen
Obere Bunte Mergel km3o	/	Praktisch undurchlässig
Kieselsandstein-schichten km3s	0,01 ... 0,03 0,01 ... 0,05	Richtung N bis Bau-km 3,7 Richtung S ab Bau-km 3,7
Untere Bunte Mergel km3u	/	Praktisch undurchlässig

Tab. 2.1.11: Hydraulische Gradienten in den Bunten Mergeln

#### Filtergeschwindigkeit $v_f$

Unter Zugrundelegung der ermittelten extremalen Durchlässigkeiten und eines mittleren hydraulischen Gradienten ergeben sich für die Bunten Mergel folgende Filtergeschwindigkeiten:

Stratigraphische Einheit	[m/s]
Obere Bunte Mergel km3o	$< 1 * 10^{-12}$
Kieselsandstein-schichten km3s	$2,2 * 10^{-7} \dots 4,8 * 10^{-14}$ $3,3 * 10^{-7} \dots 7,2 * 10^{-14}$
Untere Bunte Mergel km3u	$< 1 * 10^{-12}$

Tab. 2.1.12: Ermittelte Filtergeschwindigkeiten in den Bunten Mergeln.

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ 

Geologie	$\lambda$ [W/m K] [10]	c [MJ/(m <sup>3</sup> K)] [16]
Sandstein (km3s)	1,7 ... 2,6	1,6 ... 2,8
Schluffstein (km3u, km3o)	1,5 ... 2,2	2,1 ... 2,4
Tonstein (km3s)	1,7 ... 2,2	2,1 ... 2,4

Tab. 2.1.13: Thermische Kennwerte der Bunten Mergel

Bewertung

Anhand der hydrogeologischen und geohydraulischen Daten wird der Wärmeübergang in den Schichten des Kieselsandsteins als konvektiv – konduktiv und in den beiden anderen Schichtgliedern, Obere und Untere Bunte Mergel, als konduktiv eingeschätzt.

**2.1.4 Stubensandsteininformation (Mittlerer Keuper 4, km4)**

Der Anteil der Stubensandsteininformation an der Gesamtstrecke beträgt ca. 2510 m.

Bei der ca. 70 m mächtigen Stubensandsteininformation handelt es sich um eine Wechselfolge von je vier Sandstein- und Ton-/Schluffstein-Schichtpaketen mit jeweils unterschiedlichen Mächtigkeiten.

Die Sandsteine sind stellenweise stark geklüftet. Sie zeigen in Abhängigkeit des Bindemittels sehr unterschiedliche Festigkeits- und sehr wahrscheinlich auch differenzierte Wärmeleiteigenschaften.



Stratigraphische Einheit	$k_f$ [m/s] max	$k_f$ [m/s] min	$k_f$ [m/s] MW
Stubensandstein-schichten km4s1 bis km4s4	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-13}$	$6,5 \cdot 10^{-9}$
Hangendletten km4t1 bis km4t4	$9,5 \cdot 10^{-11}$	$5,9 \cdot 10^{-13}$	$8,7 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.1.14: Durchlässigkeitsbeiwerte im Stubensandstein

### Hydraulisches Gefälle i

Stratigraphische Einheit	i [°]	Bemerkungen
Stubensandstein-schichten km4s1 bis km4s4	0,2 ≤ 0,15 0,05 ... 0,1 sehr gering (k.A.) 0,02 ... 0,04	nördlich Bau-km 3,15 Rtg. N Bau-km 3,15 ... 3,5 Rtg. S Bau-km 3,5 ... 5,7 (Störung) Rtg. E bis SE Bau-km 5,7 ... 7,4 Rtg Bis Ende Rtg. S bis E
Hangendletten km4t1 bis km4t4	/	Praktisch undurchlässig

Tab. 2.1.15: Hydraulische Gradienten im Stubensandstein.

### Filtergeschwindigkeit $v_f$

Unter Zugrundelegung der ermittelten extremalen Durchlässigkeiten und eines mittleren hydraulischen Gradienten ergeben sich für den Stubensandstein folgende Filtergeschwindigkeiten:

Stratigraphische Einheit	[m/s]
Stubensandstein-schichten km4s1 bis km4s4	$6,0 \cdot 10^{-7} \dots 1,3 \cdot 10^{-13}$ $4,5 \cdot 10^{-7} \dots 9,9 \cdot 10^{-15}$ $2,3 \cdot 10^{-7} \dots 5,0 \cdot 10^{-14}$ $1,5 \cdot 10^{-8} \dots 3,3 \cdot 10^{-15}$ $9 \cdot 10^{-8} \dots 2,0 \cdot 10^{-14}$
Hangendletten km4t1 bis km4t4	$< 1 \cdot 10^{-12}$

Tab. 2.1.16: Ermittelte Filtergeschwindigkeiten im Stubensandstein.

### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Geologie	$\lambda$ [W/m K] [10]	c [MJ/(m³ K)] [16]
Sandstein	1,8 ... 2,6	1,6 ... 2,8
Schlufftonstein	1,6 ... 2,1	2,1 ... 2,4

Tab. 2.1.17: Thermische Kennwerte des Stubensandsteins

### Bewertung

Anhand der hydrogeologischen und geohydraulischen Daten wird der Wärmeübergang in den Schichten des Stubensandsteins als konvektiv – konduktiv und in den zwischenlagernden Hangendletten als konduktiv eingeschätzt.

### 2.1.5 Knollenmergel-Formation (Mittlerer Keuper 5, km5)

Der Anteil des Knollenmergels an der Tunnelstrecke beträgt ca. 1050 m.

Er ist 30 ... 35 m mächtig und besteht aus eintönigen, klüftigen Ton-/Schluff- und Tonmergelsteinen.

#### 2.1.5.1 Hydrogeologische und geothermische Parameter

Der Knollenmergel weist nur eine stark untergeordnete Grundwasserführung auf, die sich auf oberflächennahes, aufgelockertes Gebirge konzentriert [4]. Er bildet die Sohlschicht (grundwasserstauende Schicht) des Unterjura-Grundwasserleiters.

##### Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$

Die gemessenen Werte für die Durchlässigkeit schwanken sehr stark, was auf lokale Unterschiede im Gebirgsgefüge zurückgeführt werden kann (oberflächennah oder im Bereich von Störungen aufgelockertes Gebirge mit höherer Durchflusswirksamkeit und dichtes Gebirge in größerer Tiefe).

Der Knollenmergel ist in der tunnelbautechnisch relevanten Tiefe gering durchlässig bis praktisch undurchlässig.

Stratigraphische Einheit	$k_f$ [m/s] max	$k_f$ [m/s] min	$k_f$ [m/s] MW
Knollenmergel km5	$1,5 * 10^{-5}$	$1,8 * 10^{-13}$	$2,2 * 10^{-9}$

Tab. 2.1.18: Durchlässigkeitsbeiwerte des Knollenmergels.

##### Hydraulisches Gefälle $i$

Stratigraphische Einheit	$i$ [°]	Bemerkungen
Knollenmergel km5	k.A.	Praktisch undurchlässig

Tab. 2.1.19: Hydraulische Gradienten des Knollenmergels.

##### Filtergeschwindigkeit $v_f$

Stratigraphische Einheit	[m/s]
Knollenmergel km5	$< 1 * 10^{-12}$

Tab. 2.1.20: Ermittelte Filtergeschwindigkeiten des Knollenmergels.

##### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Geologie	$\lambda$ [W/m K] [10]	$c$ [MJ/(m <sup>3</sup> K)] [16]
Schluffstein	1,5 ... 2,2	2,1 ... 2,4

Tab. 2.1.21: Thermische Kennwerte des Knollenmergels.

##### Bewertung

Anhand der hydrogeologischen und geohydraulischen Daten wird der Wärmeübergang in den Knollenmergeln als konduktiv eingeschätzt.

### 2.1.6 Oberer Keuper (ko)

Der auch als Rhät bezeichnete Obere Keuper hat eine geringe Mächtigkeit von 0 ... 5m. Er ist im südlichen Abschnitt des Bauwerks über ca. 85 m im Querschnitt des Filbertunnels vertreten.

Das Gesteinsinventar baut sich aus feinkörnigen Sandsteinen unterschiedlicher Kornbindung sowie aus sandigen Schluff-/Tonsteinen auf.

#### 2.1.6.1 Hydrogeologische und geothermische Parameter

Es wird eine untergeordnete Grundwasserführung erwartet, die sich auf die geklüfteten kompetenteren Bänke konzentriert. Der Obere Keuper wird als sehr gering durchlässig eingestuft. Zusammen mit dem Knollenmergel bildet er die Sohlschicht des Unterjuragrundwasserleiters (Schwarzjura).

##### Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$

Stratigraphische Einheit	$k_f$ [m/s] max	$k_f$ [m/s] min	$k_f$ [m/s] MW
Oberer Keuper ko	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$

Tab. 2.1.22: Durchlässigkeitsbeiwerte des Oberkeupers.

##### Hydraulisches Gefälle $i$

Stratigraphische Einheit	$i$ [°]	Bemerkungen
Oberer Keuper ko	0,04	Schätzwert, basierend auf hydr. Gradienten des Hangenden (Unterjura)

Tab. 2.1.23: Hydraulische Gradienten des Oberkeupers.

##### Filtergeschwindigkeit $v_f$

Unter Zugrundelegung der ermittelten extremalen Durchlässigkeiten ergeben sich für den Oberen Keuper folgende Filtergeschwindigkeiten:

Stratigraphische Einheit	[m/s]
Oberer Keuper ko	$7,6 \cdot 10^{-9} \dots 1,2 \cdot 10^{-13}$

Tab. 2.1.24: Ermittelte Filtergeschwindigkeiten des Oberkeupers.

##### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Geologie	$\lambda$ [W/m K] [10]	$c$ [MJ/(m <sup>3</sup> K)] [16]
Schlufftonstein	1,6 ... 2,1	2,1 ... 2,4

Tab. 2.1.25: Thermische Kennwerte des Oberkeupers.

##### Bewertung

Anhand der hydrogeologischen und geohydraulischen Daten wird der Wärmeübergang im Rhät als konduktiv – konvektiv eingeschätzt. Dabei wird in den Sandsteinen konvektiver und in den feinkörnigen Schichten konduktiver Wärmeübergang überwiegen.

### 2.1.7 Schwarzjura (he – si)

Die Schichten des Unterjura werden auch als Schwarzer Jura oder Lias  $\alpha$  bezeichnet. Von den in der unten stehenden Tabelle Dargestellten, werden lediglich die Einheiten des Pylonotentons (Hettangium 1 (he1)), des Angulatensandsteins (Hettangium 2 (he2)) und des Arietenkalks (Sinemurium (si1)) über eine Länge von ca. 375m durchörtert. Es wurden max. 29m mächtige Ablagerungen des Lias  $\alpha$  erbohrt.

Das Gestein des Pylonotentons (he1) besteht überwiegend aus Ton-/Schluff- und Tonmergelsteinen, in die kalkige und seltener sandige Felsschichten mit Mächtigkeiten im Zentimeter- bis Dezimeterbereich eingelagert sind. Der Pylonotenton stellt den Grenzhorizont zum unterlagernden Rhät dar.

Der darüber liegende Angulatensandstein (he2) stellt sich ebenfalls als Wechsellagerung aus Ton-/Schluff- und Tonmergelsteinen sowie harten klüftigen Kalk- und Sandsteinen dar. Markant ist hier insbesondere der Hauptsandsteinkomplex (auch Vaihinger Pflasterstein gen.), der als Hauptgrundwasserleiter im Lias  $\alpha$  anzusehen ist.

Auch der Arietenkalk (si1) besteht aus einer Wechselfolge, die sich aus Kalk- und Sandsteinen sowie aus Tonschluffstein- bzw. Mergelsteinzwischenlagen aufbaut.

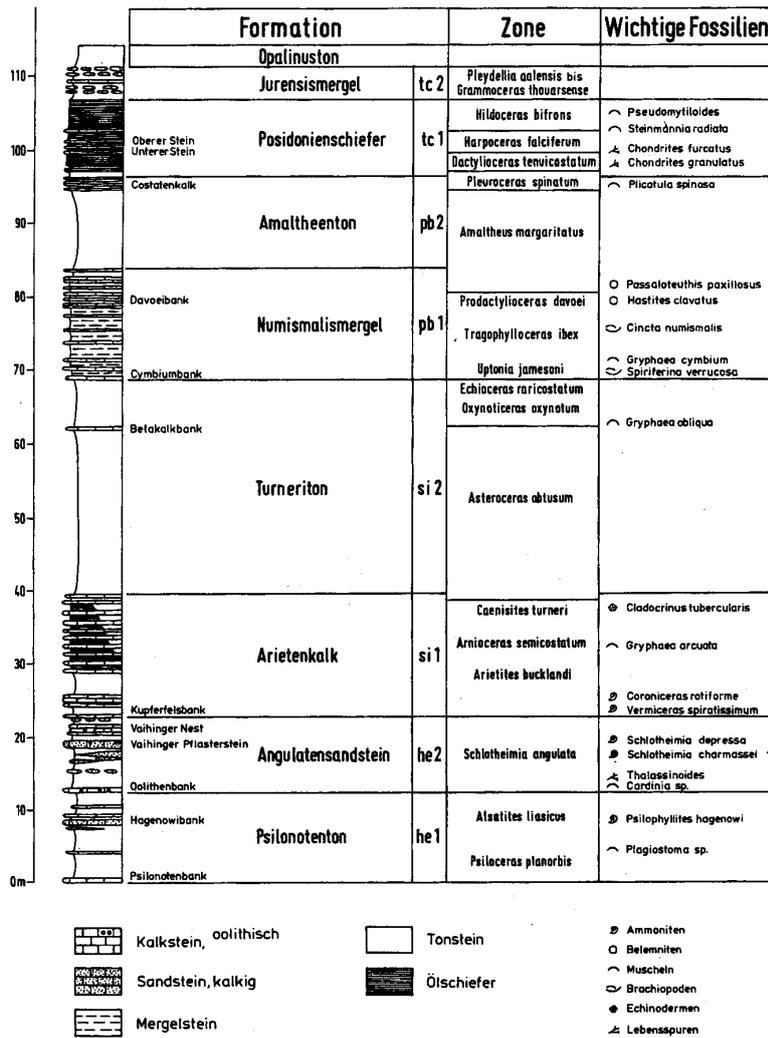


Abb. 2.1.4: Lithologisch-stratigraphisches Standardprofil des Unterjuras (Lias  $\alpha$ ) im Raum Stuttgart.

Aus: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:50.000, Blatt Stuttgart und Umgebung.

### 2.1.7.1 Hydrogeologische und geothermische Parameter

Die oben beschriebene Wechsellagerung schlägt sich ebenfalls in einer Zonierung der Grundwasserführung nieder, die in den klüftigen Hartgesteinsbänken stattfindet. Die zwischengeschalteten feinkörnigen Schichten wirken als Grundwasserhemmer. Die obere Grenze der hydrogeologischen Einheit bilden Verwitterungsprodukte des Festgesteins (Lias a Verwitterungslehm) bzw. Filderlehm oder Lösslehm. Insgesamt wird das Grundwasserdargebot als gering angesehen.

Die Grundwasserführung im Unterjura, der im südlichen Projektierungsgebiet bereits oberflächennah durchfahren wird, ist starken jahreszeitlichen Schwankungen ausgesetzt.

#### Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$

Stratigraphische Einheit	$k_f$ [m/s] max	$k_f$ [m/s] min	$k_f$ [m/s] MW
Arietenkalk si 1	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$3,9 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-10}$

Angulatensandstein he 2	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
Psilonotenton he1	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$

Tab. 2.1.26: Durchlässigkeitsbeiwerte des Unterjuras.

### Hydraulisches Gefälle $i$

Stratigraphische Einheit	$i$ [l]	Bemerkungen
Unterjura si 1 – he 2	0,02 ... 0,04	Südlicher Streckenabschnitt: unterschiedl. Rtg

Tab. 2.1.27: Hydraulische Gradienten des Unterjuras.

### Filtergeschwindigkeit $v_f$

Unter Zugrundelegung der ermittelten extremalen Durchlässigkeiten und eines mittleren hydraulischen Gradienten ergeben sich für den Unterjura folgende Filtergeschwindigkeiten:

Stratigraphische Einheit	[m/s]
Arietenkalk si 1	$1,1 \cdot 10^{-8} \dots 1,2 \cdot 10^{-13}$
Angulatensandstein he 2	$1,5 \cdot 10^{-4} \dots 3,0 \cdot 10^{-12}$
Psilonotenton he1	$3,3 \cdot 10^{-8} \dots 7,2 \cdot 10^{-14}$

Tab. 2.1.28: Ermittelte Filtergeschwindigkeiten des Unterjuras.

### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Geologie	$\lambda$ [W/m K] [10]	$c$ [MJ/(m <sup>3</sup> K)] [16]
Tonstein	1,7 ... 2,2	2,1 ... 2,4
Kalk-/Sandstein	1,4 ... 4,1	1,6 ... 2,8

Tab. 2.1.29: Thermische Kennwerte des Unterjuras.

### Bewertung

Anhand der hydrogeologischen und geohydraulischen Daten wird der Wärmeübergang in den Unterjuraschichten als konvektiv – konduktiv eingeschätzt. Insbesondere von den höher durchlässigen, klüftigen Hartgesteinen ist örtlich eine starke konvektive Beeinflussung zu erwarten. Entsprechende Erfahrungen wurden bereits gemacht und schlagen sich in der hohen Spannweite des Wärmeleitfähigkeitswertes mit hohem Maximalwert nieder.

#### **2.1.8 Quartäre Ablagerungen (Lockergesteine / Boden)**

Die Ablagerungen des felsigen Untergrunds bzw. der Auslaugungsrückstände werden durch junge, quartäre Lockergesteinsablagerungen überdeckt.

Die Lockergesteine sind lediglich in jenen Bereichen des Tunnels von Relevanz, in denen niedrige Überdeckungsverhältnisse vorherrschen bzw. das Bauwerk offen er-

stellt wird, wie etwa im Südabschnitt in der Filderebene oder im Bereich des Nesenbachtals. Hier stehen sowohl die Verwitterungsprodukte des Festgesteinsuntergrundes an (Lias  $\alpha$  – Verwitterungston), als auch der sog. Filderlehm sowie künstliche, anthropogen verursachte Auffüllungen.

Die beschriebenen Lockergesteine weisen einen Anteil von ca. 70 m an der Gesamtstrecke des Tunnels auf. Es handelt sich in der Regel um bindige, also feinkornreiche Ablagerungen wie Schluff und Ton mit sandigen Beimengungen.

### 2.1.8.1 Hydrogeologische und geothermische Parameter

#### Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$

Stratigraphische Einheit	$k_f$ [m/s] max	$k_f$ [m/s] min	$k_f$ [m/s] MW
Quartär, ungegliedert	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$

Tab. 2.1.30: Durchlässigkeitsbeiwerte im Quartär.

#### Hydraulisches Gefälle $i$

Stratigraphische Einheit	$i$ [ ]	Bemerkungen
Quartär, ungegliedert	0,01 ... 0,03	Sehr uneinheitlich, Filderhochfläche: wenige Prozent

Tab. 2.1.31: Hydraulische Gradienten im Quartär.

#### Filtergeschwindigkeit $v_f$

Unter Zugrundelegung der ermittelten extremalen Durchlässigkeiten und eines mittleren hydraulischen Gradienten ergeben sich für das Quartär folgende Filtergeschwindigkeiten:

Stratigraphische Einheit	[m/s]
Quartär, ungegliedert	$1,1 \cdot 10^{-7} \dots 1,2 \cdot 10^{-9}$

Tab. 2.1.32: Ermittelte Filtergeschwindigkeiten im Quartär.

#### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Geologie	$\lambda$ [W/m K] [10]	$c$ [MJ/(m <sup>3</sup> K)] [16]
Lösslehm, Filderlehm, Fließerde, Verwitterungslehm (wassergesättigt)	0,9 ... 2,3	1,6 ... 3,4

Tab. 2.1.33: Thermische Kennwerte des Quartärs.

#### Bewertung

Anhand der hydrogeologischen und geohydraulischen Daten wird der Wärmeübergang in den lehmigen, quartären Ablagerungen des südlichen Streckenabschnittes als konvektiv – konduktiv eingeschätzt. Eine Abhängigkeit besteht zu dem unregelmäßigen, durch Niederschläge stark beeinflussten Sickerwassereintrag.

## Querschnitte

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden 4 Querschnitte des Fildertunnels betrachtet. Die Abb. 2.1.5 zeigt die vier Rechenquerschnitte (RQ) im Tunnel.

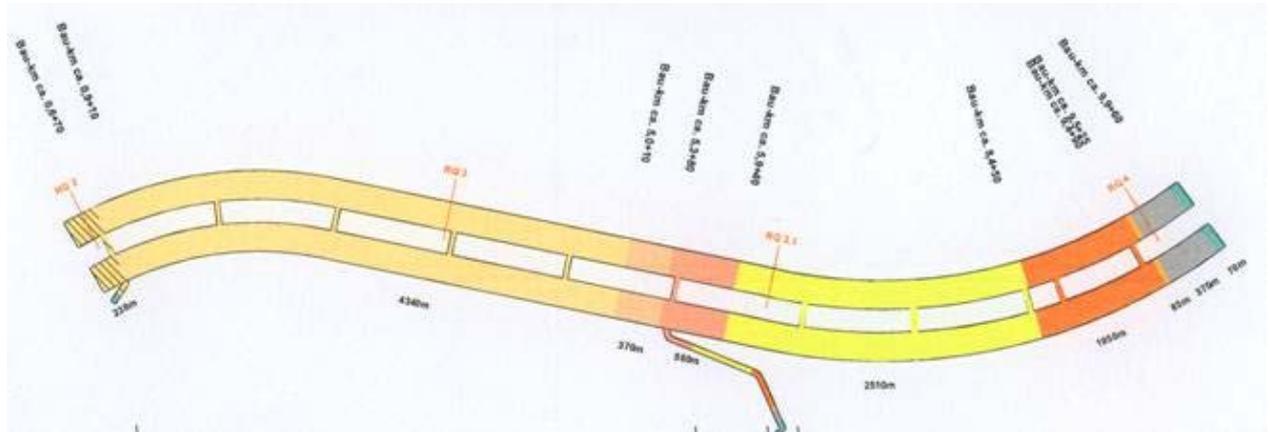


Abb. 2.1.5: Lage der Rechenquerschnitte im Verlauf des Fildertunnels

238m	km1	Gipskeuper, ausgelaut
4360m	km1	Gipskeuper, unausgelaut anfänglich anhydritfrei (ca. 240m)
370m	km2	Schilfsandstein
560m	km3	Bunte Mergel
2510m	km4	Stubensandstein
1050m	km5	Knollenmergel
85m	ko	Rhät
375m	he - si1	Schwarzer Jura $\alpha$ (Lias)
70m	Q	Lias $\alpha$ - Verwitterungston Quartär / Auffüllung

Die vier Rechenquerschnitte unterscheiden sich hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit, Grundwasserfluss, Überdeckung und Abstand zum Tunnelportal.

Kennwerte	RQ 2	RQ 3	RQ 3.1	RQ 4	Beton
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	1,7 - 2,3	1,5 - 4,1	1,6 - 2,1 1,8 - 2,6	1,7 - 2,2 1,4 - 4,1 1,5 - 2,2	2,1 - 2,3
Wärmekapazität $c_p$ [MJ/m <sup>3</sup> K]	1,6 - 3,4	?	2,1 - 2,4 1,6 - 2,8	2,1 - 2,4 1,6 - 2,8	2,6
Dichte $\rho$ [t/m <sup>3</sup> ]	2,1 - 2,3	2,4 - 2,6	2,4 - 2,5	2,3 - 2,4	2,5
Filtergeschwindigkeit $v_f$ [m/s]	$5,3 \cdot 10^{-8}$ - $4,8 \cdot 10^{-11}$	$< 1 \cdot 10^{-12}$	$< 1 \cdot 10^{-12}$ $1,5 \cdot 10^{-8}$ - $3,3 \cdot 10^{-15}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$ - $7,2 \cdot 10^{-14}$ $< 1 \cdot 10^{-12}$	/
Erdreichtemperatur $T$ [°C]	11,0 - 11,7	15,8 - 21,7	12,3 - 15,4	8,9 - 9,2	/

Tab. 2.1.34: Querschnittskennwerte

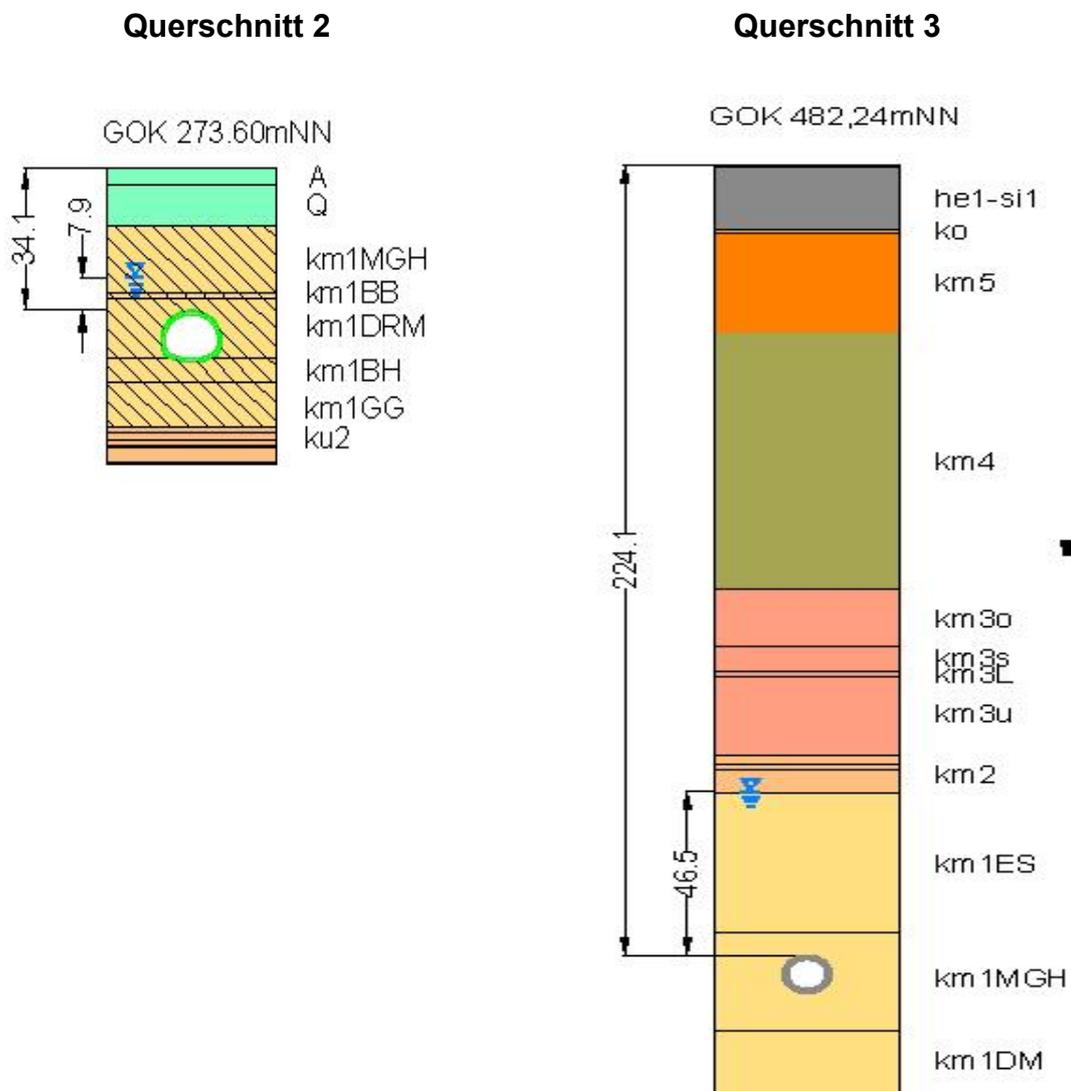
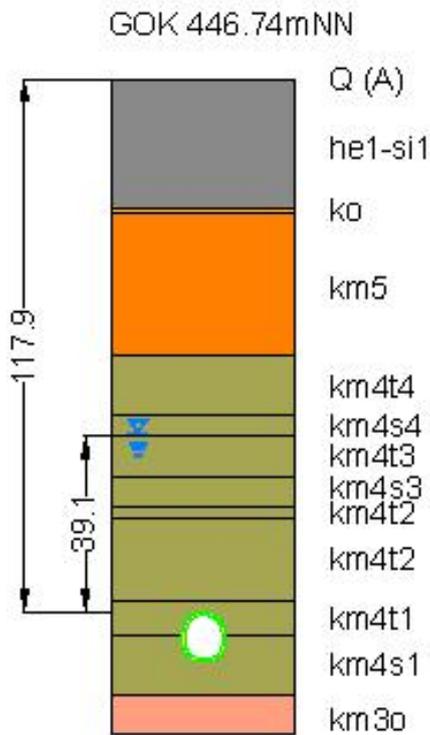


Abb. 2.1.6: Übersicht Querschnitte 2 und 3

### Querschnitt 3.1



### Querschnitt 4

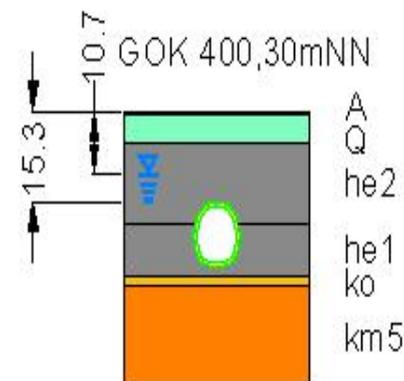


Abb. 2.1.7: Übersicht Querschnitte 3.1 und 4

## 2.2 Modell Tunnel

Wie oben beschrieben findet ein Wärmeaustausch zwischen der Absorberfläche und der Tunnelluft statt. Der Wärmeübergang von der Luft zur Tunnelwand erfolgt überwiegend konvektiv. Von der Wandoberfläche zur Absorberfläche wird die Wärme durch Leitung übertragen.

Während eine Bestimmung der umgebenden Erdreichtemperatur für die vier ausgewählten Tunnelabschnitte mit Hilfe des geothermischen Gradienten näherungsweise möglich ist, fällt die Festlegung einer entsprechenden Tunnellufttemperatur vergleichsweise schwer. Literaturstellen waren zu diesem Thema nicht ermittelbar. Einfache rechnerische Abschätzungen führten teilweise zu nicht plausiblen Ergebnissen.

Die Lufttemperatur im Tunnel hängt von mehreren Parametern ab. Dies sind die Außenlufttemperatur, die Durchströmung des Tunnels, die Länge des Tunnels, die Wand- bzw. Erdreichtemperatur, die inneren Wärmequellen und die Lage im Tunnel. Der Einfluss der Außenlufttemperatur nimmt bei langen Tunneln immer weiter ab, je größer der Abstand zum Tunnelportal ist. Kurze Tunnel werden überwiegend durch die Außenluft beeinflusst.

Wie groß der Einfluss der inneren Wärmefreisetzung ist soll im Weiteren untersucht werden. Abb. 2.2.1 zeigt vereinfacht das Modell für die Wärmefreisetzung im Tunnel.

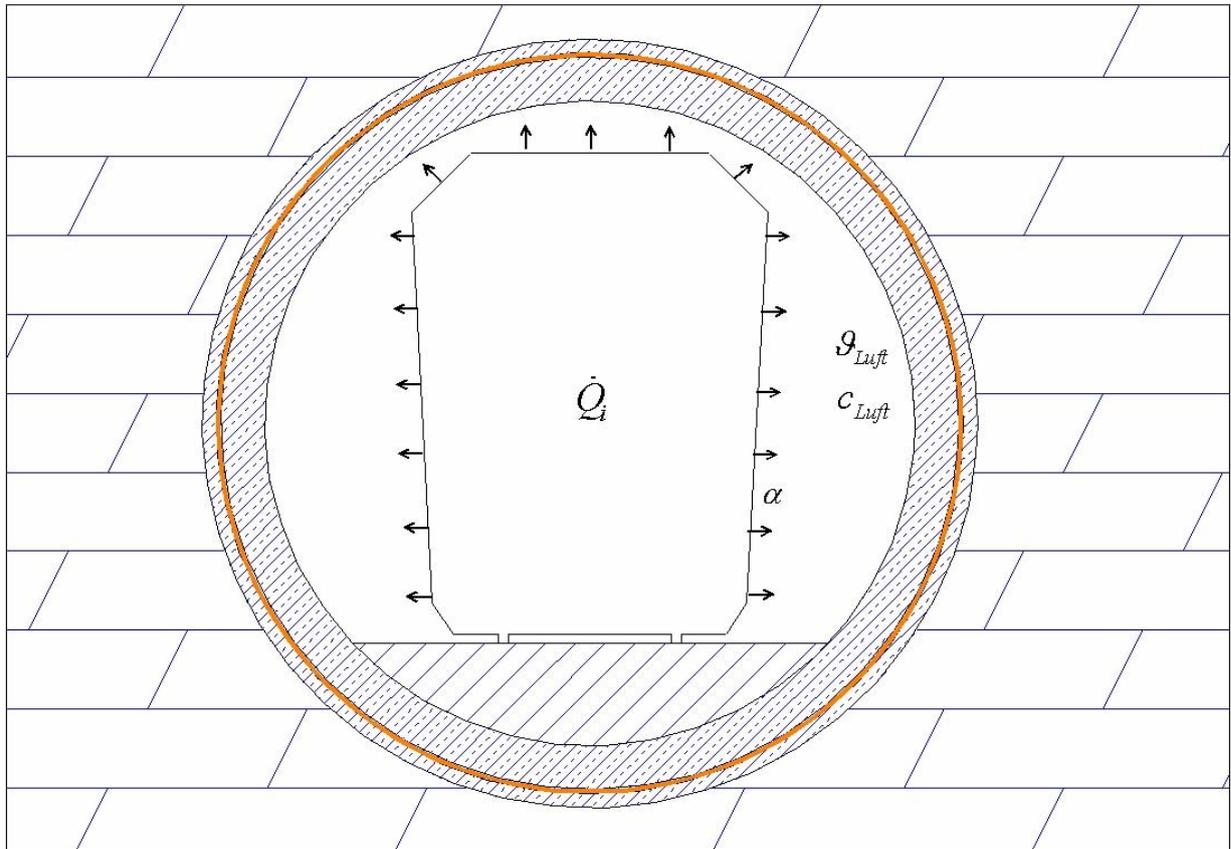


Abb. 2.2.1: Modell der inneren Wärmefreisetzung durch den Zugverkehr

Im Tunnel wird durch die fahrenden Züge Wärme an die Tunnelluft abgegeben. Von den Planern der Bahn wurden Daten zum geplanten Verkehrsaufkommen zur Verfügung gestellt (Tab. 2.2.1).

Anzahl	Art	Länge [m]	Nennleistung [kW]	wirksamer Anteil -	wirksame Leistung [kW]	Höchstgeschwindigkeit $v_{MAX}$ [km/h]
96	ICE	420	9600	0,1...0,4	5760	300
34	ICE-T, IR lange IRE,	205	6400	0,1...0,4	3840	230
92	RE, RB kurze IRE,	205	7050	0,1...0,4	4230	160
16	RE, RB	105	2160	0,1...0,4	1296	160

Tab. 2.2.1: Zusammenstellung des Verkehrsaufkommens

Der gesamte Tunnel ist nach den übergebenen Plänen ca. 9600 m lang.

Mit der wirksam werdenden Leistung der Züge und der entsprechenden Verweildauer im Tunnel wurde eine Energiemenge, die im Tunnel freigesetzt wird, pro Zug

ausgerechnet und auf das ganze Jahr hochgerechnet. Damit lässt sich eine durchschnittlich im Tunnel freigesetzte Wärmeleistung ermitteln. Bezieht man diese auf die wärmeübertragende Fläche, also die Zugoberfläche, ergeben sich für den in Tab. 2.2.1 angegebenen Bereich der thermisch wirksamen Anteile folgende bezogenen Wärmeleistungen:

wirksamer Anteil:	0,1	0,4
bezogene Leistung in W/m <sup>2</sup> :	2	6.

Der wirksame Anteil an freigesetzter Wärme beinhaltet gleichzeitig einen Abtransport der Wärme aus dem Tunnel durch Strömungsvorgänge, da hier kein geschlossenes System vorliegt. Bei starkem Außentemperatureinfluss kann die freigesetzte Leistung aber auch vollständig mit der Luft abgeführt werden, so dass kein Beitrag zur Lufttemperaturerhöhung geleistet wird.

Die stark instationären Strömungsverhältnisse in Tunneln aufgrund des Verkehrs erschweren eine Berechnung der Tunnellufttemperatur an einem bestimmten Ort im Tunnel erheblich. Dazu sind eingehendere Untersuchungen notwendig, die im Rahmen dieser Studie nicht machbar sind. Deshalb wird im Abschnitt Randbedingungen eine Abschätzung der Tunnellufttemperaturen mittels vorliegenden Messwerten vorgenommen.

Diese Lufttemperatur wird dann zur Berechnung des Wärmestroms von der Tunnelluft zum Absorber oder umgekehrt verwendet.

### 2.3 Gesamtmodell

In diesem Abschnitt werden die Modelle für die Wärmeleitung aus dem Erdreich und die Wärmeübertragung von der Tunnelluft miteinander verknüpft. Die Energiebilanz am Absorber wird mit Gleichung (2.3.1) beschrieben.

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{Q}_{Luft} + \dot{Q}_{Erd} \quad (2.3.1)$$

Mit

$\dot{Q}_{abs}$  - durch den Absorber zu- bzw. abgeführter Wärmestrom

$\dot{Q}_{Luft}$  - Wärmestrom von der Tunnelluft zum Absorber bzw. umgekehrt

$\dot{Q}_{Erd}$  - Wärmestrom vom Erdreich zum Absorber bzw. umgekehrt

Die Abbildungen Abb.2.3.1 und Abb. 2.3.2 zeigen einen Schnitt durch den Tunnel sowie die Absorberschicht. Für diese Potenzialabschätzung wurde angenommen, dass für die Erdwärmennutzung ein Absorber zwischen die Innenschale und die Außenschale eingebaut wird.

Die Abbildungen zeigen ebenfalls alle Einflussgrößen auf den Wärmestrom zwischen Erdreich und Absorber und Tunnel und Absorber.

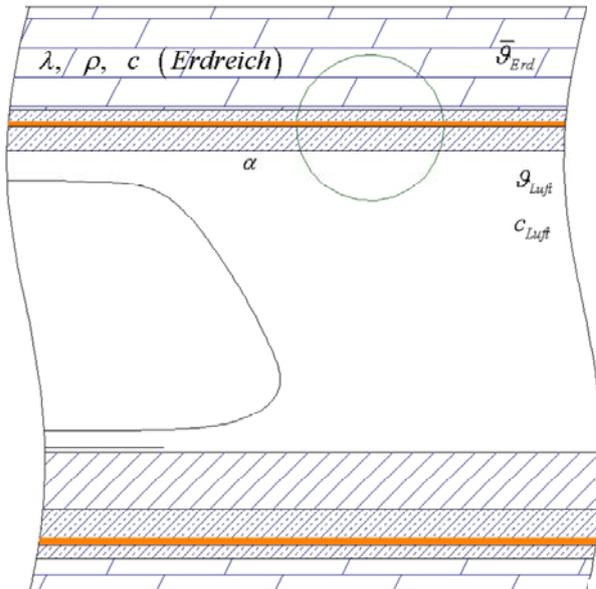


Abb.2.3.1: Längsschnitt Tunnel

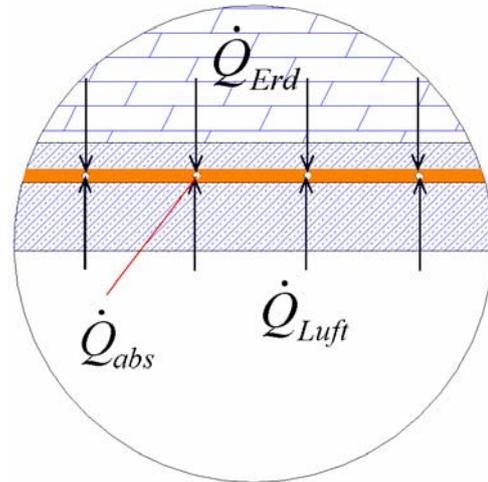


Abb. 2.3.2: Detailausschnitt

Bei der Wärmeleitung vom Erdreich zum Absorber wird mit den Leitwiderständen der Betonaußenschale und des umgebenden Erdreiches gerechnet. Daraus folgt Gleichung (2.3.2) für den Wärmestrom vom Erdreich zum Absorber.

$$\dot{Q}_{Erd} = \frac{(g_{Erd} - g_{Abs})}{R_{\lambda, \text{Beton}} + R_{\lambda, \text{Erd}}} \quad (2.3.2)$$

Mit den Widerstandbeiwerten für die Zylinderwand nach Gleichung (2.3.3) und (2.3.4):

$$R_{\lambda, \text{Beton}} = \frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{Beton}} \cdot L} \quad \text{und} \quad (2.3.3)$$

$$R_{\lambda, \text{Erd}} = \frac{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{Erd}} \cdot L} \quad (2.3.4)$$

Dabei wurde angenommen, dass die Erdreichtemperatur in einer Entfernung von 5 Metern von der Tunnelaußenschale konstant ist. Überschlägige instationäre Rechnungen mit einem Dauerezug von ca. 2000 h zeigen eine kaum merkliche Temperaturabsenkung, so dass diese Annahme bestätigt werden konnte.

Zum Wärmeleitvorgang in der Tunnelinnenschale kommt der konvektive Wärmeübergang an der Tunnelinnenwand hinzu.

Als Wärmeübergang bezeichnet man die Wärmeübertragung zwischen bewegten Gasen oder Flüssigkeiten und einer festen Wand. Wobei für Flüssigkeiten und Gase die gleichen Gesetze gelten. Der von einem Fluid mit der mittleren Temperatur  $\vartheta_{f,m}$  an eine Wandfläche  $A$  mit der Oberflächentemperatur  $\vartheta_w$  übertragenen Wärmestrom wird nach der von NEWTON angegebenen Beziehung ermittelt:

$$\dot{Q}_{Wand} = \alpha A (\vartheta_{f,m} - \vartheta_w) \quad (2.3.5)$$

Mit

$\dot{Q}_{Wand}$  - Wärmestrom von der Tunnelluft zur Tunnelwand bzw. umgekehrt

Bei Übertragung der Wärme von der Wand an das Fluid gilt das gleiche Gesetz, lediglich die Temperaturen sind zu vertauschen. Der Proportionalitätsfaktor  $\alpha$  wird als Wärmeübergangskoeffizient bezeichnet und ist gegeben durch  $W/(m^2K)$ .

$\alpha$  hängt in komplizierter Weise von sehr verschiedenen Einflussgrößen ab, die durch die physikalischen Eigenschaften und den Strömungswiderstand des Fluids sowie durch die geometrische Form der Flächen bestimmt werden.

Fasst man den Wärmeübergang von der Luft zur Wand und die Wärmeleitung in der Wand zusammen ergibt sich Gleichung (2.3.6):

$$\dot{Q}_{Luft} = \frac{(\vartheta_{Luft} - \vartheta_{Abs})}{R_\alpha + R_{\lambda, \text{Beton}}}. \quad (2.3.6)$$

Durch die Addition der beiden Anteile aus der Tunnelluft und aus dem umgebenden Erdreich erhält man die vom Absorber zu- bzw. abzuführende Wärmeleistung.

## 2.4 Randbedingungen

Als Grundlage für geothermische Berechnungen werden folgende Parameter benötigt: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , spezifische Wärmekapazität (vol. bez.)  $c_p$ , Dichte  $\rho$ , Filtergeschwindigkeit  $v_f$ , Erdreichtemperatur  $\vartheta$ .

Um für die vorgenannten Randbedingungen die Variationsbreite für diese Potenzialabschätzung zu begrenzen, wurden einzelne Vorüberlegungen bzw. rechnerische Überprüfungen durchgeführt.

Die **Dichte  $\rho$**  beschreibt im allgemeinen das Verhältnis von Masse und Volumen.

Die Massendichte gehört zu den einen Stoff kennzeichnenden Eigenschaften. Sie ist eine Funktion des Ortes und beschreibt die Masse  $dm$  pro Volumeneinheit  $dV$ . Ihre Einheit ist daher in SI-Einheiten durch  $\text{kg/m}^3$  gegeben. Der Kehrwert der Dichte wird spezifisches Volumen genannt.

Die **spezifische Wärmekapazität  $c$**  in  $\text{J}/(\text{kgK})$  gibt die Wärmemenge  $Q$  in  $\text{J}$  an, die benötigt wird, um einen Stoff mit einer Masse  $m = 1\text{kg}$  um die Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 1\text{K}$  zu erwärmen. Die Wärmekapazität ist umso höher, je mehr Wasser im Boden vorhanden ist, da hier die Speicherfähigkeit des Wassers hinzukommt.

Die **Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$**  des Bodens fasst im Grundgesetz der Wärmeleitung die Wärmeleitfähigkeit die spezifische Wärmekapazität und die Dichte des Bodens zusammen. Die Temperaturleitfähigkeit ist abhängig von Bodenaufbau, Bodenstruktur und Wassergehalt. Sie gibt Auskunft über die Tiefe und die Geschwindigkeit des Eindringens einer Temperaturwelle in den Boden. Bei konstanten Randbedingungen ist sie entscheidend für die Zeit, die zum Temperatenausgleich erforderlich ist. Je größer die Temperaturleitfähigkeit ist, desto schneller pflanzt sich eine Temperaturänderung in einem Material fort.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.4.1)$$

Die Eigenschaften  $\lambda$ ,  $c$  und  $\rho$  werden durch die stoffliche Zusammensetzung des Bodens bestimmt (und sind temperaturabhängige Materialparameter). Das Wasser hat wegen seiner hohen Wärmeleitfähigkeit und -kapazität einen großen Einfluss auf die thermischen Eigenschaften. Der Wassergehalt des Bodens spielt somit eine maßgebende Rolle für die Beurteilung der thermischen Eigenschaften des Untergrundes.

Die spezifische Wärmekapazität und die Temperaturleitfähigkeit sind für stationäre Betrachtungen nicht relevant. Erst bei instationären Berechnungen und Simulationen

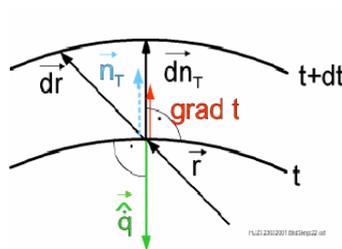
üben diese Parameter einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit bei sich ändernden zeitlichen Randbedingungen (variable Entzugsleistungen) aus.

Die **Filtergeschwindigkeit**  $v_f$  ergibt sich aus dem Verhältnis der Wassermenge  $W$  zu dem durchflossenen Filterquerschnitt  $F$  ( $v_f = W / F$  [m/s]).

Die Filtergeschwindigkeit wurde als Parameter nicht in die Potenzialabschätzung einbezogen, da die Abschätzungen auf konservative Weise erfolgten und ein Grundwasserstrom vernachlässigt wurde.

Die **Wärmeleitfähigkeit**  $\lambda$  hängt von den mengenmäßigen Anteilen der Stoffkomponenten und ihrer räumlich-geometrischen Anordnung ab. Die Wärmeleitung erfolgt praktisch allein über feste und flüssige Materialien. Somit ist die Wärmeleitfähigkeit des Bodens auch stark durch den Wassergehalt und die Dichte des Bodens beeinflusst und kann somit innerhalb eines großen Bereiches schwanken. Aufgrund dieser großen möglichen Schwankungsbreite der Wärmeleitfähigkeit sind bei analytischen Berechnungen zur Auslegung von Absorberanlagen Parametervariationen unumgänglich.

Bei der Wärmeleitung handelt es sich um einen molekularen Wärmetransport. Der Zusammenhang zwischen der Wärmestromdichte  $q$ , welche der durch eine Fläche  $A$  in der Zeiteinheit  $t$  transportierten Wärmemenge  $Q$  entspricht, und dem Temperaturgradienten wird durch das Fourier'sche Grundgesetz mit der Wärmeleitfähigkeit beschreiben:



$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad } t \quad (2.4.2)$$

Mathematisch wird der Wärmeleitvorgang durch zwei Gesetze erfasst. Das ist erstens das Fouriersche Erfahrungsgesetz der Wärmeleitung, das Wärmeströme und Temperaturen miteinander verknüpft und als empirisch ausreichend gesichert gilt, und zweitens der Energieerhaltungssatz, der hier speziell auf die Energieform Wärme anzuwenden ist. Die mathematische Vereinigung beider Gesetze liefert im Ergebnis eine partielle Differenzialgleichung, deren Lösung das gesuchte Temperaturfeld im Körper beschreibt. Die rechnerische Behandlung eines Wärmeleitproblems besteht dann im Wesentlichen darin, die genannte Differenzialgleichung unter Berücksichtigung der Rand- und Anfangsbedingungen zu integrieren.

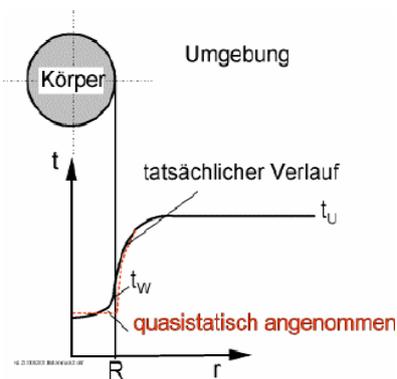
Es wird zunächst der Fall der stationären eindimensionalen Wärmeleitung betrachtet. Die Fouriersche Differenzialgleichung für das Temperaturfeld geht unter dieser Voraussetzung in die Laplacesche Differenzialgleichung über.

$$\nabla^2 t = 0 \quad (2.4.3)$$

Für den speziellen Fall der Zylinderwand (vergleichbar mit dem Tunnel) ergibt sich:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0 \quad (2.4.4)$$

Die instationäre eindimensionale Wärmeleitung wird gekennzeichnet durch:



$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad (2.4.5)$$

Die analytische Lösung der Fourierschen Differenzialgleichung für den eindimensionalen Fall ergibt sich unter Einbeziehung der Error-Function (Gaußsches Fehlerintegral) durch die Methode der Quellpunkte. Dabei werden die beiden Variablen  $x$  und  $t$  in einer Variablen  $\xi$  zusammengefasst.

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{4at}} \quad (2.4.6)$$

Die Substitution der neuen dimensionslosen Variablen  $\xi$  in der Differenzialgleichung führt diese in die einfache Differenzialgleichung

$$\frac{d^2 t}{d\xi^2} + 2\xi \frac{dt}{d\xi} = 0 \quad (2.4.7)$$

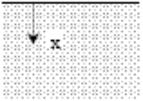
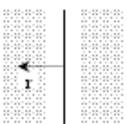
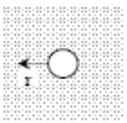
über. Deren Lösung ist:

$$t(x,t) = A + B \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-\xi^2} d\xi \quad (2.4.8)$$

dabei ist:

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-\xi^2} d\xi \equiv \Phi(\xi) \equiv \text{erf } \xi \quad (2.4.9)$$

Die partikulären Lösungen haben die Gaußsche Glockenkurve zur Grundlage.

Grundfall	Skizze	Differentialgleichung
Halbunendlicher Körper		$\frac{\partial^2 \vartheta(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \vartheta(x,t)}{\partial t}$
Unendlicher Körper mit zylindrischem Hohlraum		$\frac{\partial^2 \vartheta(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial \vartheta(r,t)}{\partial t}$
Unendlicher Körper mit kugelförmigem Hohlraum		$\frac{\partial^2 \vartheta(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \vartheta(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{a} \frac{\partial \vartheta(r,t)}{\partial t}$

Tab. 2.4.1: Berechnungsgrundlagen

### Randbedingung Tunnelluft

Wie oben beschrieben ist die Berechnung der Tunnellufttemperatur von vielen Parametern abhängig und daher im Umfang dieser Studie nicht berechenbar. Daher wurde eine Abschätzung anhand von Messwerten vorgenommen.

Aus Untersuchungen liegen handschriftliche Messwerte für Tunnellufttemperaturen für zwei Bahntunnel an der ICE-Neubaustrecke Würzburg – Hannover vor. Diese werden in Tab. 2.4.2 wiedergegeben.

Entfernung vom Portal	Kribergtunnel		Mündener Tunnel			
			Nord		Süd	
	Max. in °C	Min. in °C	Max. in °C	Min. in °C	Max. in °C	Min. in °C
0m	28,7	-9,6	29,8	-11,7	31,4	-13,4
200m	24,7	-5,2	25,4	-6,0	25,4	-7,5
500m	22,1	-3,2	23,4	-2,2	23,4	-4,5
1000m	20,5	-0,2	21,8	+0,8	20,5	-0,4
2000m	-	-	-	-	19,5	+3,6

Tab. 2.4.2: gemessene Tunnellufttemperaturen

Die Temperaturmessungen erfolgten über vier Jahre, von 1999 – 2002. Die Sensoren waren in 2,2m über der Sole installiert. Die Tunnel sind zweigleisig und im Gegenverkehr befahren.

Der Mündener Tunnel ist ca. 10,5 km lang und hat eine maximale Überdeckung von 175 m und ist daher in etwa vergleichbar mit dem untersuchten Fildertunnel. Der Kribergtunnel ist nur ca. 3 km lang und hat eine vergleichsweise geringe Überdeckung.

Eine Abschätzung der Tunnellufttemperaturen an den gewählten Querschnitten im Tunnel erfolgte mit diesen gemessenen Werten. Da die Temperaturverläufe sehr dicht beieinander liegen, wurde ein Mittelwert gebildet. Dies ist in Abb. 2.4.1 dargestellt. Die Abbildung zeigt somit die Bandbreite der möglichen Lufttemperaturen in längeren Tunneln.

Die Temperaturkurven lassen sich mathematisch wie folgt beschreiben.

- Winterfall:

$$\vartheta_{\text{Luft,Tunnel,Wi}} = \vartheta_{\text{Außenluft, Winterfall}} + a \cdot (1 - e^{(-b \cdot L)}) \quad (2.4.10)$$

- Sommerfall:

$$\vartheta_{\text{Luft,Tunnel,So}} = (\vartheta_{\text{Außenluft, Sommerfall}} - \Delta\vartheta_{\text{max}}) + a \cdot e^{(-b \cdot L)} \quad (2.4.11)$$

Mit den Größen:

L - Entfernung von Portal

a,b - Koeffizienten (wurden aus den Messwerten bestimmt)

$\Delta\vartheta_{\text{max}}$  - maximale Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Tunnelluft.

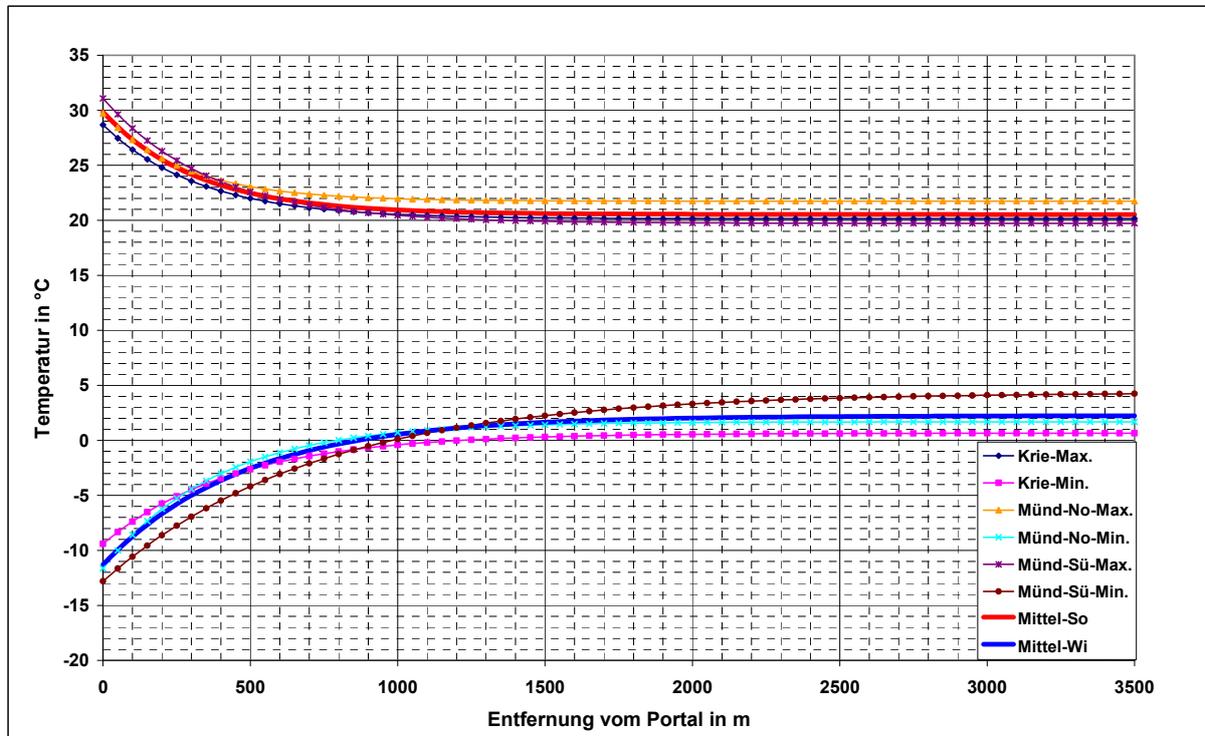


Abb. 2.4.1: Lufttemperaturverlauf im Tunnel

Durch eine Verschiebung dieser Kurven lässt sich nun die Lufttemperatur für die ausgewählten Rechenquerschnitte abschätzen. Dabei ist im Sommerfall die recht

hohe Erdreichtemperatur an den Querschnitten 3 und 3.1 in die Abschätzung einzu-  
beziehen.

Als weiterer Parameter auf der Luftseite steht der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$ .  
Dieser wurde in Anlehnung an typische, in der Gebäudetechnik verwendeten Werte  
für freie Konvektionsströmungen an Wänden festgelegt. Hier geht allerdings der  
Kehrwert  $R_\alpha$ , der so genannte Wärmeübergangswiderstand in die Berechnung ein.

Da der Wärmeübergangswiderstand abhängig ist von der Wärmestromrichtung und  
der Lage der Fläche wurde hier ein Mittelwert von

$$\mathbf{R_\alpha = 0,12 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

für alle untersuchten Fälle angenommen.

## Parameterstudien

Die maßgeblichen Parameter, die Auswirkungen auf den Wärmestrom haben sind die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, der Temperatur des umgebenden Erdreichs, die Eigenschaften der verwendeten Materialien, die Temperatur und die Fließgeschwindigkeit des Absorbermediums sowie die Temperatur und die Strömungsverhältnisse der Tunnelluft.

Gleichung (2.4.12) zeigt die Auflösung der Gleichung (2.4.9) und man erhält die Abhängigkeit des Wärmestroms von den relevanten Parametern Wärmeleitfähigkeit, Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Erdreich, Ort und Zeit.

$$\dot{q} = -\lambda(t_o - t_a) \frac{2}{\sqrt{4a\pi\tau}} e^{-\xi^2} \quad (2.4.12)$$

Eine erste Abschätzung erfolgte für den Wärmestrom in der Absorberfläche bei Veränderung der Entzugsdauer (Abb. 2.4.2).

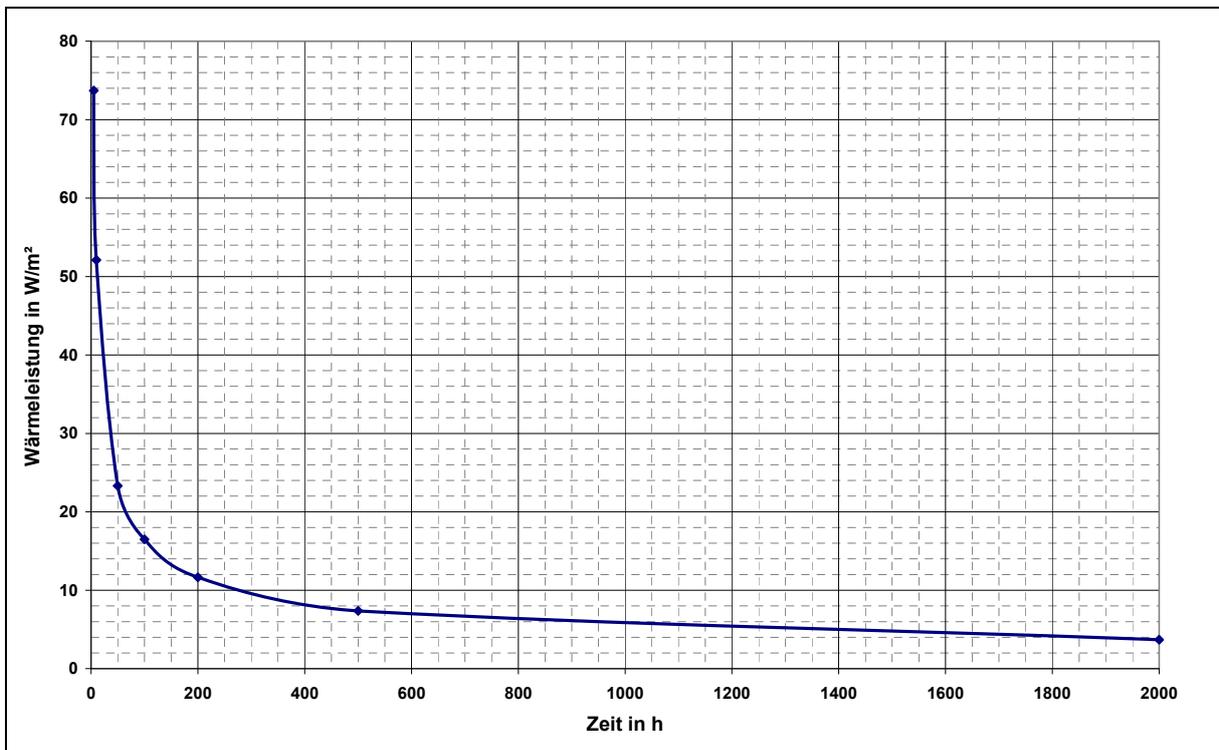


Abb. 2.4.2: zeitlicher Verlauf der Wärmeleistung

Dabei wird deutlich, dass die Entzugsleistungen sehr stark von der Betriebsdauer abhängen. D.h. über einen kurzen Zeitraum sind sehr hohe flächenbezogene Entzugsleistungen möglich. Für das gezeigte Beispiel mit  $\lambda = 2 \text{ W/mK}$  und  $\Delta\vartheta = 8 \text{ K}$  ergibt sich eine maximale Entzugsleistung von  $74 \text{ W/m}^2$  in der Anfangsphase. Durch das Absinken der Temperatur des umgebenden Erdreiches verringert sich der Wärmestrom in der Absorberfläche mit steigender Betriebsdauer. Es sind also zwi-

schen den Perioden mit Wärmeentzug entsprechende Regenerationsphasen notwendig um eine gewünschte Entzugsleistung zu realisieren.

Zur Abschätzung der Bedeutung der Wärmeleitfähigkeit wurden ebenfalls analytische Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurde die Entwicklung des Wärmestroms auf verschiedene Größen der Wärmeleitfähigkeit untersucht. Es wird ein Bereich zwischen 1,7 und 2,9 W/mK untersucht, in dem sich alle untersuchten Querschnitte befinden.

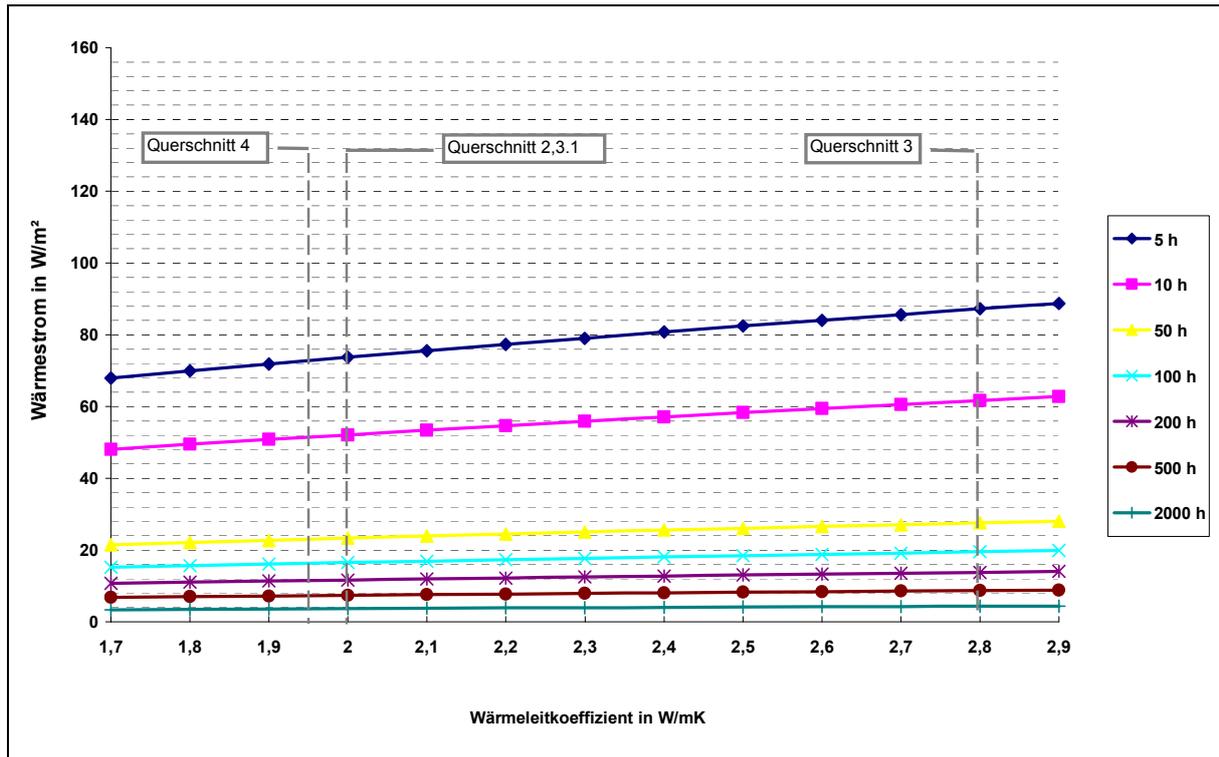


Abb. 2.4.3: Wärmestrom in Abhängigkeit vom Wärmeleitkoeffizienten und den Betriebsstunden ( $\Delta\vartheta = 8\text{K}$ )

Ein weiterer wesentlicher Parameter ist die Temperaturdifferenz zwischen dem Absorber und dem umgebenden Erdreich. Die Untersuchung des Temperatureinflusses ist in der ersten Betrachtung auch über die Dauer des Entzugs zu integrieren. Hierbei wird deutlich, dass der Einfluss des Gradienten eine wesentlichere Rolle, auch im Bezug über die Entzugsdauer, spielt. Der Schwankungsbereich zwischen den Querschnitten kann schon mehrere W/m<sup>2</sup> betragen.

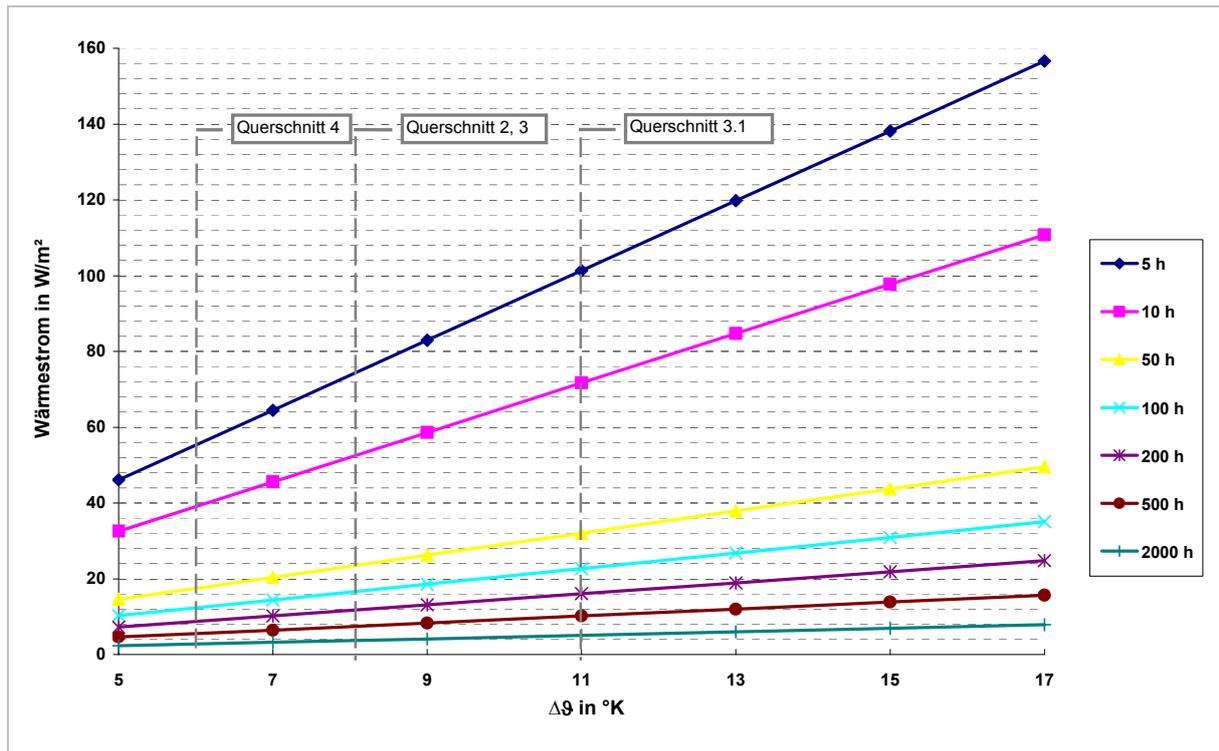


Abb. 2.4.4: Wärmestrom in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten und Betriebsstunden ( $\lambda = 2 \text{ W/mK}$ )

## Übersicht

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 2.4.3) beinhaltet die Werte der festgelegten Randbedingungen für die ausgewählten Tunnelprofile. Diese unterscheiden sich durch ihre Überdeckung, ihren Abstand zum Tunnelportal und ihren Tunnelaufbau sowie weiteren Randbedingungen.

Außerdem wurden nachfolgende Annahmen getroffen:

- Wärmeübergang Erde – Absorber: nur Wärmeleitung
- Wärmeübergang Tunnelluft – Absorber: Konvektion, Wärmeleitung
- Luftdurchströmung Tunnel
  - Vereinfachung: stationäre Modelle
  - Betrachtung: Sommerperiode, Winterperiode  
( $\vartheta_{\text{Abs, Sommer}} = 18^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{\text{Abs, Winter}} = 3^\circ\text{C}$ )
  - Verkehrsdichte gegeben
- Erdreichtemperatur
  - Oberflächennahe Bodenschichten; Beeinflussung der Erdreichtemperatur durch die saisonalen Temperaturschwankungen

- Tiefere Bodenschichten; Erdtemperatur steigt um ca. 1 K pro 33 m Tiefe
- In Zentraleuropa: konstante Erdreichtemperatur von ca. 10 – 12°C in einer Tiefe von 10 – 20 m

<b>Kennwerte</b>	<b>RQ 2</b>	<b>RQ 3</b>	<b>RQ 3.1</b>	<b>RQ 4</b>
<b>Bodenart</b>	Ausgelaugter Gipskeuper	Unausgelaugter Gipskeuper	Stubensandstein	Unterjura (Lias $\alpha$ )
<b>Überdeckung</b>	34,1 m	224,1 m	117,9 m	15,3 m
<b>mittlere Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda</math></b>	2,0 W/mK	2,8 W/mK	2,0 W/mK	1,95 W/mK
<b>Abstand zum Portal</b>	200 m	2500 m	3500 m	350 m
<b>Mittlere Erdreichtemperatur</b>	11°C	19°C	14°C	9°C
<b>Temperatur Tunnelluft Winter</b>	6,6°C	13°C	13°C	8,5°C
<b>Temperatur Tunnelluft Sommer</b>	14,4°C	19°C	14°C	12,7°C
<b>Radius Absorber</b>	5,0 m	5,3 m	5,1 m	5,1 m
<b>Radius Tunnelaußenschale</b>	5,3 m	5,4 m	5,3 m	5,3 m

Tab. 2.4.3: Übersicht der Randbedingungen

## 2.5 Berechnungen

Die Untersuchung der Vorgänge des Transports thermischer Energie und deren mathematische Beschreibung stellt ein abgeschlossenes und technisch sehr bedeutungsvolles Teilgebiet der Technischen Thermodynamik dar. Der dafür konventionell verwendete Fachausdruck Wärmeübertragung lässt sich in drei wesentliche Gebiete unterteilen: die Leitung, die Konvektion sowie die Strahlung. Der Wärmetransport durch Leitung und Konvektion ist im Gegensatz zur Strahlung an einen stofflichen Energieträger gebunden und somit für unsere Betrachtung maßgebend.

Untersuchungsgegenstand der Berechnungen ist das Potenzial, das sich durch die Absorberflächen im Tunnel gewinnen lässt. Dieses setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: dem Wärmestrom aus dem Erdreich (Wärmeleitung) sowie dem aus der Tunnelluft (Wärmeleitung & Konvektion).

Der Wärmestrom aus dem Erdreich wird zum einen durch eine Betrachtung mit zeitlich veränderlichen Temperaturfeldern (Instationär), sowie durch eine Betrachtung mit zeitlich konstantem Temperaturfeld (Stationär) dargestellt.

### **Erdreich - Instationäre Betrachtung**

Das thermische Gleichgewicht eines Körpers ist dadurch definiert, dass sich in ihm alle Temperaturunterschiede ausgeglichen haben. Daher müssen in einem Körper, der nicht im thermischen Gleichgewicht steht, unterschiedliche Temperaturen auftreten. Die Gesamtheit der Temperaturwerte und ihre räumliche Verteilung stellt das Temperaturfeld da. Mathematisch wird dieses Temperaturfeld als Funktion des Ortes und der Zeit beschrieben (2.4.5).

Beim Betrachten einer differentiellen Ortsänderung wird stets dann eine differentielle Temperaturänderung eintreten. Der stärkste Temperaturanstieg erfolgt senkrecht zu den Isothermenflächen (Verbindungsfläche aller Orte, die zu gleicher Zeit die gleiche Temperatur aufweisen). In der Abbildung sieht man den Verlauf der Erdreichtemperatur in einem Radius bis zu 5m um die Tunnelschalle. Außerdem ist die Abhängigkeit zu der Entzugsdauer des Wärmestroms zu sehen. Deutlich wird, dass nach einer einfachen Betriebsperiode (ca. 2000 h) eine minimale Absenkung der Erdreichtemperatur in 5m Tiefe festzustellen ist. Dabei handelt es sich ca. um 0,5 bis 1 K.

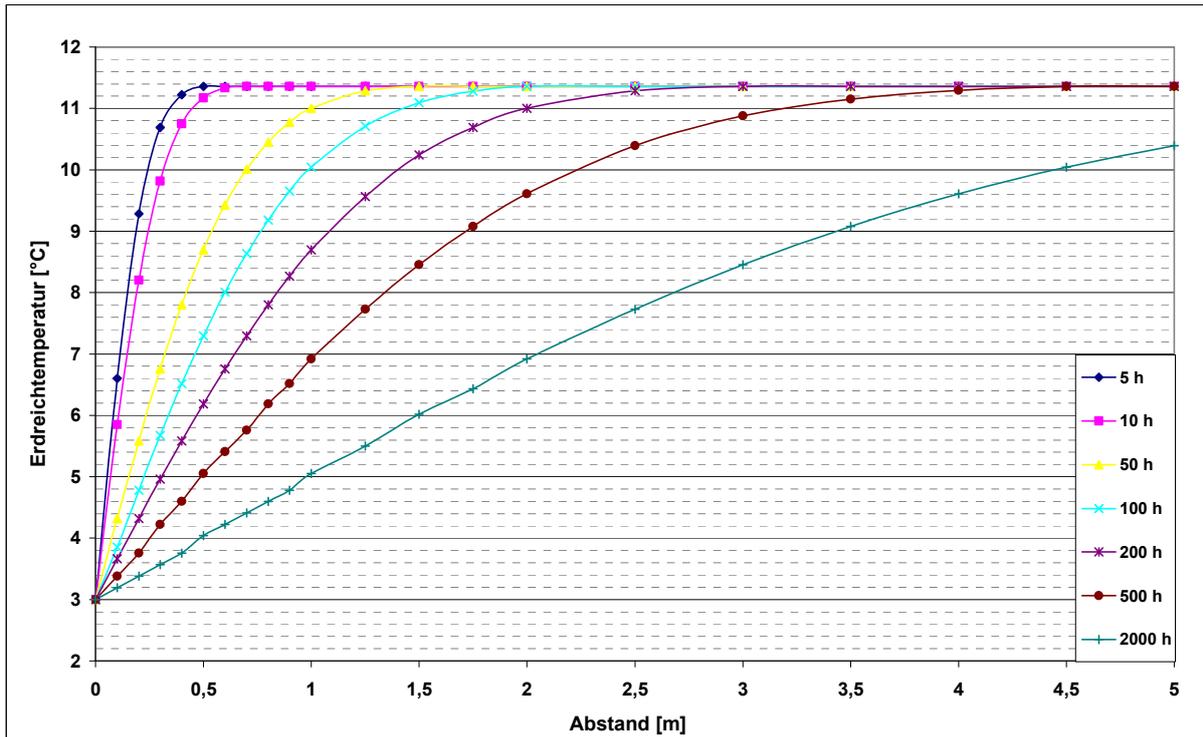


Abb. 2.5.1: Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Entfernung ( $\lambda = 2 \text{ W/mK}$ )

Die Differentialgleichung (2.4.5) erlaubt die Berechnung der Temperaturverteilung  $\vartheta(x, y, z, t)$ , sofern an den Grenzen dieses vierdimensionalen Raum- und Zeitkontinuums gewisse Bedingungen vorgegeben sind, die so genannten Anfangs- und Randbedingungen. Das Schaubild Abb. 2.5.2 verdeutlicht das Verhalten der Erreichungstemperatur im Bezug auf die Betriebsdauer. Besonders deutlich wird hierbei, dass die Steigung der Kurven mit zunehmendem Abstand flacher wird und sich mit zunehmender Betriebsdauer einem charakteristischen Wert asymptotisch annähert. Wichtig ist das aufgrund der Abschätzung des unbeeinflussten Temperaturbereichs, da man davon ausgehen kann, dass der Abfall der Temperatur hinter diesen Bereich vernachlässigbar gering ist.

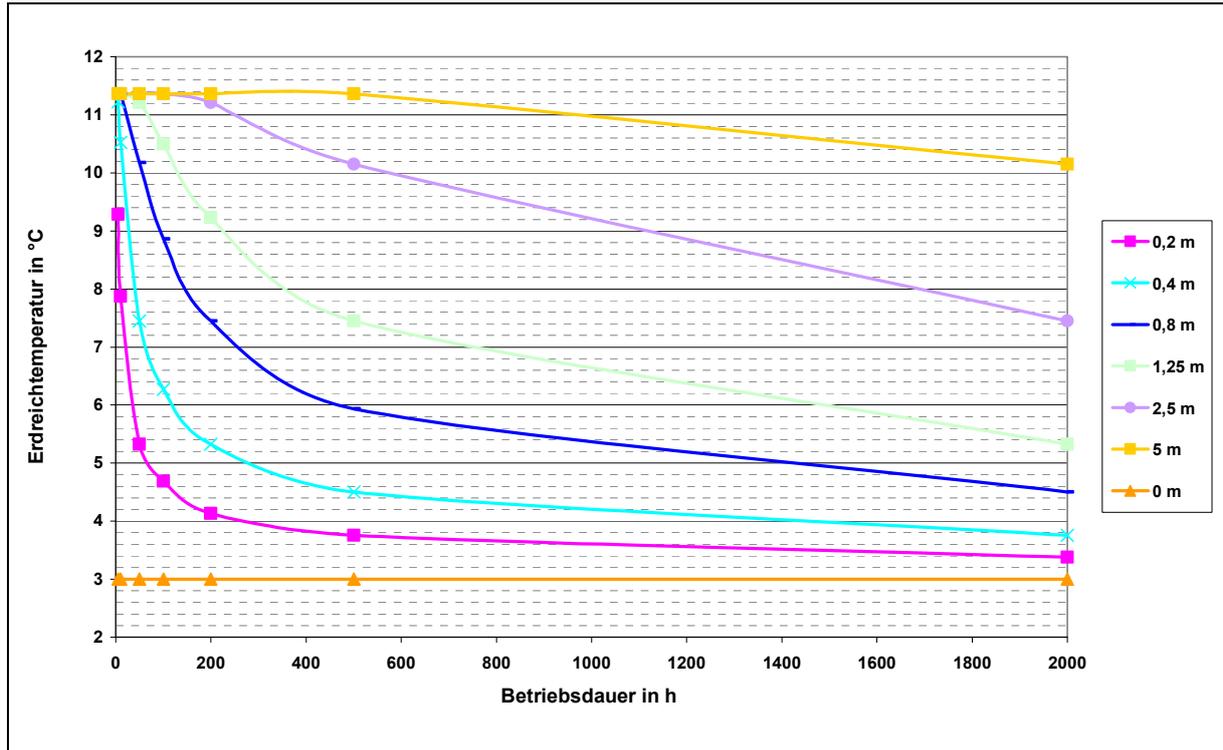


Abb. 2.5.2: Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Betriebsdauer ( $\lambda = 2 \text{ W/mK}$ )

### Stationäre eindimensionale Wärmeleitung

Bei stationären Vorgängen ist eine Zeitabhängigkeit des Temperaturfeldes nicht vorhanden. Folglich liegt im Körper eine zeitkonstante Temperaturverteilung vor. Um dieser Vorgabe in unserer Betrachtung gerecht zu werden muss eine genaue Abschätzung der Entfernung zum unbeeinflussten Temperaturbereich vorherrschen. Somit kann man diesen Bereich als wärmeleitendes Element ersetzen und man erreicht eine hinreichend genaue zeitkonstante Temperaturverteilung. Durch die instationäre Betrachtung wurde festgestellt, dass ab ca. 5m Entfernung kein wesentlicher Temperaturabfall mehr festzustellen ist. Voraussetzung ist eine Entzugsdauer von ca. 2000 Stunden, was einer typischen Heizperiode entspricht.

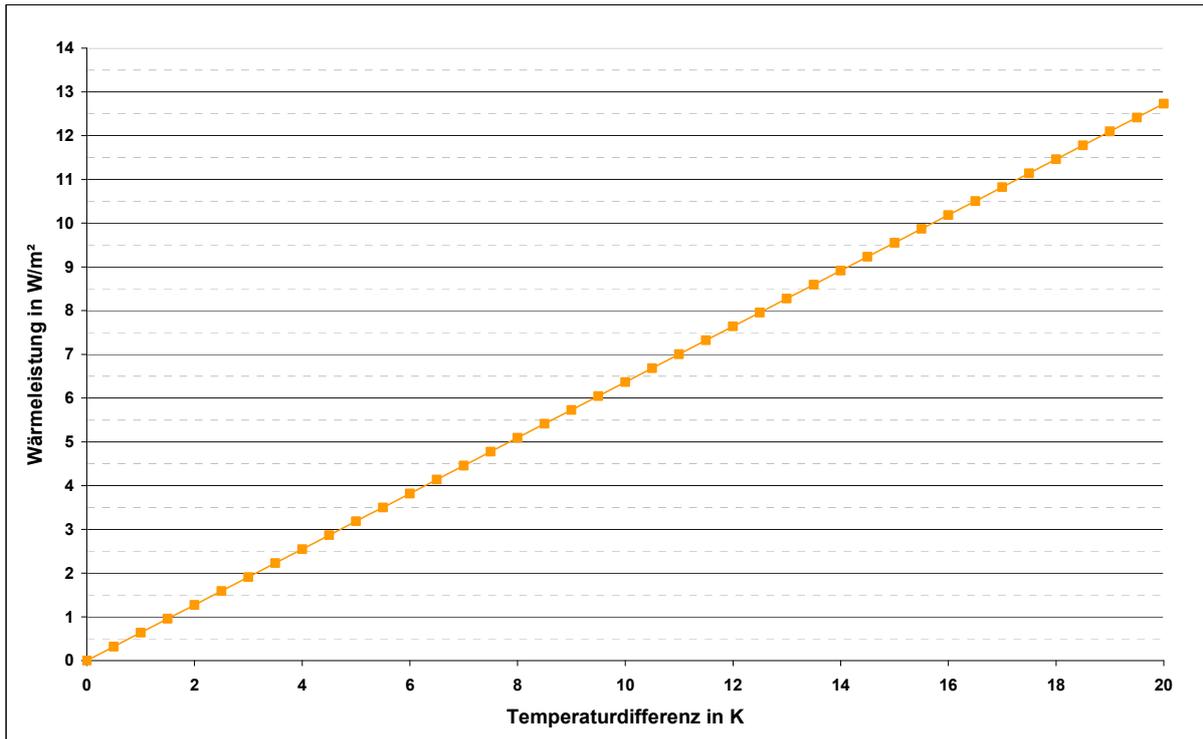


Abb. 2.5.3: Entzugsleistung aus dem Erdreich abhängig von der Temperaturdifferenz

Abhängig von der Erdreichtemperatur, die eine gewisse Schwankungsbreite aufweist, können sich entsprechende Maxima und Minima der Entzugsleistungen ergeben. Die hieraus resultierende Spannbreite der Leistungen beruht auf den Angaben der Tab. 2.1.34. Das Diagramm verdeutlicht den möglichen Bereich der sich aus der Temperatur des Absorbermediums (Winter Vorlauf 3°C, Sommer Vorlauf 18°C) und der jeweiligen Erdreichtemperatur ergibt. Die Erdreichtemperatur wird dabei durch den saisonellen Betrieb beeinflusst und regeneriert, sodass man nicht von einem konstanten Wärmestrom über die Dauer ausgehen kann. Der hier aufgezeigte Bereich basiert jedoch auf einer mittleren Entzugsleistung (welche die instationäre Temperaturabsenkung bereits berücksichtigt) und bezieht sich deshalb ausschließlich auf die natürliche Schwankung der Erdreichtemperatur.

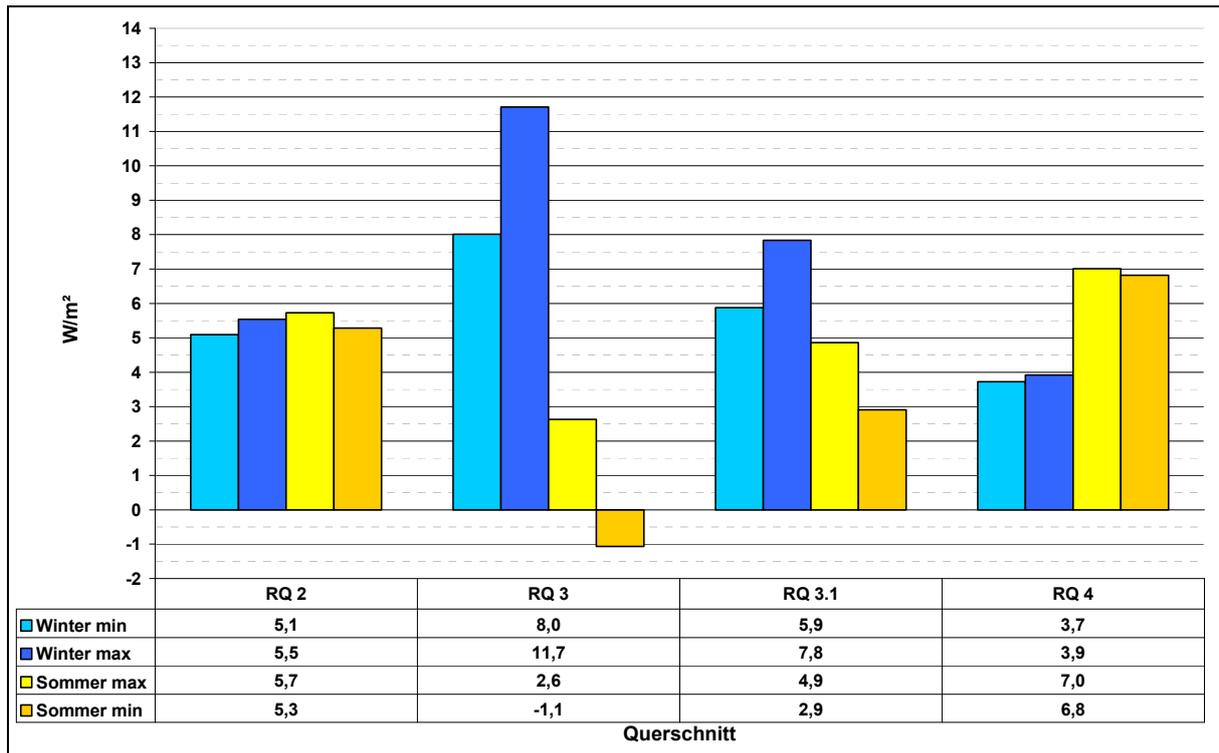


Abb. 2.5.4: Min – Max Entzugsleistungen Erdreich

## Luft

Bei der Wärmeübertragung aus fluiden Stoffen sind insgesamt zwei Transportvorgänge voneinander zu unterscheiden, die in ihren Gesetzmäßigkeiten infolge der unterschiedlichen Transportmechanismen nicht übereinstimmen. Der Transport setzt sich hierbei aus der Konvektion und der Leitung zusammen. Im Gegensatz zur Wärmeleitung liegt beim Wärmetransport durch Konvektion eine mikroskopische Teilchenbewegung vor, die nur in Fluiden möglich ist. Der Wärmefluss ist, da er mit der Teilchenbewegung direkt verbunden ist, wesentlich vom Strömungszustand des Mediums abhängig. Man unterscheidet hierbei die erzwungen und die freie Konvektion. Eine erzwungen Konvektion kommt dadurch zustande, wenn die Strömung durch ein von außen erzeugtes Druckgefälle entsteht. Bei der freien Konvektion spricht man dann wenn der Wärmetransport nur aufgrund lokaler Temperatur- und Druckunterschiede entsteht. Außerdem ergeben sich grundsätzlich andere Verhältnisse in den beiden Bereichen der laminaren- und der turbulenten Strömung.

Die Berechnung des Wärmestroms erfolgt analog dem Kapitel 2.3. Die Berechnung des Wärmestroms ergibt sich dann aus der Gleichung (2.3.6).

Abb. 2.5.5 zeigt die mögliche Entzugsleistung pro Quadratmeter Tunnelwandoberfläche abhängig von der Temperatur der Tunnelluft. Die Temperatur der Tunnelluft ist abhängig von den im Kapitel 2.2 und 2.4 beschriebenen Parametern.

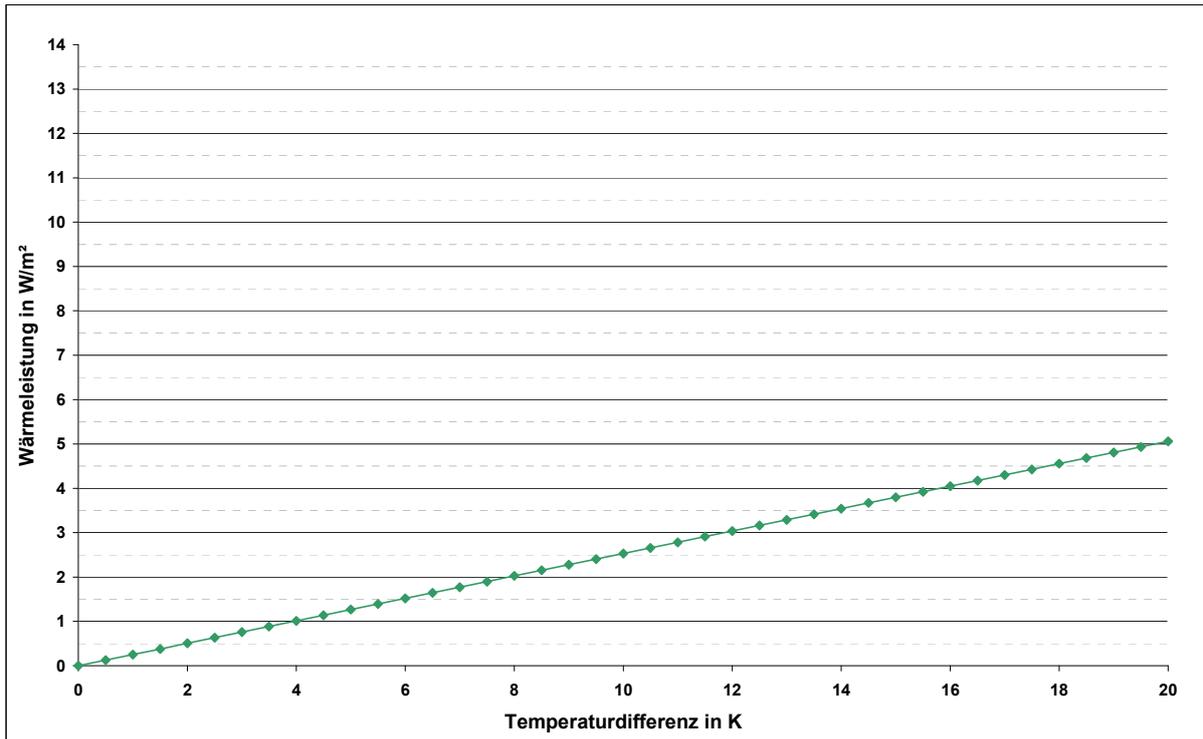


Abb. 2.5.5 Entzugsleistung aus der Tunnelluft abhängig von der Temperaturdifferenz

Für die charakteristischen Werte der Querschnitte aus Kapitel 2.4 ergeben sich folgende in der Abb. 2.5.6 abgebildeten Leistungen.

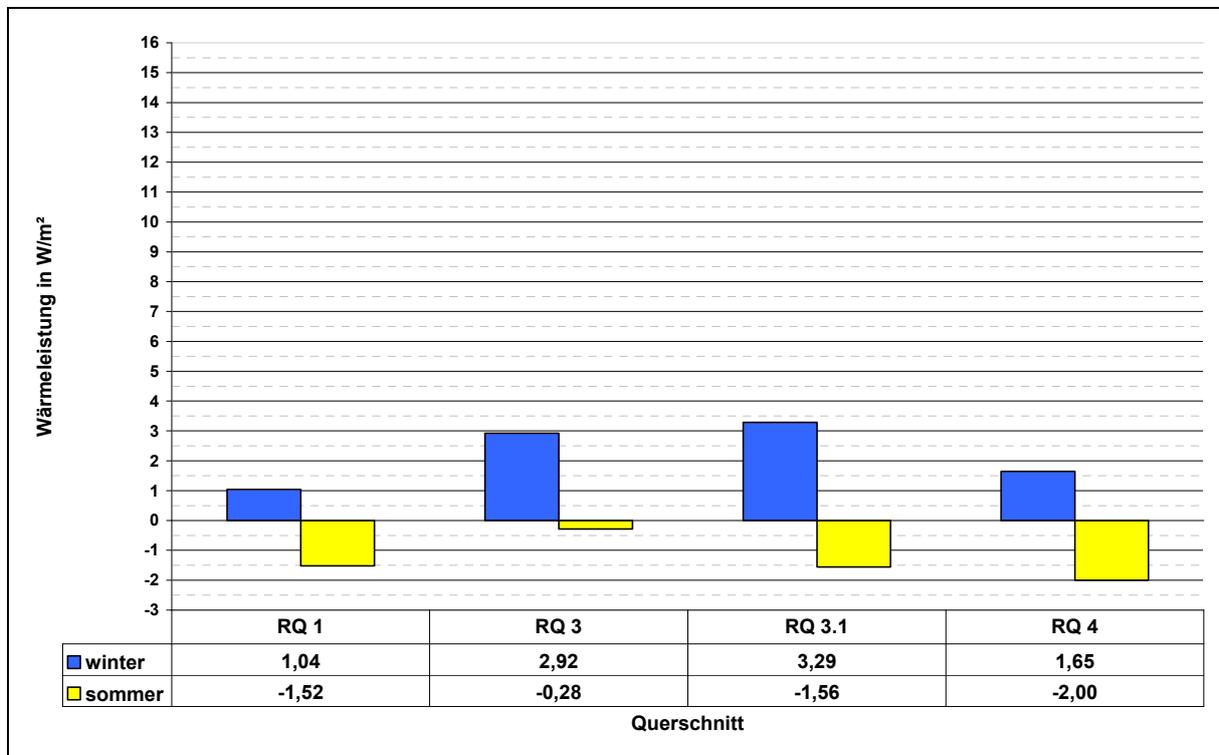


Abb. 2.5.6: Vergleich der Entzugsleistungen Tunnelluft

## 2.6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für die Leistungsberechnung der Tunnelabsorber an den festgelegten Querschnitten zusammengestellt.

Die Randbedingungen sind in Kapitel 2.4 beschrieben. In dieser Studie wurden stationäre, auf die Absorberfläche bezogene Wärmeleistungen für Heiz- und Kühlbetrieb berechnet. Der Heizbetrieb entspricht dem Winterfall und der Kühlbetrieb dem Sommerfall. Die verwendeten Absorbertemperaturen begründen sich in den folgenden Annahmen.

- Heizbetrieb:
- kein Frostbetrieb, wie bei herkömmlichen Erdwärmesonden
  - Spreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf am Absorber beträgt 4 Kelvin
  - mittlere Absorbertemperatur:  $\vartheta_{\text{abs, Winter}} = 3^{\circ}\text{C}$
- Kühlbetrieb:
- Anlage wird im ‚Freien Kühlen‘ betrieben, d.h. kein Wärmepumpenbetrieb
  - Spreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf am Absorber beträgt 4 Kelvin
  - mittlere Absorbertemperatur:  $\vartheta_{\text{abs, Sommer}} = 20^{\circ}\text{C}$

Die Abbildungen Abb. 2.6.1 und Abb. 2.6.2 zeigen die Wärmeleistungen für den Heiz- und den Kühlfall für die vier ausgewählten Rechenquerschnitte.

Im Heizfall variiert die Wärmeleistung zwischen den Querschnitten von ca. **5 W/m<sup>2</sup> bis ca. 15 W/m<sup>2</sup>**. Der Anteil der Luft entzogenen Wärme beträgt hier im Mittel 27%. Dieser hängt jedoch sehr stark von der Lufttemperatur im Tunnel ab. Durch die sehr starken Schwankungen der Lufttemperatur im Vergleich zur Erdreichtemperatur steht dieser Anteil nur begrenzt zur Verfügung. Abb. 2.6.1 zeigt auch, dass die tiefer liegenden Tunnelstrecken im Heizfall ein größeres Potenzial aufweisen als die weniger überdeckten Tunnelabschnitte. Dies hängt maßgeblich mit der höheren Erdreichtemperatur in diesen Abschnitten zusammen.

Im Kühlfall ist es möglich eine Wärme mit einer Leistung von ca. **1 W/m<sup>2</sup> bis ca. 8 W/m<sup>2</sup>** einzuspeichern. Dabei wird die an die Luft abgegebene Wärme für die Heizperiode nicht mehr nutzbar, da die der Luft zugeführte Wärme durch Strömungsvorgänge im Tunnel abtransportiert wird. Wie Abb. 2.6.2 zeigt eignen sich die weniger stark überdeckten Abschnitte mehr zum Kühlbetrieb, da hier die treibende Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Absorber größer ist. Bei sehr hohen Außen-

temperaturen kann sich der Beitrag der Außenluft aber auch umkehren, wenn die Außenlufttemperatur über die Absorbtemperatur ansteigt.

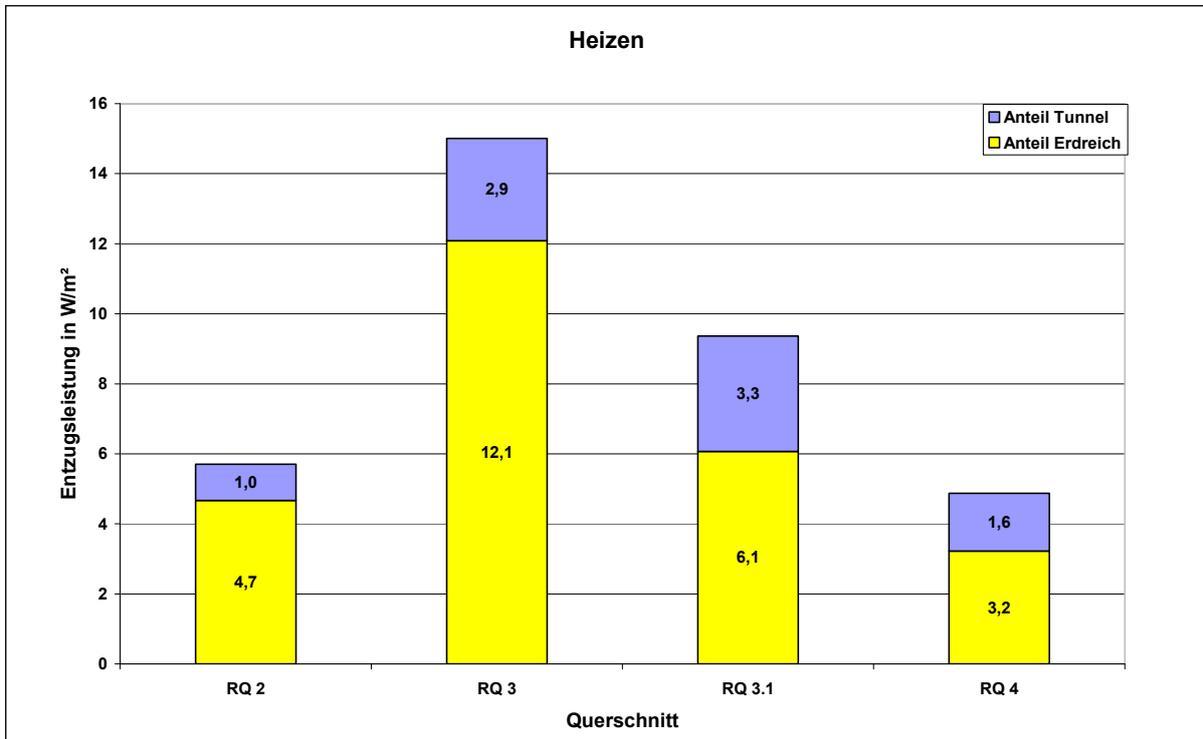


Abb. 2.6.1: Wärmeentzugsleistungen im Heizbetrieb

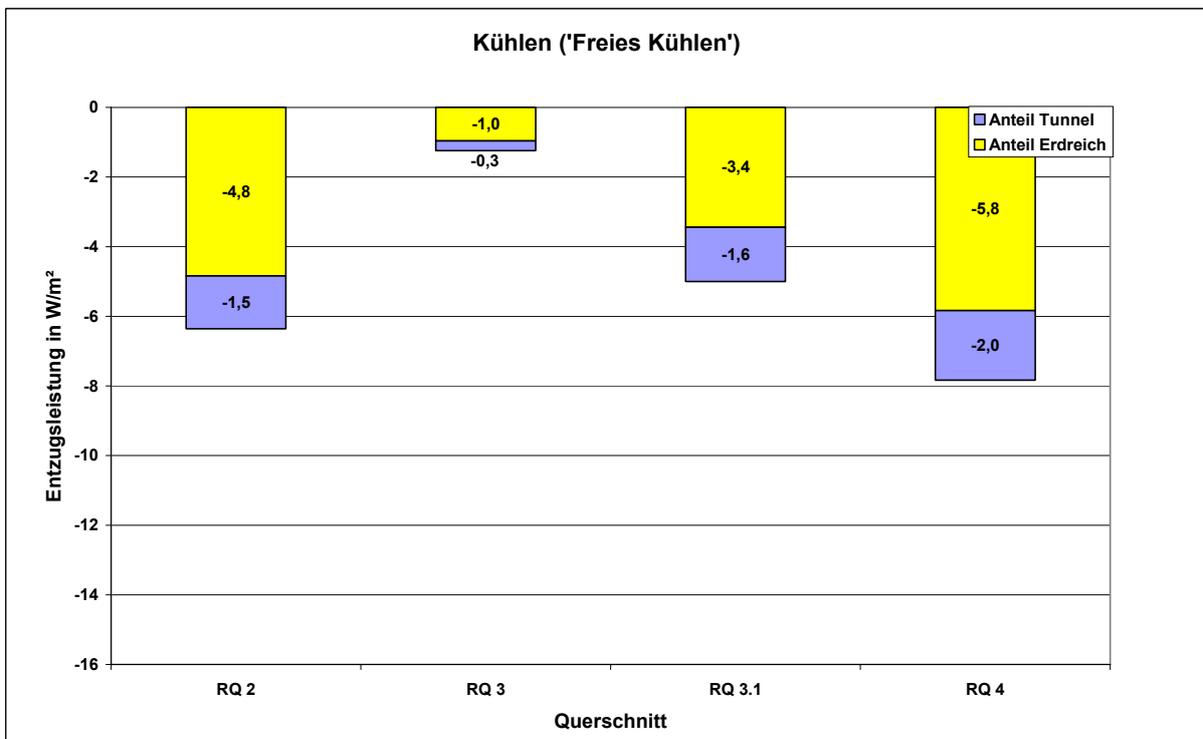


Abb. 2.6.2: Wärmeleistung im Kühlbetrieb

Eine weitere Möglichkeit zur Kühlung besteht in der Nutzung der Wärmepumpe als Kühlaggregat. Dadurch sind höhere Absorberrtemperaturen als beim ‚Freien Kühlen‘ möglich. In Abb. 2.6.3 sind die Ergebnisse der Wärmeleistung für eine mittlere Absorberrtemperatur von 30°C beispielhaft dargestellt.

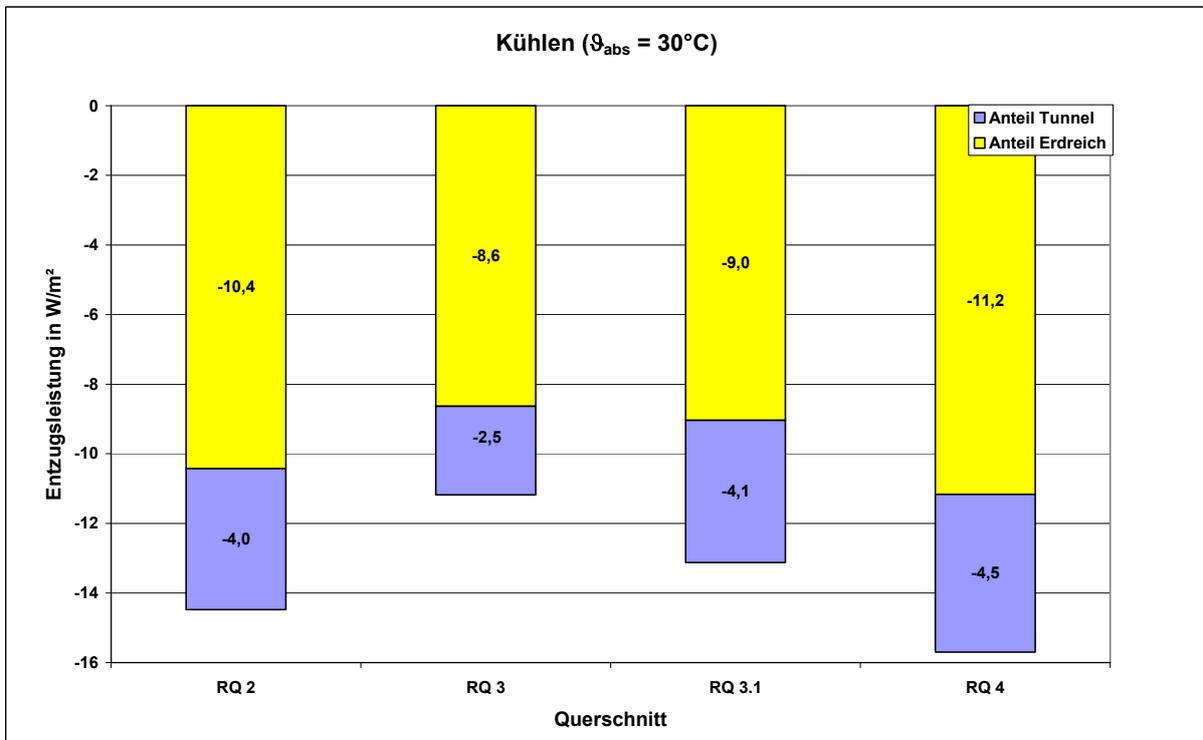


Abb. 2.6.3: Wärmeleistung im Kühlbetrieb bei  $\vartheta_{\text{abs}} = 30^{\circ}\text{C}$

Es sind in diesem Fall erkennbar höhere Wärmeleistungen auf das Erdreich übertragbar. Dies begründet sich in einer wesentlich größeren Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung. Damit sind prinzipiell ähnliche Wärmeleistungen wie im Heizfall übertragbar. In diesem Beispiel von ca. **11 W/m² bis ca. 16 W/m²**.

### 3 Technische Systeme

#### 3.1 Geothermie und Absorbertechnik

##### 3.1.1 Geothermienutzung bei Tunnelbauwerken in offener Bauweise

Im Hochbau ist der Einsatz von Geothermie bereits Stand der Technik und weit verbreitet. Die Erfahrungen können für Tunnel in offener Bauweise übernommen werden. Im Folgenden wird eine Auswahl von technischen Lösungen näher erläutert. Umfangreiche Beschreibungen finden sich in der Literatur. Erdwärmesonden und Tiefengeothermie werden im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet.

##### Energiepfähle

Eine Möglichkeit zur Geothermienutzung bei Tunneln in offener Bauweise sind sog. Energiepfähle. Hierzu werden Gründungs- und Verbauwandpfähle, die aus Gründen der Statik benötigt werden mit Absorberleitungen ausgerüstet. Ein Beispiel für den Einsatz von Energiepfählen ist der Main Tower in Frankfurt am Main. Die Gründungs- und Verbauwandpfähle dieses Gebäudes wurden teilweise als Energiepfähle ausgeführt. Insgesamt wurden rund 80.000 lfm Wärmeaustauscherrohre eingebaut, die eine Leistung von 500 kW erzeugen. Die folgenden Abbildungen zeigen eine Skizze und ein Foto eines solchen Energiepfahls.

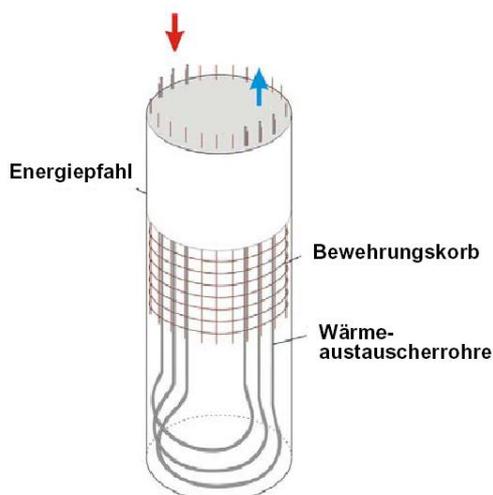


Abb. 3.1.1: Prinzipskizze



Abb. 3.1.2: Bewehrungskorb für einen Energiepfahl

Ein weiteres Beispiel ist der in Wien gebaute Lainzer Tunnel, Baulos LT24 – Hadersdorf-Weidlingau [16]. Für die hierfür in Deckelbauweise zu errichtende Weichenhalle wurden Wände aus Großbohrpfählen ( $\varnothing$  0,9 bzw. 1,2 m) mit Tiefen bis 22 m hergestellt. Dabei wurde jeder dritte Bohrpfahl als Energiepfahl mit Absorberlei-

tungen ausgerüstet. Es wird eine Wärmeleistung von 150 kW erreicht, mit welcher eine nahe gelegene Schule beheizt wird.

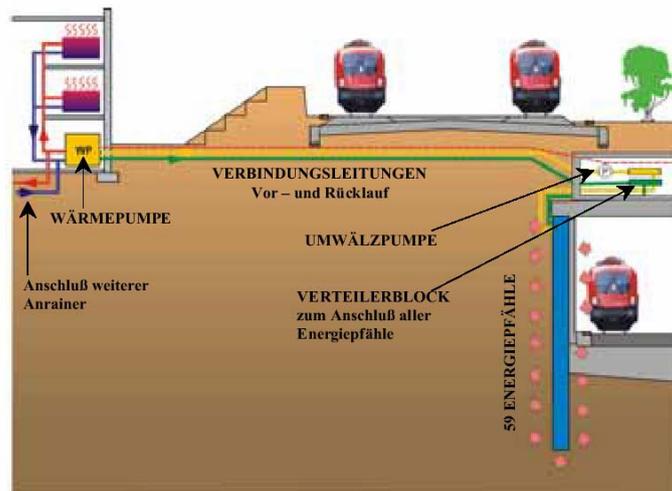


Abb. 3.1.3: Geothermienutzung im Lainzer Tunnel

### Energieschlitzwände

Bei dieser Technik werden die Absorber in die Schlitzwände des Gebäudes eingefügt. Schlitzwände werden ebenfalls aus Gründen der Statik eingesetzt und erreichen Tiefen von 65-100 m bei Wandstärken von 40 – 150 cm.

Energieschlitzwände haben eine große erdberührte Fläche. Ein Beispiel für den Einsatz von Energieschlitzwänden ist das EA-Generali-Center in Wien mit einer Fläche der Energieschlitzwand von 4.200 m<sup>2</sup>. Der Einbau von Absorberleitungen in Schlitzwänden ist ebenfalls bereits in Wien (U2/2 Taborstraße) erfolgreich eingesetzt worden.

### Energiebodenplatten

Bodenplatten eignen sich ebenfalls zur Geothermienutzung. Die Wärmetauscherrohre werden dabei in die Bodenplatte einbetoniert. Bodenplatten befinden sich zwar in geringen Tiefen, allerdings hat das Gebäude darüber eine dämmende Wirkung, weshalb auch mit Energiebodenplatten ganzjährig Absorbertemperaturen gewährleistet werden können.

Alle bis hier genannten Techniken zur Nutzung der Erdwärme sind vielfach erprobt und sind im Hochbau Stand der Technik und daher auf die Anwendung im offenen Tunnelbau übertragbar.

### 3.1.2 Geothermienutzung bei Tunnelbauwerken in Spritzbetonbauweise

#### Allgemein

Bei der Spritzbetonbauweise (NÖT) wird die durch Sprengung bzw. Tunnelvortriebsbagger freigelegte Tunnelröhre mit Spritzbeton provisorisch gesichert. In einem weiteren Arbeitsgang wird die Tunnelinnenschale aus Ortbeton eingebaut. Die Spritzbetonbauweise ist eine geschlossene Tunnelbauweise. Im Folgenden werden drei Möglichkeiten zur Energieentnahme in Tunnelbauwerken dieser Bauart erläutert.

#### Energievlies

Der Einsatz der Absorbertechnologie bei Tunneln in Spritzbetonbauweise ist bislang nur aus einem Pilotprojekt bekannt. Auch diese Versuchsanlage ist Bestandteil des Wienerwaldtunnels (LT22 – Bierhäuselberg). MARKIEWICZ berichtet hierüber ausführlich in seiner Dissertation [16].

In der dortigen Versuchsanlage wurde, wie der Aufbau in Abb. 3.1.4 zeigt, ein vor-konfektioniertes sog. Energievlies zwischen Aussen- und Innenschale des Tunnels eingebaut. Das System erlaubt die Herstellung einzelner, in sich abgeschlossener Zellen, die separat durchströmt und im Schadensfall abgeschaltet werden können.

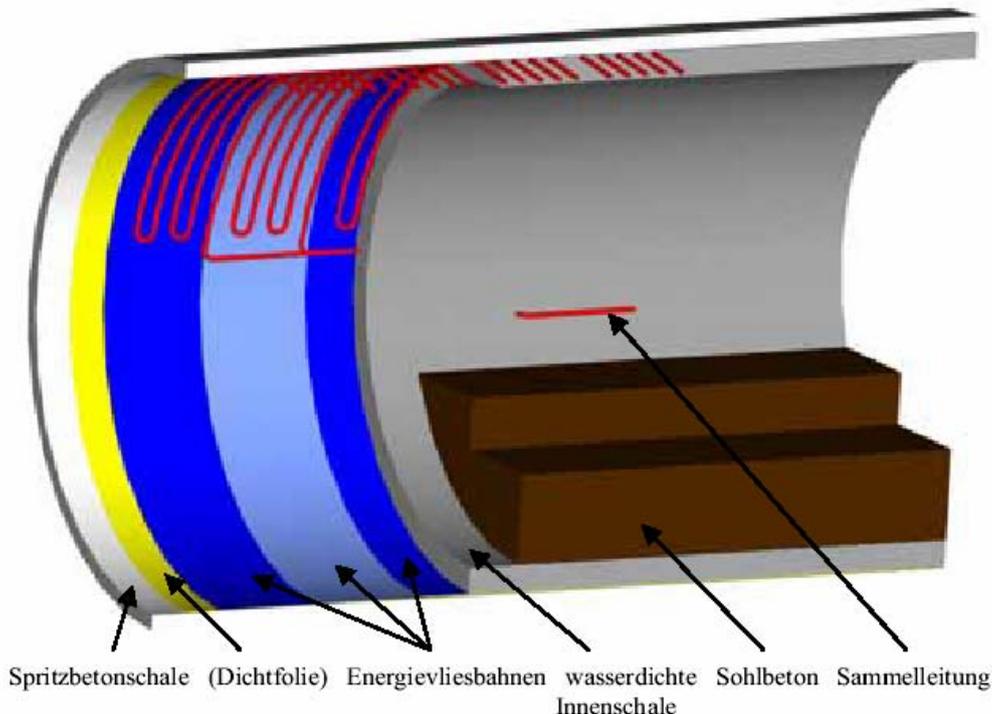


Abb. 3.1.4: Modell der Versuchsanlage LT22 Bierhäuselberg

Bei der Energievliesmatte handelt es sich um zwei Lagen Geotextils (Vlies), zwischen die in unterschiedlichen möglichen Anordnungen (Schlaufen, Mäander, Rechtecke) Rohrleitungen eingelegt werden. Die Energiematte wird zwischen Innen- und Außenschale befestigt. Dies stellt im Tunnelbau grundsätzlich keinen zusätz-

lichen Arbeitsvorgang dar, weil ohnehin eine Geotextilschicht zwischen beiden Schalen zur statischen Trennung eingebaut wird (ZTV – ING). Die Absorberleitungen der Energievliese sind in bestimmten Abständen mit einer Sammelleitung zu verbinden, die über eine Umwälzpumpe mit der Wärmepumpe verbunden sind.

Dazu müssen die Rohrleitungen durch die wasserdichte Innenschale durchgeführt werden, ohne dass daraufhin im Tunnel Nassstellen auftreten. Hierzu gibt es technische Detaillösungen mit Dichtungsmanschetten. Grundsätzlich ist dieses System auch in Tunnelbauwerken umsetzbar, für die eine Abdichtungslage aus KDB (Kunststoffdichtungsbahn) vorgesehen ist. Hier sind ebenfalls entsprechende Systeme auf dem Markt um eine wasserundurchlässige Durchdringung von KDB und Beton zu gewährleisten.

Auch die Auswirkung der Anordnung der Absorberleitungen wurden in [16] hinsichtlich Strömungsverhalten, erforderlicher Pumpleistung, Entlüftbarkeit sowie Produktion untersucht. Für die Anordnung der Absorberleitungen im Energievlies, das gemeinsam mit der Fa. Polyfelt entwickelt wurde, wurde eine Längsverlegung mit Serienschaltung (vgl. Abb. 3.1.5) gewählt.

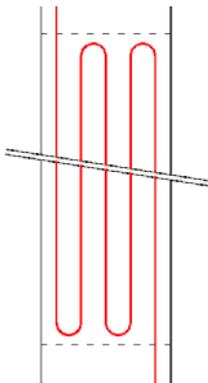


Abb. 3.1.5: Prinzipskizze für die Anordnung der Absorberleitungen, wie sie in den Energievliesen der Versuchsanlage LT22 Verwendung findet. [16].

## Energieanker

Als weitere Möglichkeit zur Geothermienutzung in Tunnels geschlossener Bauweise beschreibt MARKIEWICZ Energieanker [16]. Diese werden von der Tunnelröhre aus in das Erdreich getrieben, wodurch auch Erdschichten in größerer Entfernung zum Tunnel erschlossen werden können. Mit dieser Technik wurden bisher kaum Praxiserfahrungen gesammelt. An der TU-Wien werden jedoch zur Zeit Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt. Abb. 3.1.6 zeigt die Prinzipskizze eines Energieankers.

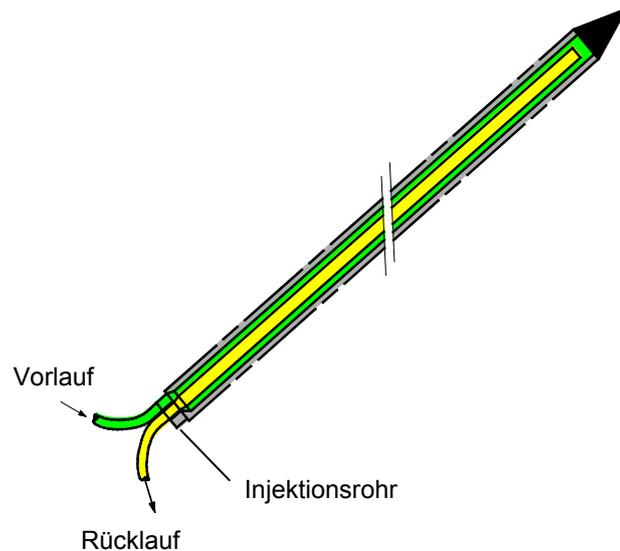


Abb. 3.1.6: Prinzipskizze eines Energieankers

## Energieinnenschale

Bei der Energieinnenschale liegen die Absorberrohre oberflächennah in der Innenschale des Tunnels. Durch die Lage der Absorberrohre ist der Einfluss der Tunnelluft bei diesem System sehr groß, weshalb die Absorberrtemperatur im Jahresverlauf großen Temperaturschwankungen unterliegt. Für die Energieinnenschale liegen noch keine Praxiserfahrungen vor.

### 3.1.3 Geothermienutzung bei maschinellen Schildvortriebsverfahren

Das maschinelle Schildvortriebsverfahren ist ebenfalls eine geschlossene Tunnelbauweise. Bei diesem Verfahren wird der Tunnel mit einem großen Bohrkopf vorangetrieben. Unmittelbar nach dem Bohrkopf werden sog. Tübbinge eingebaut um den Tunnel gegen den Erd- und Wasserdruck zu stützen. Über die Gewinnung von Energie durch Tunnelluft oder Erdwärme im Zusammenhang mit dem maschinellen Schildvortriebsverfahren ergibt sich allein aus der Fachliteratur kein Hinweis auf ausgeführte Beispiele oder gar theoretische Ansätze. Eine neue Entwicklung stellen dabei sog. Energietübbinge dar, die von der Firma PSP (München) entwickelt wurden und im Weiteren genauer beschrieben werden.

#### Aufbau und Wirkungsweise des Energietübbings

Bei der fabrikmäßigen Vorfertigung von Tübbingen aus Stahlbeton werden Absorberleitungen an der oberen (äußeren) oder unteren (inneren) Bewehrungslage befestigt. Die Befestigung an der äußeren, also bergwärtigen Bewehrung, bietet sich z.B. bei einer geothermischen Nutzung an, so wie die Befestigung an der inneren Bewehrung für die Extraktion tunnelthermischer Energie geeignet ist.

Die Absorberleitungen können als Schlaufen längs oder quer verlegt eingebunden und vorkonfektioniert eingelegt und befestigt werden.

Die Enden der Absorberleitungen werden flüssigkeitsdicht mit einer Aufnahmhülse verbunden, die im Bereich der beiden Ringfugen einbetoniert werden. Zwei benachbarte Ringe werden mit einem flüssigkeitsdruckhaltenden Verbindungselement miteinander verbunden. Über die Steckverbindung, die im Kern eine Rohrleitung hat, kann die Absorberflüssigkeit in den nächsten Ring gepumpt werden.

### Absorberflüssigkeitszyklus

In Abhängigkeit der Ringgeometrie bzw. der Ringteilung und der Ringabfolge werden mehrere Energietübbinge über Absorberleitungen miteinander verbunden (Absorberflüssigkeitszyklus). Zu Beginn der Absorberstrecke erfolgt eine Einspeisung des „kalten“ Vorlaufmediums (Vorlauf). Am Ende der Absorberstrecke wird die in Abhängigkeit der Gebirgstemperatur um mehrere Kelvin erwärmte Absorberflüssigkeit herausgeführt und über eine Sammelleitung (Rücklauf) einer Wärmepumpe zugeführt. Die Festlegung der Schlauchdurchmesser, der Biegeradien und des verwendeten Materials erfolgt in Abhängigkeit der energetischen Dimensionierung sowie der einzusetzenden Absorberflüssigkeit.

### System für den Anschluss des Absorberflüssigkeitszyklus an die Sammelleitungen

Zur Einspeisung bzw. Entnahme der Absorberflüssigkeit muss die Absorberleitung unterbrochen werden. Dazu bedarf es einer möglichst einfachen, baustellengeeigneten Methode, die nicht zeitaufwendig ist. Das Verfahren arbeitet ebenfalls mit einem System, das bereits bei der Herstellung des Tübbings eingebaut werden muss. Dieses besteht aus einem Anschlussstutzen, der innen hohl ist und am oberen Ende mit einer Durchführung für die Absorberleitung versehen ist. Die Abbildungen Abb. 3.1.7 und Abb. 3.1.8 zeigen einen Schnitt durch einen Energietübbing und eine Steckverbindung für zwei Energietübbinge.

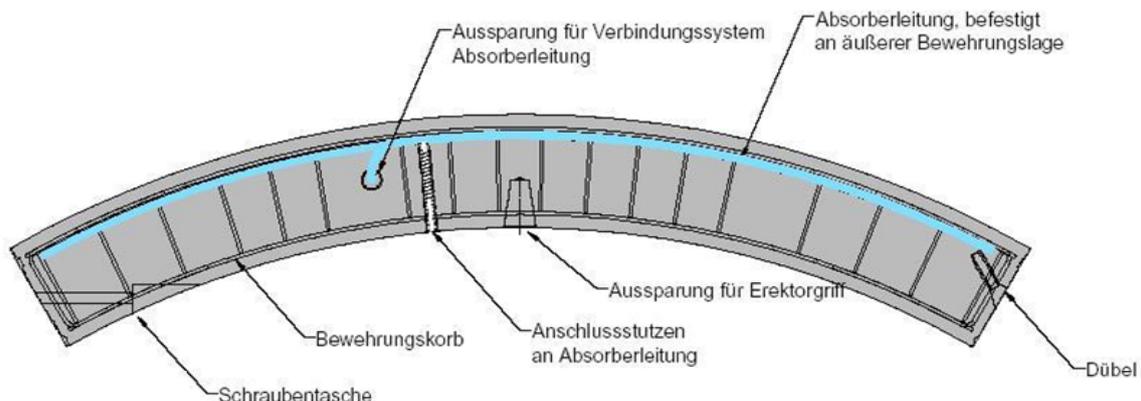


Abb. 3.1.7: Ansicht der Ringfuge eines Energietübbings

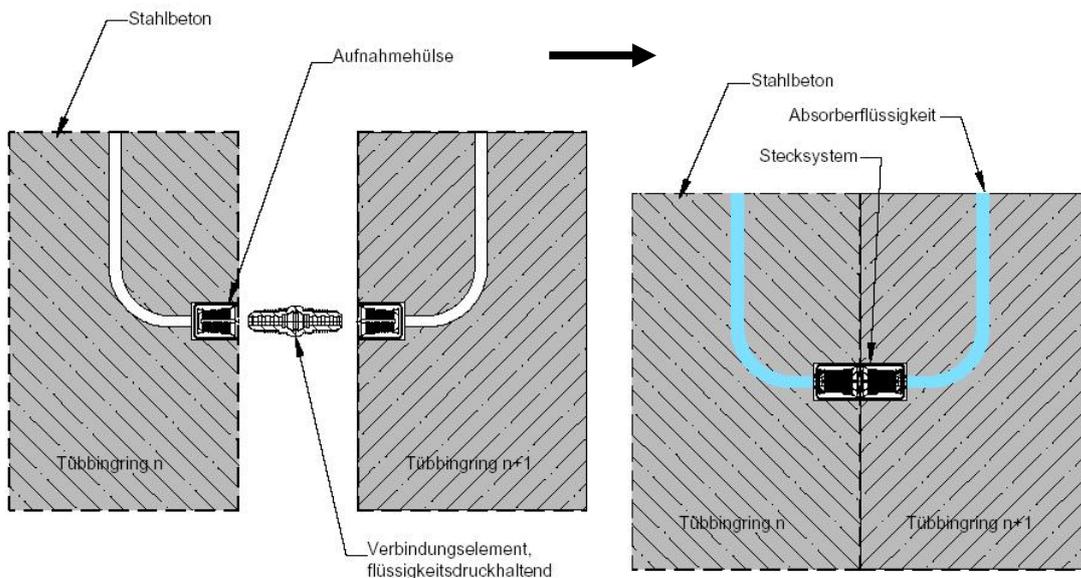


Abb. 3.1.8: Verbindung von zwei Energietübbingungen

### 3.1.4 Geothermie am Beispiel des Projekts Stuttgart 21

Dieser Abschnitt geht auf die Möglichkeiten einer Geothermienutzung am Beispiel des Bahnprojektes Stuttgart 21 ein und erläutert die baulichen Gegebenheiten der Bereiche der angrenzenden Bahnhöfe. Prinzipiell sind die in Kap. 3.1.1 bis Kap. 3.1.3 beschriebenen Absorbertechniken einsetzbar.

#### Bereich Hauptbahnhof

Der Bereich der Bahnhofshalle umfasst eine Grundfläche von ca. 33.600 m<sup>2</sup>, resultierend aus einer Länge von ca. 420 m und einer Breite von ca. 80 m. Die Sohlplatte des zu untersuchenden Bereichs wird mit Betondicken zwischen 1,70 m und 2,55 m hergestellt. Das Bauwerk wird mit Hilfe von Ortbetonbohrpfählen und Rammpfählen tiefgegründet. Die Pfähle reichen bis in eine Tiefe von ca. 8,0 m unterhalb der Gründungssohle und binden je nach Standort in die Dunkelroten Mergel des Gipskeupers bzw. in quartäre Schichten ein.

Die Pfähle sind in Pfahlgruppen, als Einzelpfähle oder als Bohrpfahlwände angeordnet. Durch die Pfahlbauweise bietet sich hier der Einsatz von Energiepfählen an. Ein weiterer Vorteil des Bereichs Hauptbahnhof ist die Nähe zu möglichen Verbrauchern. Dadurch ist der Aufwand für die Verteilung sehr gering und die Erdwärme kann effektiv genutzt werden.

Eine Anordnung der Absorberfläche zu den Bahnsteigen hin lässt eine Nutzung zur Abfuhr thermischer Lasten (Kühlung) aus den geschlossenen Bahnhofsbereichen zu. Die überschüssige Wärme lässt sich zum Einen im Boden einspeichern (über Bo-

denplatte, Energiepfähle), kann angrenzenden Gebäuden zur Beheizung dienen oder auch direkt an die Außenluft abgegeben werden.

### **Bereich Fildertunnel**

Für den Fildertunnel bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Ausbruchs- und Ausbaumethodik. Im Fokus der Planung steht die Spritzbetonbauweise, allerdings ist auch das maschinelle Schildvortriebsverfahren denkbar. Die Verfahrenstechnik für die Nutzung der „Tunnelenergie“ befindet sich im Vergleich zu den bereits vorhandenen Erfahrungen, die bei der Massivbetonabsorbertechnik gesammelt werden konnten, eher in einem frühen Entwicklungsstadium. Sollte der Tunnel mit dem maschinellen Schildvortriebsverfahren ausgebaut werden, wäre der Einsatz von Energietübbingen denkbar. Bei der Auswahl der Bereiche, die mit Absorbern auszustatten sind, ist darauf zu achten, dass die Entfernung zu eventuellen Abnehmern so gering wie möglich ist. Weitere Faktoren, die berücksichtigt werden müssen, sind die Überdeckung und der Abstand zum Tunnelportal.

### **Bereich Filderbahnhof**

Der als Filderbahnhof bezeichnete Bereich wird bergmännisch in Spritzbetonbauweise vorgetrieben. Die Schachtbauwerke werden ebenfalls in Spritzbetonbauweise abgeteuft. Die Bauwerke erhalten eine Ort beton-Innenschale unterschiedlicher Mächtigkeit. Aufgrund der Bauweise eignet sich für diesen Tunnelabschnitt der Einsatz eines Energievlieses.

## **3.2 Wärmepumpen**

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Wärmepumpentechnologien beschrieben. Diese werden nach Bauarten, Betriebsarten und nach dem eingesetzten Kältemittel unterschieden.

### **3.2.1 Bauarten**

#### **Kompressions-Wärmepumpe**

Bei Kompressionswärmepumpen wird das Arbeitsmedium in einem mechanischen Verdichter komprimiert und so die Temperatur des Fluids angehoben. Bei dieser Wärmepumpenart gibt es verschiedene Möglichkeiten den Verdichter zu betreiben, somit unterteilen sich die Kompressions-Wärmepumpen in:

- Elektro-Kompressions-Wärmepumpe und
- Gas-Kompressions-Wärmepumpe.

Die beiden Wärmepumpentypen unterscheiden sich durch den Motor, welcher den Verdichter antreibt. Erdgas, Dieselkraftstoff oder Biomasse (Rapsöl, Biogas) sind mögliche Energiequellen für den Gasmotor. Gas-Kompressions-Wärmepumpen sind

primärenergetisch günstiger, da Gas einen deutlich niedrigeren Primärenergiefaktor hat als elektrischer Strom. Außerdem kann zusätzlich die Abwärme des Verbrennungsprozesses als Heizwärme genutzt werden.

Anwendungsgebiete: Elektro-Kompressions-Wärmepumpen werden vor allem bei Heizleistungen bis 20 kW angewendet. Im Gegensatz dazu werden Gas-Kompressions-Wärmepumpen nur bei größeren Heizleistungen eingesetzt.

### **Sorptions-Wärmepumpe**

Sie funktionieren nach dem physikalischen/chemischen Vorgang der Sorption. Im Unterschied zu Kompressions-Wärmepumpen sind Sorptions-Wärmepumpen nicht mit einem mechanischen sondern mit einem sog. thermischen Verdichter ausgestattet. Der Vorteil gegenüber den Kompressionswärmepumpen ist, dass keine elektrische Energie für einen Verdichter benötigt wird, sondern Wärme zum Austreiben des Arbeitsmittels aus dem thermischen Verdichter. Hierfür kann beispielsweise Prozessabwärme, Wärme von Solarkollektoren o.ä. genutzt werden. Sorptions-Wärmepumpen lassen sich in zwei wesentliche Kategorien unterscheiden:

Absorptions-Wärmepumpen: Der thermische Verdichter dieser Kategorie basiert auf dem chemischen Vorgang der Absorption. Bei diesem Prinzip wird das Kältemittel in einer Flüssigkeit gebunden (absorbiert) und somit komprimiert.

Adsorptions-Wärmepumpen: Bei Adsorptions-Wärmepumpen wird das Kältemittel in Feststoffen wie beispielsweise Aktivkohle, Silicagel oder Zeolith gebunden. Dazu ist jedoch ein Vakuum notwendig, was den apparativen Aufwand recht groß macht. Das zum Betrieb erforderliche Temperaturniveau ist mit ca. 90°C recht niedrig.

Anwendungsgebiete: Sorptionswärmepumpen werden in einem Leistungsbereich ab 25kW Heizleistung angeboten. Sie eignen sich eher für Wärmequelltemperaturen ab 0°C und werden vor allem mit Grund und Oberflächenwasser, in Einzelfällen auch mit Erdwärmesonden betrieben.

### **3.2.2 Betriebsarten**

Die Betriebsarten von Wärmepumpen unterscheiden sich nach ihrer Wärmequelle bzw. –senke. Eine Sole/Wasser – Wärmepumpe hat z.B. Sole als Wärmequelle auf der Verdampferseite und Wasser als Wärmesenke auf der Kondensatorseite.

- Sole/Wasser-Wärmepumpen
- Luft/Wasser-Wärmepumpen
- Luft/Luft-Wärmepumpen
- Wasser/Wasser-Wärmepumpen

Bei der hier betrachteten Betriebsweise der Wärmepumpe mit Geothermie wird häufig ein Wasser-Glykol Gemisch im Absorberkreislauf eingesetzt (Betriebsart Sole/Wasser). Wenn entsprechende Sicherheitseinrichtungen vorhanden sind und eine geeignete Betriebsführung gewählt, kann evtl. auf Frostschutzmittel in der Absorberflüssigkeit verzichtet werden (Betriebsart Wasser/Wasser). Neben dem Vorteil das Wasser eine höhere Wärmekapazität als z.B. Wasser-Glykol-Gemisch hat, besteht beim Betrieb mit reinem Wasser keine Gefahr das Grundwasser aufgrund von Leckagen verunreinigt wird.

Bei der Auslegung des Massenstroms auf der Verdampferseite sollte darauf geachtet werden dass der Temperaturunterschied zwischen Verdampferein- und austritt maximal 4K beträgt. Dadurch ist ein effizienter Betrieb der Wärmepumpe gewährleistet.

### 3.2.3 Kältemittel

In der Vergangenheit wurden vorwiegend voll- oder teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW und HFCKW) eingesetzt. Da Fluorchlorkohlenwasserstoffe maßgeblich zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beitragen, dürfen in Zukunft nur noch Kältemittel zur Anwendung kommen die kein Ozonabbaupotenzial und ein möglichst geringes Treibhauspotenzial aufweisen.

#### **FCKW, HFCKW und entsprechende Gemische (nicht mehr zugelassen):**

- R11 Trichlormonofluormethan  $\text{CCl}_3\text{F}$  (Siedetemperatur:  $24^\circ\text{C}$ )
- R12 Dichlordifluormethan  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  (Siedetemperatur:  $-30^\circ\text{C}$ )
- R12 Dichlordifluormethan  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  (Siedetemperatur:  $-41^\circ\text{C}$ )
- R502 → R22/R115 im Verhältnis 48,8/51,2 %  
(R115 ist das Monochlorpentafluorethan,  $\text{C}_2\text{ClF}_5$ ) (Siedetemperatur:  $-46^\circ\text{C}$ )

#### **HFCKW und HFCKW-Gemische:**

- R134a Tetrafluorethan  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$  (Siedetemperatur:  $-26^\circ\text{C}$ )
- R407c R32/R125/R134a im Verhältnis 23/25/52 % (Siedetemperatur:  $-44^\circ\text{C}$ )
- R410a R32/R125 im Verhältnis 50/50% (R32 ist das Difluormethan,  $\text{CH}_2\text{F}_2$ , und R125 das Pentafluorethan,  $\text{C}_2\text{HF}_5$ ) (Siedetemperatur:  $-51^\circ\text{C}$ )

**Natürliche Arbeitsmittel:**

- R290 Propan  $C_3H_8$  (Siedetemperatur:  $-42^\circ C$ )
- R1270 Propen  $C_3H_6$  (Siedetemperatur:  $-48^\circ C$ )
- R717 Ammoniak  $NH_3$  (Siedetemperatur:  $-33^\circ C$ )
- R744 Kohlendioxid  $CO_2$  (Siedetemperatur:  $-57^\circ C$ )

**3.3 Gebäudetechnik**

Voraussetzung für den effizienten Einsatz von Wärmepumpen in Heizungsanlagen ist der Betrieb mit niedrigen Vorlauftemperaturen.

Durch die verbesserten Dämmstandards haben sich die Heizlast und damit auch die Systemtemperaturen in Gebäuden in den letzten Jahren verringert, wodurch der Einsatz von Wärmepumpen wieder wirtschaftlicher geworden ist. Neben der Heizlast hat auch die Fläche der Heizsysteme Einfluss auf die Vorlauftemperatur. Heizsysteme mit einer größeren Fläche benötigen eine geringere Übertemperatur um die gleiche Leistung zu übertragen wie ein Heizsystem mit einer kleineren Fläche. Fußboden- bzw. Flächenheizungen sind wegen ihrer großen Fläche deshalb gut für den Betrieb mit einer Wärmepumpe geeignet. Konventionelle Radiatoren arbeiten dagegen mit hohen Temperaturen von beispielsweise  $65^\circ C$ . Obwohl es durchaus Wärmepumpen für Vorlauftemperaturen von  $65^\circ C$  am Markt gibt, sollten diese hohen Temperaturen nicht ausgereizt werden, um einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten.

Eine andere Variante zur Nutzenübergabe, die bei Neubauten eingesetzt werden kann, ist die „Thermische Bauteilaktivierung“. Die „Thermische Bauteilaktivierung“ nutzt die großen raumseitigen Wärmeüberträgerflächen und die Speicherkapazität der Bauteile, indem in der Nacht Wasser in ein Rohrregister der Decke eingeleitet wird und diese erwärmt, am folgenden Tag kann über die Deckenbodenoberfläche ein Wärmestrom in dem Raum abgegeben werden. Im Sommer fließt kaltes Wasser durch die Decke und kühlt diese ab, am folgenden Tag kann über die Oberflächen ein Wärmestrom aus dem Raum aufgenommen werden. Dieses System arbeitet mit geringen Über- bzw. Untertemperaturen. In Verbindung mit Erdsonden oder Erdkollektoren erfolgt die Kühlung meistens frei, d.h. ohne Kältemaschine. Außerdem gewährleisten die Erdsonden eine hohe Verdampfungstemperatur an der Wärmepumpe, weshalb im Heizfall hohe Jahresarbeitszahlen bis zu 4,5 erreicht werden.

Durch die Kombination von Heizung und Kühlung ergeben sich wesentlich kürzere Amortisationszeiten, außerdem fördert diese Kombination die Regeneration des Erdspeichers. Alle energetischen Anforderungen (geringer Transportenergieaufwand, geringe Über- bzw. Untertemperaturen, Nutzung des Temperaturtagesganges) werden durch die thermische Bauteilaktivierung erfüllt.

Neben der Gebäudeklimatisierung gibt es weitere Möglichkeiten die geothermische Energie zu nutzen. Dies erfolgt meist in der Form freien Heizens („Free Heating“) bzw. freien Kühlens („Free Cooling“). Möglichkeiten ergeben sich hier z.B. in der Eisfreihaltung von Straßen, Begleitheizung von Löschleitungen, Schachtheizung (um die zulässige relative Feuchte während der Sommermonate nicht zu überschreiten) oder der Kühlung von Trafos, Betriebsräumen oder auch geschlossenen Bahnhöfen.

## 4 Potenzialabschätzung

Dieses Kapitel zeigt das Potenzial der geplanten Bauwerke im Rahmen des Vorhabens Stuttgart 21 hinsichtlich der Geothermienutzung. Die Abschätzung erfolgt auf Basis dieser Potenzialstudie mit den erarbeiteten Randbedingungen. Es erfolgte eine Einteilung in die drei Bereiche Tunnel, Hauptbahnhof und Filderbahnhof.

### 4.1 Tunnel

Für den Tunnelabschnitt erfolgt die Auswertung am Beispiel der vorher gezeigten vier Rechenquerschnitte. Dort wird jeweils ein Testabschnitt von 50m Länge angenommen. Dieser wird mit Absorbern ausgestattet und ein Vergleich mit dem notwendigen Leistungsbedarf für den Transport des Absorbermediums durchgeführt.

Dazu wurden Vergleiche zwischen Reihen- und Parallelschaltung (Abb. 4.1.1 und Abb. 4.1.2) in einem Absorberelement durchgeführt. Für die Rohre im Absorberelement ist mit einem Durchmesser von  $d = 20 \text{ mm}$  gerechnet worden, in Anlehnung an bereits durchgeführte Untersuchungen in Wien [16]. Der Einsatz von Kapillarrohrmatten verursacht im Gegensatz zu dieser Annahme höhere Druckverluste in den einzelnen Blöcken und es muss noch untersucht werden, ob diese Elemente für den Einsatz im Tunnelbau geeignet sind.

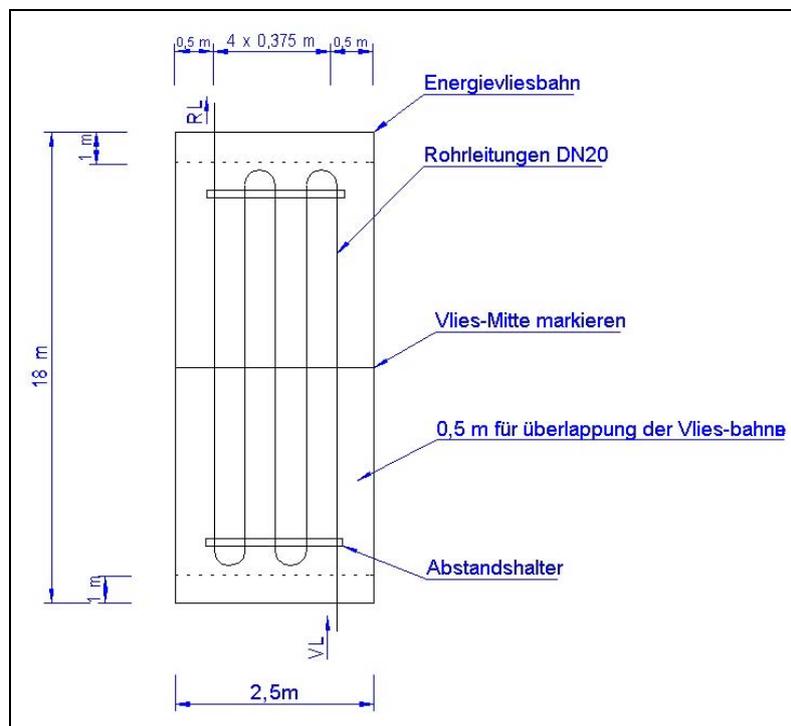


Abb. 4.1.1: Reihenschaltung einer Energiefleesbahn

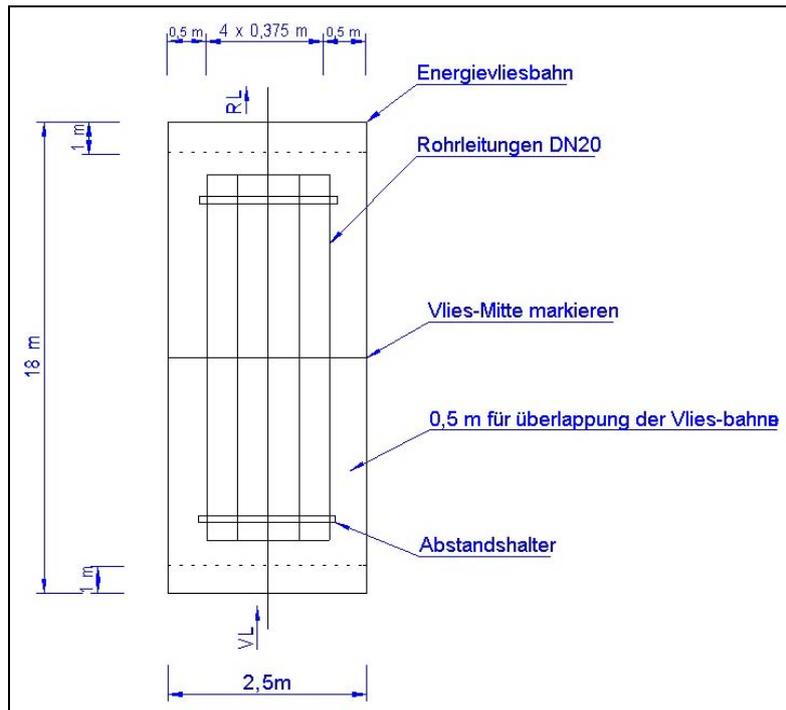


Abb. 4.1.2: Parallelschaltung einer Energievliesbahn

Die einzelnen Vliesbahnen werden zu 10 m – Blöcken innerhalb der Tunnelschale, wie in Abb. 4.1.3 gezeigt, zusammenschaltet. Die Abbildung zeigt ebenfalls beispielhaft den Anschluss der Blöcke an die Sammelleitungen, die zum Wärmetauscher der Wärmepumpe führen.

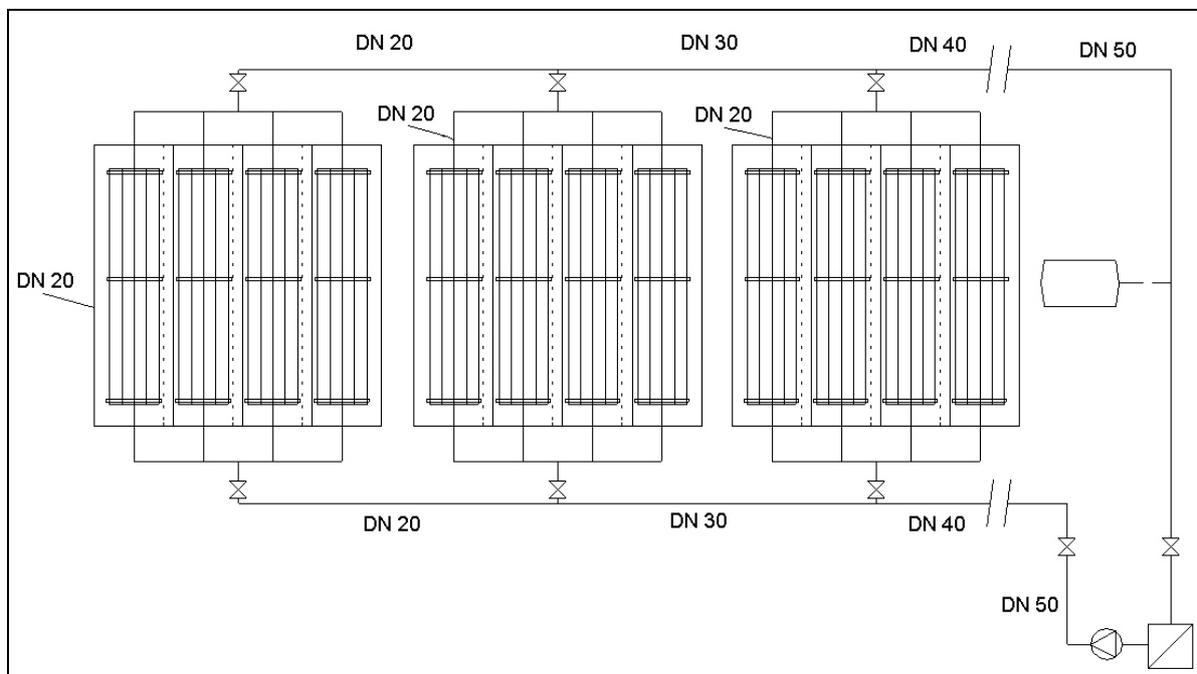


Abb. 4.1.3.: Beispiel für Verschaltung der Blöcke (Rohrnetzplan)

Die Druckverluste sind abhängig vom Durchmesser und vom Volumenstrom in den Rohrleitungen. Der Volumenstrom wurde in Abhängigkeit der Wärmeleistung am

jeweiligen Querschnitt mit der festgelegten Spreizung von  $\Delta\vartheta = 4 \text{ K}$  (nach [22]) berechnet.

Zunächst erfolgt ein Vergleich zwischen den Druckverlusten der zwei verschiedenen Schaltungsarten. Die ermittelten Druckverluste für die 10 m – Blöcke liegen zwischen **wenigen Pascal bis ca. 3000 Pascal**, je nach Größe der Wärmeleistung. Die Darstellung der Ergebnisse finden sich im Anhang (Abb. A. 1 und Abb. A. 2).

Für eine Gesamtbetrachtung ist es erforderlich die Länge der Sammelleitungen und die notwendigen Einbauten, wie Ventile, Wärmetauscher der Wärmepumpe usw. in die Berechnung einzubeziehen. Dabei zeigte sich, dass die einzelnen Elemente nur einen geringen Anteil an den Gesamtdruckverlusten haben. Entscheidend ist hier die Länge und die Dimensionierung der Anschlussleitungen sowie die Größenordnung der Druckverluste der Einbauten. Die Schaltungsart kann somit nach anderen Gesichtspunkten (wie z.B. Entlüftbarkeit) ausgewählt werden.

Für die Einbauten wurden pauschale Annahmen getroffen. Die Länge der Anschlussleitungen wurde in Abhängigkeit der Überdeckung am jeweiligen Querschnitt und der Entfernung vom Portal festgelegt. Die Werte finden sich in Tab. 2.4.3.

Die Rohrdurchmesser der Sammelleitungen sind in allen untersuchten Fällen gleich angenommen. In der Realität erfolgt jedoch eine Anpassung der Rohrdurchmesser an den jeweiligen Massenstrom im entsprechenden Rohrabschnitt.

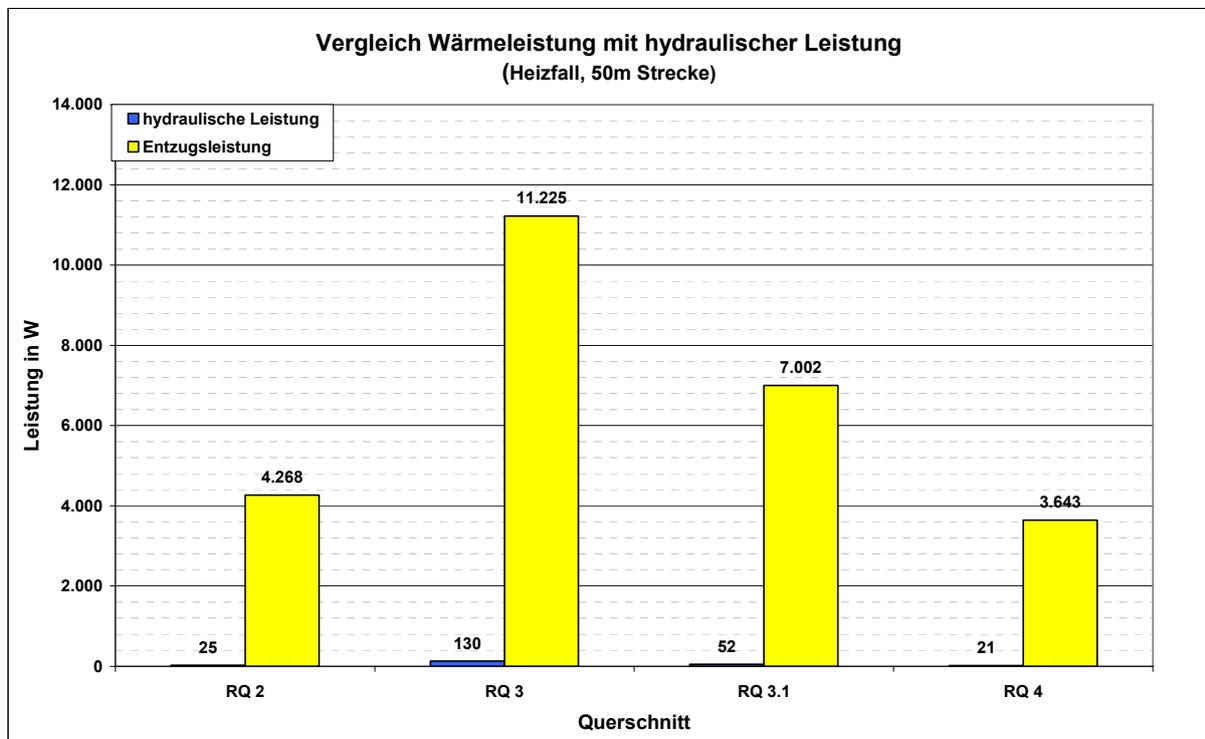


Abb. 4.1.4: Vergleich zwischen Wärmeleistung und hydraulischer Leistung im Heizfall

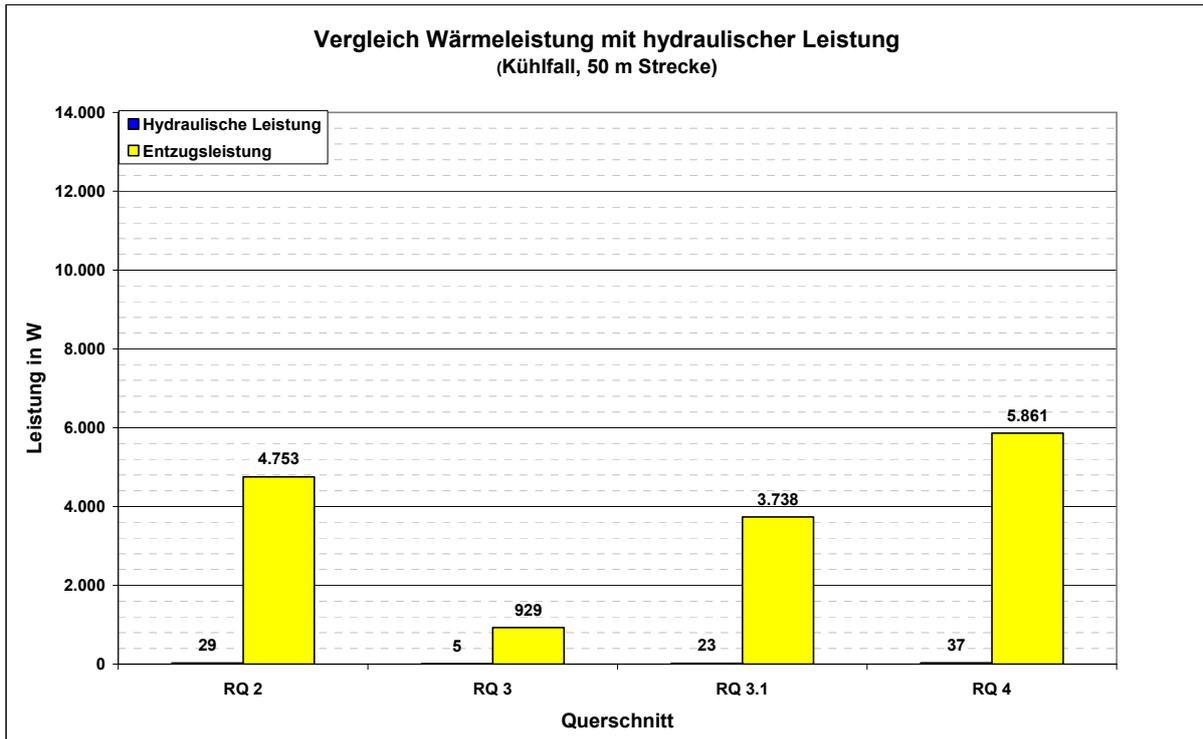


Abb. 4.1.5: Vergleich zwischen Wärmeleistung und hydraulischer Leistung im Kühlfall

Die Abbildungen Abb. 4.1.4 und Abb. 4.1.5 zeigen beispielhaft die Potenziale der Tunnelgeothermie anhand eines Vergleichs zwischen der entnommenen bzw. zugeführten Wärmeleistung an den untersuchten Querschnitten. Wie oben beschrieben wurde eine Teststrecke von 50 m Länge mit Absorbern bestückt. Diese bedecken 2/3 des Tunnelumfangs und sind aus fünf Blöcken zu 10 m zusammengesetzt. Somit ergibt sich für die Absorber eine Gesamtfläche von 680 m<sup>2</sup>.

Die ermittelten Leistungen wurden primärenergetisch bewertet um einen direkten Vergleich der Werte zu ermöglichen. In Anlehnung an DIN V 18599 wurden für die Wärme ein Primärenergiefaktor von  $f_{p;w} = 1,1$  und für den elektrischen Aufwand der Pumpe  $f_{p;el} = 3$  gewählt.

### Gesamtpotenzial Tunnel

Als Zusammenfassung wurde für die Gesamtlänge des Tunnels eine Abschätzung des Gesamtpotenzials vorgenommen mit den folgenden Größen:

<b>Tunnellänge:</b>	9.600 m
<b>Absorberfläche je Meter Tunnel:</b>	18 m <sup>2</sup> /m
<b>Gesamtfläche:</b>	172.800 m <sup>2</sup> .

Aus den ermittelten bezogenen Wärmeleistungen an den ausgewählten Querschnitten wurden Mittelwerte für den Heiz- und den Kühlfall gebildet.

Das Gesamtpotenzial für den Fildertunnel ist in Tab. 4.1.1 dargestellt.

	<b>Heizfall</b>	<b>Kühlfall (Freies Kühlen)</b>
<b>bezogene Wärmeleistung in W/m<sup>2</sup></b>	9	-5
<b>Wärmeleistung in kW</b>	1.555	-864

Tab. 4.1.1: Gesamtpotenzial für den Fildertunnel

## 4.2 Bahnhöfe

### Hauptbahnhof

Für den Hauptbahnhof wurde im Rahmen dieser Arbeit keine rechnerische Potenzialabschätzung durchgeführt, deshalb sei auf eine Studie von ADAM und OSTERMANN verwiesen [17]. Bei dieser Studie wurde der Hauptbahnhof in vier Bereiche eingeteilt. Die Bereiche 1 und 4 sind hierbei der Nord- bzw. Südkopf der Bahn-Anlage. Der Bereich 2 ist die eigentliche Bahnhofshalle und der Bereich 3 liegt unterhalb des Schlossparks. Als Absorber kommt in allen Bereichen eine Energiebodenplatte zum Einsatz. Zusätzlich werden in den Bereichen 2 und 3 einige der Gründungspfähle als Energiepfähle ausgeführt. Die Pfähle haben einen Durchmesser von 50 cm und eine Länge von 8 m. Aufgrund von Erfahrungswerten für Entzugsleistungen pro Quadratmeter wurden ein oberer und ein unterer Grenzwert für die nutzbare Energie ermittelt. Für die komplette Absorberfläche aller vier Bereiche ergeben sich eine untere Grenze der Entzugsleistung von **516 kW** und eine obere Grenze von **705 kW**.

### Filderbahnhof

Beim Filderbahnhof handelt es sich um einen Tunnel in geschlossener Bauweise, weshalb vom Einsatz eines Energievlieses ausgegangen wird. Für die Entzugsleistung werden nach dieser Studie die o.a. Mittelwerte für das Heizen 9 W/m<sup>2</sup> und das Kühlen 5 W/m<sup>2</sup> angenommen. Wird der Filderbahnhof über seine Gesamtlänge von 400 m mit einem Energievlies ausgestattet, ergibt dies eine Absorberfläche von ca. 7200 m<sup>2</sup>. Daraus resultieren folgende Gesamtleistungen der Absorber:

	<b>Heizfall</b>	<b>Kühlfall (Freies Kühlen)</b>
<b>bezogene Wärmeleistung in W/m<sup>2</sup></b>	9	-5
<b>Wärmeleistung in kW</b>	65	-36.

Tab. 4.2.1: Gesamtpotenzial für den Fildertunnel

Mögliche Abnehmer für die Tunnelwärme aus dem Filderbahnhof sind der Flughafen und die neue Landesmesse. Vorstellbar ist auch eine Kühlung der Bahnhofsgebäude bzw. Betriebsräume des Bahnhofs.

### 4.3 Umweltspezifische Risiken

Im Zusammenhang mit der geothermischen Bewirtschaftung des Untergrunds können auch Risiken für Umwelt und Wasserwirtschaft auftreten. Aus der Sicht der Genehmigungsbehörde (AfU der LH Stuttgart) stehen folgende, im Wesentlichen jedoch auf Erdwärmesonden ausgerichtete Punkte im Vordergrund:

- Behinderung des Grundwasserstromes durch geothermische Erschließungsanlagen, wie z.B. Erdwärmesonden.

Da es sich im vorliegenden Falle um ein planfeststellungsrelevantes Verkehrsbauwerk handelt und nicht um eine Anlage, die einzig zum Zwecke der energetischen Nutzung hergestellt wird, dürfte diese Befürchtung entfallen. Im Planfeststellungsbeschluss sind in der Regel konstruktive Maßnahmen als Auflage enthalten, die dazu geeignet sind, Behinderungen oder Änderungen des Grundwasserstromes zu unterbinden. Die mögliche Beeinflussung wäre demnach nicht geothermisch induziert.

- Hydraulischer Kurzschluss zwischen Grundwasserstockwerken mit der Folge, dass sich Chemismus und Druckverhältnisse ändern.

Auch dieser Möglichkeit begegnet man mit Hilfe tunnelspezifischer konstruktiver Maßnahmen, wie etwa dem Einbau von Querschotts aus Injektionskörpern.

- Verluste von Trägerflüssigkeit und Schadstoffverschleppungen

Aufgrund von lang anhaltenden Gebirgsbewegungen, die Auswirkungen auf die Außenschale zeigen sind Beschädigungen der Absorberleitungen durchaus denkbar, jedoch relativ unwahrscheinlich, da das Fließ eine Schutzfunktion wahrnimmt. Auch aufgrund von scharfkantigen Eisenteilen in der Spritzbetonschale sind Verletzungen der Schläuche möglich. Dem kann durch eine sorgfältige Präparierung und Ausbesserung des Spritzbetonuntergrundes entgegnet werden. Die ZTV – ING, Teil 5, Abschnitt 1<sup>5</sup> der Bundesanstalt für Straßenwesen nennen hier entsprechende Anforderungen an die Ebenheit des Spritzbetons bei Einbau einer Kunststoffdichtungsbahn, die hier analog angewendet werden könnten.

Undichtigkeiten im System können über entsprechende technische Kontrolleinrichtungen in kurzer Zeit festgestellt werden.

Als Wärmeträgerfluid kann darüber hinaus eine grundwasserverträgliche Flüssigkeit, einfachstenfalls Wasser eingesetzt werden.

- Physikalische Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit (T) und Einfluss auf biologische Prozesse

Aufgrund der berechtigten Befürchtungen und Feststellungen des AfU Stuttgart in diesem Zusammenhang erhebt sich die Forderung, die Anlage entsprechend sorgfältig, vor dem Hintergrund einer geologischen Begutachtung zu dimensionieren und die geplante Anlage entsprechend nachhaltig zu steuern. Dadurch können Effekte wie Aufheizen oder Frieren des Untergrundes vermieden werden.

---

<sup>5</sup> Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

## 5 Zusammenfassung / Ausblick

Die Bedeutung der Geothermie im Bereich der Gebäudeenergetik ist in den letzten Jahren stark gewachsen. Durch die geringeren Heizlasten von hochgedämmten Gebäuden und der Verbreitung von Flächenheizungen sind die Systemtemperaturen in den Heizungsanlagen gesunken. Dadurch gewinnt die Wärmepumpentechnik an Bedeutung. Wärmepumpen können in Kombination mit Geothermie effektiv betrieben werden.

Bei Nicht-Wohngebäuden sind zunehmend Maßnahmen zur Kühlung unumgänglich. Durch eine Kombination mit dem Heizbetrieb ist eine gute Regeneration des Erdreichs möglich. Das Erdreich lässt sich in diesem Fall als Wärmespeicher ansehen und die mittlere Temperatur des Erdreichs ist dann nahezu konstant.

Die Studie hat am Beispiel des Fildertunnels im Projekt Stuttgart 21 gezeigt, dass eine geothermische Nutzung von Tunnelbauwerken technisch machbar ist. Weiterhin wird das geothermische Potenzial der Tunnelstrecke und der angrenzenden Bahnhöfe ermittelt.

Die Tunnelstrecke wurde beispielhaft an vier ausgewählten Querschnitten unterschiedlicher Lage im Tunnel untersucht.

Bei weniger stark überdeckten Tunnelabschnitten ist ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Sommer- und Winterbetrieb erkennbar. Diese eignen sich daher eher für einen kombinierten Heiz- und Kühlbetrieb.

Tiefer liegende Tunnelabschnitte sind bevorzugt für den Heizbetrieb einzusetzen. Da in tiefer liegenden Schichten die Erdreichtemperatur aufgrund des geothermischen Gradienten ansteigt ist die wirksame Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Erdreich geringer. Dies gilt jedoch nur für den untersuchten Fall des ‚Freien Kühlens‘. Beim Einsatz einer Wärmepumpe zur Kühlung im Sommer lassen sich höhere Temperaturen am Absorber einstellen, sodass die übertragene Wärmeleistung zunimmt.

Die berechneten Wärmeleistungen beruhen auf der Annahme, dass die Erdreichtemperatur ab einer Entfernung von ca. 5 m von der Tunnelwand im jeweiligen Betriebsmodus ungestört bleibt. Die instationären Betrachtungen haben gezeigt, dass bei kürzeren ‚Entzugszeiten‘ auch wesentlich größere Wärmeleistungen möglich sind. Zwischen diesen ‚Entzugsphasen‘ müssen dann wieder Phasen der Regeneration folgen. Bei Wechselbetrieb zwischen Heizen und Kühlen sind dann z.B. Wärmeleistungen von bis zu **30 W/m<sup>2</sup>** übertragbar.

Die Potenzialstudie hat versucht an einem Beispiel den Aufwand zur Gewinnung der Erdwärme zu zeigen. Dieser Aufwand liegt im Transport des Absorbermediums von der Quelle zum Verbraucher. Je länger hier die Entfernungen zum nächsten Ver-

braucher sind, desto größer sind auch die zu überwindenden Druckverluste. Hinweise in der aktuellen Literatur weisen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Ausstattung von Tunneln mit Absorber auf. Dabei wird eine wirtschaftliche Obergrenze bei 350 m Tunnellänge angegeben. Vergessen wurde allerdings auch die Entfernung zum Verbraucher zu untersuchen.

Mit richtig dimensionierten Rohrleitungen und einer gut geplanten Verschaltung der einzelnen Blöcke kann jedoch der Aufwand für den Transport gering gehalten werden. Dies ist jeweils für das konkrete Bauvorhaben zu überprüfen und nachzurechnen.

### Geologie und Geotechnik

Aufgrund der besonderen Bedeutung, die den Parametern  $\lambda$  und  $c_p$  bei der Berechnung geothermischer Vorgänge zukommt, sollten diese vor dem Hintergrund der wechselvollen, sprich heterogenen und anisotropen geologischen Verhältnisse eingehender untersucht werden. Insbesondere wird ein Einfluss von mineralischer Zusammensetzung, Sättigungsgrad bzw. Wassergehalt, Verwitterungsgrad, Klüftigkeit, Wechsellagerung, Art des Bindemittels gesehen. Es werden daher entsprechende Versuchsreihen im Labor, z.B. mit dem Thermoscanner als zielführend angesehen.

Die Gesamtheit der hydrogeologischen und vor allem geothermischen Eigenschaften der Untersuchungsräume sollte analog zu der in der Hydrogeologie bekannten Vorgehensweise, zur Bildung sog. Geothermischer Modelle als Grundlage für weiterführende numerische Modelle führen.

Im Hinblick auf die Erfahrungen von Genehmigungsbehörden ist die Untersuchung der Temperaturobreitung mit Hilfe numerischer Methoden im Hinblick auf langfristige Temperaturbeeinflussungen im Untergrund ebenfalls von besonderer Bedeutung.

Zuverlässigere und genauere numerische Modelle von geothermischen Eigenschaften ermöglichen es darüber hinaus, Geothermieanlagen gemäß den Anforderungen zu dimensionieren. Das macht diese Technologie noch zuverlässiger und wirtschaftlicher.

### Bautechnik

Im Hinblick auf bautechnische Neuerungen wie etwa den mit Absorberleitungen ausgerüsteten Tübbing sollten zur Wirkungsweise im Hinblick auf ihre Effizienz numerische Untersuchungen durchgeführt werden.

Auch der Einfluss und das Verhalten der Kopplungsprozesse sowie der Auswirkungen unterschiedlicher Ringspaltverfüllmaterialien stehen im Mittelpunkt des weiteren Interesses.

Es stellt sich unter den beschriebenen Randbedingungen ein sehr großes Potenzial für die Geothermienutzung dar.

Diese Studie berücksichtigt erstmalig auch die übertragene Wärme aus der Tunnelluft auf den Absorber. Der Anteil liegt im Durchschnitt bei ca. 25%. Die Lufttemperaturen sind jedoch stark schwankend, in Abhängigkeit der Entfernung zum Portal, der Länge des Tunnels, der Durchfahrung usw.. Es kann also bei extremen Lufttemperaturen im Tunnel (Winterminimum, Sommermaximum) auch zu einem Wärmestrom in entgegengesetzte Richtung kommen. Dadurch verringert sich die Leistungsfähigkeit des Absorbers erheblich.

In der Literatur fanden sich kaum Hinweise zu Untersuchungen der Tunnellufttemperatur. Nur mittels Messwerten aus ähnlichen Tunnelbauwerken konnten Annahmen für die anzusetzenden Temperaturen getroffen werden. Für die Studie wurde mit Mittelwerten der Temperaturen gerechnet.

Es sollten im Weiteren Untersuchungen angestrebt werden, die eine Bestimmung der Tunnellufttemperaturen zum Ziel haben. Dazu sind zum Einen Messungen in verschiedenen Tunnelbauwerken notwendig. Zum Anderen sind Modelle zur Berechnung der Tunnellufttemperatur zu erarbeiten. Damit wären in Zukunft ähnliche Vorhaben auf ihre Leistungsfähigkeit besser überprüfbar.

## 6 Literatur

- [1] ADAM, D., MARKIEWICZ, R. (2002): Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 1: Theoretische Grundlagen. ÖIAZ, 147 Jg., Heft 4: S. 120 – 138.
- [2] ADAM, D., MARKIEWICZ, R. (2002): Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 1: Experimentelle Untersuchungen und Computersimulationen. ÖIAZ, 147 Jg., Heft 5-6: S. 162 – 171.
- [3] ADAM, D., MARKIEWICZ, R. (2002): Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 1: Ausführungsbeispiele und Neuentwicklungen. ÖIAZ, 148 Jg., Heft 1: S. 2 – 12.
- [4] ARGE Wasser Umwelt Geotechnik (2004):Projekt Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.2, Fildertunnel, Geologische, hydrogeologische, geotechnische und wasserwirtschaftliche Stellungnahme, 5. EKP, Teil 1: Geologie und Hydrogeologie. Westheim/Stuttgart.
- [5] ARGE Wasser Umwelt Geotechnik (2004):Projekt Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.2, Fildertunnel, Geologische, hydrogeologische, geotechnische und wasserwirtschaftliche Stellungnahme, 5. EKP, Teil 3: Hydrogeologie, Wasserwirtschaft und Altlasten. Westheim/Stuttgart.
- [6] ARGE Wasser Umwelt Geotechnik (2004):Projekt Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.3, Filderbereich mit Flughafenanbindung, Geologische, hydrogeologische, geotechnische und wasserwirtschaftliche Stellungnahme, 4. EKP, Teil 1: Geologie und Hydrogeologie. Westheim/Stuttgart.
- [7] ARGE Wasser Umwelt Geotechnik (2004):Projekt Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.1, Talquerung mit Hauptbahnhof, Geologische, hydrogeologische, geotechnische und wasserwirtschaftliche Stellungnahme, 4. EKP, Teil 1: Geologie und Hydrogeologie. Westheim/Stuttgart.
- [8] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz: Oberflächennahe Geothermie – Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund – München 2005
- [9] Cerbe G., Hoffmann H.: Einführung in die Thermodynamik, Hanser Verlag München; 2002
- [10] Elsner N.: Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Akademie-Verlag Berlin; 1985
- [11] Grigull U., Sandner H.: Wärmeleitung; Springer-Verlag;1979
- [12] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Handbuch Mikrobiologische Bodenreinigung, Stand: April 1991
- [13] Landeshauptstadt Stuttgart: Hydrogeologie und Baugrund, Schutz der Mineral- und Heilquellen, Kurzfassung – Hrsg.: LH Stuttgart, Amt für Umweltschutz, 09/1996.
- [14] Landeshauptstadt Stuttgart: Nutzung der Geothermie in Stuttgart, Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz - Heft 1/2005.
- [15] LANGEHEINECKE, K., JANY, P., SAPPER, E. (2003): Thermodynamik für Ingenieure, 4. Auflage, Fachverlag Vieweg, Wiesbaden.
- [16] Markiewicz, R.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den

- Tunnelbau. Dissertation am Institut für Grundbau und Bodenmechanik. 2004, Technische Universität Wien.
- [17] OSTERMANN, N., ADAM, D.: Die Nutzung der Erdwärme bei Verkehrsinfrastrukturprojekten am Beispiel von Stuttgart 21. BetonZement Heft 3/05: S. 12 – 17.
  - [18] OBERHAUSER, A., ADAM, D. (2006): Optimierungspotentiale der Erdwärmennutzung an Verkehrsinfrastrukturprojekten. BetonZement Heft 2/06: S. 14 – 19.
  - [19] OSTERMANN, N., ADAM, D (2005): Die Nutzung von Erdwärme bei Verkehrsinfrastrukturprojekten am Beispiel von Stuttgart 21. BetonZement Heft 3/05: S. 12 – 17.
  - [20] PANNICKE, S. et. al. (2006): Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten. Grundwasser (11) 1: 6 – 18.
  - [21] SCHIPPERS, A., REICHLING, J.(2006): Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. Grundwasser (11) 1: 40 – 45.
  - [22] VDI 4640 (12/2000): Thermische Nutzung des Untergrunds, Teile 1 – 4.
  - [23] WBI (09/2002): Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.2, Fildertunnel, Tunnelbautechnisches Gutachten.
  - [24] WBI (06/2004): Projekt Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.2, Fildertunnel, Tunnelbautechnisches Gutachten, Plananlage 4.4: Boden- und felsmechanische Kennwerte, Gefügemodelle.
  - [25] WITTKE, W., SCHMITT, D. (2005): Nutzung der Geothermie im Tunnelbau. Geotechnik 28 Nr. 4: S. 256 – 262.

## A Anhang

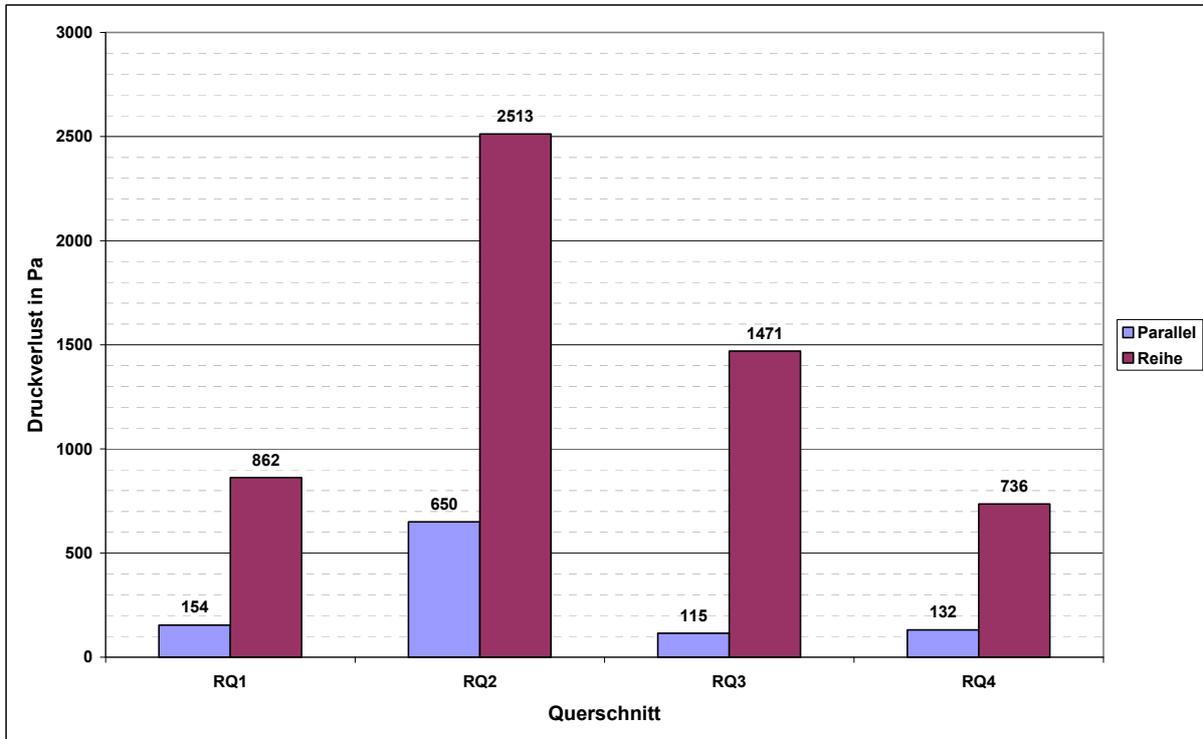


Abb. A. 1: Vergleich der Druckverluste der Blöcke im Heizfall

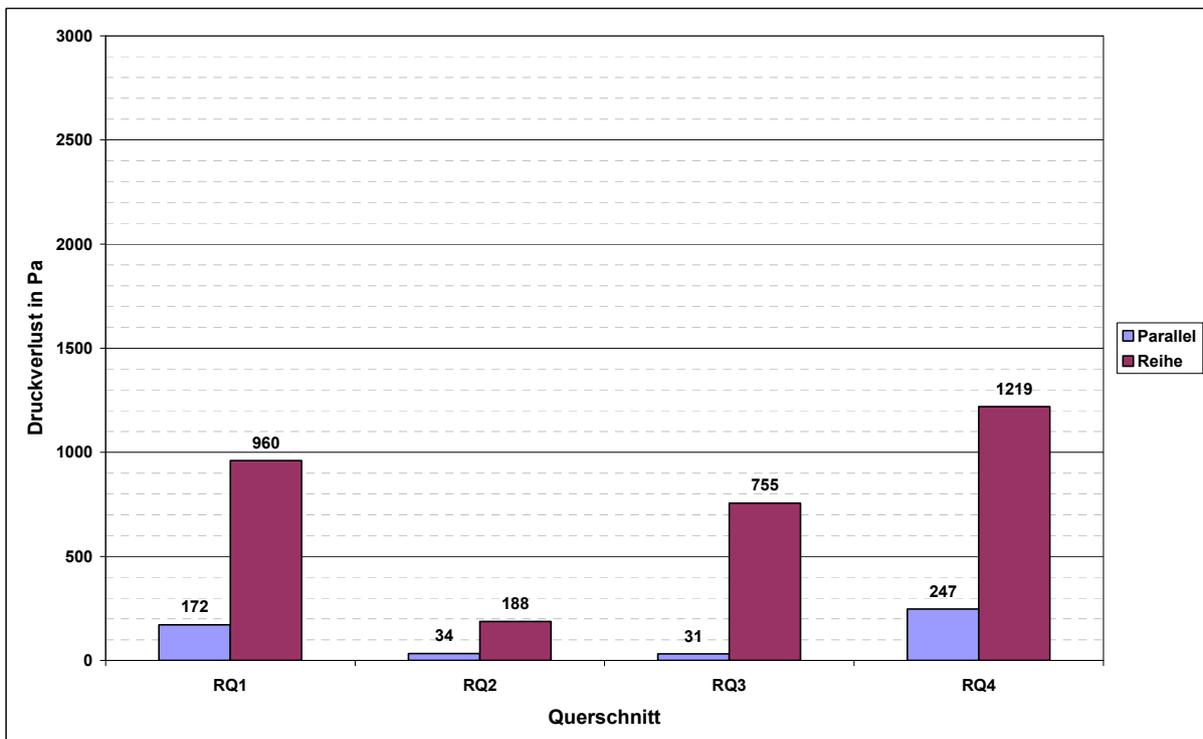


Abb. A. 2: Vergleich der Druckverluste der Blöcke im Kühlfall