

# Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 141

**bast**

# Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

von

Christian Moormann  
Patrik Buhmann

Institut für Geotechnik (IGS)  
Universität Stuttgart

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 141

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.0541/2011/BRB:**  
Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwerken

**Fachbetreuung:**  
Jürgen Blossfeld

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-95606-358-9

Bergisch Gladbach, Oktober 2017

## Kurzfassung – Abstract

### Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

Im Rahmen des Forschungsprojektes FE15.0541/2011/BRB „Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwerken“ wurde durch das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart das geothermische Potential der Tunneldrainagewasserschüttungen an den Portalen des Tunnel Rennsteig (BAB 71, Thüringer Wald) und des Grenztunnels Füssen (BAB 7, Bayern) ermittelt und die chemisch-physikalische Eignung zur thermischen Nutzung untersucht. Im Ergebnis können am Tunnel Rennsteig Wärmeströme zwischen 50 kW (Heizbetrieb) und 590 kW (Kühlbetrieb) und am Tunnel Füssen zwischen 150 kW (Heizbetrieb) bis 440 kW (Kühlbetrieb) nutzbar gemacht werden.

Für die Tunnelportale wurden Konzepte zur Nutzung der thermischen Energie entwickelt und gesamtheitlich bewertet. Verglichen wurden klassische Nutzungen aus dem Bereich der Gebäudeklimatisierung, der Eis- und Schneefreihaltung von Freiflächen sowie die thermische Nutzung des Tunneldrainagewassers zur Fischzucht. Hierbei zeigten sich die Temperierung von Freiflächen sowie die Klimatisierung von Betriebsräumen der Tunneltechnik als technisch und energetisch sinnvolle Varianten der Energienutzung.

Für die Nordportale der Tunnel Füssen und Rennsteig wurden diese Konzepte im Sinne einer Vorplanung vertieft betrachtet sowie monetär und auf der Basis weiterer Kriterien, wie der technischen Realisierbarkeit und des späteren Betriebs, bewertet.

Für das Nordportal des Grenztunnels Füssen wurden im Rahmen einer Entwurfsplanung Anlagen zur Temperierung von Freiflächen sowie zur Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume entwickelt. In beiden Fällen erfolgt die Nutzung des Tunneldrainagewassers direkt und passiv, d.h. es erfolgt kein Temperaturhub und das Wasser zirkuliert direkt durch die entsprechenden Wärmeübertrager. Das am Tunnel Füssen existierende geothermische Potential für den Kühlfall wird durch die geplante Anlage nur zu einem geringen Teil ausgenutzt, so dass die Auskopplung weiterer Kühlenergie möglich ist.

### Preliminary design of hydrogeothermal plants within German road tunnels

In the framework of the research project FE15.0541/2011/BRB “Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwerken”, the potential of exploiting the geothermal energy of the drainage water in tunnels has been investigated at the Institute of Geotechnical Engineering of Stuttgart University. For this purpose, the tunnel Rennsteig (BAB 71, Thuringian Forest) and the tunnel Füssen (BAB 7, Bavaria) were considered as case studies where the chemical and physical suitability of the drainage water were examined. One of the findings in this project, the heat flux of the Rennsteig tunnel varying between 50 kW (heating) and 590 kW (cooling), whereas for the tunnel Füssen was 150-440 kW for the heating and cooling, respectively.

Furthermore in the this project, suggestions of utilizing the thermal energy are studied; e.g. classical air conditioning for buildings, system for keeping roads free from ice and snow, as well as fish farming. For technical and economical reasons, it has been verified that the first two applications are more feasible among others.

A detailed pre-design (Vorplanung) including financial costs and technical challenges were carried out for the northern portals of the tunnel Füssen and Rennsteig. On the other hand, a preliminary design (Entwurfsplanung) was performed for the northern portal of the tunnel Füssen for keeping open spaces free from ice and snow and for air conditioning of the tunnel facility rooms. In this case, however, the drainage water is directly and passively used. In other words, the water circulates directly through a heat exchanger with no need for an additional heat pump system.

Important to mention at this stage that the geothermal potential for the Füssen tunnel is partially utilized by the suggested design so that further extraction of the cooling energy in the future is possible.



## Summary

### Preliminary design of hydrogeothermal plants within German road tunnels

#### 1 Scope

In the framework of the research project FE15.0541/2011/BRB „Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwerken“ the potential of exploiting the geothermal energy of the drainage water in tunnels has been investigated at the institute of Geotechnical Engineering of Stuttgart University for the period 15.08.2015 to 30.11.2016. Based on three design phases, the geothermal potential of three portals at German road tunnels has been considered. Moreover, suggestions of utilizing the thermal energy were studied. At the end of this project a pilot plant for air conditioning of the tunnel facility rooms and a pilot project (Technikum) for the temperature control of open spaces were developed.

The idea of the present research project is based on a preliminary study<sup>1</sup> conducted by BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen), in which numerous German road tunnels were examined with regard to their basic suitability for the geothermal use of tunnel drainage water. According to this preliminary study, BAST had selected the northern and the southern portals of the tunnel Rennsteig as well as the northern portal of the tunnel Füssen to be studied further in the current research project.

The Rennsteig Tunnel is 7.9 km long and is the most complex structure at the ridge crossing of the Thuringian Forest. It is part of German Unity Transport Project No.16, the highway BAB A71 from Sangerhausen to Schweinfurt. As part of this project the drainage water discharge at the northern and the southern portals was examined regarding its geothermal potential.

The tunnel Füssen is about 1.3 km long and connects the German highway BAB 7 with the Austrian “Fernpass” road B179. The tunnel tube, which is operated as an oncoming traffic lane, is located

at 73% on German territory, whereas the rest is on the Austrian side. As part of this project, the drainage water discharge at the northern portal was investigated regarding to its geothermal potential.

#### 2 Method of investigation

The structure of the research project was carried out on the basis of a classical project development including the basic evaluation (Grundlagenermittlung), a pre-design (Vorplanung) and finally a preliminary design (Entwurfsplanung)<sup>2</sup>.

At the beginning, the drainage water discharge outlets had been equipped with devices for measuring the discharge amount (tunnel Rennsteig) and sensors for logging the drainage water temperature (tunnel Rennsteig and Füssen). Within the framework of several field visits and coordination meetings with the people in charge of the tunnel, possibilities for the utilization of the geothermal energy were determined, which then developed on the basis of thermal and hydraulic evaluations.

The general suitability of the tunnel drainage water for geothermal tunnel applications was tested by performing a basic water analysis carried out by a laboratory accredited. Furthermore, basic water tests and a subsequent assessment of the results with regard to the use of the tunnel drainage water in a heat exchanger were carried out.

At the end of the basic evaluation and the pre-design, one investigated portal was excluded from the investigations in the following design phase. In the framework of the pre-design for the considered two tunnels and the preliminary design for one tunnel portal possible plant concepts have been developed. For this purpose, the relevant plant components were thermally and hydraulically designed and plotted. Accordingly, for the developed plant concepts, quantities were computed, which were finally compiled into a bill of quantities and monetarily evaluated. The selection of the corresponding tunnel portals was based on the monetary valuation and on the basis of further evaluation criteria such as the expected operational safety during operation or the publicity.

<sup>1</sup> J. BLOSFELD, I. RÖNNAU, Wärmeenergie aus dränierten Bergwässern von Strassentunneln, BAST, August 2014

<sup>2</sup> VBI-Leitfaden, Oberflächennahe Geothermie, 3. Aufl., Berlin, 2012

## 3 Investigation results

### 3.1 Basis evaluation

Within the project phase, basic evaluation (Grundlagenermittlung) for the geothermal potential heating and cooling operation was determined on the basis of site measurements for the three considered tunnel portals.

The geothermal potential equals to the heat flux that is available at the outlet of the tunnel drainage system. For calculating the geothermal potential the following assumptions were made:

- Minimum discharge temperature 5°C
- Maximum discharge temperature 20°C
- Maximum temperature spread (using heat pump system) 4K

Taking into account the maximum and minimum allowable temperature inflow limits in the receiving water body after the thermal utilization of the water, and with a very conservative approach determining the geothermal potential, in which minimal discharge flow rates were combined with extreme drainage water temperatures, following geothermal potentials can be derived:

Portal	Heating mode	Cooling mode
Rennsteig north	147 kW	589 kW
Rennsteig south	53 kW	227 kW
Füssen north	152 kW	438 kW

Table 1: Geothermal potentials

For each of the three cases in Table 1, water samples were taken and examined in the laboratory.

For the two portals of the tunnel Rennsteig, the results of the investigation show a slightly risk of corrosion if heat exchangers will be used. Since the laboratory tests show an error of the ionic balance, further measurements are recommended to monitor the drainage water chemistry. In order to reduce the sintering of the tunnel drainages, hardening stabilizers are used in the drainage system of the tunnel Füssen. The results of the laboratory tests show the water chemistry after the treatment. For the laboratory tests performed, no corrosive groundwater chemistry was detected at the tunnel Füssen. In addition, at both tunnels bedloads had been recorded in the tunnel drainage systems. Therefore the installation of particle filters is recommended. The use of stainless steel heat exchangers is recommended for the further design of possible geothermal energy plants.

Regarding the basic evaluation of the three tunnel portals, energy utilisation concepts were developed and evaluated based on economically and financially basis. At all tunnel portals, there are applications which can be supplied by the available geothermal potential for both heating and cooling operation. In addition, the evaluation of the construction and operation of possible applications was based on the following criteria

- Installation cost for required pipelines
- Additional cost for installations
- Integration of external persons / institutions
- Operational safety
- Publicity

Upon these criteria, the north portals of the tunnel Rennsteig and Füssen were selected for further design phase. In addition to the choice of the tunnel portals, the utilization concepts "keeping operating areas free from ice and snow" as well as "air conditioning of the tunnel facility rooms" were chosen as the objective for the following design phase.

### 3.2 Pre-design phase

Within the scope of the pre-design, four plant concepts were developed for the implementation of systems keeping operating areas free from ice and snow as well as the air conditioning of the tunnel facility rooms at the tunnel portals Rennsteig north and Füssen north. For this purpose, the design of a required water collection was carried out as a first step. At the northern portal of the tunnel Füssen, there are structures available that can be used for the installation of necessary filter and pumping systems without essential adaptations. These are located outside the running traffic in the immediate vicinity of possible applications and are easily accessible. During the construction of the water catchment facilities at the north portal of the tunnel Rennsteig, a block-off of the motorway BAB A71 in the direction of Schweinfurt is required. Furthermore, the design of the heat exchangers for the open spaces and within the tunnel facility rooms as well as the development of corresponding operating concepts was carried out. The basis of the obtained design was the determination of the power requirements for the respective locality. For this purpose, a corresponding energy balance for the temperature control of the open spaces and the existing cooling loads were determined. On the basis of the selected plant, system components and corresponding quantities had been calculated. The plant concepts were compiled in a bill of quantities and were financially evaluated. The deter-

mined costs for both tunnel portals have resulted in about 270.000 Euro (net), taking into account the degree of detailing of the cost estimation.

The aim of the pre-design phase was to select a tunnel portal for the following preliminary design. As the cost estimation did not show any clear advantages for a tunnel portal, further assessment factors were included in the decision-making process. Owing to the fact that all work could be carried out outside the traffic area and that the project site would be well accessible, the northern portal of the tunnel Füssen was selected for the upcoming preliminary design. Furthermore, the history of the drainage water drainage quantity for the tunnel of Füssen is available for several years, which exhibit only slight fluctuations in the flow rate.

The geothermal potential at the tunnel Füssen is fully utilized for the operation of keeping roads free from ice and snow during winter time. Further applications are not possible during the winter period. In summer time, there may still be the possibility of decoupling further cooling energy from the tunnel drainage water at the tunnel Füssen to provide additional applications with geothermal energy. At the tunnel Rennsteig, the measured drainage water shows a considerably higher geothermal potential, which is however not constantly available over the entire year. Further applications to use the geothermal potential are possible at the northern, but also at the southern portal of the tunnel Rennsteig.

### 3.3 Preliminary design

The aim of the third phase of this research project was to develop a pilot plant for the air-conditioning of the tunnel facility rooms as well as a pilot project (Technikum) for temperature control of open spaces. In contrast to the pre-design requirements, the advisory board of the research project agreed, that there is a need for further preliminary examinations in the scope of a pilot project (Technikum) before setting up a large scale pilot plant.

The reason for this decision is linked to the selected operating mode of the heat exchanger for the temperature control of the open spaces. The tunnel drainage water circulates directly inside a pipeline system in the roadway structure without any temperature rise caused by a heat pump. With such a direct and passive operation, only a feed pump is required. Additional heat exchangers or the use of antifreeze are not necessary. This reduces the manufacturing and operating costs of the plant and thereby increases its efficiency.

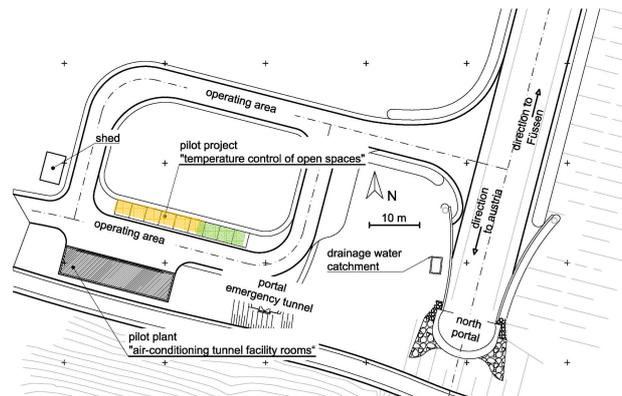


Figure 1: Plan view pilot plant „Air-conditioning tunnel facility rooms“ and pilot project „temperature control of open spaces“

However, in this operating mode, the risk of freezing and thus the destruction of the pipelines and the road surface is possible. Hence, control circuits have been developed for this possible scenario. In the case of a frost hazard, the circuits are intended to take the system out of operation and prevent freezing. In this context, the pilot project is to generate the necessary experience with the control and operation of this type of plant that can be projected to a plant on a real scale. In addition, the pilot project offers the possibility of evaluating and, if necessary, adapting the thermal heat flux densities developed on a theoretical basis, which are necessary to ensure the protection of ice and snow. This provides the basis for an optimized design of a large-scale pilot plant.

For the pilot plant and the pilot project the catchment of the drainage water and its hydraulic distribution as well as the required monitoring and controlling equipment were developed, designed and were compiled in a bill of quantities. Cost-intensive work such as the erection of the road structures, the installations within the tunnel facility rooms and the programming of the required control loops including their implementation in the corresponding hardware components were requested by subcontractors and included in the overall cost estimation.

In addition to the erection costs, the bill of quantities including the costs for the necessary design of the pilot plant "air-conditioning tunnel facility rooms" and the pilot project "temperature control of open spaces". The total costs amount of approx. 273.000 Euro (net), of which about 48% is allocated to the design costs and scientific support, and 52% to the construction of the pilot plant and the pilot project.

## 4 Conclusions for practice

The investigations of the present research project have shown, that the tunnel drainage water generated at the German road tunnels Rennsteig and Füssen has a considerable thermal potential. The use of this energy offers numerous possibilities for applications in the direct vicinity of the tunnel as well as for the supplying residential buildings with thermal energy. In particular, the existing cooling potential is higher than the existing cooling loads. The use of the tunnel drainage water for the temperature control of open spaces according to the direct passive heating system is novel in the area of keeping roads free from ice and snow and can be extended to the cooling operation in the summer time, e.g. to reduce temperature induced rut formations. The temperature control of the road surface in the portal area of a tunnel may be extended to reduce the amount of gritting salt used in this area and thus to reduce the chloride load in the tunnel.

The basic prerequisite for the estimation of the geothermal potential of the tunnel drainage water is the knowledge of the expected quantity and water temperature. Based on this, retrofitting of existing drained tunnels or the equipment of planned tunnels with readily accessible measuring devices would be desirable.

## Vorwort

Mit Schreiben vom 16.04.2015 wurde das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart von der Bundesanstalt für Straßenwesen aufgefordert, sich an dem im Rahmen des Forschungsprogramms Straßenwesen ausgeschriebenen Forschungsvorhaben „Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwerken“ (FE 15.0541/2011/BRB) durch die Abgabe eines entsprechenden Angebots zu beteiligen. Die Bundesanstalt für Straßenwesen beauftragte das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) auf Grundlage des Angebots vom 22.05.2015 mit der Durchführung des Projekts. Die Beauftragung erfolgte mit der Vertragsunterzeichnung vom 14.08.2015, der offizielle Start des auf insgesamt 15 Monate ausgelegten Projekts war am 15.08.2015.



Abbildung 1: Projektstruktur

Die Strukturierung des Forschungsprojektes erfolgte auf der Basis einer klassischen Projektentwicklung in den Stufen Grundlagenermittlung, Vorplanung und Entwurfsplanung (siehe Abbildung 1). Folgende Zwischenberichte wurden hierzu verfasst:

1. Zwischenbericht Stand:	11.02.2016
2. Zwischenbericht Stand:	14.04.2016
3. Konzept Pilotanlage:	24.06.2016
4. Entwurf Schlussbericht Stand:	15.09.2016
5. Schlussbericht Stand:	30.11.2016

Begleitet wurden die Planungsschritte durch den Betreuerkreis des Projektes, der sich aus den Vertretern der Autobahndirektion Südbayern, der Zentralstelle Brücken- und Tunnelbau an der Autobahndirektion Südbayern, des Thüringer Landesamtes für Bau und Verkehr, dem Regierungspräsidium Stuttgart, dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur und der Bundesanstalt für Straßenwesen zusammensetzte. Nach jeder Planungsphase wurden die jeweiligen Planungsstände durch das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart im Rahmen einer Betreuergruppensitzung vorgestellt und die Planungsinhalte der kommenden Planungsphase konkretisiert.

In der ersten Projektphase wurde für die Tunnelportale Rennsteig Nord und Rennsteig Süd (BAB A71) sowie das Nordportal des Grenztunnels Füssen (BAB A7) auf der Basis des anfallenden Tun-

neldrainagewassers das mögliche geothermische Potential für den Kühl- bzw. Heizbetrieb ermittelt. Hierzu war zunächst die Ausrüstung der Drainagewasseraustritte mit entsprechender Messtechnik zur Erfassung der Schüttungsmengen und Wassertemperaturen erforderlich. Neben der Entwicklung möglicher Konzepte zur Nutzung dieser Energie wurde in dieser Projektphase die grundsätzliche chemisch-physikalische Eignung des Tunneldrainagewassers zur energetischen Nutzung untersucht.

In der zweiten Projektphase erfolgte die Vorplanung von ausgewählten Nutzungskonzepten für die Tunnelportale Rennsteig Nord und Füssen Nord. Im Fokus standen hier die Bereitstellung von Kühlenergie für die tunnelzugehörigen Betriebsgebäude sowie die Temperierung von Freiflächen im direkten Tunnelnahbereich. Den Abschluss dieser Projektphase bildete die Wahl des Tunnelportals Füssen Nord für die nachfolgende Entwurfsplanung.

Im Rahmen der Entwurfsplanung wurden eine Pilotanlage und ein Technikum (siehe 4.2) zur energetischen Nutzung des anfallenden Tunneldrainagewassers entwickelt. Zum einen wurde hierzu die Adaption der bestehenden Lüftungsanlage des Tunnelbetriebsraumes am Grenztunnel Füssen, zum anderen eine 9-feldrige Testfläche zur Temperierung von Freiflächen auf dem tunnelzugehörigen Betriebsgelände geplant.

Im Zuge der Vor- und Entwurfsplanung wurden Kostenschätzungen für die Herstellung und wissenschaftliche Begleitung möglicher Pilotanlagenkonzepte erarbeitet. Hierzu wurden beispielhafte am Markt erhältliche Anlagenkomponenten gewählt, die im Zuge einer eventuell nachlaufenden Ausführungsplanung zu spezifizieren sind. Sämtliche der gewählten Produkte sind beispielhaft und dienen im Rahmen dieses Projektes zum einen als Grundlage der Kostenschätzung, zum anderen der Veranschaulichung.

Der vorliegende Schlussbericht fasst die Projektbearbeitung zusammen und gibt ergänzend Hinweise zum Untersuchungsumfang einer nachfolgenden Ausführungsplanung der Pilotanlage „Temperierung Betriebsgebäude“ und des Technikums „Temperierung Freifläche“ am Grenztunnel Füssen.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Allgemein .....</b>	<b>13</b>	4.4	Wärmeübertrager zur Eis- und Schneefreihaltung .....	58
1.1	Beschreibung Tunnelbauwerke.....	13	4.4.1	Querschnittsbildung .....	58
1.1.1	Tunnel Rennsteig .....	14	4.4.2	Rohrleitungen.....	60
1.1.2	Grenztunnel Füssen .....	15	4.4.3	Testfeldausbildung .....	61
<b>2</b>	<b>Grundlagenermittlung .....</b>	<b>16</b>	4.5	Wärmeübertrager zur Klimatisierung des Tunnelbetriebsraumes .....	61
2.1.1	Grundlagen.....	16	4.6	Pumpentechnik, Druckbehälter, Vor- und Rücklaufleitungen .....	62
2.1.2	Tunnel Rennsteig .....	16	4.7	Regelungs- und Messtechnik.....	64
2.1.3	Grenztunnel Füssen .....	20	4.7.1	Entwicklung Regelkreis .....	65
2.2	Laboruntersuchungen .....	21	4.7.2	Einregelung .....	66
2.2.1	Allgemein.....	21	4.7.3	Betriebskonzepte .....	67
2.2.2	Tunnel Rennsteig .....	22	4.8	Kostenschätzung .....	67
2.2.3	Grenztunnel Füssen .....	23	4.8.1	Allgemeines.....	67
2.3	Nutzungsvarianten .....	23	4.8.2	Flächenwärmeübertrager zur Eis- und Schneefreihaltung .....	67
2.3.1	Grundlagen.....	23	4.8.3	Kühlung Betriebsräume .....	68
2.3.2	Potentielle Nutzung .....	25	4.8.4	Messtechnik .....	68
2.3.3	Tunnel Rennsteig .....	30	4.9	Umweltverträglichkeit.....	68
2.3.4	Grenztunnel Füssen .....	32	4.10	Weiterer Forschungsbedarf .....	69
2.4	Auswahl Tunnelportale für Vorplanung .....	33	<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>72</b>
<b>3</b>	<b>Vorplanung .....</b>	<b>36</b>	<b>6</b>	<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>73</b>
3.1	Wasserfassung.....	36	6.1	Anlagen Grundlagenermittlung .....	73
3.1.1	Tunnel Rennsteig .....	36	6.2	Anlagen Vorplanung .....	73
3.1.2	Grenztunnel Füssen .....	38	6.3	Anlagen Entwurfsplanung .....	73
3.2	Eis- und Schneefreihaltung .....	38	<b>7</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>74</b>
3.2.1	Allgemein.....	38			
3.2.2	Energiebedarfsermittlung .....	38			
3.2.3	Betriebskonzepte.....	43			
3.3	Klimatisierung Technikräume.....	50			
3.3.1	Allgemein.....	50			
3.3.2	Energiebedarfsermittlung .....	50			
3.3.3	Betriebskonzepte.....	50			
3.4	Kostenschätzung.....	53			
3.5	Auswahl eines Tunnelportals für die Entwurfsplanung.....	54			
<b>4</b>	<b>Entwurfsplanung .....</b>	<b>55</b>			
4.1	Ziel der Entwurfsplanung .....	55			
4.2	Konzept Pilotanlage und Technikum.....	55			
4.3	Drainagewasserfassung.....	58			

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.



## 1 Allgemein

Als Geothermie oder Erdwärme wird die im Erdinneren gespeicherte Wärmeenergie bezeichnet, die ein erhebliches Potential zur Heizung und Kühlung von Gebäuden bietet. Das energetisch nutzbare Potential ist in besonderem Maße von der Lage eines Energieabsorbers und hier besonders von der Tiefenstufe innerhalb der Erdkruste abhängig.

Als Wärmequelle ist die gespeicherte solare Wärmeenergie an der Erdoberfläche von dem geothermischen Tiefenstrom zu unterscheiden. In der Vergangenheit hat sich in diesem Zusammenhang die Unterteilung der Geothermie in die oberflächennahe Geothermie bis 400 m unter der Geländeoberfläche und die Tiefengeothermie ab Tiefen > 400 m durchgesetzt. Basierend auf dieser Gliederung lassen sich Tunnelgeothermieanlagen der oberflächennahen Geothermie zuordnen. Tunnelbauwerke können einen sichtbaren Beitrag zu regenerativen Energiekonzepten leisten, wie bislang durchgeführte Projekte und Studien eindrucksvoll belegen [30]. Es können zwei tunnelgeothermische Verfahrenstechniken unterschieden werden, die hydrogeothermische und die absorbertechnologische Technik [22].

Absorbertechnologische Anwendungen eignen sich z.B. in innerstädtischen Bereichen bei seicht liegenden Tunnelbauwerken, aber auch bei größerer Überdeckung. Hier werden Wärmeaustauscherrohre (Absorberleitungen) in Bauteile des Bauwerks eingesetzt. Diese werden von einem Absorberfluid durchströmt, das die im Baugrund und ggf. die in der Tunnelluft gespeicherte Energie in Form von Wärme aufnimmt und der Wärmepumpe zuführt, um diese auf ein höheres Energieniveau anzuheben. In Abhängigkeit der Bauweise stehen unterschiedliche Einbauorte und -verfahren zur Verfügung. Erste absorbertechnologische Anwendungen im Tunnelbau sind aus Asien, Österreich und Deutschland bekannt. Die bis dato einzige Anwendung mit baulicher Umsetzung in Deutschland ist der Stadtbahntunnel 'Fasanenhof' in Stuttgart, das vom Forschungsnehmer, also dem Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts „GeoTU6“ wissenschaftlich begleitet wird. Das Projekt hat die Untersuchung der tunnelgeothermischen Nutzung im innerstädtischen Umfeld durch die konstruktive Umsetzung eines tunnelgeothermischen Messstandes im Maßstab 1:1 zum Ziel und wird durch die Institute für Geotechnik und für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart aktuell in der zweiten Antragsphase bearbeitet. Die tunnelgeothermische Ver-

suchsanlage besteht aus der technischen Baugrund- und der technischen Gebäudeausrüstung.

Beim hydrogeothermischen Verfahren wird das aus der Bergwasserdrainage an den Tunnelportalen austretende warme Wasser energetisch verwertet. Das hydrogeothermische Verfahren arbeitet als offenes System im Gegensatz zum absorbertechnologischen, das ein geschlossenes System darstellt. In der Schweiz wird dieses Verfahren bereits seit den siebziger Jahren umgesetzt, als man sich im Zusammenhang mit der Energiekrise 1973 dazu entschloss, das Drainagewasser des Gotthard-Straßentunnels zur Klimatisierung eines Autobahnwerkhofes zu nutzen [19].

Unter 'Hydrogeothermischen Verfahren' wird grundsätzlich die direkte Nutzung der Energie aus Grund- bzw. Schichtwasser verstanden. Ursprünglich gehen die hydrogeothermischen Verfahren auf die Nutzung von Thermalwässern zurück, die Wasser aus tiefliegenden Grundwasserleitern über Förder- und Schluckbrunnen (Primärkreislauf), an einen Wärmepumpenkreislauf (Sekundärkreislauf) übergeben. Diese Idee der Energieextraktion wurde auf die Nutzung von Drainagewässern von Tunnelbauwerken übertragen. Hydrogeothermische Anlagen existieren derzeit vornehmlich in der Schweiz [31]. Aktuell sind in der Schweiz sieben geothermische Anlagen mit einer jährlichen Gesamtwärmeleistung von ca. 5.300 MWh/Jahr in Betrieb, weitere Anlagen sind in Planung.

Die auf hydrogeothermischem Wege gewonnene Energie stellt im Grunde ein Nebenprodukt der aus tunnelstatischer Sicht erforderlichen Drainage zum Abbau des auf die Tunnelschale wirkenden Wasserdrucks dar. Der Energieertrag ist umso höher, je mehr Wasser mit hoher bzw. niedriger Temperatur anfällt. Das ideale Einsatzgebiet hydrogeothermischer Nutzungen in der Tunnelgeothermie wurde bisher meist im alpinen Raum mit seinen typischen hydrogeologischen und morphologischen Verhältnissen gesehen, in die mit Basistunnelbauwerken eingegriffen wird. Es sind aber auch Anwendungen unter für weite Teile Deutschland typischen Mittelgebirgsrandbedingungen grundsätzlich möglich, was von der BASSt durch grundlegende Untersuchungen, in die sich auch das vorliegende Forschungsvorhaben als ein weiterer logischer Schritt eingliedert, vertieft bewertet werden soll.

### 1.1 Beschreibung Tunnelbauwerke

Die Grundlage des Forschungsprojektes „Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwer-

ken“ (FE 15.0541/2011/BRB) bildet [8], in der zahlreiche deutsche Straßentunnel hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung zur energetischen Nutzung von Tunneldrainagewasser untersucht wurden. Auf der Basis [8] wurden durch die BASt die Tunnelportale Rennsteig Nord und Süd sowie das Tunnelportal Füssen Nord zum Untersuchungsgegenstand für das aktuelle Forschungsprojekt ausgewählt. Nachfolgend werden die Tunnelbauwerke Rennsteig und Füssen beschrieben.

### 1.1.1 Tunnel Rennsteig

Der Tunnel Rennsteig stellt mit ca. 7,9 km Länge das aufwendigste Bauwerk der Kammquerung des Thüringer Waldes dar. Er ist Bestandteil des Verkehrsprojektes Deutsche Einheit Nr. 16, der Autobahn A71 von Sangerhausen nach Schweinfurt. Im Zuge der Projektbearbeitung werden die Drainagewasserschüttungen des Nord- sowie des Südportals hinsichtlich einer möglichen geothermischen Nutzung untersucht.

#### 1.1.1.1 Bauwerk

Der Tunnel Rennsteig besteht aus 2 separaten Tunnelröhren, die im bergmännischen Tunnelvortrieb aufgeföhren wurden. Insgesamt bilden 1322 Gewölbeblöcke in vier verschiedenen Querschnittsarten die rund 15.794 Tunnelmeter. Die Innenschale wurde über große Bereiche als unabwehrte Schale ausgebildet. Lediglich in den Portalbereichen, die wechselnden Temperaturen ausgesetzt sind, den Störzonen im Bächerbachtal und Kehltal, der Überföhren des Brandleitetunnels und den Blöcken mit großen Einzellasten aus der späteren technischen Ausrüstung wurde eine Bewehrung vorgesehen.

Der Rennsteigtunnel wurde als druckwasserfreier Tunnel mit einer Regenschirm-Abdichtung mit offener Sohle gebaut [11].

Zur Ableitung der Tunneldrainagewässer wurde für den Tunnel Rennsteig ein neues Drainagesystem entwickelt, das im Wesentlichen durch eine vergrößerte Schlitzweite der Drainageröhre gekennzeichnet ist. Die Drainageröhre sind in einem Filterkies gebettet und durch eine Geotextil umhüllt. Die Entwässerung erfolgt entsprechend der Längsneigung des Tunnels zum Nord- bzw. zum Südportal. Gemäß [7] sind zusätzlich in Bereichen, in denen der Bergwasserspiegel unterhalb der Tunnelsohle liegt, Versickerungstrecken angeordnet.

Abschnitt	von	bis	Länge
Nord	4+700km	4+950km	250m
Nord	5+320km	5+900km	580m
Süd	7+650km	8+150km	500m
Süd	8+330km	8+450km	120m

Tabelle 1: Versickerungstrecken Rennsteig

Gespräche mit dem zuständigen Tunnelbetreiber haben ergeben, dass die Existenz dieser Versickerungstrecken nicht gesichert ist. Bei Wartungsarbeiten an der Drainage wurden diese Versickerungstrecken nicht bewusst wahrgenommen.

#### 1.1.1.2 Geologie und Hydrogeologie

Gemäß [7] wird die Geologie des Tunnels Rennsteig wie folgt beschrieben: „Der Tunnel Rennsteig liegt im Nordabschnitt in der Oberhafer Scholle und im Südabschnitt in der Beerberg Scholle. Die Schollen werden durch die Kehltalstörung getrennt. Bei den hier anstehenden Gesteinen handelt es sich um eine Abfolge von unregelmäßig geklüfteten Vulkaniten, vorwiegend Quarzporphyre, die von einer Sedimentabfolge bestehend aus Konglomeraten, Sandsteinen sowie Schluffstein- und Tonsteinlagen in wechselnder Verteilung unterlagert werden. In die verschiedenen Porphyrgänge bzw. -intrusionen sind Sedimentfolgen eingelagert.“

Und weiter zur Hydrogeologie heißt es: „Im Bereich der Tunnelstrecke treten über dem tiefliegenden Grundwasser örtlich schwebende Grundwasserstockwerke auf, die über ausgeprägtere Klüfte und Klüftzonen untereinander in Verbindung stehen. Die Wasserwegsamkeiten dieser Klüftzonen ist aber offensichtlich so gering, dass die Stockwerksgliederung erhalten bleibt. Im Bereich von Störungszonen kommt es dagegen zu einer direkten hydraulischen Verbindung der Stockwerke.“

#### 1.1.1.3 Klimatische Verhältnisse

Am Tunnel Rennsteig existieren, trotz seiner Lage im klimatisch stabilen Mitteleuropa, wegen seiner Gebirgslage wechselhafte, teilweise sogar gegensätzliche Witterung, die an einigen Stellen, wie z.B. dem Rennsteiggarten bei Oberhof, sogar alpinen Charakter hat.

Auf Grund der querenden Lage des Thüringer Waldes zur regenbringenden Hauptwindrichtung aus Südwest wird das Klima ebenfalls stark vom Gebirge selbst beeinflusst. Die Winter am Rennsteig sind kalt, die mittleren Januartemperaturen liegen bei -2 bis -4 Grad Celsius. Die Beurteilung

der minimalen Lufttemperatur am Tunnel Rennsteig erfolgt über die vom US Department of Agriculture entwickelten Winterhärtezonen. Hiernach ist der Tunnel Rennsteig der Winterhärtezone 6b mit einer minimal möglichen Lufttemperatur 2 m oberhalb der Geländeoberfläche von  $-20,4\text{ °C}$  zuzuordnen.

#### 1.1.1.4 Ortsbegehungen

Am Tunnel Rennsteig wurden im Rahmen des Projektes 4 Ortsbegehungen durchgeführt.

Datum	Zweck
10.09.2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abstimmungsgespräch mit Tunnelbetreiber</li> <li>▪ Probennahme Drainagewasser</li> <li>▪ Grundlagenermittlung Wasserfassung</li> </ul>
26.10.-27.10.2015	Installationsarbeiten Drainagewasserfassung inkl. Messtechnik
21.12.2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Probennahme Drainagewasser</li> <li>▪ Überprüfung Messtechnik</li> <li>▪ Aufmaß Außenflächen</li> </ul>
22.02.2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einbau Temperaturfühler Ostdrainage Südportal</li> <li>▪ Auslesen Datenlogger</li> <li>▪ Dokumentation Ablagerungen in Drainagen</li> </ul>

Tabelle 2: Ortsbegehung Rennsteig

Während der Gespräche wurden mehrere potentielle Nutzungsmöglichkeiten identifiziert, vorhandenes Plan- und Datenmaterial gesichtet und die grundsätzliche Umsetzbarkeit einer eventuellen Pilotanlage diskutiert.

Ein detailliertes Protokoll der Gespräche am Tunnel Rennsteig bietet die Anlage I – Protokolle Ortsbegehung Rennsteig.

#### 1.1.2 Grenztunnel Füssen

Der Grenztunnel Füssen verbindet mit seinen 1271 m die Bundesautobahn BAB A7 bei Füssen mit der österreichischen Fernpassroute B 179. Die im Gegenverkehr befahrene Tunnelröhre befindet sich zu 73% auf deutschem und zu 27% auf österreichischem Staatsgebiet. Im Zuge der Projektbearbeitung wird die Drainagewasserschüttung des Nordportals (deutsche Seite) hinsichtlich einer möglichen geothermischen Nutzung untersucht.

##### 1.1.2.1 Bauwerk

Der Grenztunnel Füssen wurde auf einer Strecke von 1.248 m in bergmännischer Bauweise und 23 m in offener Bauweise hergestellt. Der Vortrieb erfolgte durchwegs steigend von Norden nach

Süden größtenteils im Kalottenvortrieb. Das Tragwerk bildet ein an die Geologie angepasster Ausbruchsquerschnitt z.T. mit offener, z.T. mit geschlossener Sohle und zweischaligem Ausbau.

Die Entwässerung des Tunnels Füssen erfolgt getrennt über eine geschlossene Ableitung der im Tunnel anfallenden Schmutzwässer sowie über eine gemeinsame Abführung der Tragschicht- und Bergwässer sowohl aus dem Bereich des Spurtunnels, als auch aus dem Bereich des Fluchtstollens.

##### 1.1.2.2 Geologie und Hydrogeologie

Der Tunnel Füssen befindet sich in einem Gebirgszug der nördlichen Kalkalpen, die in diesem Bereich durch den wasserführenden Hauptdolomit des Burkenbichls, die sogenannten Raibler Schichten (Wechselagerung von Kalken, Dolomiten, Sandsteinen, Tonschluffsteinen) und den Wettersteinkalk des Vilser Bergs gebildet werden. Zwischen Baustation 600 und 700 m befindet sich der Tunnel im Bereich des Faulenbachtals.

##### 1.1.2.3 Klimatische Verhältnisse

Der Grenztunnel Füssen ist dem Naturraum Subalpines Jungmoränenland sowie Bayerisch-Tiroler Zwischenkalkalpen zuzuordnen und liegt wie der Tunnel Rennsteig in der Winterhärtezone 6b (siehe 1.1.1.3). Füssen liegt mit der Jahresdurchschnittstemperatur und der Niederschlagsmenge in der gemäßigten Zone. Der kälteste Monat ist der Januar mit einer Durchschnittstemperatur von  $-1,5\text{ °C}$  und einer durchschnittlichen Tageshöchsttemperatur von  $1,4\text{ °C}$ . Der wärmste Monat ist der Juli mit einer Durchschnittstemperatur von  $16,1\text{ °C}$  und einer durchschnittlichen Tiefsttemperatur von  $11,6\text{ °C}$ .

##### 1.1.2.4 Ortsbegehungen

Am Grenztunnel Füssen wurden im Rahmen des Projektes 3 Ortsbegehungen durchgeführt.

Datum	Zweck
24.09.2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abstimmungsgespräch mit Tunnelbetreiber</li> <li>▪ Probennahme Drainagewasser</li> <li>▪ Einbau Temperaturmessgeber</li> </ul>
13.01.2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Probennahme Drainagewasser</li> <li>▪ Überprüfung Messtechnik</li> <li>▪ Aufmaß Außenflächen</li> </ul>
13.05.2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abstimmung Klimatisierung Technikraum</li> <li>▪ Fotodokumentation Hindernisse Freifläche</li> </ul>

Tabelle 3: Ortsbegehung Füssen

Während der Gespräche wurden verschiedene potentielle Nutzungsmöglichkeiten diskutiert, vorhandenes Plan- und Datenmaterial gesichtet und die grundsätzliche Umsetzbarkeit einer eventuellen Pilotanlage thematisiert. Die Grundhaltung des Tunnelbetreibers zu einer sinnvollen Umsetzung einer Pilotanlage am Tunnel Füssen ist als sehr offen und positiv zu bewerten.

Ein detailliertes Protokoll der Gespräche am Tunnel Füssen bietet die Anlage II – Protokolle Ortsbegehung Füssen.

## 2 Grundlagenermittlung

Die Grundlagenermittlung gemäß [35] gibt die Entscheidungsgrundlage für die Vorplanung, die zeitlich und inhaltlich im Anschluss an diese erfolgt. Im Zuge dieser Projektphase ist das geothermisch nutzbare Potential der 3 Tunnelportale für den Heiz- bzw. den Kühlbetrieb auf der Basis von Messungen vor Ort zu ermitteln. Des Weiteren werden Konzepte zur Nutzung der geothermischen Energie an den einzelnen Tunnelportalen entwickelt und die chemisch-physikalische Eignung des Tunneldrainagewassers zur thermischen Nutzung bewertet.

### 2.1.1 Grundlagen

Unter dem geothermischen Potential wird im Folgenden der Wärmestrom bezeichnet, der gemäß dem folgenden Zusammenhang am Übergabepunkt des Drainagewassers in die Vorflut zur Verfügung steht:

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot \Delta \vartheta \quad (1)$$

Dabei ist:

$\dot{Q}$	Wärmestrom [W]
$\dot{V}$	Drainageschüttung [m <sup>3</sup> /h]
$\rho_w \cdot c_{p,w}$	volumetrische spezifische Wärmekapazität des Wassers [kJ/(m <sup>3</sup> K)]
$\Delta \vartheta$	Temperaturspreizung des Wassers nach thermischer Energieextraktion [K]

Zur Ermittlung des jeweiligen geothermischen Potentials der Tunnelportale sind zunächst die Schüttungsmengen an den entsprechenden Drainagewasseraustritten sowie die Drainagewassertemperatur zu ermitteln, die über den Jahrgang als gesicherte Minimal-/Maximalwerte für die thermische Nutzung zur Verfügung stehen. Hierzu wurden entsprechende Messsysteme an den Tunnelportalen installiert und betrieben.

Des Weiteren ist die mögliche bzw. erreichbare Temperaturspreizung während der Energieextraktion festzulegen. Hierzu sind die nachfolgenden Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Übliche Temperaturspreizungen von Wärmepumpenanlagen liegen zwischen 3 – 4 K.
- Die minimale Übergabetemperatur in die Vorflut beträgt in Anlehnung an [36] 5 °C. Im Rahmen des Projektes erfolgt die Übergabe in ein Fließgewässer, so dass der hier genannte Grenzwert konservativ zu bewerten ist.
- Die maximale Übergabetemperatur in die Vorflut beträgt in Anlehnung an [36] 20 °C. Im Rahmen des Projektes erfolgt die Übergabe in ein Fließgewässer, so dass der hier genannte Grenzwert konservativ zu bewerten ist.
- Die Mindesttemperatur im Sinne des Einfrier-schutzes im Bereich der Wärmepumpe beträgt gemäß [37] 4 °C.
- In Kapitel 4.8 werden ergänzende Angaben zu Einleittemperaturgrenzwerten in besonders schützenswerte Naturräume gemacht.

Zur Ermittlung des geothermischen Potentials werden folgende Randbedingungen festgelegt:

- Minimale Einleittemperatur 5 °C
- Maximale Einleittemperatur 20 °C
- Maximale Temperaturspreizung (bei Wärmepumpenbetrieb) 4K

In den nachfolgenden Kapiteln werden zunächst die Planungen und Arbeiten zur Drainagewasserrfassung beschrieben. Im Anschluss erfolgen die Darstellung der bisherigen Messergebnisse sowie die Abschätzung des derzeit bekannten geothermischen Potentials.

### 2.1.2 Tunnel Rennsteig

#### 2.1.2.1 Drainagewasserrfassung

Am Tunnel Rennsteig sind im Rahmen des Projektes die Drainagewässer des Nord- und Südportales zu fassen und hinsichtlich ihrer Schüttung und Temperatur messtechnisch zu erfassen.

Die Drainagewässer werden sowohl auf der Nord- als auch auf der Südseite aus den Ulmendrainagen kommend über Rohrleitungen und Sammel-schächte in die Vorflut geleitet. Die Übergabe findet auf der Südseite in den verdolten Spitzelbach, auf der Nordseite in ein eigens für die Tunnelbau-maßnahme angelegtes Bachsystem statt.

Als Planungsgrundlage wurde vor dem Hintergrund einer möglichst minimalen Beeinflussung

des Tunnelbetriebs und mit Blick auf eine spätere Anordnung der erforderlichen Installationen einer Pilotanlage die Fassung der Drainage außerhalb des eigentlichen Tunnel- bzw. Fahrbahnbereichs gewählt. Die Übergabestellen der Drainagewässer an die Vorflut wurden im Zuge des Baus des Tunnels Rennsteig als Auslässe ausgebildet, bei denen das Wasser in allen Bereichen frei aus einem Kreisprofilgerinne austritt. Des Weiteren zeigen alle Auslässe eine ausreichend lange Freispiegelstrecke vor dem Austritt, so dass die Anordnung von THOMSON-Messwehren möglich war. Die Messdatenerfassung des Wasserstandes vor dem Messwehr erfolgt über einen kapazitiven Druckgeber, die Temperaturmessung über einen Temperatursensor. Beide Sensoren sind in einer Duo-Parametersonde untergebracht und zeichnen entsprechende Messwerte in einem 15-Minutenintervall auf. Die Daten werden innerhalb der Sonde auf einem Datenlogger gespeichert, der manuell auszulesen ist.

Am Nordportal erfolgt die kontinuierliche Datenerfassung der westlichen Ulmendrainage, am Südportal die der West- und Ostulmendrainage. Die Schüttung der Ostulme am Nordportal erfolgt im Zuge von Ortsterminen durch händisches Auslitern.

Eine Übersicht der durchgeführten Installationen sowie eine technische Beschreibung der Messtechnik und deren Eichung ist der Anlage III – Drainagewasserfassung Rennsteig zu entnehmen.

#### 2.1.2.2 Messergebnisse

Die bisherigen Messergebnisse zur Beurteilung des geothermischen Potentials am Tunnel Rennsteig bilden einen Zeitraum von ca. 11 Monaten ab (27.10.2015 bis 26.09.2016). Die Ganglinien der Abstrommenge sowie der Wassertemperatur sind der Anlage III – Drainagewasserfassung Rennsteig zu entnehmen.

Zusammenfassend wird Folgendes festgehalten:

##### Nordportal

- Die maximale Drainagewassermenge der Westulmendrainage beträgt bis dato ~60 l/s.
- Die minimale Drainagewassermenge der Westulmendrainage beträgt bis dato 13,6 l/s.
- Die minimale Wassertemperatur der Westulmendrainage beträgt bis dato 6,8 °C. Ein Trend ist aus den aktuellen Messungen nicht ableitbar.

- Die maximale Wassertemperatur der Westulmendrainage beträgt bis dato 9,6 °C.
- Der Drainagewasseraustritt der östlichen Ulmenentwässerung befindet sich niveaugleich mit dem anschließenden Gewässerlauf (siehe Abbildung 2). Die vorhandenen geometrischen Verhältnisse lassen keine permanente Installation eines Thomson-Messwehres zu, ein freier, hinterlüfteter Drainagewasserüberfall kann nicht ausgebildet werden. Darüber hinaus lässt die existierende Rohrleitung keine ausreichende Beruhigung des Drainagewassers zur direkten oder indirekten Durchflussmessung zu. Im Zuge der Grundlagenermittlung wurde mit Hilfe einer temporären Verrohrung und durch händisches Auslitern versucht, die Drainagewasserabstrommenge zu erfassen.



Abbildung 2: Temporäres Messwehr Rennsteig Nord

Die Messungen zur Wassermenge sowie zur Wassertemperatur der Drainage der Ostulme können auf Basis der bis dato durchgeführten Messungen noch nicht abschließend beurteilt werden. Es wird die Errichtung eines qualifizierten Messwehres stromabwärts empfohlen. Für die Beurteilung des geothermischen Potentials am Nordportal des Tunnels Rennsteig wird die Schüttung der östlichen Ulme vernachlässigt.

##### Südportal

- Die maximale Drainagewassermenge der West- und Ostulmendrainage kann aufgrund der Ausbildung des Messwehres nicht exakt ermittelt werden. Ab eines Abflusses > 17,4 l/s erfolgt keine ausreichend genaue Messung mehr.
- Die minimale Gesamtdrainagewassermenge am Südportal beträgt bis dato 5,6 l/s.

- Die minimale Drainagewassertemperatur am Südportal beträgt bis dato 7,0 °C (Temperatur der Ostulmendrainage). Ein Trend ist aus den bisherigen Messungen nicht ableitbar.
- Die maximale Drainagewassertemperatur am Südportal beträgt bis dato 10,4 °C (Temperatur der Ost- und Westulmendrainage).

### 2.1.2.3 Geothermisches Potential

Das im Folgenden beschriebene geothermische Potential berücksichtigt die bis zum Zeitpunkt der Erstellung des 1. Zwischenberichtes ausgewerteten Messdaten (27.10.2015 bis 12.12.2015). Die vorliegenden Messungen mit Ende September 2016 liefern geringfügig andere Werte, die ein geringfügig geringeres geothermisches Potential erwarten lassen. Im Rahmen dieser Planungsphase wird eine worst-case-Annahme zu Grunde gelegt, die jeweils die minimale Abstrommenge der Summe der Ost- und Westulmendrainage mit der bis dato gemessenen Höchst- bzw. Tiefsttemperatur kombiniert. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Grundlagenermittlung darauf verzichtet, das geothermische Potential mit den geringfügig geänderten Messdaten nochmals zu berechnen. Das nutzbare geothermische Potential wird sich über den Jahresverlauf höher als prognostiziert einstellen, da der geringste Abfluss nicht mit den extremalen Drainagewassertemperaturen zusammenfallen wird.

#### Nordportal

$$\dot{V}_{\min} = 13\text{l/s} = 0,013 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\mathcal{G}_{\text{Drain},\min} = 7,7^\circ\text{C}$$

$$\mathcal{G}_{\text{Drain},\max} = 9,2^\circ\text{C}$$

Das geothermische Potential ermittelt sich auf Basis der folgenden Formel:

$$\dot{Q}_{\text{GEO}} = \dot{V} \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot \Delta\mathcal{G} \quad (2)$$

mit:

$$\rho_w = \rho_{\text{Wasser},10^\circ\text{C}} = 999,7 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p,w} = c_{p,\text{Wasser},10^\circ\text{C}} = 4,195 \text{ kJ/kg K}$$

$$\rho_w \cdot c_{p,w} = 4194 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$$

$$\Delta\mathcal{G}_{\text{Heiz}} = \mathcal{G}_{\text{Drain},\min} - \mathcal{G}_{\min,\text{Einleitung}}$$

$$\Delta\mathcal{G}_{\text{Heiz}} = \mathcal{G}_{\text{Drain},\max} - \mathcal{G}_{\max,\text{Einleitung}}$$

- Geothermisches Potential für den Heizfall gemäß 2.1.1:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{GEO,Heiz}} &= 0,013 \cdot 4194 \cdot (7,7 - 5,0) \\ &= \underline{\underline{147 \text{ kW}}} \end{aligned}$$

- Geothermisches Potential für den Kühlfall gemäß 2.1.1:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{GEO,Kühl}} &= 0,013 \cdot 4194 \cdot (9,2 - 20) \\ &= \underline{\underline{-589 \text{ kW}}} \end{aligned}$$

#### Südportal

$$\dot{V}_{\min} = 6,3\text{l/s} = 0,0063 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\mathcal{G}_{\text{Drain},\min} = 7,0^\circ\text{C}$$

$$\mathcal{G}_{\text{Drain},\max} = 11,4^\circ\text{C}$$

- Geothermisches Potential für den Heizfall gemäß 2.1.1:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{GEO,Heiz}} &= 0,0063 \cdot 4194 \cdot (7,0 - 5,0) \\ &= \underline{\underline{53 \text{ kW}}} \end{aligned}$$

- Geothermisches Potential für den Kühlfall gemäß 2.1.1:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{GEO,Kühl}} &= 0,0063 \cdot 4194 \cdot (11,4 - 20) \\ &= \underline{\underline{-227 \text{ kW}}} \end{aligned}$$

### 2.1.2.4 Ergänzende Angaben zur Messung

Die Installation der THOMSON-Messwehre am Tunnel Rennsteig erfolgte bei der zweiten Ortsbegehung am 27.10.2015 auf Grundlage der ersten Ortsbegehung am 10.09.2015 und den Voruntersuchungen gemäß [8]. Am 21.12.2015, 22.02.2016 und 23.02.2016 wurden die automatisch erfassten Daten vor Ort ausgelesen. Ergänzend wurden händische Ausliterungen vorgenommen, um die automatische Messdatenerfassung zu überprüfen bzw. zu kalibrieren.

Die Auswertung der Messdaten ergab, dass die Kapazität der Messwehre zu großen Teilen deutlich überschritten ist. Dies wurde durch Sichtung der Wehre am 21.12.2015, sowie am 22.02.2016 bestätigt (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Überströmtes Messwehr DN 500 am Südportal

Werden die Wasserstandshöhen von 16 cm am Südportal und 18,5 cm am Nordportal überschritten, ist eine Rückrechnung der Abstrommenge über die gemessene Wasserstandshöhe nur unter Berücksichtigung der neuen Abflussgeometrie möglich. Hier kann auf ein sogenanntes „compound weir“ zurückgegriffen werden, das sich aus einem dreieckigen und zwei rechteckigen Überfällen zusammensetzt:

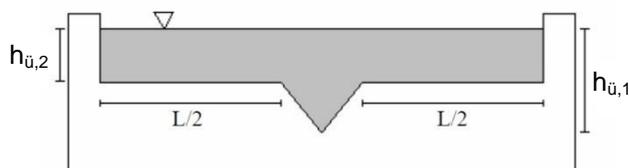


Abbildung 4: Geometrie compound weir

$$Q_{\text{compound}} = \frac{8}{15} \cdot \mu_a \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{\bar{u},1}^{5/2} - \frac{8}{15} \cdot \mu_b \cdot 1 \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{\bar{u},2}^{5/2} + \frac{2}{3} \cdot \mu_c \cdot 2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \sqrt{2g} \cdot h_{\bar{u},2}^{3/2} \quad (3)$$

Dabei sind  $\mu_a$ ,  $\mu_b$ ,  $\mu_c$  die Überfallbeiwerte,  $h_{\bar{u},1}$  ist der Wasserüberfall über die komplette Wehrhöhe,  $h_{\bar{u},2}$  ist der Wasserüberfall ab Unterkante des Rechteckabschnittes und  $L/2$  die Breite links bzw. rechts der Unterkante des Rechtecküberfalls.

Für das Messwehr am Südportal ist ergänzend zu erwähnen, dass ab einer Gesamtüberfallhöhe  $h_{\bar{u},1} > 17,4$  cm der Wasserspiegel die oberhalb des Messwehres angeordnete Rohrleitung DN 150 berührt (siehe Abbildung 3). Ab diesem Zeitpunkt bildet auch das compound weir die Abflusssituation nicht mehr zutreffend ab, so dass für Abflusshöhen  $> 17,4$  cm keine Abstrommenge ausgewertet werden kann. Darüber hinaus sind bei der Er-

mittlung der Drainagewasserabstrommengen folgende Einschränkungen zu berücksichtigen:

- Das Wasser über die gesamte Wehrbreite löst sich nicht komplett vom Wehr ab, da in diesem Bereich kein scharfkantiger Überfall vorhanden ist. Dies kann zu einem höheren Abfluss führen.
- In der Abbildung 3 ist zu erkennen, dass die Schiene für den Messgeber direkt auf der Rechteckwehrunterkante befestigt ist. Da die vorgenannten Kriterien den Abfluss am Südportal unterschätzen, wird diese Schiene vernachlässigt.

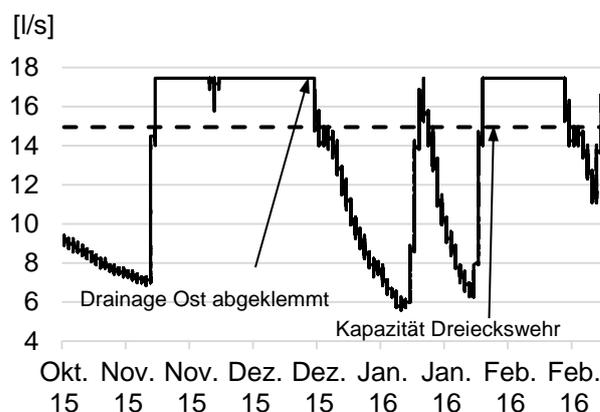


Abbildung 5: Drainagewasserabstrom Rennsteig Süd

Die Abbildung 5 zeigt die berechnete Drainagewasserabstrommenge für das Messwehr am Südportal.

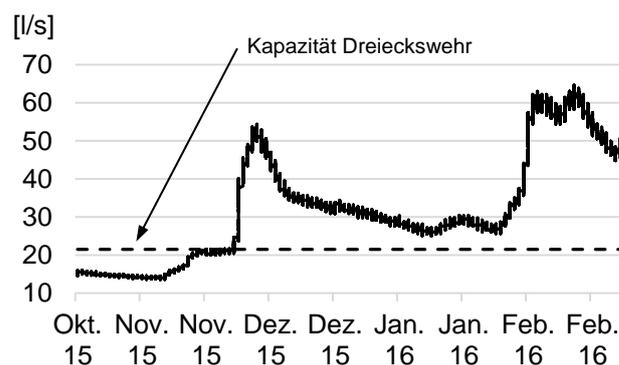


Abbildung 6: Drainagewasserabstrom Rennsteig Nord

Für den Tunnel Rennsteig stehen im Gegensatz zum Tunnel Füssen kontinuierliche Messdaten der Drainagewasserabstrommenge und Drainagewassertemperatur lediglich für den Zeitraum seit Oktober 2015 zu Verfügung. Eine gesicherte langfristige Prognose des zur Verfügung stehenden geothermischen Potentials ist auf dieser Basis nicht

möglich. Aus diesem Grund wurden die zur Verfügung stehenden Klimadaten der Wetterstation Schmücke (vgl. Kapitel 3.2.2.8) den Messergebnissen gegenübergestellt.

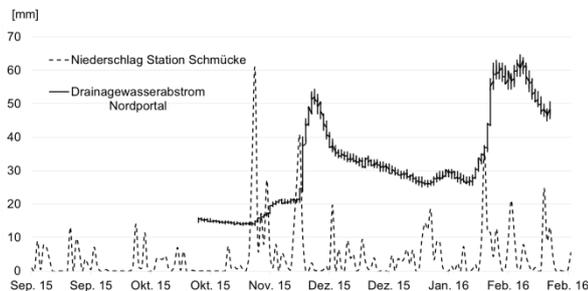


Abbildung 7: Gegenüberstellung Niederschlagsdaten und Drainagewasserabstrommenge Rennsteig Nord

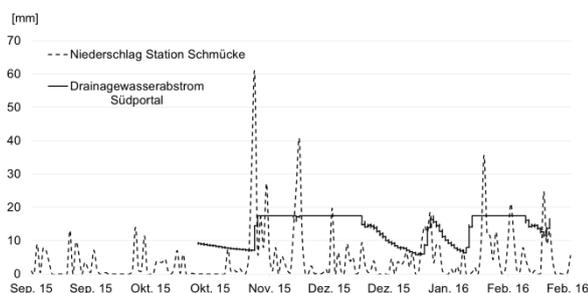


Abbildung 8: Gegenüberstellung Niederschlagsdaten und Drainagewasserabstrommenge Rennsteig Süd

Sowohl für die Drainagewasserabstrommengen für das Nord- als auch das Südportal lassen sich keine eindeutigen Abhängigkeiten zum gemessenen Niederschlag an der Station Schmücke erkennen. Für einige Regenereignisse lassen sich unter Umständen gewisse Zusammenhänge erkennen (z.B. zu Beginn Februar 2016), allerdings treten auch genauso Regenereignisse auf, die sich im Drainagewasserabstrom nicht widerspiegeln. Des Weiteren wurden die an der Station Schmücke gemessenen Lufttemperaturen den Temperaturen des Drainagewassers am Nord- sowie am Südportal gegenübergestellt. Die Abbildung 9 zeigt exemplarisch die Gegenüberstellung der Lufttemperaturen gemessen an der Station Schmücke sowie die gemessenen Drainagewassertemperaturen am Nordportal des Tunnels Rennsteig für den Zeitraum Januar 2015 (Lufttemperatur) bis Februar 2016 (Luft- und Drainagewassertemperatur). Dargestellt sind jeweils Monatsmittelwerte. In Abbildung 9 sind die Luft- bzw. Drainagewassertemperaturen auf unterschiedlich skalierten Ordinatenachsen dargestellt. Durch diese Art der verzerrten Darstellung lässt unter Umständen ein gedämpfter und phasenverschobener Verlauf der Drainagewassertemperatur gegenüber der Lufttemperatur erkennen. Zur Bestätigung dieser Annahme sind

weitere Beobachtungen der Drainagewassertemperatur erforderlich.

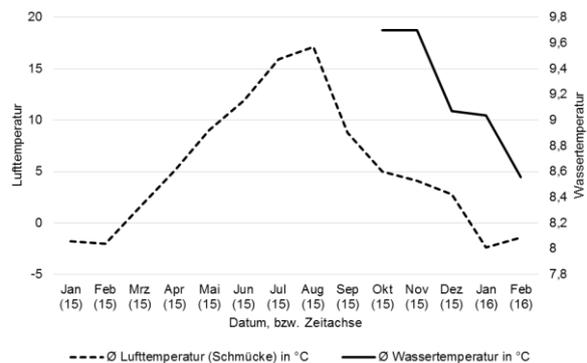


Abbildung 9: Gegenüberstellung Lufttemperatur Station Schmücke / Drainagewassertemperatur Rennsteig Nord

Die aktuellen Messergebnisse lassen derzeit noch keine gesicherten Prognosen auf zukünftige Drainagewasserschüttungsmengen und Drainagewassertemperaturen zu.

## 2.1.3 Grenztunnel Füssen

### 2.1.3.1 Drainagewasserfassung

Für das Nordportal des Grenztunnels Füssen wurde im Zuge der Planfeststellung die Errichtung und der Betrieb von THOMSON-Messwehren zur Erfassung der Drainagewasserschüttungsmengen gefordert. Diese sind in Schächten seitlich der Fahrbahn im Bereich des Tunnelportals angeordnet. So werden am Grenztunnel Füssen die Abstrommengen der Ost- und Westulme bereits seit Beginn des Betriebs des Tunnels kontinuierlich aufgezeichnet. Im Zuge des Projektes wurde am Messwehr der Westulme ein Temperatursensor installiert, der die Wassertemperatur in einem 3-Minutenintervall misst und auf einen internen Datenlogger schreibt. Die Messdaten wurden im Zuge von Ortsbegehungen händisch ausgelesen. Durch den Tunnelbetreiber wurde am 20.11.2015 sowohl in der westlichen, als auch der östlichen Drainagewasserfassung eine automatische Temperaturdatenerfassung installiert.

Die Anlage IV – Drainagewasserfassung Füssen gibt eine Übersicht der ursprünglichen und nachträglich angeordneten Installationen.

### 2.1.3.2 Messergebnisse

Die Beurteilung des geothermischen Potentials erfolgt auf der Basis der Kenntnis über eine anfallende Drainagewasserschüttungsmenge sowie die zugehörige Drainagewassertemperatur. Da am Nordportal des Grenztunnels Füssen die Temperaturmessung des Drainagewassers erst ab dem 24.09.2015 erfolgte, bilden die bisherigen Messer-

gebnisse strenggenommen einen Beurteilungszeitraum von ca. 13,5 Monaten ab. Darüber hinaus liefern die vorhandenen Langzeitmessungen (siehe auch [8]) der Schüttungsmenge eine gesicherte Prognose der zu erwartenden Schüttungsmengen, die sich sowohl für die West- wie auch die Ostulmendrainage als äußerst konstant zeigen. Die Ganglinien der Abstrommenge sowie der Wassertemperatur sind der Anlage IV – Drainagewasserauffassung Füssen zu entnehmen. Zusammenfassend wird Folgendes festgehalten:

- Die maximale Drainagewassermenge der Westulmendrainage beträgt bis dato ~20,0 l/s.
- Die minimale Drainagewassermenge der Westulmendrainage beträgt bis dato 10,0 l/s.
- Die minimale Wassertemperatur der Westulmendrainage beträgt bis dato 7,8 °C.
- Die maximale Wassertemperatur der Westulmendrainage beträgt bis dato 11,6 °C. Hier wurde zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht prognostiziert, welche Temperatur das Drainagewasser maximal annehmen kann.
- Die maximale Drainagewassermenge der Ostulmendrainage beträgt bis dato 2,5 l/s.
- Die minimale Drainagewassermenge der Ostulmendrainage beträgt bis dato 1,0 l/s.
- Die minimale Wassertemperatur der Ostulmendrainage beträgt bis dato 7,6 °C.
- Die maximale Wassertemperatur der Ostulmendrainage beträgt bis dato 12,1 °C. Hier kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht prognostiziert werden, welche Temperatur das Drainagewasser maximal annehmen kann.

### 2.1.3.3 Geothermisches Potential

Das im Folgenden beschriebene geothermische Potential berücksichtigt die bis zum Zeitpunkt des 1. Zwischenberichtes (11.02.2016) erhobenen Messdaten. Die vorliegenden Messungen mit Ende Oktober 2016 liefern geringfügig andere Werte, die ein geringfügig geringeres geothermisches Potential erwarten lassen. Die zur Verfügung stehenden Messdaten zur Schüttungsmenge der Ost- und Westulmendrainage lassen auf eine kontinuierlich gleichbleibende Drainagewasserabstrommenge schließen. Die Entwicklung der Drainagewassertemperaturen zeigt auf Basis der bisher vorliegenden Messungen eine maximale Temperaturspreizung von ca. 3,8°C (Drainage West), was die für Abschätzung des geothermischen Potentials eine

lediglich geringe Streuung möglicher Entzugsleistungen hervorruft. Des Weiteren wird dieser Planungsphase eine worst-case Annahme zu Grunde gelegt, die jeweils die minimale Abstrommenge der Summe der Ost- und Westulmendrainage mit der bis dato gemessenen Höchst- bzw. Tiefsttemperatur kombiniert. aufgrund der vorgenannten Randbedingungen und Annahmen kann das nachfolgend zusammengefasste geothermische Potential am Nordportal des Grenztunnels Füssen als abgesichert betrachtet werden.

$$\dot{V}_{\min} = 10,0\text{l/s} + 1,0\text{l/s} = 11\text{l/s} = 0,011 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$g_{\text{Drain,min}} = 8,3^\circ\text{C}$$

$$g_{\text{Drain,max}} = 10,5^\circ\text{C}$$

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des geothermischen Potentials ist dem Kapitel 2.1.2.3 zu entnehmen.

- Geothermisches Potential für den Heizfall gemäß 2.1.1:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{GEO,Heiz}} &= 0,011 \cdot 4194 \cdot (8,3 - 5,0) \\ &= \underline{\underline{152\text{kW}}} \end{aligned}$$

- Geothermisches Potential für den Kühlfall gemäß 2.1.1:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{GEO,Kühl}} &= 0,011 \cdot 4194 \cdot (10,5 - 20) \\ &= \underline{\underline{-438\text{kW}}} \end{aligned}$$

## 2.2 Laboruntersuchungen

An den Tunnelportalen Rennsteig Nord und Süd sowie am Nordportal des Tunnels Füssen wurden im Rahmen der Grundlagenermittlung jeweils 2 Wasserproben entnommen und labortechnisch untersucht.

### 2.2.1 Allgemein

Die thermische Nutzung des Tunnelrainagewassers setzt einen hierfür geeigneten Grundwasserchemismus voraus. Bei der direkten Wassernutzung erfährt das Wasser Druck- und Temperaturänderungen. Hierdurch kann es physikochemisch verändert und mikrobiologisch beeinflusst werden. Ein langfristiger störungsfreier Betrieb der Tunnelgeothermieanlage sowie der zugehörigen Komponenten wie z.B. einer Wärmepumpe kann nur sichergestellt werden, wenn folgende Störeinflüsse ausgeschlossen werden können:

- **Korrosion**  
Die hydrochemische Zusammensetzung des Wassers kann Korrosionsprozesse für Bauteile aus Beton und Eisen hervorrufen.
- **Verockerung**  
Bei sauerstoffarmen Wässern mit niedrigem Redoxpotential können bei Vorhandensein von im Wasser gelösten Eisen und Mangan Verockerungen auftreten.
- **Kalkausfällungen**  
Kalkausfällungen spielen in dem hier zu erwartenden Temperaturbereich zwischen 4 °C und 13 °C (vgl. 2.1.1) keine Rolle, so lange das Lösungsgleichgewicht nicht geändert wird.
- **Absetzbare Stoffe - Versandung**  
Eine generelle Verunreinigung des Tunneldrainagewassers mit absetzbaren Stoffen >1,0 mm, besonders wenn es sich hierbei um organische Stoffe handelt, kann leicht zu Schäden führen.
- **Verschleimung**  
Durch erhöhte Mengen an Stickstoffverbindungen oder organischen Substanzen im Tunneldrainagewasser wird ein erhöhtes Wachstum von Pilzen und Bakterien hervorgerufen, das zu einer Verschleimung der Anlagentechnik führen kann.
- **Aluminiumausfällungen**  
Für den Fall der Vermischung von Tunneldrainagewässern mit unterschiedlichen pH-Werten, können Aluminiumverbindungen ausfallen oder sich an Anlagenteilen ablagern.

Bei der Beurteilung des Drainagewasserchemismus sind die Normen DIN 50930-6, DIN 4030-1, beim Einsatz einer Wärmepumpe die Angaben der Hersteller sowie im Fall von Verunreinigungen die entsprechenden Einleitschwell- und grenzwerte der Länder und des Bundes zu berücksichtigen (siehe Anlage V – Laboruntersuchung Rennsteig und Anlage IV – Drainagewasserfassung Füssen). Darüber hinaus liefert das Arbeitsblatt 130 des DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V.) „Brunnenregenerierung“ weiterführende Hinweise zur Ursachen von potentiellen Störeinflüssen beim Betrieb von Brunnenanlagen.

In [13] werden Angaben zu einzuhaltenden Grenzwerten für Wasser/Wasser-Wärmepumpen mit geschweißtem Edelstahl-Spiralwärmetauscher und kupfergelötetem Edelstahlplattenwärmetauscher gemacht. Hiernach ist für Edelstahl-

Spiralwärmetauscher „eine Wasseranalyse bezüglich Korrosion des Verdampfers (...) nicht erforderlich, wenn die Grundwassertemperatur im Jahresmittel unter 13 °C liegt. In diesem Fall müssen nur die Grenzwerte für Eisen und Mangan eingehalten werden (Verockerung)“ [13]. Diese Grenzwerte sind mit <0,20 mg/l für Eisen und mit <0,10 mg/l für Mangan angegeben.

Für die oben genannten Plattenwärmetauscher ist auch bei mittleren Drainagewassertemperaturen unter 13 °C eine detaillierte Bewertung der Drainagewässer erforderlich, die in den nachfolgenden Kapiteln für die einzelnen Tunnelportale vorgenommen wird.

Die Protokolle der labortechnischen Untersuchung sowie eine detaillierte Bewertung der ermittelten Werte sind für den Tunnel Rennsteig der Anlage V – Laboruntersuchung Rennsteig sowie für den Tunnel Füssen der Anlage VI – Laboruntersuchung Füssen zu entnehmen. Es folgt eine Zusammenfassung der chemisch-/physikalischen Bewertung der Drainagewässer getrennt für jedes untersuchte Portal.

## 2.2.2 Tunnel Rennsteig

### 2.2.2.1 Nordportal

Am Nordportal des Tunnels Rennsteig wurden während zwei Ortsbegehungen Wasserproben des Tunneldrainagewassers genommen und labor-technisch untersucht:

1. Probennahme am 10.09.2015
2. Probennahme am 21.12.2015

Hierbei zeigt sich durchgehend ein geringer pH-Wert von 6,6 – 6,9. Diese Größenordnung wurde auch im Rahmen des Vorprojektes [8] bei der Beprobung vor Ort so festgestellt. Darüber hinaus zeigen die Werte des Hydrogencarbonats (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sowie am 10.09.2015 der Wert der freien Kohlensäure eine gewisse Korrosionsgefahr beim Einsatz eines Wärmeübertragers an. Das wesentlich zur Verockerung einer Geothermieanlage beitragende gelöste Eisen sowie Mangan sind unauffällig.

Jede Messung ist fehlerbehaftet. Die Qualität einer Wasseranalyse wird nicht zuletzt anhand des Ionenbilanzfehlers (Ladungsbilanz) beurteilt. Dieser liegt für das Nordportal des Tunnels Füssen bei 10,39% bzw. 12,72%. Dies ist eine hohe Abweichung. Welche Faktoren für die hohen Abweichungen ausschlaggebend waren, konnte auch nach Rücksprache mit dem zuständigen Labor nicht abschließend geklärt werden.

Für die weitergehende Projektierung einer Wasser-Wasser-Wärmepumpenanlage wird der Einsatz eines Edelstahlwärmeübertragers erforderlich. Darüber hinaus werden aufgrund des ermittelten pH-Wertes und bedingt durch den Umstand des hohen Ionenbilanzfehlers weitere Messungen zur Beobachtung des Drainagewasserchemismus hinsichtlich seiner Korrosionswirkung bei einer Niedrigtemperaturanlage mit und ohne Wärmepumpe, z.B. zur Eisfreihaltung, empfohlen.

#### 2.2.2.2 Südportal

Am Südportal des Tunnels Rennsteig wurden während zwei Ortsbegehungen Wasserproben des Tunnelndrainagewassers genommen und labor-technisch untersucht (Daten der Probennahme siehe Kapitel 2.2.2.1. Auffällig ist hier der Wert des Hydrogencarbonats ( $\text{HCO}_3^-$ ) sowie am 10.09.2015 der niedrige pH-Wert. Das wesentlich zur Verockerung einer Geothermieanlage beitragende gelöste Eisen sowie Mangan sind unauffällig.

Der Ionenbilanzfehler liegt am Südportal des Tunnels Rennsteig bei 5,64% (tolerabel) und 14,34%. Welche Faktoren für die hohen Abweichungen ausschlaggebend waren, konnte auch nach Rücksprache mit dem zuständigen Labor nicht abschließend geklärt werden.

Für die weitergehende Projektierung einer Wasser-Wasser-Wärmepumpenanlage können sowohl Kupfer- als auch Edelstahlwärmeübertrager eingesetzt werden. Weitere Untersuchungen des Wasserchemismus zur Eignung der Drainagewässer in Verbindung mit nachgeschalteten Wärmeübertragern werden empfohlen.

#### 2.2.3 Grenztunnel Füssen

Am Nordportal des Tunnels Füssen wurden während zwei Ortsbegehungen Wasserproben des Tunnelndrainagewassers genommen und labor-technisch untersucht.

1. Probennahme am 24.09.2015
2. Probennahme am 13.01.2016

Hierbei zeigt lediglich der Parameter der freien Kohlensäure, dass bei der Anordnung einer Wärmepumpe aus Gründen der Korrosionsgefahr ein Edelstahlwärmeübertrager zum Einsatz kommen sollte. Wässer mit einem hohen Gehalt an freier Kohlensäure zeigen eine erhöhte Aggressivität gegenüber metallischen Werkstoffen und können erhöhte Korrosionsraten hervorrufen. Dies kann zu Undichtigkeiten im Rohrleitungsnetz, Rohrleitungsbrüchen und Ablagerungen im Verteilungsnetz führen.

Die Einschränkungen durch den genannten Parameter werden im Zuge der weiteren Projektphasen entsprechend der beabsichtigten thermischen Nutzung der Tunnelndrainagewässer genauer eruiert.

Die berechneten Ionenbilanzfehler am Tunnel Füssen belaufen sich auf 0,74% bzw. 1,68% < 5% und können somit als tolerabel eingestuft werden.

Im Zuge der Ortbegehung wurde beim Zusammenfluss des Drainagewassers aus der Ost- sowie der Westulmendrainage eine gewisse Menge Geschiebe im Bereich des Kontrollschachtes festgestellt (siehe Anlage IV – Drainagewasserfassung Füssen, Abbildung 14). Für einen störungsfreien Betrieb einer eventuell zu errichtenden Geothermieanlage sollte die Herkunft des Geschiebes geklärt und bei Bedarf ein entsprechender Filter mit Sandfang eingerichtet werden.

Während der Ortbegehung am 13.05.2016 wurden in einem Übergabeschacht nahe dem Portal des Fluchtstollens Versinterungen festgestellt (siehe Anlage II – Protokolle Ortsbegehung Füssen), die auf der Basis der untersuchten Laborproben so nicht zu erwarten gewesen waren. Nach Rücksprache mit dem Tunnelbetreiber und weiteren Nachforschungen (siehe [8]) stellte sich heraus, dass am Tunnel Füssen in den Ulmendrainagen Maßnahmen chemischer Art getroffen werden (Härtestabilisation), um die Versinterungen der Tunnelndrainage zu reduzieren. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zeigen den Wasserchemismus nach der erfolgten Behandlung. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird davon ausgegangen, dass auch für den Betrieb einer geothermischen Anlage am Tunnelportal Füssen eine Behandlung des Tunnelndrainagewassers fortgesetzt wird und entsprechende Härtestabilisatoren unverändert zum Einsatz kommen. Diese Annahme ist vor der Inbetriebnahme einer Anlage am Nordportal des Tunnels Füssen zu bestätigen.

## 2.3 Nutzungsvarianten

### 2.3.1 Grundlagen

Im Zuge der Grundlagenermittlung des Projektes „Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwerken“ sind für die Tunnelportale Rennsteig Nord und Süd sowie für den Tunnel Füssen Nord mögliche Nutzungsvarianten/-konzepte zu entwickeln und sowohl energetisch als auch monetär hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Ausführbarkeit zu bewerten.

Hierzu werden im Kapitel 2.3.2 potentielle Nutzungen geothermischer Energie beschrieben, die für

alle Standorte allgemeingültig sind. Im Anschluss daran erfolgt in den Kapiteln 2.3.3 und 2.3.4 getrennt für jedes Portal eine Vorstellung grundsätzlicher Nutzungsmöglichkeiten der geothermischen Energie an dem entsprechenden Standort.

In der Anlage VII – Potentielle Nutzungen Rennsteig und der Anlage VIII – Potentielle Nutzungen Füssen werden die potentiellen Nutzungen ausschließlich hinsichtlich ihrer energetischen Bilanz beurteilt. Hierzu wird der erforderliche Wärmeenergiebedarf dem geothermischen Potential gemäß Kapitel 2.1.2.3 und 2.1.3.3 gegenübergestellt. Durch dieses Vorgehen können grundsätzlich denkbare Nutzungen gezielt gefiltert werden.

Eine Zusammenschau der potentiellen Nutzungen für die jeweiligen Tunnelportale gibt die Anlage IX – Entscheidungsmatrix. Hier werden neben der Bewertung des geothermischen Potentials folgende weitere Bewertungskriterien auf die untersuchten Nutzungskonzepte angewendet:

- Größe des geothermischen Potentials

Bewertet wird die Größe des geothermischen Potentials in Bezug auf die erforderliche Wärmeenergie der potentiellen Nutzung.

3	Wärmebedarf kann voll gedeckt werden
2	Wärmebedarf nur durch Einsatz einer weiteren Wärmequelle abdeckbar
1	Wärmebedarf nicht sinnvoll abzudecken

- Aufwand der Leitungsführung zur potentiellen Nutzung

Bewertet wird der Aufwand zur Herstellung der Versorgungsleitung zur potentiellen Nutzung (Fernwärmeleitung). Hierbei werden im Rahmen der Grundlagenermittlung keine Herstellungskosten ermittelt, sondern lediglich die Leitungslänge, ggf. erforderliche bauliche Sonderbaumaßnahmen sowie die Beanspruchung externer Flächen bewertet.

3	Leitungsführung auf tunneleigenem Grund ohne überdurchschnittlichen Tiefbauaufwand möglich
2	nicht vergeben
1	Erhebliche Leitungslänge erforderlich, Beanspruchung fremden Grundes

- Aufwand für weitere Installationen

Unter weiteren Installationen werden sämtliche Anlagenteile verstanden, die aus dem zur Verfügung stehenden geothermischen

Potential nutzbare Wärme wandeln. Darüber hinaus werden hier ggf. weitere technische Anlagenteile berücksichtigt, die einmalig für diese potentielle Nutzung sind.

3	Lediglich Pumpleistung zur Fluidzirkulation erforderlich
2	Einsatz einer klassischen Wasser/Wasser Wärmepumpe
1	Bivalente Wärmepumpen, Wasseraufbereitung usw.

- Einbindung externer Personen / Institutionen

Die Einbindung von Personen außerhalb des Tunnelbetreiberkreises erfordert sowohl im Zuge der Projektierung als auch während des Betriebs einer Tunnelgeothermieanlage ein hohes Maß an Aufklärungsarbeit und birgt die Gefahr von nur aufwändig zu überwindenden Hürden. Dieses Bewertungskriterium berücksichtigt sowohl den Endenergienutzer als auch Behörden zur Genehmigung externer Belange. Die zeitlichen und monetären Auswirkungen auf die Tunnelgeothermieanlage sind nur schwer zu kalkulieren.

3	keine tunnelexternen Personen involviert
2	Geringer externer Kreis (z.B. lediglich ein Nutzer), keine externe Behörde
1	Großer externer Personenkreis, Behördliche Genehmigungen erforderlich

- Öffentlichkeitswirksamkeit

Unter dem Punkt Öffentlichkeitswirksamkeit wird die sichtbare Außenwirkung der Geothermieanlage bewertet.

3	Hohe Sichtbarkeit (großer involvierter Personenkreis, visuell erkennbar)
2	Sichtbarkeit kann mit geringen Mitteln erreicht werden
1	Ohne gezielte Öffentlichkeitsarbeit nicht sichtbar

- Betriebssicherheit

Im Rahmen der Betriebssicherheit wird bewertet, inwieweit ein möglicher Ausfall der Geothermieanlage die Nutzung nachhaltig beeinträchtigt.

3	Ausfall der Anlage kann durch bestehende Strukturen leicht abgefangen werden
2	Nutzung eingeschränkt möglich
1	Nutzung nicht mehr möglich, erhebliche Maßnahmen erforderlich

Die den Farben zugeordneten Zahlen 1 -3 geben die Gewichtung der einzelnen Bewertungen wieder. Jedes Bewertungskriterium erhält darüber hinaus einen Vorfaktor, über den die Gewichtung des Bewertungskriteriums gesteuert wird. Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurde eine gleichwertige Gewichtung aller Bewertungskriterien berücksichtigt.

Weitere Angaben zur Bewertung der einzelnen potentiellen Nutzung sind der Anlage IX – Entscheidungsmatrix zu entnehmen.

### 2.3.2 Potentielle Nutzung

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die potentiellen Nutzungsmöglichkeiten der extrahierten Energie als Grundlage für die in den Kapiteln 2.3.3 und 2.3.4 beschriebenen Detailkonzepte in Grundzügen. Vertiefte Angaben zur Energiebedarfsermittlung und zum generellen Vorgehen bei der Auslegung entsprechender Anlagen werden dann im Kapitel 0 „Vorplanung“ gemacht.

#### 2.3.2.1 Eis-/Schneefreihaltung

Für die Auslegung einer Flächenheizung zur Eis- und Schneefreihaltung ist im Allgemeinen die Kenntnis über den Wärmeleistungsbedarf und den Jahresenergiebedarf erforderlich. Hierzu sind die Schneeverhältnisse und ihre Verteilung, sowie Ablation zu beschreiben.

Die Grundlage der Schneeverhältnisse für die deutsche Fläche bildet der hydrologische Atlas für Deutschland (HAD) [10] über die Karte des mittleren Andauerhaltens der Schneedecke sowie über die Karte des mittleren maximalen Wasseräquivalents einer Schneedecke.

Der erforderliche Energiebedarf zur Sicherstellung der Eis- und Schneefreiheit von Freiflächen ist unter der Berücksichtigung von ungünstigen Temperaturrandbedingungen zu ermitteln:

- Eis- und Schneefreihaltung hat während der Nacht zu erfolgen → kein kurzweiliger Strahlungseintrag (Sonne) vorhanden
- Es findet kein Niederschlag statt → Wärmestrom durch Niederschlag wird vernachlässigt

Demzufolge sind die folgende Einstrahlungen und Wärmeströme zu bilanzieren:

- Langwellige Strahlungsbilanz
- Wärmestrom zum Schneeschmelzen
- Konvektiver Wärmestrom an der Geländeoberfläche

Die Anlage zur Eis- und Schneefreihaltung kann in den Wintermonaten kontinuierlich betrieben werden, d.h. das Tunnel Drainagewasser zirkuliert in den Monaten, in denen mit Schnee und Eis zu rechnen ist, ununterbrochen durch das Rohrleitungssystem unterhalb der Freifläche, oder die Anlage wird auf der Basis von geeigneten Prognoseverfahren mit entsprechender Vorlaufzeit zum erwarteten Schnee- oder Glatteisereignis angefahren. Die Art des Betriebs hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auslegung der Anlage und sollte im Vorfeld, vor allem auf der Basis der gewählten Energieform zur Bereitstellung der Pumpleistung getroffen werden.

Bei der Ausbildung einer Anlage zur Schnee- und Eisfreihaltung können folgende Bauformen unterschieden werden:

- Besprühung der Freifläche

Das Verfahren zur Besprühung von Freiflächen mit Grundwasser wird in Japan seit 1961 angewendet. Anzustrebende Wassertemperaturen zum Einsatz dieser Technologie liegen zwischen 8°C bis 18°C. Die erforderliche Wassermenge je m<sup>2</sup> freizuhaltende Fläche kann für eine Neuschneemenge von 10 cm pro Tag und eine Temperaturspreizung von 10 K näherungsweise zu 0,1 m<sup>3</sup>/min = 100 l/min berechnet werden.



Abbildung 10: Shosetsu (Schneesmelze) Leitung [18]

- Anordnung von Rohrleitungen in der Freifläche ohne Dämmschicht

Die Anordnung von Rohrleitungen im Bereich der Freifläche ist das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Eis- und Schneefreihaltung. Die Anordnung einer Dämmung gegen das Erdreich ist bei diesen Konstruktionen nicht erforderlich, da bereits ein nach oben gerichteter Bodenwärmestrom existiert und den Prozess

der Eis- und Schneefreihaltung unterstützt. Die nachfolgende Abbildung zeigt prinzipielle Schichtaufbauten zur Anordnung der Zirkulationsleitungen:

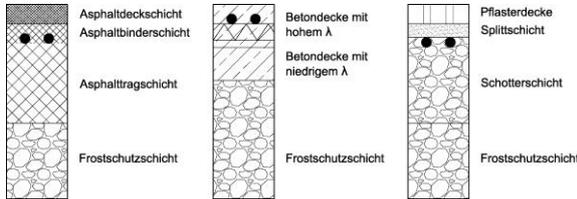


Abbildung 11: Anordnung der Zirkulationsleitungen, Links: Asphaltaufbau, Mitte: Betonfahrbahn, Rechts: Pflasterdecke

- Anordnung von Rohrleitungen in der Freifläche mit Dämmschicht

In [26] werden Untersuchungen zu wärmege-dämmten Konstruktionen zur Freiflächenbeheizung durchgeführt. Sind z.B. aufgeständerte Konstruktionen wie Bahnsteige eis- und schneefrei zu halten, kann eine entsprechend dimensionierte Wärmedämmung an der Unterseite der Konstruktion die Effektivität des Heizsystems auf das Niveau der erdgleich verlegten Systeme anheben

Überschlägig kann der erforderliche Wärmestrom zur Eis- und Schneefreihaltung der Literatur [26] zu 400 W/m<sup>2</sup> entnommen werden. Dieser pauschale Ansatz wird im Rahmen der Grundlagenermittlung zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Tunnelgeothermieanlage zu Grunde gelegt. Eine detaillierte Betrachtung auf Basis und unter Berücksichtigung der genannten Faktoren und Einwirkungen wird im Zuge der Vorplanung erfolgen.

### 2.3.2.2 Klimatisierung Technikräume Tunnel

Die Grundlage fast aller Empfehlungen zur Klimatisierung von Server- und Technikräumen bildet [2]. In diesem Dokument sind in erster Linie klimatische Randbedingungen für klassifizierte IT-Systeme aufgeführt. Die hier definierten Temperatur- und Luftfeuchtebereiche sind die von den großen Herstellern freigegebenen Betriebsbedingungen für Server, Speichersysteme, Bandlaufwerke etc. Weitere Empfehlungen geben das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) und der Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM).

Im Folgenden wird die generelle Vorgehensweise zur Ermittlung des Kühlbedarfs eines Serverraumes auf der Basis von [24] gezeigt.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der bezogene Strom vollständig in Wärme umgewandelt wird, da die über die Datenverbin-

dungen übertragene Leistung vernachlässigbar gering ist. Daher lässt sich die Leistungsaufnahme der Geräte in Watt der thermischen Abwärme gleichsetzen.

Die Gesamtabwärme eines Systems setzt sich aus den Servern selber, zusätzlichen Geräten wie einer unterbrechungsfreien Stromversorgung und ggf. Verteilern zusammen. Die Abwärme aus Personen und Beleuchtung kann aus Sicht des Verfassers bei Serverräumen der Tunneltechnik vernachlässigt werden, da sich in den Betriebsräumen der Tunneltechnik nur selten Personen aufhalten und auch die Beleuchtung nicht kontinuierlich in Betrieb ist. Die nachfolgende Tabelle stellt die erforderlichen Eingangswerte zur Ermittlung des Kühlbedarfs zusammen:

Element	erf. Daten	Berechnung der Abwärme
IT-Gerät	Gesamte Leistungsaufnahme in Watt	Identisch mit Leistungsaufnahme
USV mit Batterie	Angegebene Leistung in Watt	(0,04 x angegebene Leistung) + (0,06 x gesamte IT-Leistung)
Leistungsverteilung (Elektroverteiler)	Angegebene Leistung in Watt	(0,02 x angegebene Leistung) + (0,02 x gesamte IT-Leistung)

Tabelle 4: Berechnung der Abwärme eines Tunnelserverraumes gemäß [24]

Es kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass ca. 78 % der Abwärme durch die Server und 22% durch die unterbrechungsfreien Stromversorgung und die Stromverteilung generiert werden.

Neben der Abwärme aus der Servertechnik ist bei Serverräumen, die im Bereich der Tunnelportale angeordnet sind ein Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung zu berücksichtigen. Hierzu sind die betreffenden Gebäude mit ihrer ggf. vorhandenen Erdüberdeckung und den angeordneten Fenster- bzw. Türfronten rechnerisch abzubilden. Die genaue Berechnung erfolgt nach [34]. Überschlägig kann das verkürzte HEA-Verfahren [12] angewendet werden. Hierzu sind die Gebäudeumfassungswände inkl. der enthaltenen Fenster-, Tür- und Fassadenflächen entsprechend ihrer Himmelsausrichtung flächenmäßig zu erfassen und mit tabellierten Wärmestromdichten zu multiplizieren.

	Wärmestromdichte
Fensterfläche Orientierung	[W/m <sup>2</sup> ]
N	60
NO	70
O	280
SO	240
S	300
SW	280
W	290
NW	240
Wand	10
Decke	10

Tabelle 5: Wärmestromdichten durch solare Wärmestrahlung [Erfahrungsschatz IGS, unveröffentlicht]

Neben der rechnerisch erforderlichen Kühlleistung ist bei der Klimatisierung von Technikzentralen auch die Raumlufffeuchtigkeit zu berücksichtigen. Beim Erreichen des gewünschten Feuchtigkeitsgrades sollte das System im Idealfall mit einem konstanten Wert der Luftfeuchtigkeit arbeiten, ohne dass weitere Maßnahmen erforderlich sind. Je nach System können Kühlsysteme die Luftfeuchtigkeit des Serverraumes herabsetzen, so dass eine Befeuchtung der Räume erforderlich wird und damit eine weitere Wärmequelle vorhanden ist. Diese ist im Allgemeinen mit einem bis zu 30%-igen Zuschlag zur ermittelten Kühlleistung zu berücksichtigen. Eine Trennung der Zu- und Abaufrohrleitung und damit eine Verhinderung der Kondensatbildung ist anzustreben.

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurde am Tunnel Rennsteig die erforderliche Kühlleistung je Technikzentrale im Zuge der Ortsbegehung abgefragt (siehe hierzu Anlage I – Protokolle Ortsbegehung Rennsteig). Hiernach kann die maximal erforderliche Kühlleistung zu 8 kW angegeben werden. Diese Angabe ist auf Basis der hier vorgestellten Vorgehensweise bei Bedarf zu verifizieren.

Sowohl für die Technikräume am Tunnel Rennsteig als auch für den Technikraum am Tunnel Füssen wird im Rahmen der Grundlagenermittlung eine erforderliche maximale Kühlleistung von

$$\underline{Q_{erf}} = 8 \text{ kW} \text{ zu Grunde gelegt.}$$

### 2.3.2.3 Klimatisierung externer Gebäude

Im Folgenden wird unter der Klimatisierung von externen Gebäuden lediglich der Wärmebedarf für Wohn- und ausgewählte Nicht-Wohngebäude verstanden. Die Versorgung mit Kälteenergie ist nicht Bestandteil dieser Voruntersuchung.

Auf deutscher Ebene ist zur Ermittlung der Heizlast DIN EN 12831 in Verbindung mit dem nationalen Anhang verbindlich eingeführt und löst damit die Berechnungen nach DIN 4701 ab. DIN EN 12831 unterscheidet zwischen einem vereinfachten und einem ausführlichen Berechnungsverfahren. Das vereinfachte Berechnungsverfahren kann für Wohngebäude mit bis zu drei Wohneinheiten und einer Luftdichtheit von  $n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$  angewendet werden. Für die überwiegende Mehrzahl der vorkommenden Gebäude, so auch z.B. für Gebäude des Hotel- und Gaststättengewerbes ist das ausführliche Berechnungsverfahren anzuwenden. Im Rahmen der Grundlagenermittlung wird vereinfacht auf tabellierte Werte zum Wärmebedarf (Heizlast) zurückgegriffen, die im Zuge der Vorplanung entsprechend zu verifizieren sind.

Baujahr	bis 1958	1959-68	1969-73
Gebäude			
Einfamilienhaus freistehend	180	170	150
Reihenhaus			
Endhaus	160	150	130
Mittelhaus	140	130	120
Mehrfamilienhaus			
- bis 8 WE	130	120	110
- über 8 WE	120	110	100

Tabelle 6: Spezifischer Leistungsbedarf W/m<sup>2</sup> (Teil 1) [Erfahrungsschatz IGS, unveröffentlicht]

Baujahr Gebäude	1974-77	1978-83	1984-94
Einfamilienhaus freistehend	115	95	75
Reihenhaus			
Endhaus	110	90	70
Mittelhaus	100	85	65
Mehrfamilienhaus			
- bis 8 WE	75	65	60
- über 8 WE	70	60	55

Tabelle 7: Spezifischer Leistungsbedarf W/m<sup>2</sup> (Teil 2)

Ein über alle Gebäudetypen und Baujahre gemittelter spezifischer Leistungsbedarf ergibt sich zu:

$$q_{\text{erf}} = 97 \text{ W/m}^2 \approx 100 \text{ W/m}^2$$

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wird im Zusammenhang mit den Anlagen VII und VIII die mögliche zu beheizende Fläche wie folgt ermittelt:

$$A_{\text{mögl}} = \frac{\dot{Q}_{\text{GEO}}}{q_{\text{erf}}} \quad (4)$$

Die überschlägige Abschätzung ist nach Wahl eines zu beheizenden Objektes zu überprüfen und ggf. zu revidieren. Des Weiteren wird unter den hier geschilderten Annahmen lediglich ein monovalenter Betrieb der Wärmepumpenanlage berücksichtigt. Auch dieser Ansatz ist im Zuge der folgenden Planungsstufe weiter zu untersuchen.

Die Ermittlung der Wärmeenergie zur Bereitstellung von Warmwasser kann auf der Basis von Literaturwerten zum Wasserverbrauch über die folgende Formel berechnet werden:

$$Q_{\text{TW}} = V_w \cdot \rho \cdot c_p \cdot (g_{w,m} - g_k) \cdot \frac{1}{3600} \cdot 365 \text{ [kWh/a]}$$

$$Q_{\text{TW}} = V_w \text{ [l/Tag]} \cdot 1,0 \text{ kg/l} \cdot 4,19 \text{ kJ/(kgK)} \cdot (45^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) \cdot 0,1014$$

$$Q_{\text{TW}} = V_w \text{ [l/Tag]} \cdot 14,87 \text{ [kWh/a]}$$

Gemäß [20, 21] werden die folgenden Warmwasserbedarfsmengen angegeben:

Gebäudeart		Warmwasserbedarf in l/Tag
Je Person	Einfacher Wohnungsbau	25 - 60
	Einfamilienhäuser	40 - 70
	Villen mit großem Garten	60 - 100
	Nach EnEV	27
	Bürogebäude	10 - 15
	Schwimmbäder	50 - 80
Hotels (je Bett)		60 - 90

Tabelle 8: Warmwasserbedarf

Aus den tabellierten Warmwasserbedarfsmengen ergeben sich folgende Wärmebedarfe:

Gebäudeart		Wärmebedarf in W/h
Je Person	Einfacher Wohnungsbau	40 - 100
	Einfamilienhäuser	70 - 120
	Villen mit großem Garten	100 - 170
	Nach EnEV	50
	Bürogebäude	20 - 30
	Schwimmbäder	80 - 140
Hotels (je Bett)		100 - 150

Tabelle 9: Warmwasserwärmebedarf

Der Warmwasserenergiebedarf liegt deutlich unter dem zur Bereitstellung von Heizwärme. Im Rahmen der Grundlagenermittlung wird auch unter dem Umstand, dass der Heizwärmeenergiebedarf für die entsprechenden Nutzungen nur überschlägig ermittelt wurde, der Energiebedarf zur Versorgung mit Warmwasser vorerst vernachlässigt.

#### 2.3.2.4 Aquakulturen

„Die Aquakultur ist mit Steigerungsraten von durchschnittlich neun Prozent seit 1970 der am schnellsten wachsende Zweig in der globalen Ernährungswirtschaft.“ [4]

Unter Aquakulturen werden im Rahmen dieses Projektes Fischmastanlagen verstanden, in denen hauptsächlich Warmwasserfische gemästet werden. Diese Anlagen haben einen hohen Bedarf an thermischer Energie, weshalb sie vor allem bei Untersuchungen zur Abwärmenutzung von Biogasanlagen im Fokus stehen [6, 17].

Die Angaben über die Höhe der zur Verfügung stehenden Energie variieren bei den Herstellern von Aquakulturanlagen stark [29]. Die Firma Agintec (<http://www.agintec.de/>) gibt für die Erzeugung von afrikanischem Wels folgende Kenngrößen an:

Bedarf	
Wasserbedarf	620 m <sup>3</sup> /a
Strombedarf	15.000 kWh/a
Heizwärmebedarf	35.000 kWh/a
Umsatzschätzung	
Jahresproduktion	28.500 kg
Ausbeute 40%	11.400 kg
50% davon Filets (12Euro/kg)	68.400 Euro/a
50% davon Räucherfilets (25Euro/kg)	142.500 Euro/a
Umsatzerlöse gesamt	210.900 Euro/a

Tabelle 10: Energiebedarf und Umsatzschätzung Aquakultur nach [1]

Die erforderliche Wassertemperatur ist bei ca. 23°C einzustellen.

Verglichen wird im Rahmen der Anlage VII – Potentielle Nutzungen Rennsteig lediglich der erforderliche Gesamtheizwärmeenergiebedarf mit einem mittleren möglichen geothermischen Potential der Anlage. Diese überschlägige Betrachtung ist bei Bedarf zeitlich detaillierter aufgelöst zu betrachten.

Als kumulierter Jahresheizwärmeenergiebedarf werden 35.000 kWh sowie ein Wasserbedarf von 620 m<sup>3</sup>/a berücksichtigt.

### 2.3.2.5 Erdverlegte Rohrleitungen

Für alle aufgezeigten potentiellen Nutzungen sind aller Voraussicht nach erdverlegte Fernwärmeleitungen erforderlich. Die Herstellung, Verlegung und Auslegung ist nach den Normen DIN EN 253:2009+A2:2015 „Fernwärmerohre –Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze –Verbund-Rohrsystem, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, Polyurethan Wärmedämmung und Außenmantel aus Polyethylen“ und DIN EN 13941:2009+A1:2010 „Auslegung und Installation von werkmäßig gedämmten Verbundmantelrohren für die Fernwärme“ geregelt.

Über diese Leitungen wird ein Wärmestrom an den umgebenden Untergrund abgegeben oder über diesen aufgenommen. Der Wärmestrom einer erdverlegten Leitung kann für den stationären Fall

über den folgenden Zusammenhang ermittelt werden:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot F^* \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (5)$$

Hierbei sind die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Untergrundes, die wärmestromantreibende Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche der Fernwärmeleitung und dem Untergrund und der Formfaktor  $F^*$  für erdverlegte Leitungen zu berücksichtigen.

$$F^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{s}{2r}\right)} \quad (6)$$

Hierbei ist  $L$  die Länge der Fernwärmeleitung,  $s$  der Achsabstand der Leitung von OK Gelände und  $r$  der Radius der Rohrleitung (inkl. Dämmung).

Die statischen Anforderungen einer Mindestüberdeckung werden bei den für diesen Anwendungsfall sehr kleinen Rohrdurchmessern nicht bemessungsrelevant, so dass eine Verlegetiefe von ca. 100 cm zu wählen ist.

In einer Verlegetiefe von 80 cm herrschen über den Jahresverlauf saisonal noch stark unterschiedliche Baugrundtemperaturen zwischen +2°C und +17°C. Die Abbildung 12 zeigt den typischen saisonalen Baugrundtemperaturverlauf in 50 cm Tiefe (türkis), 1 m Tiefe (magenta) und 2 m Tiefe (grün).

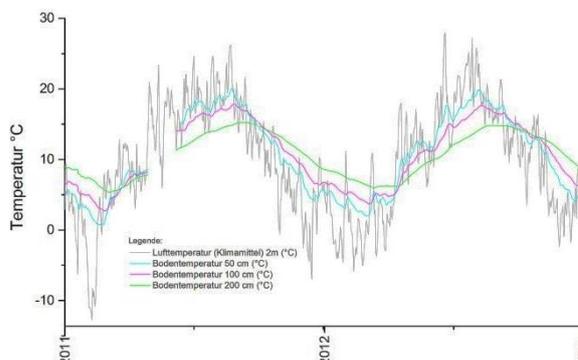


Abbildung 12: Temperaturverlauf Baugrund

Sind die Baugrundtemperaturen über den Jahresgang bekannt, kann der Formfaktor für koaxiale Rohre verwendet werden:

$$F^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad (7)$$

Hierbei sind für die Temperaturdifferenz nun die Temperatur des Drainagewassers und die des Untergrundes (siehe Gleichung (5), für den Radius  $r_a$  der Außendurchmesser inkl. Dämmung und für  $r_i$  der Innendurchmesser der Rohrleitung zu verwenden.

den. Unter Vernachlässigung des Rohrmaterials ist die Wärmeleitfähigkeit der ggf. vorhandenen Rohrdämmung anzusetzen.

Unter Berücksichtigung einer maximalen Drainagewassertemperatur, einer minimalen Untergrundtemperatur und einem Standardfernwärmeleitungsrohr ist im konkreten Fall mit einem Wärmeverluststrom von ca. 2 W/m Fernwärmeleitung zu rechnen.

### 2.3.3 Tunnel Rennsteig

#### 2.3.3.1 Nordportal

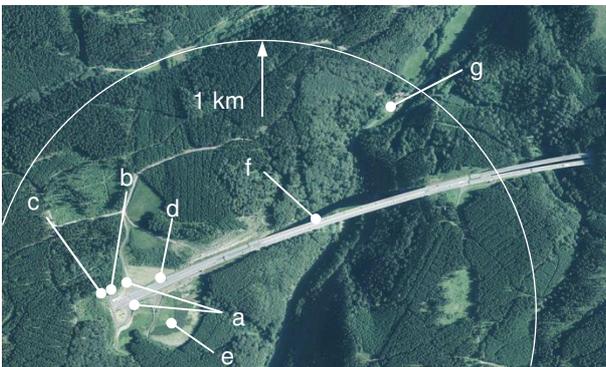


Abbildung 13: Potentielle Nutzungen Rennsteig Nord; a: Hubschrauberlandeplätze, b: Tunnelbetriebsgebäude, c: Betriebsfläche d: Fahrfläche A71, e: Freifläche, f: Brücke Wilde Gera, g: Wohnbebauung [Freistaat Thüringen, Landesamt für Vermessung und Geoinformation, Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0, geoportal-th.de]

Die potentiellen Nutzungen der tunnelgeothermischen Energie am Nordportal des Tunnel Rennsteig bilden die Eis- und Schneefreihaltung der Hubschrauberlandeplätze, der Betriebsflächen des Portalbereichs, der Fahrfläche der A 71 außerhalb des Tunnels sowie der Fahrfläche im Bereich der Talbrücke „Wilde Gera“ (siehe Abbildung 13).

Der Einsatz der geothermischen Energie zur Klimatisierung von Gebäuden bietet sich bei dem Tunnelbetriebsgebäude sowie der Wohnbebauung im Tal der Wilde Gera an.

Als weitere Nutzungsmöglichkeit ist über die Anlage einer Fischzucht im Bereich des derzeitigen Sandfangs östlich der Autobahn nachzudenken.

In der Anlage VII – Potentielle Nutzungen Rennsteig werden die einzelnen Nutzungskonzepte energetisch bewertet und diskutiert. Nachfolgend werden die wesentlichen Untersuchungsergebnisse zusammengefasst (Zuordnung vgl. Abbildung 13).

#### a: Hubschrauberlandeplätze

Mit dem zur Verfügung stehenden geothermischen Potential ist die Eis- und Schneefreihaltung von beiden Hubschrauberlandeplätzen möglich. Ggf. ist der erforderliche Pumpbetrieb zur Sicherstellung der Fluidzirkulation in den unter dem Asphalt angeordneten Rohrleitungen durch eine hydraulisch betriebene Pumpe (z.B. Prinzip Widder) möglich.

#### b: Tunnelbetriebsgebäude

Die Versorgung der Technikzentrale mit entsprechender Kühlleistung ist unter den derzeitigen Annahmen mit großer Sicherheit möglich.

#### c: Betriebsfläche

Mit dem zur Verfügung stehenden geothermischen Potential ist die Eis- und Schneefreihaltung von Betriebsflächen im Bereich des Tunnelportals nicht sinnvoll möglich.

#### d: Fahrfläche A 71

Unter den im Rahmen der Grundlagenermittlung zu Grunde gelegten Randbedingungen ist die Eis- und Schneefreihaltung im Portalbereich des Tunnels Rennsteig auf einer Länge von ca. 23 m möglich. Berücksichtigt wurde bei dieser Längenermittlung eine Fahrbahnbreite von ca. 8 m je Richtungsfahrbahn. Die maximal mögliche Gesamtfläche ergibt sich folglich zu 368 m<sup>2</sup>. Inwieweit diese Länge ausreichend ist, um den Taumitteleintrag in den Tunnel wesentlich zu reduzieren, kann derzeit noch nicht abschließend bewertet werden.

#### e: Freifläche

Mit dem zur Verfügung stehenden geothermischen Potential ist der Betrieb einer Fischzuchtanlage mit deutlich größerem Umfang als im Rahmen dieses Forschungsprojektes bisher angenommen möglich. Durch das hohe Temperaturniveau des Beckenwassers (23 °C gegenüber der Drainagewassertemperatur von ca. 9 °C) ist die Anordnung einer Wärmepumpe erforderlich. Die zum Betrieb der Wärmepumpe anfallenden Stromkosten sind bei einer noch zu führenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu dem bereits angegebenen Stromverbrauch hinzuzurechnen.

Das erwärmte und mit Nährstoffen angereicherte Zuchtwasser ist, bevor es in die Vorflut zurückgeleitet wird, abwassertechnisch und thermisch zu behandeln. Hierzu sind in einer weiteren Planungsphase entsprechende Untersuchungen vorzunehmen. Die erforderliche Rückkühlung des Zuchtwassers sollte durch das vorhandene geothermische Restpotential möglich sein.

#### f: Brücke Wilde Gera

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wird aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem Brückentragwerk der Brücke über die Wilde Gera um eine Stahlbetonverbundbrücke handelt und diese hinsichtlich der Glatteisbildung nicht so gefährdet ist wie eine Stahlbrücke (vgl. [14]), und vor dem Hintergrund, dass aktuell keine Taumittelsprühanlage installiert wurde, keine weitere Untersuchung hinsichtlich einer möglichen Nutzung vorgenommen.

#### g: Wohnbebauung

Ohne die mit Heizwärmeenergie zu versorgende Grundfläche des Gebäudes und die Wärmeenergie zur Bereitstellung von Energie zur Warmwasseraufbereitung genau zu kennen, ist das hohe geothermische Potential gegenüber des geringen Wärmeenergiebedarfs eines Einzelnutzers ausreichend, um eine dauerhafte Wärmeversorgung für diese Nutzung sicherzustellen.

Zu betrachten sind für diese Nutzung vor allem die Installationskosten für die Fernwärmeleitung, die Installation einer entsprechenden Wärmepumpe sowie die Wiedereinleitung der Drainagewässer in die Vorflut Wilde Gera.

#### 2.3.3.2 Südportal

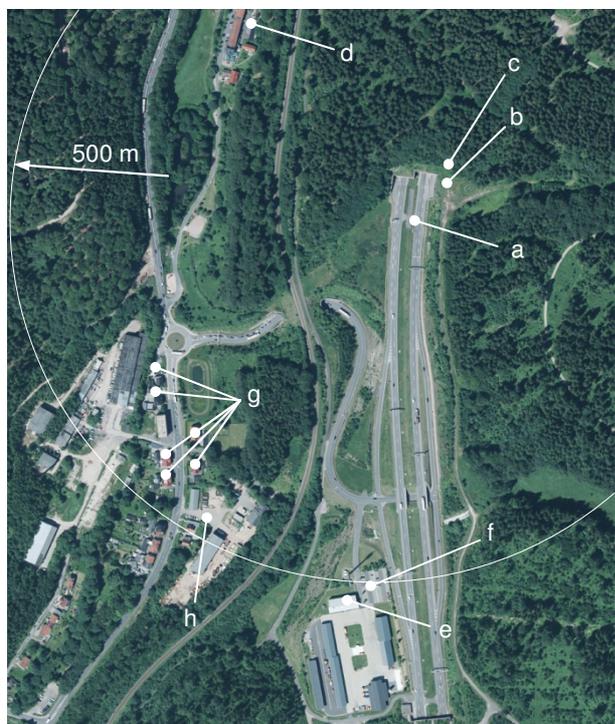


Abbildung 14: Potentielle Nutzungen Rennsteig Süd; a: Fahrfläche A71, b: Tunnelbetriebgebäude, c: Betriebsfläche d: Hotel Waldmühle, e: Zentrale Betriebsleitstelle Thüringen, f: Parkplatz, g: Wohnbebauung, h: Stadtreinigung [Freistaat Thüringen, Landesamt für Vermessung und Geoinformation, Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0, geoportal-th.de]

Als potentielle Nutzungen der tunnelgeothermischen Energie am Südportal des Tunnel Rennsteig kommen die Eis- und Schneefreihaltung der Betriebsflächen des Portalbereichs, der Fahrfläche der A 71 außerhalb des Tunnels sowie der Parkplatzflächen im Bereich der zentralen Betriebsleitstelle in Betracht.

Der Einsatz der geothermischen Energie zur Klimatisierung von Gebäuden bietet sich bei der Tunnelzentrale, der naheliegenden Wohnbebauung, der zentralen Betriebsleitstelle, der Stadtreinigung sowie des Hotels Waldmühle an.

In der Anlage VII – Potentielle Nutzungen Rennsteig werden die einzelnen Nutzungskonzepte energetisch bewertet und diskutiert. Nachfolgend werden die wesentlichen Untersuchungsergebnisse zusammengefasst (Zuordnung vgl. Abbildung 14).

#### a: Fahrfläche A71

Unter den im Rahmen der Grundlagenermittlung zu Grunde gelegten Randbedingungen ist die Eis- und Schneefreihaltung im Portalbereich des Tunnels Rennsteig auf einer Länge von ca. 6,5 m möglich. Berücksichtigt wurde bei dieser Längenermittlung eine Fahrbahnbreite von ca. 8 m je Richtungsfahrbahn. Inwieweit diese Länge ausreichend ist, um den Taumittelintrag in den Tunnel wesentlich zu reduzieren, kann derzeit noch nicht abschließend bewertet werden.

#### b: Tunnelzentrale

Die Versorgung der Technikzentrale mit entsprechender Kühlleistung ist unter den derzeitigen Annahmen mit großer Sicherheit möglich.

#### c: Betriebsfläche

Mit dem zur Verfügung stehenden geothermischen Potential ist die Eis- und Schneefreihaltung von Betriebsflächen im Bereich des Tunnelportals nicht sinnvoll möglich.

#### d: Hotel Waldmühle

Unter den getroffenen Annahmen zu Bettenzahl und Gebäudeflächen ist die Deckung des Wärmeenergiebedarfs für diese potentielle Nutzung zu 53 % möglich. Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Randbedingungen, besonders im Hinblick auf den erforderlichen Heizwärmebedarf, wird sich der Deckungsgrad unter Umständen noch vergrößern. Derzeit ist die Versorgung des Hotels Waldmühle lediglich durch einen bivalenten oder ähnlichen Wärmepumpenbetrieb möglich.

e: Zentrale Betriebsleitstelle Thüringen

Unter den im Rahmen der Grundlagenermittlung zu Grunde gelegten Randbedingungen ist die Versorgung der ZBL Thüringen mit Heizwärme und Wärmeenergie zur Warmwasserbereitstellung nur durch einen bivalenten oder ähnlichen Wärmepumpenbetrieb möglich. Genauere Angaben über den erforderlichen Heizwärmeenergiebedarf sowie den Energiebedarf zur Warmwasserbereitstellung sind bei Bedarf in der nächsten Projektphase zu eruieren. Auch die Führung der erforderlichen Fernwärmeleitung zum Transport der Drainagewässer zur ZBL sowie deren Wiedereinleitung in die Vorflut nach der Wärmeauskopplung sind detailliert zu untersuchen.

f: Parkplatz

Unter den getroffenen Annahmen ist die Eis- und Schneefreihaltung des Parkplatzes nur zu unter 10% möglich. In einer weiteren Planungsphase wäre vor allem die Leitungsführung zum Parkplatz der ZBL im Hinblick auf die Baukosten detailliert zu betrachten. Grundsätzlich ist zum Transport der Drainagewässer eine entsprechende Pumpleistung vorzuhalten.

g: Wohnbebauung

Grundsätzlich ist die Versorgung des Wohngebietes südwestlich des Tunnels Rennsteig mit entsprechender Heizenergie möglich. Neben den Kosten für die Hauptleitungstrasse ist vor allem die Bereitschaft der Hauseigentümer zur Umrüstung ihrer bestehenden Heiztechnik in der kommenden Planungsphase zu bewerten. Des Weiteren ist die Wiedereinleitung der Drainagewässer in eine geeignete Vorflut zu untersuchen.

h: Stadtreinigung

Mit Blick auf die im Zusammenhang mit dem Südportal betrachteten potentiellen Nutzungen, sollte die Versorgung der Stadtreinigung Schmalkalden grundsätzlich auch monovalent möglich sein. Genauere Angaben über den erforderlichen Heizwärmeenergiebedarf sowie den Energiebedarf zur Warmwasserbereitstellung sind bei Bedarf in der nächsten Projektphase zu eruieren. Auch die Führung der erforderlichen Fernwärmeleitung zum Transport der Drainagewässer zur Stadtreinigung Schmalkalden sowie deren Wiedereinleitung in die Vorflut nach der Wärmeauskopplung sind detailliert zu untersuchen.

Die potentiellen Nutzungen der tunnelgeothermischen Energie am Nordportal des Tunnels Füssen bilden die Eis- und Schneefreihaltung der Betriebs

### 2.3.4 Grenztunnel Füssen

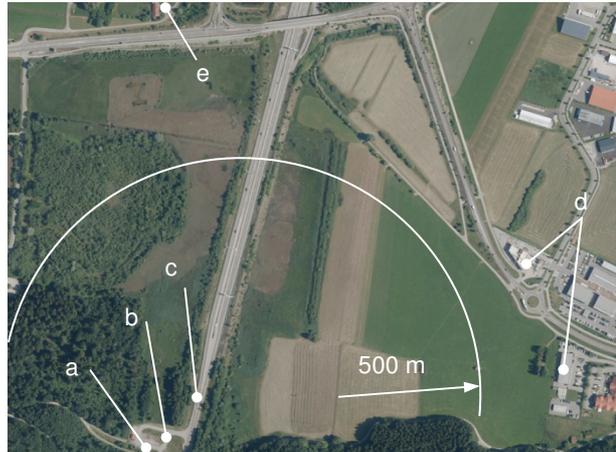


Abbildung 15: Potentielle Nutzungen Füssen Nord; a: Tunnelbetriebsgebäude, b: Freiflächen, c: Fahrfläche A7, d: Autohäuser, e: Wohnbebauung [Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung]

flächen des Portalbereichs sowie der Fahrfläche der A 7 außerhalb des Tunnels.

Der Einsatz der geothermischen Energie zur Klimatisierung von Gebäuden bietet sich bei der Tunnelbetriebsgebäude, der naheliegenden Wohnbebauung und Autohäusern im benachbarten Industriegebiet an.

In der Anlage VIII – Potentielle Nutzungen Füssen werden die einzelnen Nutzungskonzepte energetisch bewertet und diskutiert. Nachfolgend werden die wesentlichen Untersuchungsergebnisse zusammengefasst (Zuordnung vgl. Abbildung 15).

a: Tunnelbetriebsgebäude

Die Versorgung der Technikzentrale mit entsprechender Kühlleistung ist unter den derzeitigen Annahmen mit großer Sicherheit möglich.

b: Freiflächen

Aufgrund der Tatsache, dass im Rahmen der Grundlagenermittlung das geothermische Potential sowie die erforderliche Wärmestromdichte zur Eisfreihaltung konservativ ermittelt wurden, besteht auf Basis einer detaillierten Betrachtung die Möglichkeit, verkehrstechnisch sinnvolle Bereiche der Tunnelbetriebsfläche eis- und schneefrei zu halten. Die Eis- und Schneefreihaltung des gesamten Betriebsgeländes wird auch unter Berücksichtigung der Abwärme aus den Tunnelbetriebsgebäuden nicht möglich sein.

c: Fahrfläche A7

Unter den im Rahmen der Grundlagenermittlung zu Grunde gelegten Randbedingungen ist die Eis-

und Schneefreihaltung im Portalbereich des Tunnels Füssen auf einer Länge von ca. 50 m möglich. In wie weit diese Länge ausreichend ist, um den Taumiteleintrag in den Tunnel wesentlich zu reduzieren, kann derzeit noch nicht abschließend bewertet werden.

#### d: Autohäuser

Die Versorgung eines nahe gelegenen Autohauses mit thermischer Energie ist aus derzeitiger Sicht durch das zur Verfügung stehende geothermische Potential möglich. Wesentlich für die weitere Entscheidung zu dieser Nutzung sind die Bewertung der für ein solitäres Gebäude doch erheblichen Installationsaufwendungen sowie die Möglichkeit, das Tunneldrainagewasser lokal einzuleiten oder zu versickern.

#### e: Wohnbebauung

Grundsätzlich ist die Versorgung des Wohngebietes nördlich des Tunnels Füssen mit entsprechender Heizenergie möglich (ca. 10 Einfamilienhäuser á 150 m<sup>2</sup>). Neben den Kosten für die Hauptleitungstrasse und der erforderlichen Unterverteilung innerhalb des Wohngebietes ist vor allem die Bereitschaft der Hauseigentümer zur Umrüstung ihrer bestehenden Heiztechnik in der kommenden Planungsphase zu bewerten.

## 2.4 Auswahl Tunnelportale für Vorplanung

Im Rahmen der 1. Phase des Projektes „Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwerken“ wurde auf der Basis von Messdaten der Drainagewasserabstrommengen und der Drainagewassertemperatur für die Tunnelportale Rennsteig Nord und Süd sowie für das Tunnelportal Füssen Nord das mögliche geothermische Potential potentiellen Nutzungskonzepten gegenübergestellt und energetisch bewertet. Die Grundlage zur Abschätzung des geothermischen Potentials bildet die jeweils bis zum Zeitpunkt der Berichtslegung minimale gemessene Schüttung am entsprechenden Portal. Hieraus kann sich über den Gesamtjahresgang ein durchaus erheblich größeres Gesamtpotential ergeben. Des Weiteren wurden für die drei zu untersuchenden Tunnelportale Konzepte zur energetischen Nutzung der Tunneldrainagewässer sowohl für Heiz- als auch für Kühlzwecke erarbeitet. Eine zusammenfassende und bewertende Übersicht bildet eine Entscheidungsmatrix, in der neben der energetischen Bewertung weitere Bewertungskriterien auf die einzelnen Nutzungen angewendet wurden.

Die in Abbildung 16 gezeigte Bewertungsmatrix bildete im Rahmen der 2. Betreuergruppensitzung zum Forschungsprojekt die Grundlage zur Wahl der Tunnelportale Rennsteig Nord und Füssen Nord für die Phase der anschließenden Vorplanung. Im Zuge der Betreuergruppensitzung wurde herausgearbeitet, dass im Rahmen der Realisierung eines Tunnelgeothermiepilotprojektes die Einbindung der Öffentlichkeit grundsätzlich einen hohen Stellenwert hat, zunächst eine potentielle Nutzung jedoch im direkten Umfeld des Tunnelbetreibers zu bevorzugen ist. Diskutiert wurden in diesem Zusammenhang die Betriebssicherheit sowie die Wiedereinleitungsrandbedingungen zur Rückführung der Drainagewässer in eine entsprechende Vorflut. Mögliche Nutzungen außerhalb des direkten Tunnelnahbereiches wurden folglich von einer weiteren Betrachtung im Rahmen dieses Projektes ausgeschlossen.

Hinsichtlich der Eis- und Schneefreihaltung von Fahrflächen im Bereich der Tunnelportale wurden die unter 2.3.3.1, 2.3.3.2 und 2.3.4 aufgezeigten Bereiche, die durch das vorhandene geothermische Heizpotential eis- und schneefrei gehalten werden könnten dahingehend revidiert, dass lediglich Richtungsfahrtstreifen in den Tunnel hinein und nicht aus dem Tunnel hinaus zu berücksichtigen sind. Hierdurch verdoppelt sich die mögliche Fahrbahnlänge vor den entsprechenden Tunnelportalen, die eis- und schneefrei gehalten werden kann. Unter der Annahme einer sinnvollen Fahrbahnlänge von > 50 m (Ergebnis einer intensiven Diskussion im Rahmen der 2. Betreuergruppensitzung) ist eine Eis- und Schneefreihaltung im Bereich der Fahrflächen nur an den Tunnelportalen Rennsteig Nord und Füssen Nord sinnvoll möglich.

Im Rahmen der 2. Betreuergruppensitzung wird festgestellt, dass die Eis- und Schneefreihaltung der Hubschrauberlandeplätze am Tunnelportal Rennsteig Nord als nachrangig gegenüber dem Betrieb einer Freiflächentemperierung im Bereich der Tunnelbetriebsflächen zu bewerten ist. Auf diesen Flächen ist ein zum Teil händisches Räumen erforderlich. Durch eine entsprechend angeordnete Freiflächentemperierung könnten zusätzliche Aufwendungen beim Winterdienst eingespart werden. Die Anordnung von Freiflächentemperierungen im Bereich der Tunnelbetriebsflächen ist aufgrund des vorhandenen geothermischen Heizpotentials lediglich an den Tunnelportalen Rennsteig Nord und Füssen Nord sinnvoll möglich.

Die Teilnehmer der 2. Betreuergruppensitzung kommen nach intensiver Diskussion überein, dass das Südportal des Tunnels Rennsteig im Zuge der nachfolgenden Planungsphase nicht weiter be-

trachtet wird. Diese Entscheidung wird damit begründet, dass dort das geringste geothermische Potential der drei zu untersuchenden Tunnelportale vorliegt und die vorhandenen Betriebsflächen jeweils nicht vollständig eis- und schneefrei gehalten werden können.

Neben der Wahl der Tunnelportale Rennsteig Nord und Füssen Nord wurden die Nutzungsvarianten „Eis- und Schneefreihaltung der Betriebsflächen“ sowie „Kühlung der Tunnelbetriebsgebäude“ als Untersuchungsinhalte für die nachfolgende Planungsphase festgelegt.

Neben den für die weiteren Untersuchungen festgelegten Nutzungen besteht sowohl am Tunnel Rennsteig als auch am Grenztunnel Füssen ein erhebliches ungenutztes geothermisches Potential hinsichtlich der Bereitstellung von Kühlenergie. Selbst unter Berücksichtigung der Klimatisierung der tunneleigenen Betriebsräume verbleibt ein Potential, das besonders bei der Errichtung von Gebäuden mit hoher Kühllast im Nahbereich der Tunnel berücksichtigt werden sollte. Ein besonderer Fokus sollte hier auf das Industriegebiet im Norden des Grenztunnels Füssen gelegt werden. Es wird empfohlen, das mögliche Kühlpotential den entsprechenden Stellen der Stadtverwaltung Füssen mitzuteilen, damit dies bei der Planung zukünftiger Bauwerke in diesem Bereich ausgeschöpft werden kann.

Ergänzend zu der energetischen Eignung der Tunnelrainagewässer wurden für alle Portale labortechnische Untersuchungen hinsichtlich der Eignung dieser zum Einsatz in einem Wärmeübertrager vorgenommen. Das Tunnelrainagewasser ist mit lediglich kleinen Einschränkungen an allen Tunnelportalen zum Einsatz in einem Wärmeübertrager geeignet.

Vorfaktor	Portal Füssen Nord										Portal Rennsteig Nord										Portal Rennsteig Süd									
	152 kW - 438 kW					147 kW - 589 kW					53 kW - 227 kW																			
	Tunnel- zentrale	Betriebs- fläche	Fahrfläche A7	Autohäuser	Wohn- bebauung	Hub- schrauber- landeplätze	Tunnel- zentrale	Betriebs- fläche	Fahrfläche A71	Freifläche	Wohn- bebauung	Fahrfläche A71	Betriebs- fläche	Freifläche	Wohn- bebauung	Fahrfläche A71	Tunnel- zentrale	Betriebs- fläche	Hotel Waldmühle	ZBL	Parkplatz	Wohn- bebauung	Stadt- reinigung							
1	3	2	2	3	3	3	3	1	2	3	3	1	3	3	3	1	3	1	2	2	1	3	3							
1	3	3	3	1	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	3	3	3	1	1	1	1	1							
1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2							
1	3	3	2	2	3	3	3	2	1	3	2	2	3	1	2	2	3	3	2	2	2	1	2							
1	1	2	2	1	2	2	1	2	3	2	2	2	3	3	1	2	1	2	3	2	2	3	1							
1	3	3	3	1	3	3	3	3	2	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1	1	3	1	1							
Bewertungspunkte Nutzung	15	15	14	10	10	16	15	0	14	13	10	0	15	0	14	13	10	0	11	10	0	10	10							
Bewertungspunkte Portal	56																													
Bewertungspunkte Portal	64																													
Bewertungspunkte Portal	68																													

Abbildung 16: Bewertungsmatrix

### 3 Vorplanung

Die Grundlage der Vorplanung bilden die Ergebnisse der Entwurfsplanung sowie die Festlegungen, die im Rahmen einer Betreuergruppensitzung mit dem Betreuerkreis getroffen wurden. Auf der Basis der im Rahmen der Entwurfsplanung erarbeiteten Entscheidungsmatrix wurden die Nordportale der Tunnel Füßen und Rennsteig für die weitere Bearbeitung ausgewählt. Des Weiteren wurde vereinbart, dass von den potentiellen Nutzungsmöglichkeiten lediglich die Eis- und Schneefreihaltung von Freiflächen sowie die Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume weiter entwickelt werden.

Im Rahmen der Vorplanung werden 4 Anlagenkonzepte zur Umsetzung der Eis- und Schneefreihaltung von Freiflächen sowie der Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume an den 2 Tunnelportalen entwickelt. Hierzu erfolgt die Vorplanung einer erforderlichen Wasserfassung, die energetische Auslegung der Wärmeübertrager im Bereich der Freifläche und innerhalb der Tunnelbetriebsgebäude sowie die Entwicklung entsprechender Betriebskonzepte. Auf der Basis von konkret gewählten Anlagensystemkomponenten und entsprechenden Mengenermittlungen werden die Anlagenkonzepte in Langtextleistungsverzeichnissen zusammengestellt und monetär bewertet. Den Abschluss der Vorplanung bildet die Wahl eines Tunnelportales für die an die Vorplanung anschließende Phase der Entwurfsplanung.

#### 3.1 Wasserfassung

Unabhängig von der Art der beabsichtigten Nutzung der geothermischen Energie an den Standorten Nordportal Füßen bzw. Nordportal Rennsteig ist das Tunneldrainagewasser zur Entnahme zu fassen. Die Fassung ist so auszulegen, dass im Bereich des Ansaugrohres einer Förderpumpe ausreichend Wasservolumen zur Verfügung steht und eine Beruhigung des Wassers stattfindet. So kann die Wasserfassung die Funktion eines Sandfanges übernehmen.

Die Wasserfassung ist geometrisch so anzuordnen, dass zu jeder Zeit ein rückstaufreier Abstrom aus dem bestehenden Leitungssystem der Tunneldrainage gewährleistet ist. Hierzu ist ein freier Ausfluss der bestehenden Drainageleitungen in die Wasserfassung herzustellen.

Ggf. ist es sinnvoll, im Bereich der Wasserfassung bereits Anlagenteile zur Filterung, Förderung und Verteilung der Tunneldrainagewässer in die entsprechenden Rohrleitungen und angeschlossenen Wärmeübertrager unterzubringen. Die Abmessun-

gen der zu errichtenden Bauwerke sind entsprechend anzupassen. In den nachfolgenden Abschnitten werden für die zu untersuchenden Tunnelportale zunächst die bestehende Situation beschrieben und anschließend die durchzuführenden baulichen Adaptionen vorgestellt.

#### 3.1.1 Tunnel Rennsteig

Die potentiellen Nutzungen am Tunnelportal Rennsteig Nord befinden sich im Bereich der Einfahrt in die Weströhre. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Vor-Ort-Situation im Detail:

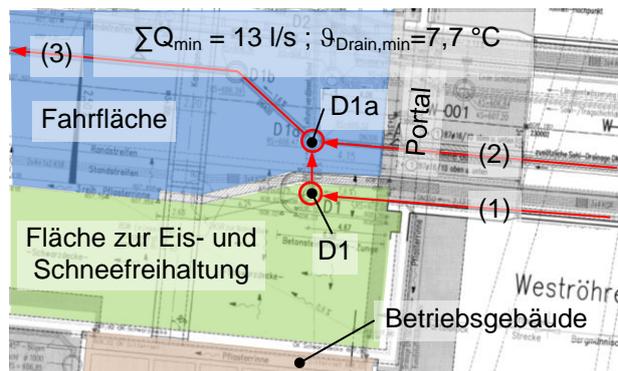


Abbildung 17: Rennsteig-Nord, Situationsplan

Am Nordportal des Tunnels Rennsteig wurden im Zuge der Grundlagenermittlung die Schüttungen des Drainagewassers zuverlässig lediglich für die Westulme der Weströhre (1) sowie die Zusatzdrainage im Bereich der Tunnelsohle (2) zu  $\Sigma Q_{\min} = 13 \text{ l/s}$  und  $\vartheta_{\text{Drain, min}} = 7,7 \text{ }^\circ\text{C}$  ermittelt. Das durch diese Drainagen zur Verfügung stehende geothermische Potential ist ausreichend, um zum einen die Fläche vor dem Betriebsgebäude eis- und schneefrei zu halten, und zum anderen die Kühllast des Betriebsgebäudes zu decken. Vor diesem Hintergrund ist es ausreichend, das Drainagewasser der Drainagen (1) und (2) zu fassen und energetisch nutzbar zu machen.

Die Abbildung 17 zeigt die Lage der bestehenden Drainagewasserkontrollschächte D1a und D1, beide ausgeführt als Schacht DN 1000. Der Schacht D1 liegt im Bereich der zu beheizenden Betriebsfläche, während der Schacht D1a im Bereich der Fahrfläche angeordnet ist.



Abbildung 18: Blick in Schacht D1

Wie der Blick in den Schacht D1 verdeutlicht (siehe Abbildung 18), verläuft die Drainageleitung im Bereich des Schachtes D1 als offenes Gerinne. Folgende Randbedingungen schließen die direkte Nutzung des Schachtes D1 als Wasserfassung aus:

- Die Schachtgeometrie ist zur Unterbringung der erforderlichen Installationen nicht ausreichend.
- Die Herstellung eines freien Ausflusses des Tunneldrainagewassers ist nicht möglich.
- Das Drainagewasser der Sohl drainage (2) kann nicht gefasst werden.

Folgende Randbedingungen schließen die direkte Nutzung des Schachtes D1a als Wasserfassung aus:

- Die Schachtgeometrie ist zur Unterbringung der erforderlichen Installationen nicht ausreichend.
- Die Herstellung eines freien Ausflusses des Tunneldrainagewassers ist nicht möglich.

Unter den genannten Randbedingungen ist die Herstellung einer Wasserfassung für das Nordportal des Tunnels Rennsteig erforderlich. Die Schachtsohle am Schacht D1a liegt bei 606,30 mNN, die der Geländeoberfläche im Bereich der Betriebsflächen bei ca. 608,02 mNN. Eine zu errichtende Wasserfassung hat sich an diesen Höhenkoten zu orientieren. Die Abbildung 19 zeigt einen Schnitt durch ein Bauwerk einer möglichen Wasserfassung:

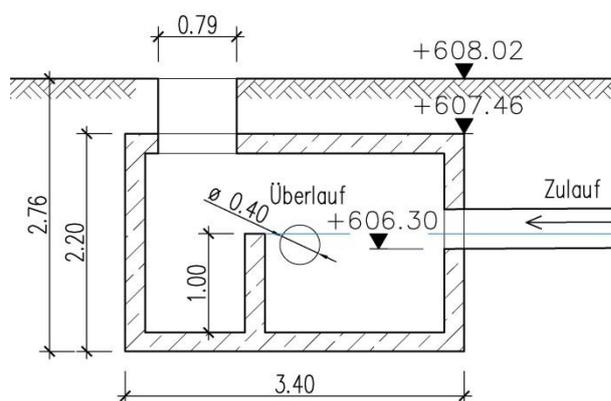


Abbildung 19: Wasserfassung Rennsteig; Schnitt

Das Bauwerk der Wasserfassung mit einer Grundfläche von ca. 7,50 m<sup>2</sup> (3,4 x 2,2 m) ist im Bereich der zu beheizenden Freifläche im Schutze eines Baugrubenverbau oder einer geböschten Baugrube zu errichten. Des Weiteren sind die bestehenden Drainagen (1) und (2) (siehe Abbildung 17) in die Wasserfassung zu leiten sowie das thermisch genutzte Drainagewasser in die bestehende Rohrleitung DN 400 (siehe (3) in Abbildung 17) abzuführen und in die Vorflut zu leiten. Für die Um- und Einleitung der bestehenden Drainageleitungen sind Grabenverbauten mit den Abmessungen b/t = 1,40/2,00 m herzustellen. Die nachfolgende Skizze zeigt die erforderlichen Rohrumlegungsarbeiten:

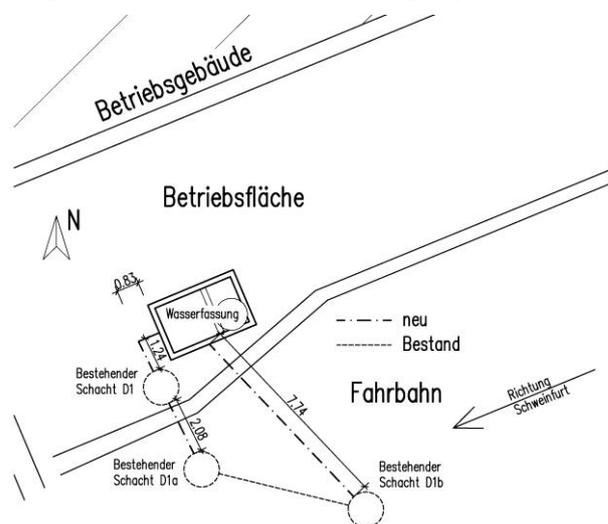


Abbildung 20: Wasserfassung Rennsteig; Skizze Lageplan

Die Rohrleitung zwischen den Schächten D1a und D1 ist so zu modifizieren, dass das gesamte Drainagewasser in Richtung Norden entwässert. Der Schacht D1 ist an das Bauwerk der Wasserfassung anzuschließen. Das thermisch genutzte Drainagewasser bzw. der Drainagewasserüberlauf ist in den bestehenden Schacht D1b zur Ableitung in die Vorflut zu führen. Die beschriebene Adaptionen

erfolgt in Teilen in der bestehenden Fahrfläche der A 71, die für den Zeitraum der Arbeiten eine Sperrung beider Richtungsfahrbahnen in Richtung Schweinfurt erforderlich macht.

Nach erfolgter Umliegung und Neuverlegung der Drainagewasserleitungen sind die bauzeitlichen Baugruben und Grabenverbauten wieder zu verfüllen und der Fahrflächenaufbau wieder herzustellen.

### 3.1.2 Grenztunnel Füssen

Die potentiellen Nutzungen am Tunnelportal Füssen Nord befinden sich im Westen des Tunnelportals. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Vor-Ort-Situation im Detail:

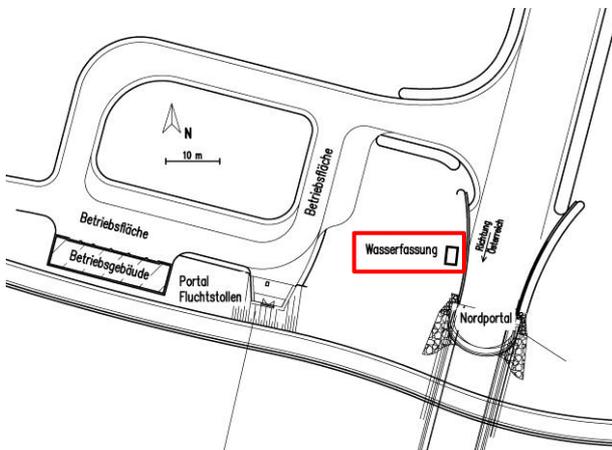


Abbildung 21: Wasserfassung Füssen; Skizze Lageplan

Am Nordportal des Tunnels Füssen werden die maßgeblichen Drainagewassermengen über die Drainage der Westulme abgeleitet. Die Schüttungsmengen der Ostulme sind im Vergleich hierzu vernachlässigbar gering, so dass die vorhandene Wasserfassung (siehe Abbildung 21) ohne weitere bauliche Anpassungen genutzt werden kann.

Informationen zu weiteren Installationen, die in den Bauwerken der Wasserfassung unterzubringen sind, können den Abschnitten 3.2.3.2 und 3.3.3ff. entnommen werden.

## 3.2 Eis- und Schneefreihaltung

### 3.2.1 Allgemein

Die Eis- und Schneefreihaltung wurde als zu untersuchende potentielle Nutzung im Rahmen der 2. Betreuergruppensitzung zum Forschungsprojekt FE 15.0541/2011/BRB für die Freiflächen im Bereich der Technikräume Rennsteig Nord und Füssen Nord festgelegt. Durch den Betrieb einer Freiflächenheizung mittels tunnelgeothermischer Wärmeenergie soll im Wesentlichen das händische Räumen von kleinteiligen Flächen reduziert

und somit langfristig eine Kostenreduktion herbeigeführt werden. Darüber hinaus bietet eine Temperierung der Fahrflächen in den Sommermonaten die Möglichkeit, die Temperaturen des Fahrbahnaufbaus zu senken und damit einer Spurrillenbildung vorzubeugen. Diese ergänzende Möglichkeit der Nutzung wird im Rahmen dieser Vorplanung nicht weiter betrachtet.

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt zunächst die Aufstellung einer Wärmebilanz zur Eis- und Schneefreihaltung. Diese Bilanz bildet die Basis zur Dimensionierung der Freiflächenheizung. Auf der Basis dieser Bilanz kann die erforderliche Wärmestromdichte  $\dot{q}_{zu}$  zur Eis- und Schneefreihaltung ermittelt werden. Im Anschluss werden unterschiedliche Betriebskonzepte vorgestellt, diskutiert und mögliche Risiken aufgezeigt. Für die untersuchten Portale werden dann entsprechende Anlagenkonzepte entwickelt und einer groben Kostenschätzung unterworfen.

Auch wenn die Vorplanung konkret für den Betrieb einer Anlage zur Eis- und Schneefreihaltung im Bereich der Betriebsflächen durchgeführt wurde, können die Ergebnisse, im Besonderen die ermittelten erforderlichen Wärmestromdichten  $\dot{q}_{zu}$ , auch auf weitere potentiell zu beheizende Flächen, z.B. die Fahrflächen im Bereich der Tunnelportale übertragen werden.

### 3.2.2 Energiebedarfsermittlung

Die zur Eis- und Schneefreihaltung erforderliche Wärmeenergie ist für die Dimensionierung von Freiflächenheizungen für den Spitzenlastfall, d.h. die im jährlichen Verlauf maximal auftretende Energieabgabe auszulegen. Die Basis der Ermittlung der erforderlichen Wärmestromdichte  $\dot{q}_{zu}$  bildet eine Energiebilanz, die im Bereich des einzubauenden Wärmeübertragers (Rohrleitungen im Freiflächenaufbau) aufzustellen ist:

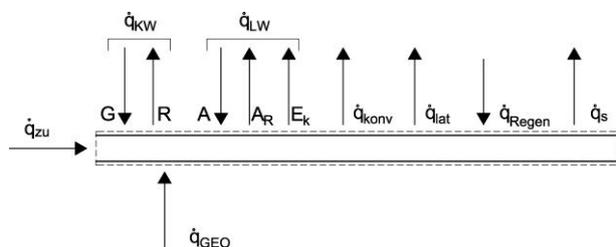


Abbildung 22: Energiebilanz Freiflächenheizung

Die Energiebilanz für den betrachteten Wärmeübertrager wird wie folgt formuliert:

$$\dot{q}_{zu} = \pm \dot{q}_{KW} \pm \dot{q}_{LW} + \dot{q}_{konv} + \dot{q}_{lat} - \dot{q}_{regen} + \dot{q}_s - \dot{q}_{GEO} \tag{8}$$

Die einzelnen Wärmestromdichten werden nachfolgend beschrieben.

### 3.2.2.1 Geothermischer Tiefenstrom $\dot{q}_{\text{GEO}}$

Als geothermischer Tiefenstrom wird der Wärmestrom aus dem Erdinneren bezeichnet, der das Resultat des Zerfalls von langlebigen Nukliden im Erdmantel ist. Die jährliche Gesamtleistung der Erde beträgt ca. 27,5 Terrawatt, was einer örtlichen Wärmestromdichte von ca. 50 mW/m<sup>2</sup> entspricht. Aufgrund von Temperaturanomalien wie z.B. Hot Spots oder dergleichen kann dieser Wert lokal erheblich abweichen.

Der Einfluss der Erdwärme ist bei einer Freiflächenheizung gegenüber den anderen an der Energiebilanz beteiligten Wärmeströmen verhältnismäßig gering.

### 3.2.2.2 Kurzwelliger Wärmestrom $\dot{q}_{\text{KW}}$

Die Oberflächentemperatur der Sonne beträgt ca. 6000 K. Das ist der Grund, warum die energiereichste Strahlung als für den Menschen sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 0,45 \mu\text{m}$  ausgestrahlt wird. Außerhalb der Erdatmosphäre unterliegt diese solare Einstrahlung nur geringen jahreszeitlichen Schwankungen. Beim Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre erfolgt eine Schwächung der Strahlungsintensität durch Absorptions- und Streuvorgänge. Die auf die Erde auftreffende Globalstrahlung  $G$  setzt sich aus der direkten Strahlung  $I$  und der diffusen Strahlung  $D$  zusammen:

$$G = I + D \quad (9)$$

Die Testreferenzjahre des DWD [10] geben nur die Globalstrahlung an, so dass die direkten und die diffusen Anteile entsprechend der zu betrachtenden Flächen und deren Orientierung zu bestimmen sind.

Bei der Betrachtung von Anlagen zur Eis- und Schneefreihaltung können Wärmeströme infolge kurzwelliger Strahlung bei der Ermittlung der erforderlichen Wärmestromdichte  $\dot{q}_{\text{zu}}$  auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt werden. Bei der Betrachtung eines worst-case Szenarios zum Zeitpunkt des Betriebs einer Freiflächenheizung muss entweder mit einem bewölkten Himmel gerechnet oder ein Schneefall und Eisbildung in den Nachtstunden betrachtet werden.

Aus diesem Grund wird für die Auslegung des Wärmeübertragers zur Temperierung der Freiflä-

chen auf eine Berücksichtigung der Wärmestromdichte  $\dot{q}_{\text{KW}}$  auf der sicheren Seite verzichtet.

### 3.2.2.3 Langwelliger Wärmestrom $\dot{q}_{\text{LW}}$

Jeder Körper, der eine Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes aufweist, steht mit anderen Körpern in seinem Sichtfeld in einem Strahlungsaustausch. Die Intensität und der Wellenlängenbereich der emittierten Strahlung eines Körpers sind von seiner Oberflächenbeschaffenheit und seiner Oberflächentemperatur abhängig.

Trifft eine elektromagnetische Strahlung auf einen Körper, so wird diese z.T. absorbiert, teilweise reflektiert und bei transparenten Bauteilen transmittiert. Diese Bauteileigenschaften zusammen mit der Bauteiloberflächentemperatur und dem geometrischen Sichtverhältnis der im Strahlungsaustausch stehenden Bauteile bestimmen den wirkenden Wärmestrom. Mittels der Stefan-Boltzmann-Konstanten  $\sigma$  für einen schwarzen Strahler, dem Emissionsgrad  $\varepsilon$ , der Oberflächentemperatur  $T_{\text{surface}}$ , und einer kleinen gegenüber einer unendlich großen Fläche in allgemeiner Form folgt der Wärmestrom zu:

$$\dot{q}_{\text{LW}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{surface}}^4 \quad (10)$$

Die langwellige Strahlungsbilanz bzw. die langwellige Wärmestromdichte  $\dot{q}_{\text{LW}}$  setzt sich konkret aus der Intensität der atmosphärischen Gegenstrahlung  $A$ , der reflektierten atmosphärischen Gegenstrahlung  $A_R$  und der Strahlungsflussdichte  $E_k$  der gesamten langwelligen Ausstrahlung zusammen:

$$\dot{q}_{\text{LW}} = A + A_R + E_k \quad (11)$$

#### Atmosphärische Gegenstrahlung $A$ :

Die atmosphärische Gegenstrahlung  $A$  ergibt sich mit einem Emissionsgrad des bedeckten Himmels  $\varepsilon_c$  zu:

$$A = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{\text{surface}}^4 \quad (12)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0) \cdot \frac{N}{8} \cdot 0,8 \quad (13)$$

Hierbei ist  $\varepsilon_c$  der Emissionsgrad des nicht bedeckten Himmels und  $N$  der Gesamtbedeckungsgrad.

$$\varepsilon_0 = 0,711 + 0,0056 \cdot \theta_s + 7,3 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_s^2 + 0,013 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{24}\right) + 12 \cdot 10^{-5} \cdot (p_x - 1000) \quad (14)$$

Hierbei ist  $\theta_s$  die Taupunkttemperatur in °C,  $t$  die Zeit am Tag in h und  $p_x$  der Luftdruck am Beobachtungsort in hPa.

Die Taupunkttemperatur  $\theta_s$  ist eine Funktion der Lufttemperatur  $\theta_{Air}$  und der relativen Luftfeuchtigkeit  $\varphi$ .

$$p_s = 611 \cdot \exp\left[\frac{a + b \cdot \theta_{Air} + c \cdot \theta_{Air}^2 + d \cdot \theta_{Air}^3 + e \cdot \theta_{Air}^4}{d \cdot \theta_{Air}^3 + e \cdot \theta_{Air}^4}\right] \quad (15)$$

mit:

$$\begin{aligned} a &= 1,91275 \cdot 10^{-4} & b &= 7,25800 \cdot 10^{-2} \\ c &= -2,9390 \cdot 10^{-4} & d &= 9,84100 \cdot 10^{-7} \\ e &= -1,9200 \cdot 10^{-9} \end{aligned}$$

$$\theta_s = a + b \cdot \ln(p_d) + c \cdot \ln(p_d)^2 + d \cdot \ln(p_d)^3 + e \cdot \ln(p_d)^4 \quad (16)$$

mit:

$$\begin{aligned} a &= -63,16113 & b &= 5,36859 \\ c &= 0,973587 & d &= -0,0738636 \\ e &= 0,00481832 \\ p_d &= p_s \cdot \varphi \end{aligned}$$

Reflektierte atmosphärische Gegenstrahlung  $A_R$ :

$$A_R = (1 - \varepsilon) \cdot A \cdot \sin^2\left(\frac{\gamma_F}{2}\right) \quad (17)$$

Die Emissionsgrade  $\varepsilon$  für im Projekt wesentliche Baustoffe und sonstige Oberflächen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Oberfläche	Referenztemperatur [°C]	Emissionsgrad $\varepsilon$
Beton	25	0,93
Asphalt	20	0,97
Schnee	0	0,94

Tabelle 11: Emissionsgrade

Der Faktor  $\gamma_f$  beschreibt die Neigung der Fläche gegenüber der Horizontalen in [Grad]. Die Ortsbegehungen haben ergeben, dass alle potentiell zu beheizenden Flächen mit vernachlässigbaren

Abweichungen als horizontale Flächen berücksichtigt werden können.

Langwellige Ausstrahlung  $E_K$ :

$$E_K = \varepsilon_K \cdot \sigma \cdot T_{surface}^4 \quad (18)$$

Hierbei ist  $\varepsilon_K$  der langwellige Emmisionsgrad der zu betrachtenden Erdoberfläche gemäß Tabelle 11.

### 3.2.2.4 Konvektiver Wärmestrom $\dot{q}_{konv}$

Am Übergang der Geländeoberfläche zur Atmosphäre findet Wärmeübertragung infolge Konvektion statt. Die Wärmestromdichte wird über den folgenden Zusammenhang ermittelt:

$$\dot{q}_{konv} = \alpha \cdot (g_{air} - g_{surface}) \quad (19)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  beschreibt hierbei die Wärmeübertragungsmechanismen in der Grenzschicht zwischen dem überströmten Festkörper (Geländeoberfläche) und dem strömenden Fluid (bewegte Luft). Für den Übergang Schnee/Atmosphäre ergibt sich der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{SA}$  in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit  $v_w$  in 2 m über der Schneefläche zu:

$$\alpha_{SA} = 3,0 + 3,6 \cdot v_w^{0,7} \quad (20)$$

Für den Übergang Asphalt/Atmosphäre ergibt sich der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{AA}$  abhängig von der Windgeschwindigkeit direkt über der Asphaltfläche zu:

$$\alpha_{AA} = 1,8 + 4,1 \cdot v_w \quad [\text{für } v_w \leq 5,0 \text{ m/s}] \quad (21)$$

Hohe Windgeschwindigkeiten bewirken hohe Verlustwärmeströme. Nach Auswertung der mittleren Windgeschwindigkeiten  $v_{10}$  in  $z_{10} = 10$  m über Grund für die Portale Rennsteig Nord und Füssen Nord können diese im langjährigen Mittel mit  $v_{10} = 3,5$  m/s für den Tunnel Füssen und  $v_{10} = 3,7$  m/s für den Tunnel Rennsteig angegeben werden. Um die beschriebenen Korrelationen zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  verwenden zu können, sind die angegebenen Windgeschwindigkeiten auf die Windgeschwindigkeiten  $v_w$  der entsprechenden Höhen  $z_w$  über Grund über den folgenden Zusammenhang umzurechnen:

$$v_w = v_{10} \cdot \frac{\log z_w - \log z_0}{\log z_{10} - \log z_0} \quad (22)$$

Auf der Basis einer im Rahmen der Vorplanung durchgeführten Variationsrechnung ist der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{SA}$  immer geringfügig höher als der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{AA}$ . Aus diesem Grund wird für den konvektiven Wärmestrom der Wärmeübergang von einer schneebedeckten Fläche zur strömenden Luft berücksichtigt.

### 3.2.2.5 Latenter Wärmestrom $\dot{q}_{lat}$

An einer mit der Umgebungsluft in Kontakt stehenden schneebedeckten Fläche wirken Wärmeströme infolge Verdunstung oder Kondensation. Diese lassen sich mittels der DALTON'schen Verdunstungsformel wie folgt berechnen:

$$\dot{q}_{lat} = \alpha_{SA} \cdot \frac{0,622 \cdot L}{p \cdot c_{p,L}} \cdot (p_d - p_s) \quad (23)$$

mit:

L Umwandlungswärme für Wasser bei 0°C: 2500 kJ/kg

$c_{p,L}$  spezifische Wärmekapazität der Luft: 1,005 kJ/kgK

$p_d$  und  $p_s$  gemäß Kapitel 3.2.2.3

$\alpha_{SA}$  gemäß Kapitel 3.2.2.4

Eine Verdunstung an der Schneefläche tritt auf, wenn der Partialdampfdruck  $p_d$  der Luft kleiner als der Dampfdruck  $p_s$  der Schneefläche ist. In diesem Fall ist in der Gesamtbilanz ein zusätzlicher Wärmestrom zu berücksichtigen, der das zur Verfügung stehende geothermische Potential reduziert.

### 3.2.2.6 Wärmestrom durch Regenereignis $\dot{q}_{Regen}$

Der in der Gesamtenergiebilanz eingebrachte Wärmestrom durch Regen  $\dot{q}_{Regen}$  kann über den folgenden Zusammenhang ermittelt werden:

$$\dot{q}_{Regen} = i_R \cdot c_w \cdot (g_R - g_S) \quad (24)$$

mit:

$i_R$  Regenintensität [mm/h]

$c_w$  spezifische Wärmekapazität des Wassers: 4,186 kJ/kgK

$\vartheta_R$  Temperatur des Niederschlags [°C]

$\vartheta_S$  Temperatur des Schnees [°C]

Der Einfluss eines Regenereignisses auf das Abschmelzen einer Schneedecke wird häufig überschätzt. Vielmehr erfolgt durch den Niederschlag eine Verdichtung der Schneedecke, nicht jedoch eine Reduzierung der Schneemenge. Auf der sicheren Seite liegend wird der in der Gesamtbilanz positiv wirkende Wärmestrom durch Regen zur Beurteilung der Eis- und Schneefreihaltung vernachlässigt.

### 3.2.2.7 Schmelzenergie $\dot{q}_s$

Für den Fall, dass sich auf den Betriebsflächen im Bereich der Tunnelportale bereits eine Schneedecke gebildet hat, ist zum Abschmelzen der Schneedecke Schmelzenergie gemäß der nachfolgenden Beziehung aufzubringen:

$$\dot{q}_s = i_S \cdot \rho_S \cdot L_S + m \cdot c_{p,w} \cdot \Delta g \quad (25)$$

mit:

$i_S$  Schneefallintensität [cm/h]

$\rho_S$  Schneerohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

$L_S$  Umwandlungswärme von Schnee zu Wasser: 335 kJ/kg

$m$  Wasseräquivalent, das bei gegebener Schneefallintensität auf die Umwandlungstemperatur (0°C) erwärmt werden muss [kg/(m<sup>2</sup>·h)]

$c_{p,w}$  spezifische Wärmekapazität für Wasser bei 0°C: 4210 J/(kg·K)

$\Delta g$  Temperaturunterschied bezogen auf Schneetemperatur [K]

Die aufzuwendende Schmelzenergie ist in starkem Maße vom Betrieb der Freiflächenheizung abhängig. Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Zeitpunkt an dem die Anlage vorlaufend zum Niederschlagsereignis angefahren wird. Des Weiteren wurden im Rahmen der Energiebedarfsermittlung (vgl. Kapitel 3.2.2.8 und 3.2.2.9) die anfallenden Wasseräquivalente im Rahmen der Vorplanung bislang lediglich auf täglicher Basis berücksichtigt. Im Rahmen der Ausführungsplanung ist die Ermittlung des Energiebedarfs mit Blick auf die erforderliche Schmelzenergie fortzuschreiben.

### 3.2.2.8 Energiebedarf Rennsteig Nord

Die Grundlage zur Ermittlung des Energiebedarfs am Tunnel Rennsteig sind die Klimadaten der Wetterstation 4501 – Schmücke, die in ca. 6,5 km vom Nordportal des Tunnels Rennsteig entfernt liegt.



Abbildung 23: Lage Wetterstation 4501 - Schmücke

Im Rahmen der Vorplanung wird auf folgende Tagesklimadaten zurückgegriffen:

- Minimale Lufttemperatur in 2 m über der Geländeoberkante [°C]
- Relative Luftfeuchtigkeit [%]
- Luftdruck [hPa]
- Bedeckungsgrad [-]
- Windgeschwindigkeit [m/s]
- Niederschlagshöhe [mm]
- Art des Niederschlags [-]

Aus den vorhandenen Messdaten wurden folgende Daten abgeleitet:

- Emmisionsgrad [-]
- Sättigungsdampfdruck [hPa]
- Partialdruck [Pa]

Die Wahl dieser zeitlichen Auflösung ist im Zuge der Ausführungsplanung ggf. zu erhöhen. Die in den vorherigen Abschnitt zusammengestellten Anteile an der Gesamtenergiebilanz wurden auf die Klimadaten der Station Schmücke für die Jahre 1990 bis 2015 angewendet und ausgewertet. Das Diagramm in Abbildung 24 zeigt den im Rahmen der Vorplanung ermittelten Heizwärmeenergiebedarf.

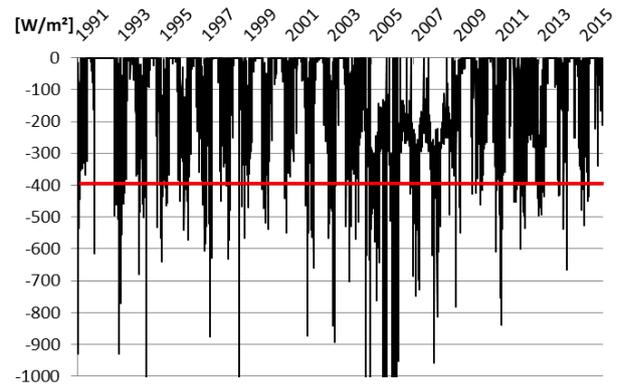


Abbildung 24: Energiebedarf Freiflächenheizung Tunnel Rennsteig

Die in Kapitel 2.3.2.1 zur Eis- und Schneefreihaltung zu Grunde gelegte erforderliche Wärmestromdichte von  $400 \text{ W/m}^2$  wird tageweise deutlich überschritten. Einen wesentlichen Einfluss auf die berechnete Wärmestromdichte haben die berücksichtigte Schmelzenergie sowie die Wärmeübergangswiderstände an der Oberfläche der zu temperierenden Freifläche, die im Wesentlichen durch Konvektion, also durch die Windverhältnisse vor Ort bestimmt werden. Diese Einflüsse können sich lokal aufgrund von z.B. Windabschattungseffekten deutlich unterschiedlich darstellen. Wärmestromdichten  $> 1000 \text{ W/m}^2$  resultieren aus Fehlerwerten der vorhandenen Klimadaten, die im Rahmen dieses Projektes nicht berichtet wurden. Der in Abbildung 24 dargestellte Heizwärmeenergiebedarf berücksichtigt keine Wärmespeichereffekte im Untergrund oder die Historie der Entwicklung der Untergrundtemperaturen. Vor diesem Hintergrund ist der im Rahmen der Vorplanung ermittelte Heizwärmeenergiebedarf zur Schnee- und Eisfreihaltung am Tunnel Rennsteig als äußerst konservativ und damit zu hoch zu bewerten. Es wird empfohlen, im Zuge der Ausführungsplanung Klimadaten mit direktem Bezug zum Tunnelportal zu erheben und diese in die Auslegung des Wärmeübertragers einfließen zu lassen.

### 3.2.2.9 Energiebedarf Füssen Nord

Die Grundlage zur Ermittlung des Energiebedarfs am Tunnel Füssen sind die Klimadaten der Wetterstation 1550 – Garmisch-Partenkirchen, das ca. 31 km vom Nordportal des Tunnels Füssen entfernt liegt.



Abbildung 25: Lage Wetterstation 1550 - Garmisch-Partenkirchen [<https://geoportal.bayern.de/bayernatlas>]

Sämtliche Ausführungen des Kapitels 3.2.2.8 gelten für den Tunnel Füssen gleichermaßen. Das Diagramm in Abbildung 26 zeigt den im Rahmen der Vorplanung ermittelten Heizwärmeenergiebedarf.

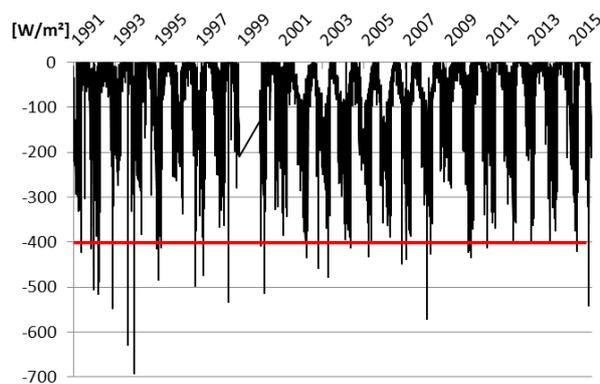


Abbildung 26: Energiebedarf Freiflächenheizung Tunnel Füssen

Der aus den Stationsdaten der Klimastation Garmisch-Partenkirchen hergeleitete Heizwärmeenergiebedarf zum Betrieb einer Freiflächentemperierung am Tunnel Füssen deckt sich zu großen Teilen mit der unter 2.3.2.1 getroffenen Annahme zur erforderlichen Wärmestromdichte von  $400 \text{ W/m}^2$ . Wie für den Tunnel Rennsteig beschrieben, wurden auch bei dem hier dargestellten Energiebedarf keine Wärmespeichereffekte im Untergrund oder die Historie der Entwicklung der Untergrundtemperaturen berücksichtigt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass unter der Auslegung des Wärmeübertragers zur Temperierung von Freiflächen auf der Basis einer Wärmestromdichte von  $400 \text{ W/m}^2$  eine ganzjährige Eis- und Schneefreiheit gewährleistet werden kann. Einschränkend ist in diesem Zusammenhang die Lage der ausgewerteten Klimastation zum Nordportal des Tunnels Füssen zu bewerten. Durch die Entfernung von ca. 31 km können die lokalen klimatischen Bedingungen am Tunnel Füssen von den Bedingungen an der Klimastation Garmisch-Partenkirchen abweichen. Es wird empfohlen, im Zuge der Ausführ-

ungsplanung Klimadaten mit direktem Bezug zum Tunnelportal zu erheben und diese in die Auslegung des Wärmeübertragers einfließen zu lassen.

### 3.2.3 Betriebskonzepte

Grundlegende Systeme zur Eis- und Schneefreihaltung wurden bereits im Zuge der Grundlagenermittlung eruiert und im Rahmen des Kapitels 2.3.2.1 beschrieben.

Üblicherweise ist zur Eis- und Schneefreihaltung ein flächiges Wärmeübertragungssystem im Bereich der Fahr- bzw. Betriebsflächen anzuordnen. Die hierzu erforderlichen Systemkomponenten werden in 3.2.3.2 vorgestellt. Der Betrieb des Wärmeübertragers kann durch folgende Betriebsweisen erfolgen:

#### ▪ Passive Heizung

##### ○ Direkt

Das Tunneldrainagewasser wird direkt durch das Rohrleitungssystem des flächigen Wärmeübertragers geführt und erfährt keinen Temperaturhub.

##### ○ Indirekt

Das Tunneldrainagewasser überträgt seine Wärmeenergie mittels eines Platten-, Rohr- oder Spiralwärmeübertragers auf ein Fluid des flächigen Wärmeübertragerkreislaufes. Hierbei kann diesem Fluid ein Frostschutzmittel beigegeben werden, um den Gefrierpunkt des Mediums herabzusetzen.

#### ▪ Aktive Heizung

Das Tunneldrainagewasser übernimmt die Funktion des Primärkreislaufes einer Wärmepumpenanlage. Durch das Zuführen von elektrischer Energie in Form von Verdichtungsarbeit erfolgt ein Temperaturhub. Das Fluid des angeschlossenen Sekundärkreislaufes zirkuliert dann mit einer gegenüber den Tunneldrainagewasser höheren Temperatur.

Unter direkter passiver Heizung wird in Anlehnung an den in der Literatur zu findenden Begriff der passiven Kühlung ein System verstanden, bei dem kein zusätzlicher Temperaturhub des Tunneldrainagewassers zum Erreichen der entsprechenden Heizenergie erforderlich ist und das Tunneldrainagewasser ohne die Zwischenschaltung eines Wärmeübertragers direkt im Rohrsystem des flächigen Wärmeübertragers zirkuliert. Im Rahmen der 2. Betreuergruppensitzung wurde Skepsis hinsichtlich der Funktions-/Betriebssicherheit dieses Systems geäußert. Im Rahmen des folgenden

Kapitels wird die Machbarkeit dieses Systems untersucht.

3.2.3.1 Machbarkeit direkte passive Heizung

Die Basis der nachfolgenden Untersuchungen bildet die Vordimensionierung des Freiflächenwärmeübertragers gemäß Kapitel 3.2.3.2.

Im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung ist nachzuweisen, dass unter ungünstigen Umständen das Tunneldrainagewasser, das in den Rohrleitungen unterhalb der Betriebsflächen zirkuliert, nicht gefriert (s. 3.2.3). Hierzu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die bisherigen Temperaturmessungen der Tunneldrainagewässer haben folgende minimale Abstromtemperaturen an den einzelnen Tunnelportalen ergeben:

Portal	Minimale Drainagewassertemperatur [°C]
Rennsteig Nord	7,7
Rennsteig Süd	7,0
Füssen Nord	8,3

Tabelle 12: Minimale Abstromtemperaturen

Da das Südportal des Tunnels Rennsteig nicht Bestandteil der Vorplanung ist, wird für die nachfolgend durchgeführten Berechnungen eine Eintrittstemperatur des Tunneldrainagewassers in den Kreislauf des flächigen Wärmeübertragers von 8°C berücksichtigt.

- Die Rohrleitungen werden ca. 10 cm unterhalb der bestehenden Geländeoberkante angeordnet; sie sind im Endzustand durch 10 cm Asphalt bedeckt. Diese Annahme wurde aufgrund der in Abbildung 33 dargestellten Anordnung der Rohrleitungen getroffen. Somit ist gewährleistet, dass ein Ersatz der Asphaltdeckschicht ohne Beschädigung der Rohrleitungen erfolgen kann.
- In den Rohrleitungen zirkuliert das Tunneldrainagewasser mit einem Volumenstrom von 1000 l/h = 0,28 l/s.
- An der Unterkante des Untersuchungsmodells wirkt der geothermische Tiefenstrom mit 0,05 W/m².
- Die seitlichen Ränder des untersuchten Systems sind isoliert, es wird folglich ein Kreislaufsystem betrachtet, bei dem eventuelle Randeinflüsse vernachlässigt werden.

- Die Berechnungen werden für den stationären Fall geführt, d.h. eine unendlich lange Beaufschlagung des Systems mit einer Wärmestromdichte von 400 W/m². Diese Vorgehensweise ist als äußerst konservativ zu sehen. Darüber hinaus wurde eine weitere Berechnung mit einer um 50% erhöhten Wärmestromdichte durchgeführt, um auch für diesen Fall die maßgebliche Austrittstemperatur des flächigen Wärmeübertragers zu bestimmen. Die Wärmestromdichte von 400 W/m² resultiert aus der in Kapitel 2.3.2.1 getroffenen Annahme. Diese wurde im Zuge der Kapitel 3.2.2.8 und 3.2.2.9 über vorhandene Klimadaten verifiziert.
- Die Berechnungen wurden mit der Software Comsol Multiphysics in der Version 5.2a durchgeführt.

Die folgenden Abbildungen zeigen das numerische Berechnungsmodell sowie die resultierenden Temperaturverläufe der Rohrleitungen. Des Weiteren zeigt die Abbildung 29 den Druckverlauf innerhalb der betrachteten Rohrleitung. Alle Ergebnisplots haben die Wärmestromdichte von 400 W/m² als Berechnungsgrundlage.

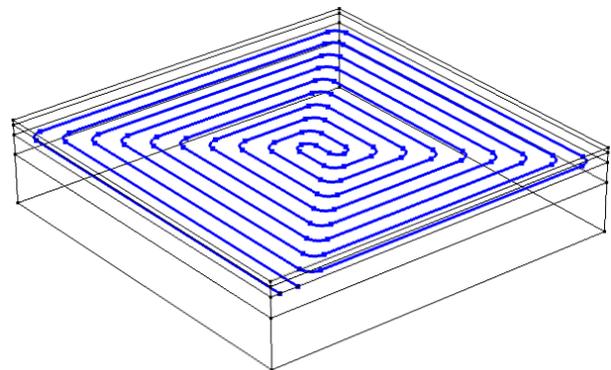


Abbildung 27: Numerisches Berechnungsmodell

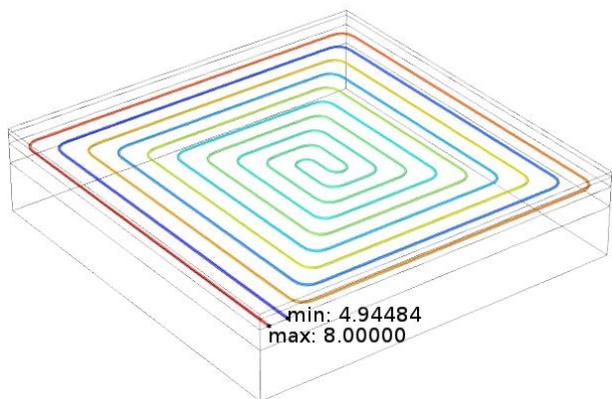


Abbildung 28: Wärmestromdichte 400 W/m² - Temperaturverlauf der Rohrleitung in °C

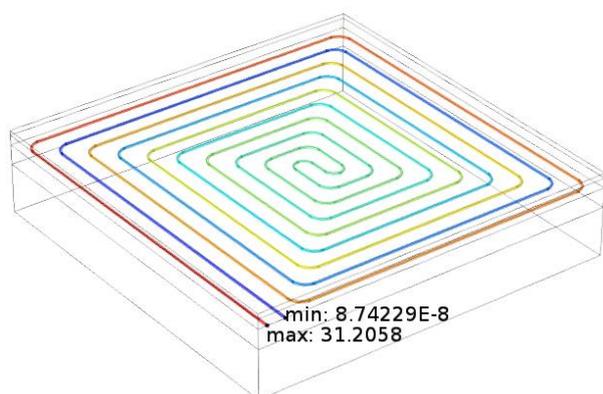


Abbildung 29: Druckverlauf innerhalb der Rohrleitung in kPa

Die Berechnungen mit einer um 50% erhöhten Wärmestromdichte führen für die Rohrleitung zur nachfolgend dargestellten Austrittstemperatur:

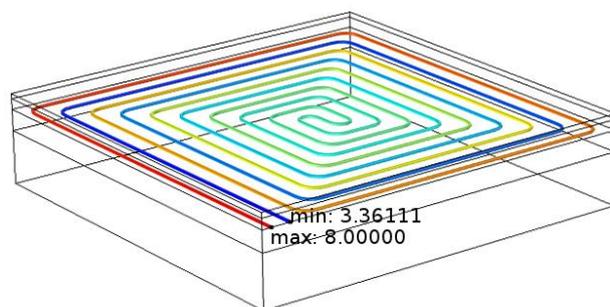


Abbildung 30: Wärmestromdichte 600 W/m<sup>2</sup> - Temperaturverlauf der Rohrleitung in °C

Sowohl unter Berücksichtigung einer auf der sicheren Seite liegend ermittelten Wärmestromdichte von 400 W/m<sup>2</sup> als auch unter Annahme einer um 50% erhöhten Wärmestromdichte bleiben die Kreislaufaustrittstemperaturen selbst unter Berücksichtigung stationärer Verhältnisse im positiven °C-Bereich. Das Gefrieren des Tunneldrainagewassers innerhalb der flächigen Wärmeübertragungssysteme ist auf Basis der bisher durchgeführten Untersuchungen bei Aufrechterhaltung eines Mindestvolumenstromes von

$$\dot{V}_{\min} = \frac{3,52 \text{ kW}}{8 \text{ K} \cdot 4194 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}} = \quad (26)$$

$$1,049 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 377 \text{ l/h}$$

nicht zu befürchten.

Unter der Berücksichtigung einer wirkenden Wärmestromdichte von 400 W/m<sup>2</sup> wird sich die Rücklauftemperatur der Einzelkreisläufe zu 5°C einstellen. Die Mindesteinleittemperatur gemäß Kapitel 2.1.1 wird somit eingehalten. Sollte eine höhere Wärmestromdichte zur Aufrechterhaltung der Eis- und Schneefreihaltung erforderlich wer-

den, wird sich unter Umständen eine Temperatur des Rücklaufs einstellen, die unter eine Mindesteinleittemperatur fällt. Für diesen Fall ist im Zuge der Erstellung eines Regelkreises zu entscheiden, ob eine kurzzeitige Unterschreitung der Mindesteinleittemperatur zulässig ist, oder die Anlage außer Betrieb zu nehmen ist.

Neben der energiebilanziellen Betrachtung der Machbarkeit einer direkten passiven Heizung ist die Systemsicherheit, in diesem Fall der Ausfall einer oder mehrerer Umwälzpumpen bzw. ein Stromausfall zu untersuchen und bewerten.

Denkbar in diesem Zusammenhang sind einerseits die Vorhaltung einer Reservepumpe, dies wird im Rahmen der Kostenschätzung gemäß Kapitel 3.4 berücksichtigt, zum anderen Untersuchungen zum Lastfall „Ausfall einer oder mehrerer Pumpen und Aufrechterhaltung eines Mindestvolumenstroms“. Darüber hinaus ist die Bereitstellung einer Notstromversorgung, ggf. mit Speicherkapazität zu prüfen bzw. die Notstromversorgung des bestehenden Tunnelbetriebs zu adaptieren. Diese Maßnahmen wurden im Rahmen der Vorplanung nicht genauer betrachtet. Maßnahmen zum Umgang mit dem Lastfall „Stromausfall“ wurden im Zuge der Entwurfsplanung detailliert untersucht und können dem Kapitel 4.7 entnommen werden.

### 3.2.3.2 Rohrleitung und Systemkomponenten

Im Rahmen der Vorplanung werden zur Vordimensionierung des Systems zur Eis- und Schneefreihaltung Annahmen hinsichtlich des hydraulischen Systems und dessen Ausführung gemacht, die nachfolgend beschrieben werden. Diese Annahmen werden im Zuge der nachlaufenden Entwurfsplanung adaptiert und ggf. angepasst.

#### Kreislaufrohrleitung

Zur Sicherstellung eines möglichst geringen Druckverlustes werden zur Vordimensionierung möglichst große Rohrquerschnitte zur Ausbildung des flächigen Wärmeübertragers gewählt. Sämtliche Berechnungen im Rahmen dieser Vorplanung basieren auf dem Rohrleitungstyp RAUTHERM S 25 x 2,3 mm der Firma Rehau.

Technische Daten	Einheit	
Werkstoff	[-]	PE-Xa
Durchmesser außen	mm	25
Wandstärke	mm	2,3
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,35

Tabelle 13: Rohrspezifikationen Kreislaufrohrleitung

Aus energetischer Sicht ist es sinnvoll, die Fließbedingungen innerhalb der Rohrleitungen turbulent zu halten, da somit ein gegenüber laminaren Strömungsverhältnissen verbesserter Wärmeübergang vom zirkulierenden Medium zur Rohrwandung gewährleistet wird. Dieser verbesserte Wärmeübergang führt allerdings zu einem erhöhten Druckverlust in der Leitung, womit die erforderlichen Pumpleistungen steigen. Aktuell sind keine Studien bekannt, die die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Strömungszustände vergleichend gegenüberstellen. Im Rahmen dieser Vorplanung wird von einem Strömungszustand im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung bei  $Re = 2300$  ausgegangen. Unter der Annahme des Einsatzes eines Frostschutzmittels 40% Frostschutz/60% Wasser ergibt sich hieraus eine Fließgeschwindigkeit innerhalb des Rohres von:

$$v_{Rohr} = \frac{Re \cdot \nu}{d_i} = \frac{2300 \cdot 5}{20,4} = 564 \text{ mm/s} = 0,56 \text{ m/s} \quad (27)$$

mit:

$\nu$  kinematische Viskosität [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]

$d_i$  Innendurchmesser Rohr

Der Einsatz eines Frostschutzmittels-Wassergemisches führt gegenüber dem Einsatz von reinem Wasser zu einer Erhöhung der Viskosität und damit zu höheren Druckverlusten während das Fluid durch die Rohrleitung strömt. Im Zuge der Vorplanung war noch nicht abzusehen, ob die Kreislaufrohrleitungen direkt mit Tunneldrainagewasser oder eine Frostschutzmittels-Wassergemische durchströmt würden. Aus diesem Grund wurde auf der sicheren Seite liegend eine höhere Viskosität der Dimensionierung zu Grunde gelegt.

Der maximal förderbare Volumenstrom ergibt sich damit zu:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= v \cdot A = v_{Rohr} \cdot \frac{d_i^2}{4} \cdot \pi \\ &= 0,56 \cdot \frac{0,0204^2}{4} \cdot \pi = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 0,18 \text{ l/s} = 659 \text{ l/h} \end{aligned} \quad (28)$$

Nachfolgend wird ein maximaler Volumenstrom von  $\dot{V}_{\text{Kreislauf}} = 1000 \text{ l/h} = 0,28 \text{ l/s}$  für die Dimensionierung des Rohrleitungssystems zu Grunde gelegt. Es sind demnach ca. 3,5 Rohrleitungskreis-

läufe je 1 l/s Tunneldrainagewasser (vgl. Formel (29)) erforderlich.

Unter Berücksichtigung der Untersuchungen der Grundlagenmittlung (Kapitel 2.1.2.3 und 2.1.3.3) ergeben sowohl am Tunnel Füssen, als auch am Tunnel Rennsteig die vorhandenen Tunneldrainagewasserschüttungen von ca. 12 l/s ca. 150 kW Wärmestrom für den Heizfall. Für die weitere Planung ergibt sich daraus sowohl für das Nordportal des Tunnels Rennsteig als auch für das Nordportal des Tunnels Füssen die erforderliche Anzahl der Einzeilkreisläufe zu:

$$n_{\text{Kreisläufe}} = 12 \text{ l/s} \cdot 3,5 \frac{\text{Kreisläufe}}{\text{l}} = 42 \text{ Stck} \quad (29)$$

Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Gesamtwärmeenergiemenge von 150 kW, ergibt sich eine Heizleistung je Kreislauf zu:

$$\dot{Q}_{\text{Kreislauf}} = \frac{150 \text{ kW}}{42} = 3,57 \text{ kW} \quad (30)$$

Unter der Annahme einer zur Eis- und Schneefreihaltung erforderlichen Wärmestromdichte  $\dot{q}_{\text{zu}} \sim 400 \text{ W/m}^2$  (Erläuterungen zu dieser Annahme siehe 2.3.2.1, 3.2.2.8 und 3.2.2.9), wird die Fläche eines Wärmeübertragerteilkreislaufs zu

$$A_{\text{Kreislauf}} = \frac{3,57 \text{ kW}}{0,4 \text{ kW/m}^2} \approx 9 \text{ m}^2 \quad (31)$$

ermittelt.

Zur Plausibilitätskontrolle kann der abgegebene Wärmestrom eines Wärmeübertragerteilkreislaufs über den eingestellten Volumenstrom, die volumetrische Wärmekapazität des Fluids (Tunneldrainagewasser) und eine entsprechende Temperaturspreizung zwischen Kreislaufeintritts- und austrittstemperatur ermittelt werden:

$$\dot{Q}_{\text{GEO}} = \dot{V} \cdot \rho_w \cdot c_{p,w} \cdot \Delta \vartheta \quad (32)$$

mit:

$$\rho_w = \rho_{\text{Wasser}, 10^\circ\text{C}} = 999,7 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p,w} = c_{p,\text{Wasser}, 10^\circ\text{C}} = 4,195 \text{ kJ/kg K}$$

$$\rho_w \cdot c_{p,w} = 4194 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$$

$$\Delta \vartheta_{\text{Heiz}} = 8^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C} = 3^\circ\text{C}$$

Die hier verwendete Temperaturspreizung von  $3^\circ\text{C}$  ergibt sich aus der gewählten Kreislaufeintrittstemperatur (vgl. hierzu 3.2.3.1) und der minimalen Einleittemperatur (vgl. hierzu 2.1.1). Unter Berücksichtigung

sichtigung des gewählten maximalen Volumensstroms von 0,28 l/s ergibt sich folgender Gesamt-wärmestrom bzw. folgende Wärmestromdichte:

$$\dot{Q}_{GEO} = 0,00028 \cdot 4194 \cdot 3 = 3,52 \text{ kW} \quad (33)$$

$$q_{GEO} = \frac{3,52 \text{ kW}}{9 \text{ m}^2} = 0,39 \text{ kW} \approx 400 \text{ W} \quad (34)$$

Der Dimensionierung der Freiflächenheizung wird im Rahmen der Vorplanung eine Fläche von 9m<sup>2</sup> je Kreislauf zu Grunde gelegt. Die Abbildung 31 zeigt den vordimensionierten Wärmeübertrager im Grundriss unter Angabe einer gewählten Rohrleitungsführung:

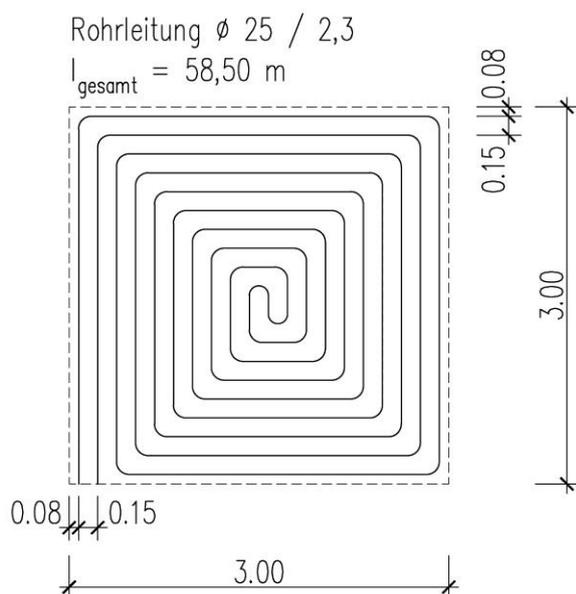


Abbildung 31: Wärmeübertragerkreislaufer Abmessungen und Rohrleitungsführung

Im Rahmen der Vorplanung werden abweichend von der maximal möglichen Kreislaufanzahl vor dem Hintergrund einer sinnvollen geometrischen Anordnung am Nordportal des Tunnels Rennsteig 41 und am Nordportal des Tunnels Füssen 40 Teilkreisläufe (vgl. Anlage XII – Freiflächenheizung Füssen Nord und Anlage XIII – Freiflächenheizung Rennsteig Nord Anlage XIII – Freiflächenheizung Rennsteig Nord) berücksichtigt.

#### Verteilung

Der Anschluss der Heizkreisläufe erfolgt nach dem sogenannten TICHELMANN-System. Hierbei handelt es sich um eine sogenannte Parallelschaltung der Einzelteilkreisläufe.

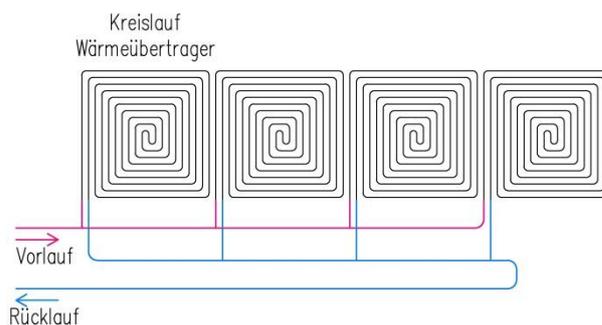


Abbildung 32: TICHELMANN-System

Hierbei erfolgt die Verlegung der Anschlussleitungen zu den einzelnen Teilkreisläufen derart, dass die Summe der Vorlauf- und der Rücklauf-längen für alle Teilsysteme in etwa gleich lang sind. Der hierdurch für alle Systeme annähernd gleiche Druckverlust innerhalb der Rohrleitungen führt zu annähernd gleichen Durchströmungsgeschwindigkeiten und letztendlich zu einer gleichmäßigen Wärmeabgabe. Auf Druckventile zur Steuerung gleicher Strömungszustände kann somit verzichtet werden.

Im Rahmen der unter 3.2.3.1 geführten Machbarkeitsstudie wurden neben der Temperaturentwicklung in der Rohrleitung eines Wärmeübertragerkreislaufer auch die strömungsrelevanten Gegebenheiten untersucht. Hierbei zeigte sich, dass der Druckverlust unter den gewählten geometrischen und hydraulischen Randbedingungen je Teilkreislaufer bei ca. 32 kPa, oder ca. 3,2 m Wassersäule liegt. Um diesen nicht zu vernachlässigenden Druckverlust nicht wesentlich weiter zu steigern, sind die Zu- und Rücklaufleitungen zu den einzelnen Teilkreisläufen durch große Rohrquerschnitte auszubilden, die direkt bis zu den Einzelkreisläufen führen. Hierzu wird im Rahmen der Vorplanung das System Rauthermex, UNO Rohr, mit der folgenden Spezifikation verwendet:

Technische Daten	Einheit	
Typ	[-]	60/126
Durchmesser außen (Dämmung)	mm	128
Durchmesser innen (Rohr)	mm	63
Wandstärke	mm	5,8

Tabelle 14: Rohrspezifikationen Verteilerrohrleitung

Der durch die Anordnung der Verteilerrohre entstehende zusätzliche Druckverlust wird im Rahmen der Vorplanung mit einem pauschalen Zuschlag von 10% auf den Druckverlust je Einzelteilkreislaufer berücksichtigt. Genauere Berechnun-

gen des Druckverlustes erfolgen im Zuge der Entwurfsplanung (siehe 4.6).

#### Förderpumpe

Zur Auslegung der Förderpumpen wird abweichend von den zuvor getroffenen Annahmen davon ausgegangen, dass die einzelnen Teilkreisläufe der Anlage aus hydraulischer Sicht nicht parallel, sondern in Reihe miteinander verbunden werden. Unter dieser Annahme sind die ermittelten Druckverluste je Teilkreislauf zu addieren und eine entsprechende Pumpleistung bereitzustellen. Ob die Einzelsysteme der Anlage parallel (TICHELMANN-System) oder in Reihe verbunden werden, wird im Zuge der Entwurfsplanung festgelegt.

Je Wärmeübertragerfläche von 9 m<sup>2</sup> sind 0,28 l/s Tunnelrainagewasser zu fördern sowie ein Druck von 35 kPa (32 kPa + 10%) zu überwinden.

Im Rahmen der Vorplanung wird eine Pumpe des Typs Grundfos Magna 3 50-180 mit folgenden Spezifikationen gewählt:

Technische Daten	Einheit	
Grundfos Magna 3 Typ	[-]	50-180
Förderhöhe	m	17,5
Fördermenge	l/s	2
Leistung min	W	23
Leistung max	W	762

Tabelle 15: Spezifikationen Umwälzpumpe

Jeweils 5 Kreisläufe werden mittels einer Umwälzpumpe betrieben:

$$\dot{V}_{\text{Einzelpumpe}} = 5 \cdot 0,28 \text{ l/s} \approx 1,4 \text{ l/s} < 2 \text{ l/s} \quad (35)$$

$$P_{\text{Einzelpumpe}} = 5 \cdot 3,5 \text{ kPa} = 17,5 \text{ kPa} = 17,5 \text{ m} \quad (36)$$

Die gewählte Pumpe kann 5 Einzelteilkreisläufe hydraulisch versorgen. Aufgrund der hohen Anzahl an erforderlichen Pumpen zur Verteilung des gesamten zur Verfügung stehenden geothermischen Potentials ist im Rahmen der Entwurfsplanung die Wahl des Pumpentyps bzw. der hydraulischen Verbindung der Teilkreisläufe zu überprüfen und ggf. anzupassen.

#### Sonstige Installationen

Die Förderpumpen entnehmen das Tunnelrainagewasser über eine Saugleitung direkt aus der bestehenden (Tunnel Füßen) bzw. herzustellenden (Tunnel Rennsteig) Wasserfassung

(siehe 4.3). Die bisherigen im Rahmen der Grundlagenermittlung durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich der Eignung der Tunnelrainagewässer zum Einsatz in klassischen Wärmeübertragern hat gezeigt, dass unter Verwendung von korrosionsbeständigen Metallen in der Anlagentechnik keine Behandlung der Drainagewässer erforderlich wird (ergänzende Hinweise zur Eignung der Tunnelrainagewässer siehe 2.2.2.1, 2.2.2.2 und 2.2.3). Im Zuge der Ausführungsplanung ist die Eignung vor allem der Förderpumpe durch den Hersteller überprüfen zu lassen. Die Untersuchungen des Drainagewässers am Tunnel Füßen haben eine geringe Menge an Sedimentfracht ergeben. Auch am Tunnel Rennsteig ist das Vorhandensein von Geschiebe im Drainagewasser nicht zur Gänze auszuschließen (siehe Anlage I – Protokolle Ortsbegehung Rennsteig). Aus diesem Grund wird im Rahmen der Vorplanung ein Sandfilter für jede Förderpumpe berücksichtigt (siehe Anlage XV – Anlagenbestandteile).

Die zum Einsatz kommenden Förderpumpen sind zur Erreichung einer möglichst hohen Effizienz drehzahl geregelt auszuführen. Die Steuerung der Drehzahl erfolgt über die zu messenden Vor- bzw. Rücklauftemperaturen der einzelnen Wärmeübertragerkreisläufe. Hierzu ist eine entsprechende Regelung zu entwickeln, die es im Sinne des begleitenden Monitorings ermöglicht, die Strömungs- und Temperaturverhältnisse der Einzelkreisläufe zu erfassen und zu regeln (Hinweise zum Regelungskonzept siehe 4.7.1 und Anlage XIV – Planunterlagen). Sämtliche Investitionen diese Regelungstechnik betreffend werden im Rahmen der Vorplanung nicht untersucht oder entwickelt und sind auch nicht Bestandteil der unter Kapitel 3.4 beschriebenen Kostenschätzung. Eine detaillierte Ausarbeitung der erforderlichen Steuer- bzw. Regeltechnik und eine entsprechende Kostenzusammenstellung erfolgt im Rahmen der Entwurfsplanung.

#### Bettung der Rohrleitungen

Die Rohrleitungen werden im Rahmen der Vorplanung gemäß der nachfolgenden Skizze (Abbildung 33) im Bereich der Betriebsflächen angeordnet angenommen:

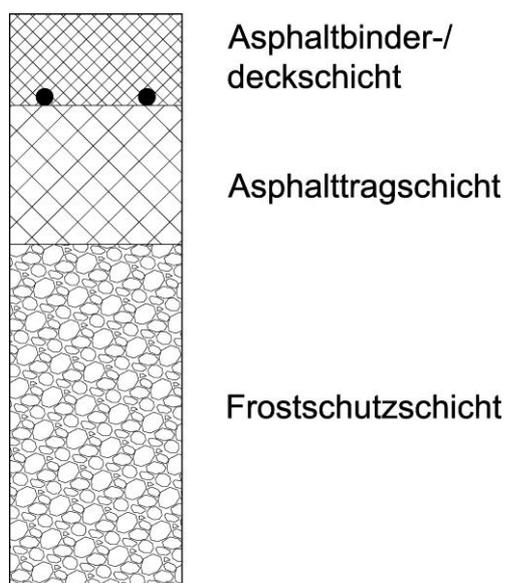


Abbildung 33: Prinzipskizze Bettung Rohrleitungen im Bereich der Wärmeübertragerkreisläufe

Der berücksichtigte Fahrflächenaufbau wurde hierbei in Anlehnung an die Bk100 gemäß RStO 12 Zeile 1, Tafel 1 gewählt. Ob dieser so im Bereich der Betriebsflächen vorliegt, ist im Zuge der Ausführungsplanung zu erheben und die durchgeführten Berechnungen ggf. anzupassen. Die Kostenschätzung gemäß Kapitel 3.4 berücksichtigt das

Aufnahmen der vorhandenen Asphaltdeck- und Binderschicht sowie deren Wiederherstellung des gezeigten Fahrflächenaufbaus. Die angesetzten Kosten können folglich eher als zu hoch betrachtet werden, sollte sich im Zuge der Ausführungsplanung eine geringere als die angenommen Bauklasse zeigen.

### 3.2.3.3 Anlagenlayout

Für die Anlagen zur Schnee- und Eisfreihaltungen wurde sowohl für das Tunnelportal Rennsteig Nord als auch Füssen Nord eine grobe Aufteilung der vorhandenen Betriebsflächen in die beschriebenen Einzelkreisläufe vorgenommen. Diese Aufteilung dient vor allem als Grundlage zur Massenermittlung und Erstellung einer entsprechenden Kostenschätzung (siehe 3.4). Darüber hinaus gibt gewählte Aufteilung der Betriebsfläche aber auch einen Überblick über eine mögliche Ausbildung der aktivierbaren Flächen an den Tunnelportalen Füssen und Rennsteig. Eine Übersicht der aktivierten Flächen ist in der Anlage XII – Freiflächenheizung Füssen Nord und der Anlage XIII – Freiflächenheizung Rennsteig Nord zu entnehmen und ist in der Abbildung 34 für das Portal Füssen Nord dargestellt.

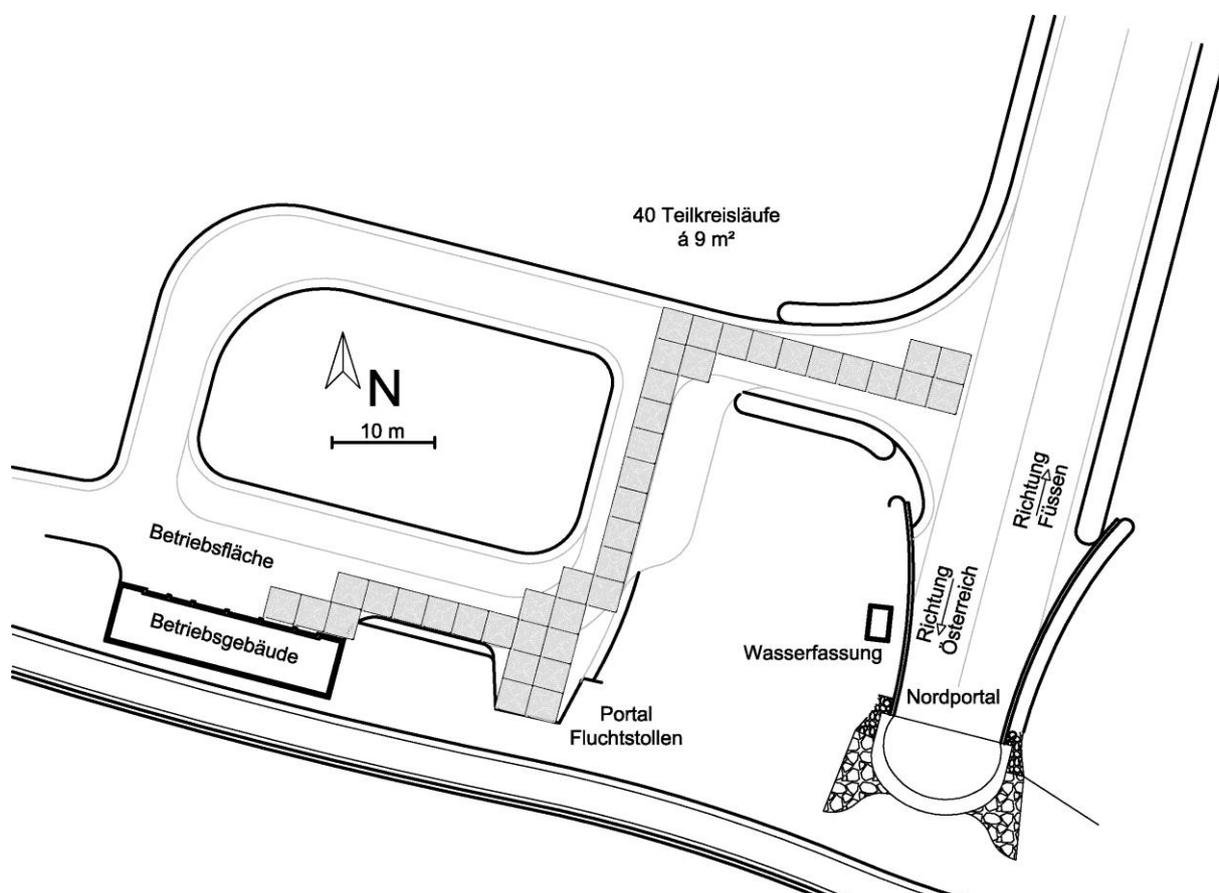


Abbildung 34: Anordnung Temperierungskreisläufe Nordportal Füssen

### 3.3 Klimatisierung Technikräume

#### 3.3.1 Allgemein

Die Voruntersuchungen zum tunnelgeothermischen Potential hinsichtlich der Bereitstellung von Kühlleistung haben gezeigt, dass sowohl am Tunnelportal Rennsteig Nord als auch am Portal Füssen Nord ausreichend Kühlenergie zur Versorgung der Tunneltechnikräume zur Verfügung steht.

Bei der Kühlung wird grundsätzlich in die sogenannte aktive und passive Kühlung unterschieden:

##### *Aktive Kühlung*

Bei der aktiven Kühlung wird der Kühlbedarf durch einen Kompressor (System Kühltisch) gedeckt. Zum Betrieb des Kompressors ist entsprechend der erforderlichen Kühlleistung elektrische Energie aufzuwenden.

##### *Passive Kühlung*

Bei der passiven Kühlung ist die Mediumtemperatur des Primärkreislaufes ausreichend niedrig, um die erforderliche Kühlleistung lediglich über die natürliche Temperaturspreizung zwischen Primär- und Sekundärkreislauf decken zu können. In diesem Fall wird elektrische Energie lediglich für die Umwälzung der Volumenströme benötigt.

Nach einer Vorbewertung des zur Verfügung stehenden geothermischen Kühlpotentials kann für die zu untersuchenden Tunnelbetriebsräume eine Passivkühlung zum Einsatz kommen.

#### 3.3.2 Energiebedarfsermittlung

##### 3.3.2.1 Anlage Rennsteig Nord

Die erforderliche Kühllast für den Tunnelbetriebsraum am Nordportal des Tunnels Rennsteig wurde bereits im Zusammenhang mit der Durchführung der Grundlagenermittlung durch den Tunnelbetreiber zu 8 kW angegeben. Augenscheinlich ist dieser Wert im Vergleich mit der für den Betriebsraum des Tunnels Füssen Nord (siehe 3.3.2.2) angegebenen Kühllast eher gering. Aus diesem Grund werden ergänzend für die Auslegung der passiven Kühlung mittels Tunnelrainagewasser folgende zusätzliche Wärmeenergieeinträge berücksichtigt:

Eintragsart	Bezugsfläche	spezifischer Eintrag	Wärmeenergie
Solar	105 m <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup> Fassadenfläche	1,05 kW
Beleuchtung	280 m <sup>2</sup>	15 W/m <sup>2</sup> Grundfläche	4,20 kW

Personenverkehr	wird vernachlässigt
-----------------	---------------------

Tabelle 16: Wärmeenergieeinträge Rennsteig Nord

Das System einer passiven Kühlung für den Betriebsraum des Tunnels Rennsteig Nord ist folglich auf 13,5 kW auszulegen.

##### 3.3.2.2 Anlage Füssen Nord

Die Energiebedarfsermittlung zur Bereitstellung einer erforderlichen Kühlleistung fußt für den Betriebsraum am Nordportal des Tunnels Füssen auf den durch den Tunnelbetreiber gemachten Angaben zu den vorhandenen Anschlusswerten der installierten Technik sowie auf einer überschlägigen Berechnung zu weiteren Energieeinträgen wie solare Wärmegewinne und Abwärme weiterer Infrastruktur.

Als Gesamtanschlusswert der installierten Technik wurde durch den Tunnelbetreiber laut E-Mail vom 15.03.2016 15 kW angegeben. Weitere Wärmeenergieeinträge belaufen sich gemäß Tabelle 17 auf ~ 2,5 kW.

Eintragsart	Bezugsfläche	spezifischer Eintrag	Wärmeenergie
Solar	75 m <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup> Fassadenfläche	0,75 kW
Beleuchtung	116 m <sup>2</sup>	15 W/m <sup>2</sup> Grundfläche	1,74 kW
Personenverkehr	wird vernachlässigt		

Tabelle 17: Wärmeenergieeinträge Füssen Nord

Das System einer passiven Kühlung für den Betriebsraum des Tunnels Füssen Nord ist folglich auf 17,5 kW auszulegen.

#### 3.3.3 Betriebskonzepte

Die Kühlung von Betriebsräumen mit vorwiegender Belastung durch Abwärme von einer Serverinfrastruktur erfolgt traditionell durch Zuluft-Abluftsysteme mit integrierter Kühlung. Darüber hinaus werden unter anderem auch sogenannte Schrankkühlsysteme angeordnet, bei denen die entstehende Abwärme direkt am Entstehungsort, also dem Serverschrank, an den Kältekreislauf übertragen wird.

Die unter 3.3.1 definierte passive Kühlung findet zumeist unter Verwendung von flächigen Wärmeübertragern wie z.B. Kühldecken, Fußbodenkühlungen oder aktivierten Bauteilkernen statt. Diese

Systeme kommen vor allem dort zum Einsatz, wo ein behagliches Raumklima für die Nutzung der Räume durch Personen erforderlich ist. Zur Reduktion der Temperaturen in Serverräumen bieten diese Systeme jedoch meist eine zu geringe spezifische Kühlleistung.

#### Wärmeübertrager

Im Rahmen dieser Vorplanung wird zur Ausstattung der Tunnelbetriebsräume mit passiver Kühlleistung auf das System der Klimatruhe zurückgegriffen. Nach den derzeitigen Recherchen bieten diese Systeme zum einen die Möglichkeit, direkt mit dem Tunneldrainagewasser beaufschlagt zu werden, zum anderen bieten sie die erforderlichen Kühlleistungen zur Abdeckung der vorhandenen Kühllast (Hinweis: Die im Anschluss an diese Vorplanung durchgeführte Entwurfsplanung weicht vom System der Klimatruhen ab. Vgl. hierzu Kapitel 4.5).

Im Rahmen der Vorplanung wird als Planungsgrundlage eine Hydrima-Klimatruhe des Typs ACTH 50 der Firma Stiebel Eltron gewählt.

Technische Daten	Einheit	
Typ	[-]	ACTH 50
Höhe	mm	478
Breite	mm	1323
Tiefe	mm	231
Gewicht	kg	35
Kühlleistung	kW	5,17
Leistungsaufnahme (elekt.)	W	125
Luftmenge	m <sup>3</sup> /h	437
Schalldruckpegel in 1m Entfernung	dB(A)	52
Druckverlust	kPa	25,9
Nennvolumenstrom	l/h	886
Kaltwasser Vorlauf	°C	7
Kaltwasser Rücklauf	°C	12

Tabelle 18: Spezifikation Klimatruhe ACTH 50

Die Verbindung mehrerer Klimatruhen innerhalb eines Gebäudes erfolgt entsprechend der im Rahmen der Ausführungsplanung durchzuführenden Rohrnetzrechnung. Im Rahmen der Vorplanung werden hierzu keine Untersuchungen durchgeführt.

#### Versorgungsleitung

Die Vor- und Rücklaufleitung von der Wasserfassung zum Betriebsgebäude werden als klassische Fernwärmeleitung geplant. Im Rahmen der Vorplanung wird hier auf das Rauthermex DUO Rohr mit den in Tabelle 19 beschriebenen Spezifikationen zurückgegriffen:

Technische Daten	Einheit	
Typ	[-]	40+40/126
Durchmesser außen (Dämmung)	mm	128
Durchmesser außen (Rohr)	mm	40
Wandstärke	mm	3,7

Tabelle 19: Rohrspezifikationen Verteilerrohrleitung

Grundsätzlich ist es denkbar, die Versorgungsleitungen der Eis- und Schneefreihaltung auch für den Kühlbetrieb der Tunneltechnikräume zu nutzen. Dieses mögliche Optimierungspotential ist vor allem im Hinblick auf die hierfür erforderliche Anlagentechnik im Zuge der Ausführungsplanung zu untersuchen.

#### Förderpumpe

Je Klimatruhe sind 0,25 l/s (886 l/h gemäß Tabelle 18) Tunneldrainagewasser zu fördern sowie ein Druck von 25,9 kPa zu überwinden. Die zusätzlichen Druckverluste in den Zu- und Verteilungsleitungen werden je Klimatruhe pauschal mit +10% berücksichtigt. Diese Annahme ist im Zuge der Entwurfs- bzw. Ausführungsplanung zu prüfen und ggf. anzupassen (Hinweis: Im Zuge der Entwurfsplanung wird das System der Klimatruhe nicht weiter verfolgt, vgl. Kapitel 4.5).

Die Vordimensionierungen der Anlagen Rennsteig Nord (siehe 3.3.3.1) und Füssen Nord (siehe 3.3.3.2) ergeben, dass je Betriebsraum 3 Klimatruhen des Typs ACTH 50 erforderlich werden:

Im Rahmen der Vorplanung wird eine Pumpe des Typs Grundfos Magna 3 40-100 mit folgenden Spezifikationen gewählt:

Technische Daten	Einheit	
Grundfos Magna 3 Typ	[-]	40-100
Förderhöhe	M	12,0
Fördermenge	l/s	5,3
Leistung min	W	15
Leistung max	W	336

Tabelle 20: Spezifikationen Umwälzpumpe

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{Einzelpumpe}} &= 3 \cdot 0,25 \text{ l/s} \approx 0,75 \text{ l/s} \\ &< 5,3 \text{ l/s} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{Einzelpumpe}} &= 3 \cdot (2,6 \cdot 1,1 \text{ kPa}) = 8,6 \text{ kPa} \\ &< 12,0 \text{ m} \end{aligned} \quad (38)$$

Die gewählte Pumpe kann 3 Klimatruhen hydraulisch versorgen.

Grundsätzlich ist es denkbar, die erforderlichen Pumpen zur Eis- und Schneefreihaltung in den Sommermonaten zur Kühlung der Tunnelbetriebsräume zu nutzen. Diese mögliche Optimierung ist im Zuge der Ausführungsplanung gegebenenfalls weiter zu untersuchen.

### 3.3.3.1 Anlage Rennsteig Nord

Am Betriebsgebäude Rennsteig Nord existiert bereits eine Zuluft-Abluft-Kühlung des Betriebsgebäudes. Mit E-Mail vom 08.03.2016 wurden dem Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart durch den Tunnelbetreiber Planunterlagen über die installierte Lüftungs- und Klimaanlage des Betriebsraumes am Nordportal des Tunnels Rennsteig zur Verfügung gestellt. Diese zeigen das prinzipielle Anlagenschema sowie die installierten Luftkanäle im Zusammenhang mit der Rohbaukontur des Betriebsgebäudes. Zu erkennen ist, dass zahlreiche, voneinander getrennte Räume durch das Klima- und Lüftungssystem klimatisiert werden. Um das geothermische Kühlpotential innerhalb des Betriebsgebäudes nutzbar zu machen, sind grundsätzlich 2 Vorgehensweisen denkbar:

- Installation von einzelnen Klimatruhen in den derzeit klimatisierten Räumen und Anpassung der jeweiligen Kühlleistung an die entsprechend vorhandene Kühllast.

Das vorhandene Klimasystem ist regelungstechnisch so zu modifizieren, dass keine Kühlleistung mehr bereitgestellt wird, sondern lediglich der erforderliche Luftwechsel sichergestellt ist. Jede Klimatruhe, nach derzeitiger

Schätzung 10 Stück, sind zu installieren und an ein Vor- und Rücklaufrohrleitungssystem sowie an eine Kondensatleitung anzuschließen. Das aktuell installierte Klimagerät verliert seine Funktion.

- Nutzung der geothermischen Kühlleistung im Bereich des Klimagerätes im Sinne eines Vorkühlers.

Die durch den Tunnelbetreiber zur Verfügung gestellten Planunterlagen zeigen neben der Lüftungsanlage die Existenz eines Klimagerätes, das allerdings nicht näher beschrieben ist. Nach Rücksprache mit den damals an der Planung beteiligten Fachfirma Siemens Gebäudetechnik Ost GmbH, diese firmiert nicht mehr unter diesem Namen, sollte grundsätzlich die Möglichkeit bestehen, einen mit geothermischer Kühlleistung betriebenen Vorkühler dem Klimagerät vorzuschalten, um so die derzeit zur Kühlung erforderliche elektrische Leistung zu verringern. Hierfür wäre ein Wärmeübertrager auszulegen und zu konstruieren. Diese Arbeiten wurden im Rahmen der Vorplanung nicht durchgeführt.

Die hier aufgeführten Varianten zur Deckung der erforderlichen Kühllast im Betriebsgebäude am Nordportal des Tunnels Rennsteig erfordern einen hohen Planungs- und Modifizierungsaufwand. Die hieraus resultierenden Kosten lassen sich erst auf der Basis einer detaillierten Entwurfsplanung beziffern.

Die Kühllast des Betriebsgebäudes am Nordportal des Tunnels Rennsteig liegt mit 13,5 kW in der Größenordnung der Kühllast des Betriebsgebäudes Füssen Nord. Aus diesem Grund werden im Rahmen der Vorplanung die Kosten, die für das Betriebsgebäude des Tunnels Füssen ermittelt wurden, für das Betriebsgebäude am Nordportal des Tunnels Rennsteig übernommen. Eine detaillierte Vorplanung zur Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume am Nordportal des Tunnels Füssen erfolgt nicht.

### 3.3.3.2 Anlage Füssen Nord

Am Betriebsraum des Tunnels Füssen findet derzeit keine kontrollierte Klimatisierung des Tunnelbetriebsraumes statt. Gemäß der Angaben des Tunnelbetreibers zur vorhandenen Abwärme der installierten Technikkomponenten sowie unter Berücksichtigung weiterer Wärmeeinträge in den Tunnelbetriebsraum ist gemäß 3.3.2.2 von einer vorhandenen Kühllast von 17,5 kW auszugehen. Unter Zugrundelegung der Klimatruhe ACTH 50 und deren Spezifikationen gemäß Tabelle 18 kann

bei der Installation von 3 Klimatruhen eine Kühllast von ca. 15,6 kW abgedeckt werden. Die geringfügige Unterschreitung der erforderlichen Kühlleistung um ca. 12% wird im Rahmen der Vorplanung als hinnehmbar angenommen. Im Betriebsgebäude des Tunnels Füssen sind 3 Klimatruhen des Typs ACTH 50 zu installieren.

Eine Anordnung von Wärmeübertragern nach dem System Klimatruhe ist unter den zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten machbar.

Die erforderlichen Installationen innerhalb des Gebäudes wie z.B. Vor- und Rücklaufleitungen, Kondensatleitungen, elektrische Leitungen oder Wanddurchbrüche werden im Rahmen der Kostenschätzung gemäß Kapitel 3.4 unter der Annahme von geschätzten Gesamtkosten berücksichtigt.

Die Hauptleitung zum Betriebsraum wird als Fernwärmerohr ausgeführt.

### 3.4 Kostenschätzung

Das Ziel Vorplanung ist neben dem Vorentwurf potentieller Anlagen zur Nutzung der geothermischen Energie, von den untersuchten zwei Tunnelportalen Rennsteig Nord und Füssen Nord ein Portal für die nachfolgende Entwurfsplanung auszuwählen. Vor diesem Hintergrund ist eine Grundlage zu entwickeln, auf deren Basis die Festlegung auf ein zu untersuchendes Tunnelportal erfolgen kann.

Hierzu wird im Rahmen der Vorplanung das Verfahren einer klassischen Kostenschätzung für die entwickelten Nutzungen gewählt. Sämtliche erforderlichen Leistungen zur Planung und Herstellung der jeweiligen Anlagentechnik werden in einem nach dem Standard Leistungsbuch Bau (STLB) gegliederten Leistungsverzeichnis im Langtextformat erfasst. Hierbei werden die entsprechenden Leistungsbeschreibungen frei formuliert und nicht gemäß den Vorgaben des STLB übernommen. Im Rahmen einer Kostenschätzung ist dies durchaus gerechtfertigt. Das Leistungsverzeichnis ist in die folgenden Teilprojekte gegliedert:

- Allgemeines
- Wasserfassung
- Eis- und Schneefreihaltung
- Kühlung Betriebsräume
- Messtechnik

Innerhalb der Teilprojekte findet die bereits erwähnte Gewerkestruktur gemäß STLB Anwendung. Mit Hilfe dieser Struktur ist es möglich, im späteren Projektverlauf ggf. bereits projektierte

Nutzungen aus dem Gesamtprojekt herauszunehmen, ohne das Leistungsverzeichnis für die verbleibenden Nutzungen anpassen zu müssen (Hinweis: Die an die Vorplanung anschließende Entwurfsplanung nimmt die Leistungsverzeichnisstruktur der Vorplanung nicht auf, da der Planungsinhalt der Entwurfsplanung gegenüber dem Kenntnisstand während der Erstellung der Vorplanung geändert wurde, vgl. hierzu 4.1).

Die Massen der einzelnen Teilleistungen wurden auf der Basis der aktuellen Vorplanung für die entsprechenden Tunnelportale berücksichtigt und sind im Zuge einer ggf. anschließenden Ausführungsplanung fortzuschreiben und zu konkretisieren.

Die zu Grunde gelegten Einheitspreise basieren zum Teil auf eigenen Erfahrungswerten, Annahmen und Herstelleranfragen. Besonders im Bereich der erforderlichen Wärmeübertragerkomponenten, wie den unterhalb der Freifläche angeordneten Rohrleitungen, konnten die Installationskosten nur grob abgeschätzt werden. Die in den Leistungsverzeichnissen genannten Summen der Teilleistungen sowie die Gesamtprojektkosten sind folglich mit einer gewissen Unschärfe behaftet.

Der Titel 3. Kühlung Betriebsräume (siehe Anlage X – Leistungsverzeichnis Tunnel Rennsteig) wurde für den Tunnel Rennsteig aufgrund der unter 3.3.3.1 ausgeführten Randbedingungen gleich den Kosten für den Tunnel Füssen angenommen. Ob mit diesem Kostenrahmen die erforderlichen Adaptionen und Neuinstallationen am Tunnel Rennsteig möglich sind, kann auf Basis des derzeitigen Planungsstandes nicht abschließend beurteilt werden.

Die ermittelten Projektkosten für die Herstellung der Anlagentechnik zum Betrieb der Eis- und Schneefreihaltung sowie zur Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume stellt ein Kriterium zur Wahl eines der beiden Tunnelportale zur detaillierteren Planung im Zuge der Entwurfsplanung dar (vgl. Kapitel 3.5).

Die Kostenschätzungen für die geothermischen Nutzungen an den Tunnel Rennsteig und Füssen sind der Anlage X – Leistungsverzeichnis Tunnel Rennsteig sowie der Anlage XI – Leistungsverzeichnis Tunnel Füssen zu entnehmen. Hierbei wurden die 2 Anlagenkonzepte (Freiflächentemperierung und Kühlung Tunnelbetriebsräume) jeweils für das Tunnelportal Rennsteig Nord und Füssen Nord bewertet. (Hinweis: Die in den Leistungsverzeichnissen beschriebenen Anlagenkonzepte geben den Planungsstand der Vorplanung wieder. Im Rahmen der Entwurfsplanung wurden eine Pilotanlage zur Klimatisierung der Betriebsräume und ein

Technikum zur Temperierung von Freiflächen entwickelt (siehe Kapitel 4 ff.), deren Umfang sich nicht in direkten Bezug zu den Anlagenkonzepten der Vorplanung in Bezug setzen lässt.)

Die Kostenschätzungen enden für die untersuchten Tunnelportale mit Gesamtkosten zu:

Tunnelportal	Gesamtkosten (netto)
Rennsteig Nord	267.534,23 €
Füssen Nord	276.156,78 €

Tabelle 21: Übersicht Gesamtkosten Entwurfsplanung

### 3.5 Auswahl eines Tunnelportals für die Entwurfsplanung

Als Abschluss der Vorplanung ist von den zwei untersuchten Tunnelportalen Rennsteig Nord und Füssen Nord ein Portal für die sich der Vorplanung anschließenden Entwurfsplanung auszuwählen. Folgende Beurteilungskriterien werden in diesem Zusammenhang gesehen:

1. Kosten zur Umsetzung einer Pilotanlage gemäß Kapitel 3.4.

Die für die Tunnelportale ermittelten Kosten zur Umsetzung einer Pilotanlage zur Eis- und Schneefreihaltung von Betriebsflächen und zur Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume haben unter Berücksichtigung des Detaillierungsgrades der Kostenschätzung für beide Tunnelportale die gleiche Größenordnung ergeben. Die Kosten für die notwendigen Adaptierungen der bestehenden Lüftungsanlage am Tunnel Rennsteig konnten bis dato noch nicht ausreichend genau ermittelt werden, woraus eine derzeit noch nicht quantifizierbare Kostensteigerung gegenüber den bisher angenommenen Kosten resultieren kann.

→ Das Risiko einer Kostensteigerung gegenüber der Entwurfsplanung ist für den Tunnel Rennsteig etwas höher.

2. Umsetzbarkeit der Pilotanlage mit Blick auf die erforderlichen Bautätigkeiten

Am Tunnel Füssen können sämtliche Arbeiten außerhalb der durch den Verkehr (BAB A7) beanspruchten Flächen erfolgen. Hier existiert eine Wasserfassung im Bereich der Tunnelbetriebsflächen mit einer guten Zugänglichkeit (siehe Kapitel 3.1.2), so dass auch während des Betriebs die Wartung der Installationen im Bereich der Wasserfassung uneingeschränkt möglich ist.

Am Tunnel Rennsteig sind zur Herstellung der erforderlichen Wasserfassung beide Richtungsfahstreifen Richtung Schweinfurt betroffen (siehe Kapitel 3.1.1). Die Zugänglichkeit zu den mit Wärmeübertragern ausgestatteten Tunnelbetriebsflächen gestaltet sich am Tunnelportal Rennsteig Nord etwas aufwändiger, verglichen mit den Verhältnissen am Tunnelportal Füssen Nord.

→ Baubetrieblich ist dem Tunnel Füssen der Vorzug zu geben.

3. Prognosesicherheit

Für den Tunnel Füssen liegen Daten über die Drainagewasserabstrommenge über einen mehrjährigen Zeitraum vor. Der Drainagewasserabstrom ist nur geringen Schwankungen unterworfen. Hinsichtlich der zu erwartenden Drainagewassertemperaturen kann unter Berücksichtigung der bisherigen Messergebnisse von einer maximalen Temperaturspreizung von ca. 3,8°C (Drainage West) ausgegangen werden. Für den Tunnel Rennsteig wurden Messeinrichtungen zur Erfassung der Drainagewassermengen und -temperatur erst zu Beginn dieses Forschungsprojektes installiert. Die im Kapitel 2.1.2.2 vorgestellten Messergebnisse erlauben derzeit keine zuverlässige langfristige Prognose des geothermischen Potentials für dieses Portal.

→ Hinsichtlich der Prognosesicherheit des zur Verfügung stehenden geothermischen Potentials ist dem Tunnel Füssen der Vorzug zu geben.

4. Potential möglicher Ausbaustufen - Erweiterung durch potentielle weitere Nutzungen.

Das zur Verfügung stehende geothermische Potential des Tunnels Füssen wird für den Betrieb der Eis- und Schneefreihaltung in den Wintermonaten zur Gänze genutzt. Weitere Nutzungen sind in den Wintermonaten nicht möglich. In den Sommermonaten besteht am Tunnel Füssen ggf. noch die Möglichkeit, weitere Kälteleistung aus dem Tunneldrainagewasser auszukoppeln um hiermit weitere Nutzungsmöglichkeiten zu generieren. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang die Versorgung von Büro- oder Industriegebäuden im nahegelegenen Gewerbegebiet Füssen (vgl. Kapitel 2.3.4 und Anlage VIII – Potentielle Nutzungen Füssen).

Am Tunnel Rennsteig zeigen die gemessenen Abstrommengen (vgl. Abbildung 6) ein erheblich größeres geothermisches Potential, das al-

lerdings nicht konstant über das gesamte Jahr zur Verfügung steht. Weitere Nutzungsmöglichkeiten sind am Nordportal, aber auch dem derzeit nicht mehr betrachteten Südportal des Tunnels Rennsteig möglich.

→ Mit Blick auf mögliche Ausbaustufen einer geothermischen Pilotanlage sowie auf die Versorgung weiterer Nutzer ist dem Tunnel Rennsteig der Vorzug zu geben.

Auf der 3. Betreuergruppensitzung zum Forschungsprojekt wurden die aufgezeigten Beurteilungskriterien diskutiert. Hierbei wurden vor allem die geringen bauliche Eingriffe in den Bestand, eine gute Zugänglichkeit zum Projektgebiet sowie eine höhere Prognosesicherheit des zur Verfügung stehenden geothermischen Potentials als Vorteile für die Errichtung einer Pilotanlage am Nordportal des Tunnels Füssen gewertet.

Für die Entwurfsplanung wurde das Standort Tunnel Füssen Nordportal gewählt.

## 4 Entwurfsplanung

Im Rahmen der 3. Betreuergruppensitzung zum Forschungsprojekt „Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwerken“ wurde das Bearbeitungsziel, die Entwicklung einer Entwurfsplanung für eine Pilotanlage zur thermischen Nutzung anfallender Tunneldrainagewässer, gegenüber der ursprünglich vereinbarten Leistung durch die Vertragsparteien BAST und Universität Stuttgart geringfügig adaptiert. Die geänderten Inhalte der Entwurfsplanung werden in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschrieben.

### 4.1 Ziel der Entwurfsplanung

Im Rahmen der 3. Betreuergruppensitzung wurde das Nordportal des Tunnels Füssen als Standort für die Untersuchungen zur Errichtung einer geothermischen Pilotanlage zur Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume und eines Technikums zur Temperierung der Freiflächen im Bereich der tunnелеigenen Betriebsflächen ausgewählt. Abweichend von der ursprünglichen Zielstellung, eine vollständige, das gesamte geothermische Potential voll ausschöpfende Großanlage zu planen, wurde vereinbart, zunächst ein Vorprojekt zu initiieren und dies im Rahmen der anstehenden Entwurfsplanung zu entwickeln.

Unter einem Technikum wird im Folgenden ein wissenschaftlich begleiteter Versuchsstand verstanden, an dem Wärmeübertragungssysteme zur

Eis- und Schneefreihaltung hinsichtlich ihrer Ausbildung und ihres Betriebs unter Realbedingungen getestet werden. Die während des Betriebes der Technikumsanlage ermittelten Prozessparameter werden für die Planung und Auslegung einer entsprechenden Großanlage („Scale-up“) genutzt. Die Untersuchungen im Rahmen eines Technikums werden erforderlich, da die Anlage zur Temperierung der Freiflächen nach dem System „direkt-passive-Heizung“ (siehe Kapitel 3.2.3.1) erfolgen soll. Diese Art des Betriebs im Bereich von Freiflächentemperierungen entspricht nicht dem Stand der Technik und es existieren keine dokumentierten Erfahrungen aus der Praxis. Die Gefahr bei dieser Art des Betriebs ist, dass es infolge von zu hohen Wärmestromdichten oder beim Ausfall der Förderpumpe zum Auffrieren des Tunneldrainagewässers in den Rohrleitungen kommen kann und dies die Rohrleitungen innerhalb des Fahrflächenaufbaus sowie den Fahrflächenaufbau selber zerstört. Die Durchführung des Technikums wird die zur Dimensionierung und Planung einer Großanlage zur Freiflächentemperierung erforderlichen Randbedingungen hinsichtlich des Betriebs und der konstruktiven Ausführung beschreibbar machen.

Im Rahmen der Entwurfsplanung sind sowohl für die Pilotanlage „Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume“ als auch das Technikum „Temperierung der Freiflächen“ beginnend von der Wasserfassung und der Wasserförderung die Ausbildung der Wärmeübertrager detailliert zu planen. Hierbei sind neben der eigentlichen Anlagentechnik vor allem die mit diesen Anlagen zu untersuchenden Parameter, Szenarien und Konstruktionen zu benennen und entsprechende Konzepte und Methoden zu entwickeln, mit denen diese untersucht werden können.

Darüber hinaus ist die wissenschaftliche Begleitung des Projektes zu planen und zusammen mit der erforderlichen Anlagen-, Regelungs- und Messtechnik monetär zu bewerten. Hierzu werden die Ergebnisse der Entwurfsplanung in ein Langtextleistungsverzeichnis zusammengestellt. Die Ergebnisse der Entwurfsplanung lassen sich nicht direkt mit den Ergebnissen der Vorplanung gemäß Kapitel 0 ff. vergleichen, da im Rahmen der Vorplanung der Fokus der Bearbeitung auf einer Großanlage ohne intensive wissenschaftliche Begleitung lag.

### 4.2 Konzept Pilotanlage und Technikum

Für das Nordportal des Tunnels Füssen sind im Zuge einer Entwurfsplanung eine Pilotanlage zur

Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume (1) sowie ein eine Anlage zur Temperierung von Freiflächen im Sinne eines Technikums (2) zu entwickeln.

(1) Pilotanlage „Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume“

Zur Deckung der Kühllast des Betriebsraumes wurden im Vorfeld der Erstellung dieses Zwischenberichtes mehrere Ortstermine wahrgenommen und die Planung zur Integration der Kühlkomponenten in die bestehende Lüftungsanlage konkretisiert (vgl. Kapitel Anlage II – Protokolle Ortsbegehung Füßen). Im Rahmen der Pilotanlage wird auf eine Variation der Bereitstellung der Kühllast und intensive Untersuchungen in diesem Zusammenhang verzichtet, da die Steuerung und Regelung dieser Anlage zu einer Standardaufgabe aus dem Bereich der Haustechnik zählt. Das Pilotprojekt wird sich daher im Wesentlichen mit der Bereitstellung des Tunneldrainagewassers sowie der wissenschaftlichen Auswertung der Anlagen- daten befassen.

(2) Technikum „Temperierte Freifläche“

Die Ausbildung des Wärmeübertragers zur Eis- und Schneefreihaltung hat einen entscheidenden Einfluss auf die realisierbare Wärmestromdichte. Das bedeutet, je nach Ausbildung des Übertragers werden an der Oberfläche des eis- und schneefrei zu haltenden Bereichs höhere oder niedrigere Temperaturen erreicht.

Die direkte passive Eis- und Schneefreihaltung mit Tunneldrainagewasser macht zur Minimierung der Wärmeverluste den Einsatz von Rohrleitungen als Wärmeübertrager erforderlich. Diese sollten möglichst flächig im Bereich der Freiflächen angeordnet werden. Unter der Berücksichtigung dieser Randbedingungen sind grundsätzlich folgende Ausbildungen denkbar:

- Oberflächennahe Verlegung von Kunststoffrohrleitungen im Bereich der Freifläche
- Oberflächennahe Verlegung von metallischen Rohrleitungen im Bereich der Freifläche
- Anordnung von ergänzenden Wärmeleitkonstruktionen (Wärmeleitbleche, thermisch aktivierte Bewehrungsmatten usw.)

Die Anordnung von Kunststoffrohrleitungen hat sich in der Vergangenheit sowohl im Bereich der Fußboden-, als auch im Bereich der Freiflächenheizung bewährt. Für besser wärmeleitende Materialien wie z.B. Kupferrohre existieren keine Langzeiterfahrungen für die beabsichtigte Nutzung. Auch ein denkbarer Projektzeitraum von ggf. 1-3 Jahren würde hier keine ausreichenden Lang-

zeiterfahrungen generieren. Aus diesem Grund wird für die Ausbildung des Wärmeübertragers auf bewährte, am Markt erhältliche Rohrleitungen aus vernetztem Polyethylen zurückgegriffen.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeübertragung und die Oberflächentemperatur haben die Parameter gemäß Abbildung 35:

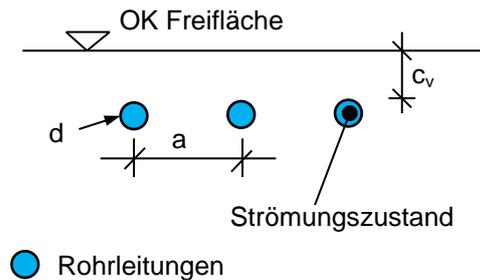


Abbildung 35: Einflüsse bei der Ausbildung des Wärmeübertragers auf die erzielbare Wärmestromdichte, a: Rohrabstand,  $c_v$ : Verlegtiefe, d: Rohrdurchmesser

Im Rahmen von Voruntersuchungen zur Entwurfsplanung wurden auf Basis von dem in Abbildung 27 dargestellten numerischen Berechnungsmodell Variationsberechnungen möglicher geometrischer Anordnungen der Rohrleitungen innerhalb der Freifläche und unter Berücksichtigung verschiedener Strömungszustände durchgeführt. Aus diesen Berechnungen haben sich die nachfolgend zusammengefassten Abhängigkeiten ergeben:

- Abstand der Rohrleitungen (a): Der Einfluss des Abstandes der Rohrleitungen folgt einem nichtlinearen Zusammenhang. Grob ergibt eine Verringerung des Rohrabstandes von 15 cm auf 10 cm eine Zunahme der Wärmestromdichte um ca. 20 W/m<sup>2</sup>, eine Erhöhung des Rohrabstandes von 15 cm auf 20 cm eine Verringerung um 10 W/m<sup>2</sup>.

Bei der Wahl der Rohrabstände sind neben den sich ergebenden Gesamtröhlängen und den damit zusammenhängenden Pumpleistungen auch die Mindestbiegeradien der einzusetzenden Rohre zu berücksichtigen.

Basierend auf den genannten Untersuchungsergebnissen sind 3 unterschiedliche Rohrabstände in den Testflächen des Technikums anzuordnen, um darüber den Einfluss des Rohrabstandes entsprechend feststellen zu können.

- Überdeckung (t): Pro 1 cm Überdeckung steigt oder sinkt die Leistung der Anlage um ca. 20 W/m<sup>2</sup>. Je näher die Leitungen an der Oberflä-

che der Fahrfläche angeordnet werden, desto höher wird die Wärmestromdichte ausfallen.

Limitierend für die Anordnung sind konstruktive Anforderungen wie zum Beispiel eine Mindestdeckung zur Sicherstellung eines Verbundes zwischen den Rohrleitungen und dem Fahrflächenbelag. Aus diesem Grund kann eine optimale Tiefenlage der Rohrleitungen bereits im Zuge der Entwurfsplanung ermittelt werden. Im Rahmen der 4. Betreuergruppensitzung zum Forschungsprojekt wurde die Tiefenlage der Rohrleitungen innerhalb des Fahrbahnaufbaus diskutiert. Für die Ausbildung der Testflächen des Technikums wurden entsprechende Festlegungen getroffen (siehe Kapitel 4.4.3).

- Die Vergrößerung des Leitungsquerschnitts (d) hat unter Berücksichtigung der bisher durchgeführten Berechnungen nur einen untergeordneten Einfluss auf die erzielbare Wärmestromdichte. Aus diesem Grund werden möglichst große Rohrleitungsquerschnitte zur Reduktion des hydraulischen Druckverlustes verwendet. Die Wahl des endgültigen Rohrleitungsquerschnitts hat im Zuge der Ausführungsplanung auch auf Basis von geometrischen Randbedingungen (vgl. Kapitel 4.4.2), einer Mindestüberdeckung zur Sicherstellung von ausreichendem Verbund und baubetrieblichen Faktoren zu erfolgen.

Eine Variation des Rohrleitungsquerschnittes im Zuge des Pilotprojektes erfolgt nicht.

- Die Berücksichtigung einer Bewehrungsstahlmatte hat mit einer Zunahme von ca.  $30 \text{ W/m}^2$  gegenüber einem Querschnitt ohne Bewehrung einen großen Einfluss auf die erzielbare Wärmestromdichte. Alternativ können als Wärmeverteilschicht auch modifizierte Baustoffe (Asphalt oder Beton) zum Einsatz kommen, die in gleicher Weise wie eine Bewehrungsstahlmatte die Wärmestromdichte erhöhen.

Im Zuge des Technikums sind Wärmeverteilelemente und unterschiedlich wärmeleitende Fahrflächenmaterialien zu untersuchen.

Im Ergebnis sollen 9 Testfelder (6 Testfelder in Asphaltbauweise (Abbildung 36 orange) und 3 Testfelder in Betonbauweise (Abbildung 36 grün) mit unterschiedlichen geometrischen, bzw. baulichen Variationen untersucht werden. Eine Beschreibung der Detailausbildung des Fahrflächenquerschnitts erfolgt in Kapitel 4.4.3.

Im Zuge der Vorplanung wurde eine Fläche von  $9 \text{ m}^2$  als Grundeinheit zur Eis- und Schneefreihaltung ermittelt. Ziel bei der Planung des Techni-

kums ist es, die im Zuge des Projektes realisierten Testfelder auch in einem ggf. anschließenden Großprojekt weiter nutzen zu können. Aus diesem Grund wird für die Ausbildung der Testfelder die Grundkonfiguration von  $3,0 \times 3,0 \text{ m}$  beibehalten. Es sind gemäß der vorstehenden Ausführungen folglich 9 Testflächen á  $9 \text{ m}^2$  Testfelder auf der Betriebsfläche im Bereich des Nordportals des Tunnels Füßen anzuordnen.

Nach Rücksprache mit dem Tunnelbetreiber ist es grundsätzlich denkbar, die Testfelder bereits im Bereich der eigentlichen Fahrflächen anzuordnen. So könnten diese bei der Realisierung eines Großprojektes weiter Verwendung finden, allerdings dann mit unterschiedlichen erzielbaren Wärmestromdichten. Denkbar ist auch eine Anordnung der Flächen außerhalb der aktuellen Verkehrsflächen, um somit das Risikopotential einer nicht einwandfrei funktionierenden Anlage zu senken. Im Rahmen der Entwurfsplanung und nach Rücksprache mit dem Betreuerkreis wurde eine Anordnung der Testflächen in Bereichen des Tunnelbetriebsgeländes vereinbart, die derzeit mit Rasengittersteinen befestigt sind und als Park- bzw. Abstellfläche genutzt werden (siehe Abbildung 36 und Anlage XIV – Planunterlagen).



Abbildung 36: Skizze Anordnung Versuchsflächen Technikum „Temperierte Freifläche“

Durch die Anordnung der Testflächen des Technikums in diesem Bereich des Betriebsgeländes kann die Herstellung des Technikums abseits des eigentlichen Tunnelbetriebs erfolgen. Nach erfolgreichem Technikumsversuch können die Testflächen weiterhin als Park- bzw. Abstellfläche Verwendung finden.

Neben den geometrischen und materialbedingten Variationsmöglichkeiten hat der Anlagenbetrieb, vor allem der Zeitpunkt des Anfahrens der Anlage bezogen auf ein relevantes Niederschlagsereignis einen wesentlichen Einfluss auf die Effektivität bzw. die Reaktionszeit des Systems zur Eis- und Schneefreihaltung. Die aktuellen Planungen sehen vor, die Pumpleistung zur Sicherstellung des erforder-

derlichen Volumenstroms innerhalb der Rohrleitungen durch elektrische Energie zur Verfügung zu stellen. Wird diese Energie aus konventionellen Kraftwerken und nicht über eine regenerative Energiequelle bezogen, sind die Förderpumpen möglichst kurzfristig vor einem entsprechenden Niederschlagsereignis anzufahren. Eine Anlaufzeit unter Berücksichtigung der Trägheit des Systems sowie geeignete Prognoseinstrumente sind zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Technikums ist es vorgesehen, unterschiedliche Betriebsarten zu testen und auf ihre Effizienz zu prüfen. Genaue Angaben zu entsprechenden Betriebskonzepten sind dem Kapitel 4.7.3 zu entnehmen.

### 4.3 Drainagewasserfassung

Die Drainagewasserfassung am Tunnelportal Füssen Nord erfolgt im bestehenden Messschacht Nr. 10. Innerhalb dieses Schachtes besteht ausreichend Platz, um die erforderliche Pumpen- und Filtertechnik unterzubringen (siehe Abbildung 37).

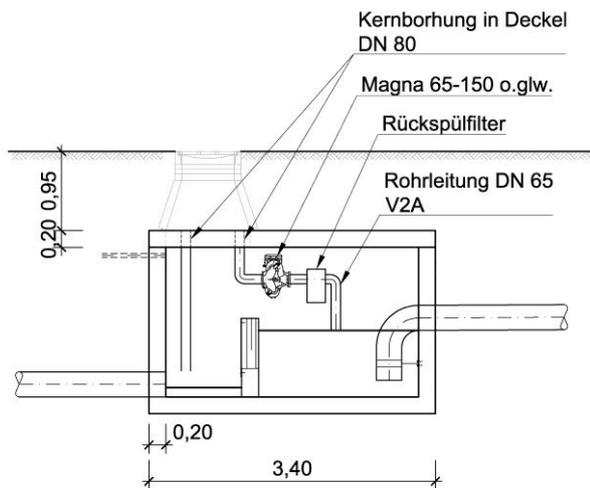


Abbildung 37: Installationen Drainagewasserfassung Schacht Nr. 10

Sämtliche Rohrleitungen sind in rostfreiem Edelstahl DN 65 auszubilden. Die Befestigung der Anlagentechnik erfolgt über Rohrschellen an der Behälterwand. Die Vor- und Rücklaufleitungen werden mittels Kernbohrungen DN 80 durch die Bestandsdecke geführt und gegen nicht drückendes Wasser abgedichtet. Des Weiteren ist eine Kernbohrung zum Einziehen eines Kabelschutzrohres DN 75 vorzusehen. Die Lage dieser Kernbohrungen ist im Zuge der Ausführungsplanung festzulegen. Das Kabelschutzrohr dient zur Aufnahme der elektrischen Versorgungsleitungen, sowie der erforderlichen Datenkabel zur Steuerung und Überwachung der hydraulischen Förderpumpe.

Nach erfolgter thermischer Nutzung wird das Tunneldrainagewasser wieder an die Drainagewasserfassung übergeben.

Innerhalb der Drainagewasserfassung erfolgt weiter die Messung des Füllstandes sowie der Drainagewassertemperatur. Für die Kostenermittlung im Rahmen der Entwurfsplanung wird davon ausgegangen, dass die Daten der bereits installierten Messtechnik nicht zum Betrieb der Pilotanlage zur Verfügung stehen. Diese Daten laufen derzeit auf die Rechner der zentralen Tunnelleittechnik auf und werden dort entsprechend verarbeitet. Eine Verwendung dieser Messdaten für eine Regelung der Pilotanlage oder des Technikums würde einen entsprechenden Eingriff in diese feste Rechnerstruktur bedeuten. Für den Betrieb der Pilotanlage bzw. des Technikums sollte diese Schnittstelle vermieden werden.

### 4.4 Wärmeübertrager zur Eis- und Schneefreihaltung

Die Ausbildung des Wärmeübertragers des Technikums „temperierte Fahrfläche“ erfolgt in 9 Testflächen (6 Testflächen Asphaltbauweise, 3 Testflächen Betonbauweise). Innerhalb dieser Testflächen sollen der Einfluss des Rohrabstandes sowie unterschiedlicher Wärmeleitmaterialien auf die erzielbare Wärmestromdichte an der Oberfläche der Freiflächen untersucht werden.

#### 4.4.1 Querschnittsausbildung

Die Grundlage für die Querschnittsausbildung der temperierten Freiflächen bilden die standardisierten Oberbauprofile für Verkehrsflächen gemäß RStO 12 [28] und hier die Belastungsklasse Bk100. Diese hohe Belastungsklasse wurde im Wesentlichen vor dem Hintergrund der Kostenermittlung gewählt. In wie weit die hier gewählte Belastungsklasse zur Ausführung kommen soll, ist im Zuge der Ausführungsplanung zu entscheiden. Grundsätzlich wäre auch die Ausführung einer geringeren Belastungsklasse denkbar, da über die Testflächen kein Verkehr abgewickelt wird. Auch würden sich durch die Wahl einer geringeren Belastungsklasse die erzielten Ergebnisse des Technikums weiterhin in den Realmaßstab übertragen lassen.

##### 4.4.1.1 Asphalt

In [14] wurden zahlreiche Grundsatzuntersuchungen zur Ausbildung temperierter Fahrflächen auf Brückentragwerken vorgenommen. Neben Untersuchungen zu geeigneten Rohrmaterialien wurde auch die Befestigung der Rohrleitungen auf Asphalt sowie die Höhenlage der Rohrleitungen be-

wertet. Bezug nehmend auf diese Untersuchungen und auf Basis der RStO 12 [28] wurde ein Asphaltdeckenaufbau aus einer Deckschichtdicken zwischen 2,5 bis 3,5 cm und einer darunter liegenden Binderschicht gewählt. Hierdurch besteht die Möglichkeit, die Rohrleitungen auf einer festen Unterlage mit entsprechenden Metallaschen entsprechend [14] zu befestigen und darüber eine Deckschicht einzubauen, die auch nachträglich ohne Beschädigung der Rohrleitungen durch Abfräsen und Wiedereinbau erneuert werden kann.

Die Erneuerung von Fahrflächen ist in [28] geregelt. Hiernach ist der teilweise Ersatz von Befestigungen, z.B. der Austausch einer Deckschicht oder Decke aufgrund von Alterserscheinungen möglich, wenn der sonstige Fahrbahnaufbau weiterhin der jeweiligen Belastungsklasse entspricht. Grundsätzlich sollte bei der Festlegung der Tiefenlage der Rohrleitungen eine Erneuerung der Deckschicht berücksichtigt werden.

In den ZTV BEA-StB [39] werden die Anforderungen an die Ebenheit der gefrästen Unterlage vor dem Wiedereinbau der Asphaltdeckschicht angegeben. Diese wird für eine Ebenheitsanforderung von  $\leq 4\text{mm}/4\text{m}$  Messstrecke (mittlerer Bereich) zu  $\leq 6\text{mm}$  angegeben. Vor diesem Hintergrund sollte ein Vorhaltemaß zum Schutz der Rohrleitungen von 10 mm ausreichend sein.

Im Rahmen dieser Entwurfsplanung wird die Tiefenlage der Rohrleitungen wie folgt festgelegt:

Für 5 Testfelder erfolgt die Anordnung der Rohrleitungen auf der 1. Lage einer Binderschicht (Binderschicht gesamt =  $2 \times 4\text{ cm}$ ), also mit einer Verlegetiefe von ca. 5,5 cm gemäß Abbildung 38. Es sind folglich zwei getrennte Asphaltbinderschichten herzustellen, was einen entsprechenden Eingriff in die baubetrieblichen Abläufe bei der Herstellung der Asphaltdeckschicht darstellt.

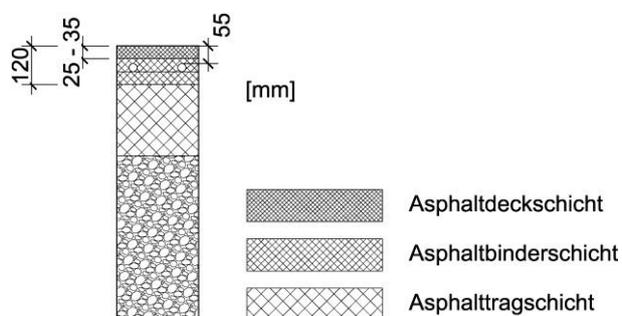


Abbildung 38: Skizze Verlegetiefe Rohrleitung in Asphalttestflächen

Aus diesem Grund werden in einem Testfeld die Rohrleitungen auf der Oberkante der Asphalttragschicht ( $t = 12\text{ cm}$ ) angeordnet. Hierdurch verschlechtern sich zwar die thermischen Eigenschaf-

ten des Wärmeübertragers „temperierte Freifläche“, baubetrieblich kann die Herstellung der Asphaltdeckschicht wie gewohnt erfolgen.

Es wird empfohlen, die Festlegung über die Anordnung der Rohrleitungen im Querschnitt im Zuge der Ausführungsplanung tiefergehend zu untersuchen.

Werden die Rohrleitungen mit großem Abstand zur Oberkante der Fahrfläche angeordnet, steigt die in den Wintermonaten für die Temperierung erforderliche Energiemenge. Um diesen Umstand in gewissem Umfang zu kompensieren wurden, in [33] Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität unterschiedlicher Asphaltmischungen durchgeführt. Hierzu wurden Asphaltmischungen mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen (Elektroofenschlacke, Basalt, Gabbro, Granit, Quarzit und Moräne) hergestellt und wärmetechnisch untersucht. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zu unterschiedlichen Hohlraumgehalten und zu Guss- und Walzasphalten durchgeführt. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass hinsichtlich einer Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit in erster Linie Quarzit und nachfolgend Moräne Gabbro und Granit als Zuschlagsstoffe geeignet sind.

In [15] wurden Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit an Asphalten mit Stahlfaserzugabe durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Volumenanteil von ca. 7 % Stahlfasern die elektrische Leitfähigkeit wesentlich beeinflusst. Untersuchungen zur Übertragung dieser Ergebnisse auf die Wärmeleiteigenschaften konnten im Zuge dieses Forschungsprojektes nicht eruiert werden. Im Zuge der 4. Betreuergruppensitzung wurde deutlich, dass der Einsatz von Stahlfasern im Asphalt zu nachteiligen Folgen für die Fahrsicherheit führen kann und aus diesem Grund im Rahmen des Technikums nicht zur Anwendung kommen sollte.

Hinsichtlich der einzusetzenden Asphaltmischungen wurden im Rahmen dieser Entwurfsplanung keine Untersuchungen vorgenommen. Im Zuge der Ausführungsplanung sind entsprechende Festlegungen für den Aufbau eines Standardaufbaus zu treffen.

#### 4.4.1.2 Beton

Die Querschnittsgestaltung der 3 Testflächen in Betonbauweise folgt der Bk 100 in Anlehnung an [28]. Hier gilt wie für die Asphaltflächen, dass die gewählte Belastungsklasse im Zuge der Ausführungsplanung abschließend festzulegen ist. Hinsichtlich der Höhenlage der Rohrleitungen im Beton werden keine Anforderungen an eine Teilerneuerung der Fahrfläche gestellt. Es wird davon

ausgegangen, dass, sollte der teilweise Ersatz der Fahrfläche erforderlich werden, die Rohrleitungstechnik ebenfalls zu erneuern sein wird. Um die Vergleichbarkeit der Testergebnisse mit den Asphaltflächen zu gewährleisten, wird die Tiefenlage der Rohrleitung in Anlehnung an die Anordnung innerhalb der Asphaltfahrflächen gemäß Abbildung 38 festgelegt. Im Zuge der Ausführungsplanung sind hierbei die Einbauschichtdicken von Ober- und Unterbeton entsprechend zu prüfen und ggf. anzupassen.

Wie unter 4.2 beschrieben, sollen im Rahmen der 3 Testfelder in Betonbauweise unterschiedliche Wärmeleiteigenschaften des Betons oberhalb der Rohrleitungen untersucht werden. In [27] wurden numerische Untersuchungen zu mit Mattenstahl thermisch verbessertem Beton durchgeführt. Diese Ergebnisse zeigen eine um ca.  $25 \text{ W/m}^2$  gesteigerte Wärmestromdichte gegenüber einem Querschnitt mit thermisch unverändertem Beton. Die vom Institut für Geotechnik durchgeführten Berechnungen zeigen eine Steigerung um ca.  $30 \text{ W/m}^2$ . Die Unterschiede können zum einen in der Modellierung, zum anderen in unterschiedlichen Stahlquerschnitten der Bewehrungsmatte gesehen werden. In [38] wurde der Einfluss von Stahl- und Karbonfasern sowie von Graphit auf die thermische Leitfähigkeit von Beton untersucht. Der Autor empfiehlt eine Mischung aus 1% Stahlfasern, 0,4% Karbonfasern und 45% Graphit zum Einsatz in der Eis- und Schneefreihaltung.

Hinsichtlich der einzusetzenden Betonmixturen wurden im Rahmen dieser Entwurfsplanung keine Untersuchungen vorgenommen. Im Zuge der Ausführungsplanung sind entsprechende Festlegungen für den Herstellung eines Standardaufbaus zu treffen.

#### 4.4.2 Rohrleitungen

Die in den Testflächen zum Einsatz kommenden Rohrleitungen haben folgende Eigenschaften zu erfüllen:

- Unkomplizierte Verlegung (biegen, befestigen) auf dem vorbereiteten Unterbau
- Gute Wärmeleiteigenschaften
- Beständigkeit gegen mechanische und thermische Beanspruchung während des Einbaus
- Langzeittemperaturbeständigkeit für den Einsatz bei Temperaturen zwischen  $-10^\circ\text{C}$  und  $75^\circ\text{C}$

Die größten mechanischen Beanspruchungen erfahren die Rohrleitungen während des Einbaus der abschließenden Asphalt- bzw. Betondeck-

schicht, den größten thermischen Belastungen sind die Rohrleitungen während des Einbaus des Walzasphaltes ausgesetzt. In [32] werden Einbautemperaturen des Walzasphaltes je nach verwendetem Straßenbitumen bis maximal  $180^\circ\text{C}$  angegeben. In [16] wird über die Ausrüstung eines Teilbereiches berichtet, der mit Rohrleitungen unter einer Asphaltdeckschicht ausgestattet wurde. Genaue Angaben über den Herstellprozess konnten nicht eruiert werden.

Untersuchungen in [14] mit Gussasphalttemperaturen von ca.  $200^\circ\text{C}$  zeigen, dass Rohrleitungen aus PE-Xa (siehe Kapitel 3.2.3.2) nur bedingt zum Einsatz in Asphaltbauweisen geeignet sind und ggf. eine Wasserkühlung der Rohrleitungen während des Einbaus erforderlich wird. An dieser Stelle ist allerdings anzumerken, dass für den Demonstrator „temperierte Fahrfläche“ mit geringeren Asphalttemperaturen (Walzasphalt) zu rechnen ist.

Des Weiteren besitzen diese Rohrleitungen einen minimalen Biegeradius von  $5 \cdot d$  (Außendurchmesser des Rohres), der auch durch den Einsatz von Hilfsmitteln wie einer Biegefeder nicht weiter reduziert werden kann. Bei der Verwendung eines Rohres DN 25 ergibt sich somit ein Mindestbiegeradius von:

$$D_{min,PE-Xa} = 5 \cdot 2,5 \text{ cm} = 12,5 \text{ cm} \quad (39)$$

Im Kapitel 4.2 wird allerdings ein Mindestbiegeradius von 10 cm in einer der Asphalttestflächen gefordert.

Empfohlen wird in [14] der Einsatz von sogenannten Metall-Kunststoff-Verbundrohren (PE-Xa/Al/PE), die in jedem Fall eine ausreichende Temperaturbeständigkeit zeigen und unter der Verwendung einer Biegefeder Mindestbiegeradien von

$$D_{min,PE-Xa/Al/PE} = 3 \cdot 2,5 \text{ cm} = 7,5 \text{ cm} \quad (40)$$

zulassen. Die Kosten für das Verbundrohr sind gegenüber dem reinen Kunststoffrohr nahezu doppelt so hoch, so dass für Großanwendungen in Walzasphalt- und Betonbauweise der Einsatz eines PE-Xa-Rohres weiterverfolgt werden sollte. In diesem Zusammenhang sollte in Zukunft die Eignung des Rohrmaterials auch im Hinblick auf die Erneuerung der Deckschicht bewertet werden. Sollten Frästiefen größer als die vorhandene Überdeckung inkl. Frästoleranz erforderlich werden, sind die verbauten Rohrleitungen als entsprechende Hindernisse für den Fräsprozess und bei

der Deponierung bzw. Wiederaufbereitung des Fräsgutes zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Technikums sollten zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der einzelnen Testfelder keine unterschiedlichen Rohrsysteme zum Einsatz kommen, da sich die am Markt befindlichen Rohrleitungen nicht nur im Material, sondern auch im Innendurchmesser und in ihrer Wärmeleitfähigkeit unterscheiden.

#### 4.4.3 Testfeldausbildung

Für die Testfelder in Asphaltbauweise werden folgende Fahrflächenaufbauten vorgeschlagen:

##### Testfeld A1

- Oberbau: Asphalt
- Verlegetiefe  $_{\text{eff}C_v} = 5,5 \text{ cm}$
- Rohrleitungen: PE-Xa/Al/PE, DN 25/3,7
- Abstand Rohrleitung: 20 cm

##### Testfeld A2

- Oberbau: Asphalt
- Verlegetiefe  $_{\text{eff}C_v} = 5,5 \text{ cm}$
- Rohrleitungen: PE-Xa/Al/PE, DN 25/3,7
- Abstand Rohrleitung: 15 cm

##### Testfeld A3

- Oberbau: Asphalt
- Verlegetiefe  $_{\text{eff}C_v} = 5,5 \text{ cm}$
- Rohrleitungen: PE-Xa/Al/PE, DN 25/3,7
- Abstand Rohrleitung: 10 cm

##### Testfeld A4

- Oberbau: Asphalt
- Verlegetiefe  $_{\text{eff}C_v} = 9,5 \text{ cm}$
- Rohrleitungen: PE-Xa/Al/PE, DN 25/3,7
- Abstand Rohrleitung: 15 cm

##### Testfeld A5

- Oberbau: Asphalt
- Deckschicht thermisch modifiziert (hierzu sind im Zuge der Ausführungsplanung Grundsatzversuche zur Wärmeleitfähigkeit sowie zur Dauerhaftigkeit der Deckschicht durchzuführen)
- Verlegetiefe  $_{\text{eff}C_v} = 5,5 \text{ cm}$
- Rohrleitungen: PE-Xa/Al/PE, DN 25/3,7
- Abstand Rohrleitung: 15 cm

##### Testfeld A6

- Oberbau: Asphalt
- Deckschicht thermisch modifiziert (Art und Weise der thermischen Modifikation ist auf der Basis weiterer Literaturrecherchen und entsprechender Vorversuche im Zuge der Ausführungsplanung festzulegen)
- Verlegetiefe  $_{\text{eff}C_v} = 5,5 \text{ cm}$
- Rohrleitungen: PE-Xa/Al/PE, DN 25/3,7
- Abstand Rohrleitung: 15 cm

Für die Testfelder in Betonbauweise werden folgende Fahrflächenaufbauten vorgeschlagen:

##### Testfeld B1

- Oberbau: Beton
- Verlegetiefe  $_{\text{eff}C_v} = 5,5 \text{ cm}$
- Rohrleitungen: PE-Xa/Al/PE, DN 25/3,7
- Abstand Rohrleitung: 15 cm

##### Testfeld B2

- Oberbau: Beton
- Deckschicht thermisch mit einer Mischung aus 1% Stahlfasern, 0,4% Karbonfasern und 45% Graphit modifiziert (hierzu sind im Zuge der Ausführungsplanung Grundsatzversuche zur Wärmeleitfähigkeit sowie zur Dauerhaftigkeit der Deckschicht durchzuführen)
- Verlegetiefe  $_{\text{eff}C_v} = 5,5 \text{ cm}$
- Rohrleitungen: PE-Xa/Al/PE, DN 25/3,7
- Abstand Rohrleitung: 15 cm

##### Testfeld B3

- Oberbau: Beton
- Deckschicht thermisch mit einer Bewehrungsstahlmatte Typ Q 188 A/B modifiziert
- Verlegetiefe  $_{\text{eff}C_v} = 5,5 \text{ cm}$
- Rohrleitungen: PE-Xa/Al/PE, DN 25/3,7
- Abstand Rohrleitung: 15 cm

## 4.5 Wärmeübertrager zur Klimatisierung des Tunnelbetriebsraumes

Für die Klimatisierung des Tunnelbetriebsraumes am Portal Füssen Nord wird die bestehende Lüftungsanlage adaptiert und um die Möglichkeit der Bereitstellung von Kühlenergie ergänzt. Hierzu erfolgt der Einbau eines Kühlerteils des Typs

W/22/457/12R/28K/2.6Cu,9.5/Al-L1 (siehe Abbildung 39) in den bestehenden Lüftungskanal und die Anpassung des nachfolgenden Lüftungsquerschnitts (siehe Anlage II – Protokolle Ortsbegehung Füßen). Das Kühlerteil wird direkt mit dem anfallenden Tunneldrainagewasser betrieben und ist auf die folgenden Randbedingungen ausgelegt:

- Drainagewassereintritt 12,0 °C
- Drainagewasseraustritt 16,0 °C (Wesentlich für die Bereitstellung der erforderlichen Kühlleistung ist die Temperaturspreizung zwischen Ein- und Austrittstemperatur und nicht die absolute Temperatur)
- Drainagewasser Menge 7,27 m<sup>3</sup>/h (~2 l/s)
- Druckverlust Medium 20,1 kN/m<sup>2</sup>

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Tunneldrainagewassers gemäß Kapitel 2.2.3 wurden im Rahmen der Entwurfsplanung der Fa. Wolf zur Prüfung übergeben (vgl. Angebot Fa. Doser in Anlage XV – Anlagenbestandteile). Hiernach kann das Tunneldrainagewasser mit den zum Zeitpunkt der durchgeführten Messungen ermittelten Parametern ohne eine weitere Behandlung mit dem beschriebenen Kühlerteil betrieben werden.

Die Entwurfsplanung der gebäudeseitigen Adaptationen und Installationen erfolgt durch die Firma Max Doser GmbH & Co. KG – Haustechnik aus Füßen. Diese hat einen Wartungsvertrag für die bestehende Lüftungsanlage und ist mit der Örtlichkeit vertraut.

Im Rahmen des Technikums erfolgt lediglich die Bereitstellung der Kühlenergie am beschriebenen Kühlerteil. Hierzu werden entsprechende Fernwärmerohre bis in das Betriebsgebäude geführt und mit Tunneldrainagewasser durchströmt. Die Steuerung der Pumpe erfolgt durch die gebäudeseitige Regelungstechnik, so dass im Rahmen dieser Entwurfsplanung hierzu keine weiteren Planungen erforderlich sind.

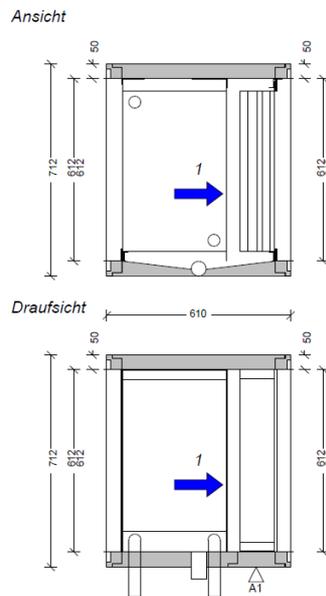


Abbildung 39: Kühlerteil Typ W/22/457/12R/28K/2.6Cu,9.5/Al-L1 der Fa. Wolf

#### 4.6 Pumpentechnik, Druckbehälter, Vor- und Rücklaufleitungen

Zur Dimensionierung der erforderlichen Pumpentechnik, der Vor- und Rücklaufleitungen sowie der Druckluftanlage für das Szenario „Stromausfall“ (siehe Kapitel 4.7.1) ist der hydraulische Druckverlust innerhalb der Versorgungsleitungen nebst der erforderlichen Einbauten (Ventile, Schieber, Messtechnik usw.) zu ermitteln. Hierzu wurde ein zweidimensionales Berechnungsmodell der geplanten Rohrleitungen für das Technikum „temperierte Freifläche“ in der Softwareanwendung Comsol 5.2a entwickelt (siehe Abbildung 40 und Abbildung 41). Modelliert wurden die Vor- und Rücklaufleitung mit einem Innendurchmesser von 63 mm (siehe Tabelle 19), die Kreislaufleitungen in den Paneelen mit einem Innendurchmesser von 17,6 mm (siehe Tabelle 25) sowie ein Volumenstrom von 2,5 l/s (vgl. 3.2.3.1) Berücksichtigt wurden sämtliche erforderliche Ventile mit einem Verlustkoeffizienten von 0,2 (Absperrschieber) sowie alle Abzweigungen.

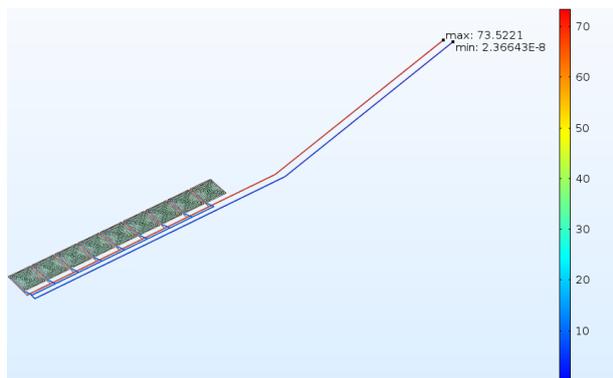


Abbildung 40: Hydraulisches Gesamtmodell, berechneter Druckverlust

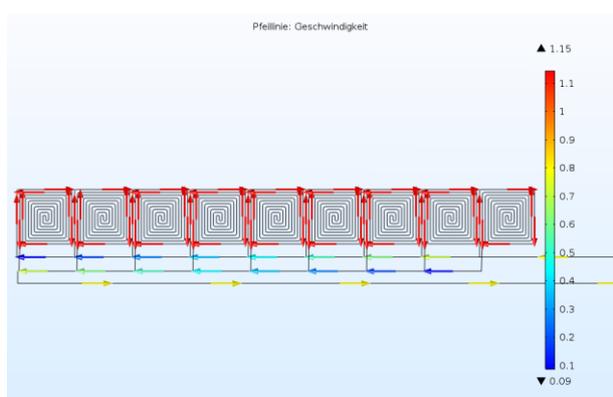


Abbildung 41: Hydraulisches Gesamtmodell, berechnete Strömungsgeschwindigkeit

Der maximale Druckverlust der Gesamtanlage beläuft sich auf ca.  $74 \text{ kN/m}^2$  bzw.  $0,74 \text{ bar}$  bei einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit  $1,15 \text{ m/s}$  im Bereich der Wärmeübertragerpaneele. Für die Auslegung der Pumpleistung wird ein Druckverlust von  $75 \text{ kN/m}^2$  berücksichtigt.

Vergleichsberechnungen mit einem einzelnen Wärmeübertragerpaneel (siehe Abbildung 42) zeigen einen etwas geringeren Druckverlust (ca.  $60 \text{ kN/m}^2$  bzw.  $0,6 \text{ bar}$ ).

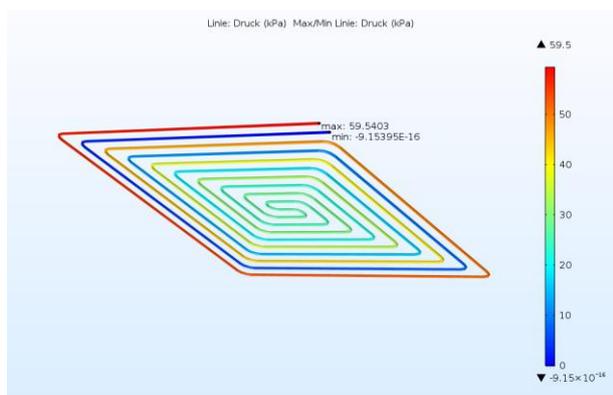


Abbildung 42: Hydraulisches Modell Einzelpaneel, berechneter Druckverlust

Die Oberfläche des Technikums „temperierte Freifläche“ liegt auf ca.  $795 \text{ m\ddot{u}NN}$  (Höhenangabe gemäß abgeschätzt auf Planbasis Plan TF-PN-014b „Portalbereich Nord – Lageplan Leitungsführung E+M“, Plan existiert nur digital beim IGS), die Deckeloberkante der Wasserfassung (Schacht Nr. 10) auf  $792,47 \text{ m\ddot{u}NN}$  (Höhenangabe gemäß Plan TF-PN-013a „Portalbereich Nord – Schächte und Durchflussmessung“, Plan existiert nur digital beim IGS). Die Differenz zwischen Oberkante Deckel und Unterkante Messwehr beträgt  $2,34 \text{ m}$ . Somit ergibt sich eine geodätische Höhendifferenz, die ergänzend zum beschriebenen Druckverlust überwunden werden muss, von

$$\Delta h = 795 - 792,47 + 2,34 = 4,87 \text{ m} \quad (41)$$

Um alle Testfelder des Demonstrators gleichzeitig in Betrieb nehmen zu können, ist eine Pumpe mit den folgenden Mindestanforderungen zu wählen:

$$\dot{V} \geq 9 \cdot 0,28 \text{ l/s} \approx 2,5 \text{ l/s} \quad (42)$$

$$P \geq 75,0 \text{ kPa} + 48,7 \text{ kPa} \approx 13,0 \text{ mWS} \quad (43)$$

Gewählt wird im Zuge der Entwurfsplanung eine Umwälzpumpe der Baureihe MAGNA3 der Firma Grundfos. Die MAGNA3 Umwälzpumpen sind für die Umwälzung von Flüssigkeiten in Heizungsanlagen mit variablem Förderstrombedarf bestimmt, bei denen zur Reduzierung der Energiekosten die Leistung der Pumpe automatisch an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden kann. Die Pumpen sind aber auch für den Einsatz in häuslichen Trinkwarmwassersystemen geeignet.

Technische Daten	Einheit	
Grundfos Magna 3 Typ	[-]	65-150
Förderhöhe	m	15,0
Fördermenge	l/s	15,7
Leistung min	W	29
Leistung max	W	1301

Tabelle 22: Spezifikationen Umwälzpumpe

Auf der Saugseite erfolgt die Verbindung zwischen der Pumpe und der Wasserfassung über ein DN 65 Edelstahlrohr und einen vorgeschalteten manuellen Rückspülfilter gemäß DIN EN 13443-1 und DIN 19628 zur Trinkwasserfiltration. Im Rahmen der Entwurfsplanung wird ein GENO-Rückspülfilter mit folgenden Spezifikationen gewählt:

Technische Daten	Einheit	
GENO®-Rückspülfilter MX	[-]	DN 65
Durchflussleistung bei 0,2 bar Druckverlust	m³/h	69
Einbaulänge ohne Gegenflansche	mm	220
Bedienung	manuell (ggf. in Ausführungsplanung anpassen)	

Tabelle 23: Spezifikationen Filter

Im Szenario „Stromausfall“ ist die gesamte Anlage mittels Druckluft zu entleeren. Zur Dimensionierung der erforderlichen Druckluftvorhaltung ist das Rohrleitungsvolumen der Anlage zu ermitteln:

Vor- und Rücklaufleitungen:

$$V_1 = 130m \cdot \frac{(0,063m)^2}{4} \cdot \pi = 405l \quad (44)$$

Kreislaufleitungen in den Testflächen:

$$V_1 = 9 \cdot 58,5m \cdot \frac{(0,0176m)^2}{4} \cdot \pi = 128l \quad (45)$$

$$V_{ges} = 405 + 128 = 533l \quad (46)$$

Nach dem Gasgesetz von Boyle-Mariotte gilt:

$$p \cdot V = const. \quad (47)$$

Das bedeutet, dass bei gegebenem Druck für einen Druckluftbehälter das erforderliche Speichervolumen zum Freispülen der gesamten Anlage unter der Vernachlässigung von Temperaturunterschieden und unterschiedlichen Fließwiderständen von Luft und Wasser wie folgt ermittelt werden kann:

$$erf V_{Luft} = \frac{533l \cdot 0,74bar}{P_{Luftkessel}} \quad (48)$$

Unter der Annahme eines in der Praxis gängigen Speicherdruckes von 10 bar, ergibt sich ein erforderliches Speichervolumen von:

$$erf V_{Luft} = \frac{394,42l/bar}{10bar} = 39,44l \quad (49)$$

Um nicht kalkulierte Verluste sowie das Speichervolumen des Luftkessels zu kompensieren wird im Rahmen der Entwurfsplanung ein Kesselvolumen  $\geq 80$  l berücksichtigt. Gewählt wird im Rahmen der Entwurfsplanung ein KAESER-Kompressor EU-ROCOMP liegend EPC 340-100 mit folgenden Spezifikationen:

Technische Daten	Einheit	
KAESER-Kompressor EU-ROCOMP	[-]	340-100
Druck	bar	10
Ansaugleistung	l/min	340
Behältervolumen	l	90
Motorleistung	kW	1,7
Elektrische Versorgung	400V / 3 Ph / 50 Hz	
Abmessungen BxTxH	mm	1120x350x910

Tabelle 24: Spezifikation Kompressor

Der Anschluss der Luftdruckleitung erfolgt in die Vorlaufleitung zu den Testflächen über ein selbstöffnendes Magnetventil der Funktionsart „stromlos offen“.

Die Ausführungen im Kapitel 4.4.2 machen es erforderlich, dass das im Rahmen der Vorplanung gewählte Rohrmaterial durch das Material PE-Xa/Al/PE ersetzt wird. Im Rahmen der Entwurfsplanung wird folgender Rohrtyp berücksichtigt:

Technische Daten	Einheit	
Werkstoff	[-]	PE-Xa/Al/PE
Durchmesser außen	mm	25
Wandstärke	mm	3,7
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,43

Tabelle 25: Rohrspezifikationen Testflächen

Im Zuge der Entwurfsplanung werden die Vor- und Rücklaufleitungen unverändert gemäß Kapitel 3.2.3.2 übernommen.

## 4.7 Regelungs- und Messtechnik

Die regelungs- und messtechnische Ausstattung der Pilotanlage „Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume“ erfolgt im Wesentlichen im Rahmen der Adaption der bestehenden Lüftungsanlage des Betriebsraumes des Tunnels Füssen. Derzeit ist geplant, mit der Raumlufttemperatur des Betriebsraumes als Regelgröße, die Drehzahl der hydraulischen Pumpe zur Förderung des Tunneldrainagewassers zu steuern. Weitere Hinweise zur Regelung der Pilotanlage „Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume“ sind der Anlage XV – Anlagenbe-

standteile zu entnehmen. Die nachfolgenden Beschreibungen beziehen sich ausschließlich auf die Regel- und Messtechnik des Technikumsversuches.

Der Regelkreis zum Betrieb des Technikums „temperierte Freifläche“ sieht im Wesentlichen die Messung von Temperaturen, Wärmeströmen und Volumenströmen an unterschiedlichen Stellen der Anlage vor, die dann als Regelgrößen gegeneinander abgeglichen werden und die Steuerung der hydraulischen Pumpe zur Förderung des Tunneldrainagewassers übernehmen.

Das Mess- und Regelungskonzept der temperierten Freifläche wird im Rahmen der Anlage XIV – Planunterlagen gezeigt.

#### 4.7.1 Entwicklung Regelkreis

Für den Technikumsversuch „temperierte Freifläche“ ist eine Regelung und Steuerung zu entwickeln, die einen sicheren und automatisierten Betrieb der Anlage ermöglicht. Folgende Ziele werden hierzu definiert:

- 1) Eis- und Schneefreiheit auf allen Flächen des Technikums
- 2) Minimale Wiedereinleittemperatur des Tunneldrainagewassers nach der thermischen Nutzung  $> 4^{\circ}\text{C}$  (Annahme)
- 3) Das Absenken des Wasserspiegels der Drainagewassersfassung unterhalb der Unterkante des Thomsen-Wehres ist auszuschließen

Zu 1)

Die Herstellung von Eis- und Schneefreiheit auf den Flächen des Technikumsversuches wird über folgende Messdatenerfassung überwacht:

- Volumenstrom des Tunneldrainagewasservorlaufs
- Messung der Fluidtemperatur beim Eintritt in eine Testfläche der temperierten Freifläche
- Messung der Fluidtemperatur beim Austritt aus einer Testfläche der temperierten Freifläche
- Messung der Oberflächentemperatur einer Testfläche der temperierten Freifläche
- Messung der Wärmestromdichte an der Oberfläche einer Testfläche der temperierten Freifläche
- Klimadatenerfassung an der vorhandenen Klimastation am Tunnelportal Füssen Nord

Aus den Messungen des Volumenstroms sowie den Vor- und Rücklauftemperaturen einer Testfläche kann direkt auf den abgegebenen Gesamt-

wärmestrom geschlossen werden. Der Vergleich des gesamten Wärmestroms mit der direkten Messung der Wärmestromdichte an der Oberfläche der Testfläche liefert einen Anhaltswert für den in Richtung Erdreich gerichteten Verlustwärmestrom. Verglichen werden die Ergebnisse des Wärmestroms mit rechnerisch ermittelten erforderlichen Wärmestromdichten zur Sicherstellung der Eis- und Schneefreiheit. Die Grundlage für die Prognose erforderlicher Wärmestromdichten bilden die Messdaten der Klimastation am Tunnelportal Füssen Nord (Beschreibung siehe Anlage XV – Anlagenbestandteile) zusammen mit dem Straßenzustands- und Wetterinformations-System (SWIS). Durch die BASt wurde mit [5] ein Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst entwickelt, das es ermöglichen soll, Trendrechnungen für kurze Zeiträume unter Berücksichtigung der gemessenen Klimadaten durchzuführen. Im Zuge der Ausführungsplanung ist das vorhandene Modell zur Glättewarnung um die Prognose der erforderlichen Wärmestromdichten zu ergänzen, die vorhandene Klimastation um die Messung der Windgeschwindigkeit nachzurüsten, sämtliche Daten mit dem SWIS in Verbindung zu setzen und in den Regelkreis zum Betrieb des Technikums „temperierte Freifläche“ aufzunehmen.

Neben der Prognose und Messung der Wärmestromdichten wird die Oberflächentemperatur der Testflächen der temperierten Freifläche überwacht. In [23] werden die Glättearten Glatteis, Reifglätte, Schneeglätte und Eisglätte unterschieden. In welcher Form die Glätte auf den Testflächen auftritt ist zum einen von der Oberflächentemperatur, zum anderen von vorhandener Feuchtigkeit an der Oberfläche abhängig. „Die Verknüpfung der verschiedensten Bedingungen bezüglich Temperatur und Feuchte können dann zur Bildung von winterlicher Glätte in einer der genannten vier Formen führen“ [23]. In [14] wird eine tabellarische Übersicht vorgestellt, die unterschiedliche klimatische Randbedingungen mit der Bildung von Fahrbahnglätte in Beziehung setzt. Im Zuge der Ausführungsplanung sind weitere Literaturstudien zur Bildung von Glätte auf Fahrfächen vorzunehmen, um einen entsprechenden Grenzwert der Oberflächentemperatur der Testflächen festzulegen. Auf der sicheren Seite liegend sollte die Freiflächentemperatur nicht unter  $5^{\circ}\text{C}$  fallen.

Zu 2)

Während des Betriebs der temperierten Freifläche sind ein Gefrieren des Tunneldrainagewassers in den Rohrleitungen der Testflächen sowie eine zu geringe Übergabetemperatur in die Vorflut auszu-

schließen. Hierzu werden folgende Messdaten erfasst:

- Messung der Fluidtemperatur beim Austritt aus einer Testfläche des Demonstrators
- Messung der Fluidtemperatur bei der Übergabe an die Vorflut
- Überwachung des Speicherdrucks des Druckluftkessels

Der zur Eis- und Schneefreihaltung erforderliche Wärmestrom wird durch den Volumenstrom des Tunnelrainagewassers, das in den Rohrleitungen der Testflächen zirkuliert, geregelt. Die gewählte Pumpleistung stellt den erforderlichen Volumenstrom sicher, so dass die Fluidtemperatur bei Austritt aus der Testfläche des Demonstrators nicht unter einen Grenzwert ( $<4^{\circ}\text{C}$ ) sinkt. Wird am Austritt aus der Testfläche eine Temperatur  $<4^{\circ}\text{C}$  (Schwellwerte sind im Zuge der Ausführungsplanung festzulegen) registriert, wird die Drehzahl der Pumpe entsprechend geregelt, so dass ein höherer Volumenstrom die Rohrleitungen durchfließt.

Sollte die elektrische Stromversorgung ausfallen (Szenario „Stromausfall“) besteht die Gefahr, dass es zu einem Gefrieren des Tunnelrainagewassers in den Rohrleitungen kommt. Im Falle einer Unterbrechung der Stromversorgung öffnet ein automatisches Magnetventil und gibt den Weg für die in einem Druckkessel gespeicherte Druckluft frei. Diese Druckluft drückt in weiterer Folge das Tunnelrainagewasser aus den Rohrleitungen der Testfläche, so dass ein kompletter Austausch des Wassers gegen Luft erfolgt und die Gefahr des Einfrierens der Rohrleitungen nicht mehr gegeben ist. Im Anschluss an dieses Szenario ist die gesamte Anlage „temperierte Freifläche“ manuell wieder in Betrieb zu nehmen. Um sicher zu stellen, dass ausreichend Druckluft zur Entleerung der Anlage zur Verfügung steht, wird eine Druckkontrolle des Vorratsbehälters eingerichtet, die den vorhandenen Behälterdruck misst und bei Unterschreitung eines unteren Sachwellwertes einen Alarm an die Betreiber der Anlage sendet (z.B. via SMS) und bei Unterschreiten eines Grenzwertes die Anlage automatisch soweit wie möglich entleert (vergleichbar Szenario „Stromausfall“).

Des Weiteren wird die Wiedereintrittstemperatur des thermisch genutzten Tunnelrainagewassers bei der Übergabe an die Vorflut messtechnisch erfasst. Fällt die Temperatur unter einen durch eine entsprechende Prüfung (siehe Kapitel 4.8) noch festzulegenden Grenzwert, wird zunächst der Volumenstrom erhöht, bis die Mindesteinleittemperatur wieder erreicht wird. Sollte ein Erreichen der Mindesttemperatur nicht mehr möglich sein, wird

die Anlage nach dem Szenario „Stromausfall“ außer Betrieb genommen. Entsprechende Regelkurven sind im Zuge der Ausführungsplanung zu entwickeln. Die Messung der Übergabetemperatur erfolgt in einem der Wasserfassung nachgeschalteten Schacht, in dem die Tunnelrainagewässer aus der Ost- und der Westulmendrainage zusammengeführt werden. Gemessen wird folglich die resultierende Einleittemperatur, die sich aus dem thermisch genutzten Drainagewasser der Westulme und dem thermisch nicht genutzten Wasser der Ostulme zusammensetzt.

Zu 3)

Für den Betrieb der Anlage „temperierte Freifläche“ ist ein Mindestvolumenstrom von ca.  $\sim 2,5$  l/s bzw.  $\sim 9\text{m}^3/\text{h}$  bei extremen klimatischen Verhältnissen sicherzustellen. Dies sollte unter Berücksichtigung der minimal zur Verfügung stehenden Schüttung des Tunnelrainagewassers von ca. 10 l/s (siehe Kapitel 2.1.3.3) grundsätzlich gewährleistet sein. Überwacht wird die Tunnelrainagewasserentnahme über einen Füllstandssensor im Bereich der Wasserfassung. Sinkt der Wasserspiegel unter einen im Zuge der Ausführungsplanung festzulegenden Grenzwert, wird zunächst die Fördermenge gedrosselt. Lassen sich auch mit gedrosseltem Volumenstrom die Führungsgrößen der Ziele 1) und 2) erreichen, wird der Betrieb der Anlage fortgesetzt. Ist zum Erreichen der Ziele 1) und 2) ein höherer Volumenstrom erforderlich und der Wasserspiegel in der Wasserfassung sinkt unter den definierten Grenzwert, wird die Anlage nach dem Szenario „Stromausfall“ außer Betrieb gesetzt.

#### 4.7.2 Einregelung

Wie bereits in Kapitel 3.2.3.2 beschrieben, erfolgt die Anordnung der Rohrleitungen für den Technikumsversuch „temperierte Freifläche“ im sogenannten TICHELMANN-System. Hierdurch können die Druckverluste der Vor- und Rücklaufleitungen kompensiert werden. Im Bereich der Testflächen erfolgt die Untersuchung unterschiedlicher Rohrabstände, womit sich auch die Druckverluste der unterschiedlichen Testfelder unterscheiden werden. Darüber hinaus werden die Testfelder auch hinsichtlich der eingesetzten Materialien unterschiedlich ausgeführt, so dass bei gleichbleibendem Volumenstrom an der Oberfläche unterschiedliche Wärmestromdichten erzielt werden. Aus diesem Grund wird ein modifizierter hydraulischer Abgleich der einzelnen Testfelder erforderlich. Hierzu wird nicht wie in der Praxis üblich auf Modellrechnungen zur Ermittlung des erforderlichen Strömungswiderstandes zurückgegriffen, sondern die gesamte Anlage in einem Testbetrieb gefahren. Hierbei werden die Vor- und Rücklauf-

temperaturen eines jeden Testfeldes erfasst. Des Weiteren erfolgt die Messung des spezifischen Durchflusses an jedem der 9 Testfelder. Aus den Messwerten Durchfluss und Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf kann direkt auf den übertragenen Wärmestrom geschlossen werden. So können die einzelnen Testfelder entweder mit einer gleichen Wärmestromdichte oder einem gleichen Volumenstrom beaufschlagt werden. Die Messungen sollten bestenfalls im Zuge der eigentlichen Temperierung erfolgen, wenn das Tunneldrainagewasser seine Mitteltemperatur (ca. November) erreicht hat, um temperaturbedingte Dichteänderungen des Tunneldrainagewassers zu kompensieren.

Zur Erfassung des Volumenstroms eines einzelnen Testfeldes werden Vorrichtungen erforderlich, die die temporäre Anordnung eines induktiven Volumenstrommessgebers ermöglichen. Nähere Ausführungen hierzu siehe Anlage XV – Anlagenbestandteile.

#### 4.7.3 Betriebskonzepte

Der Betrieb der Anlage zur Temperierung von Freiflächen kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen. Werden zur Bereitstellung der Pumpenergie regenerative Energiequellen wie Windkraft oder Solarkraft genutzt, kann die Durchströmung der Rohrleitungen in den Wintermonaten im Dauerbetrieb erfolgen. Hierdurch reduziert sich der Aufwand zur Prognose von Glätteereignissen und die Betriebssicherheit wird erhöht. Auch für diese Betriebsart sind die Kosten für Wartung und Energiebereitstellung entsprechend zu berücksichtigen.

Die zweite Art des Betriebs erfolgt im Sinne einer Bedarfssteuerung auf der Basis eines entsprechenden Glätteprognosemodells, das im Zuge der Ausführungsplanung zu erarbeiten ist. Hierbei wird die hydraulische Pumpe erst in Betrieb genommen, wenn auf den Testflächen mit einer Glättebildung zu rechnen ist. Eine Vorlaufzeit zum Glätteereignis gewährleistet, dass eine entsprechende Wärmestromdichte zur Eis- und Schneefreihaltung zum Zeitpunkt des Frost- oder Niederschlagsereignisses zur Verfügung steht.

Genauere Angaben zum Betriebskonzept lassen sich im Zuge der Entwurfsplanung nicht machen, da keine Erfahrungen mit einer Testanlage in dieser Form vorliegen. Sinnvolle und vor allem umsetzbare Betriebskonzepte werden sich während des Betriebs der Anlage ergeben und können dann die Grundlage für entsprechende Großanwendungen liefern.

## 4.8 Kostenschätzung

Im Zuge der Entwurfsplanung zum gegenständlichen Forschungsprojekt wurden für die Pilotanlage „Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume“ und das Technikum „Temperierung von Freiflächen“ sämtliche Anlagenbestandteile, erforderlichen Arbeiten sowie die wissenschaftliche Begleitung in ein Langtextleistungsverzeichnis nach der Struktur des Standard Leistungsbuch Bau (STLB) überführt (siehe Anlage XVII – Leistungsverzeichnis). Das Leistungsverzeichnis ist in die folgenden Teilprojekte gegliedert:

- Allgemeines
- Flächenwärmeübertrager zur Eis- und Schneefreihaltung
- Kühlung Betriebsräume
- Messtechnik

Innerhalb der Teilprojekte findet die bereits erwähnte Gewerkestruktur gemäß STLB Anwendung. Im Folgenden werden wesentliche Inhalte des Leistungsverzeichnisses erläutert.

### 4.8.1 Allgemeines

Unter „Allgemeines“ werden eine übergeordnete Planungskoordination seitens der BAST sowie erforderliche Baustelleneinrichtungs- und absicherungsarbeiten erfasst.

### 4.8.2 Flächenwärmeübertrager zur Eis- und Schneefreihaltung

Der Titel „Flächenwärmeübertrager zur Eis- und Schneefreihaltung“ beinhaltet zunächst die Kosten für eine erforderliche Ausführungsplanung des Technikums sowie eine entsprechende wissenschaftliche Begleitung. Hinsichtlich des Umfangs der Ausführungsplanung wurden Annahmen getroffen, die innerhalb des Leistungsverzeichnisses detailliert aufgeschlüsselt sind. Weiter folgen die Kosten für die Herstellung sämtlicher Anlagenbestandteile sowie den Rückbau und die Wiederherstellung bestehender Fahrflächenbefestigungen. Hierzu wurden entsprechende Lieferkosten entweder bei Herstellern angefragt und im Internet recherchiert. Die Kosten für Installationsarbeiten wurden im Rahmen der Entwurfsplanung abgeschätzt. Kostenintensive Arbeiten, wie z.B. der Aushub und die Herstellung der Testflächen in Asphalt- bzw. Betonbauweise wurden direkt bei Fachfirmen über entsprechende Angebote angefragt. Für im Zuge der Entwurfsplanung nicht berücksichtigte Kosten wurden dem Titel „Flächenwärmeübertrager zur Eis- und Schneefreihaltung“ 20% der berechneten Kosten aufgeschlagen.

### 4.8.3 Kühlung Betriebsräume

Der Titel „Kühlung Betriebsräume“ berücksichtigt folgende Aufgabenteilung für eine eventuelle Ausführungsplanung:

- 1) Die Herstellung der Versorgungsleitungen von der existierenden Wasserfassung zum Tunnelbetriebsgebäude, sämtliche Installationen außerhalb des Betriebsgebäudes sowie der Betrieb der Förderpumpe sind Bestandteil der eigentlichen Pilotanlage und werden entsprechend wissenschaftlich begleitet.
- 2) Sämtliche Installationen und Adaptionen innerhalb des Betriebsgebäudes können dem klassischen Gewerk „Lüftung“ zugerechnet werden und sind nicht explizit Bestandteil einer wissenschaftlichen Projektbegleitung.

Auf Basis der aufgezeigten Aufgabenteilung umfasst die Kostenschätzung für diesen Titel zunächst lediglich einen geringen Umfang an Ausführungsplanung und wissenschaftlicher Begleitung. Installations- und Herstellungskosten sind lediglich für die Anlagenbestandteile außerhalb des Gebäudes detailliert beschrieben. Sämtliche Arbeiten innerhalb des Betriebsgebäudes wurden durch eine Fachfirma Doser des Lüftungshandwerks im Rahmen einer Kostenschätzung ermittelt, die als Gesamtsumme innerhalb des Leistungsverzeichnisses berücksichtigt ist. Für im Zuge der Entwurfsplanung nicht berücksichtigte Kosten wurden den Positionen ohne Nachunternehmerleistung 20% der berechneten Kosten aufgeschlagen.

### 4.8.4 Messtechnik

Für die Kostenschätzung der Mess- und Regelungstechnik wurden die erforderlichen Messinstrumente und Sensoren sowie deren Installation detailliert zusammengestellt. Das Aufsetzen (Programmieren) eines erforderlichen Regelkreises sowie die für diesen Zweck erforderlichen Systemkomponenten wurden durch die Firma Jumo aus dem Bereich der Sensor-, Steuer- und Regelungstechnik im Rahmen eines Angebotes ermittelt, die als Gesamtsumme innerhalb des Leistungsverzeichnisses berücksichtigt sind. Die Planung der erforderlichen Messtechnik ist Bestandteil der Titel 2 und 3. Für im Zuge der Entwurfsplanung nicht berücksichtigte Kosten wurden den Positionen ohne Nachunternehmerleistung 20% der berechneten Kosten aufgeschlagen.

Das Leistungsverzeichnis gemäß Anlage XVII – Leistungsverzeichnis Pilotanlage und Technikum kann nicht mit den Leistungsverzeichnissen aus der Vorplanung in Bezug gesetzt werden. Im Rahmen der Vorplanung wurde hinsichtlich des Anlagen-

layouts von anderen Randbedingungen ausgegangen, eine intensive wissenschaftliche Begleitung des Projektes nicht berücksichtigt.

Die Titelsummen des Leistungsverzeichnisses der Entwurfsplanung belaufen sich auf:

Titel	Kosten (netto)
Allgemein	17.982,69 €
Flächenwärmeübertrager zur Eis- und Schneefreihaltung	176.500,38 €
Kühlung Betriebsräume	44.771,89 €
Messtechnik	33.381,62 €
<b>gesamt</b>	<b>272.636,58 €</b>

Tabelle 26: Übersicht Gesamtkosten Entwurfsplanung

## 4.9 Umweltverträglichkeit

An das Betriebsgelände des Tunnels Füssen schließt nördlich ein FFH-Gebiet (Flora-Fauna-Habitat) an (siehe Abbildung 43), in das die derzeitigen Tunneldrainagewässer der östlichen und westlichen Ulmendrainage entwässern.



Abbildung 43: Übersicht FFH-Gebiete Füssen

Gemäß § 34 BNatSchG bzw. Art. 6 Abs. 3 FFH-RL sind bei einer FFH-Verträglichkeitsprüfung die Auswirkungen eines Projektes hinsichtlich unterschiedlicher Wirkfaktoren zu beurteilen.

Bei dem Betrieb der Pilotanlage am Nordportal des Tunnels Füssen wird in den Sommermonaten das Tunneldrainagewasser zur Kühlung des Tunnelbetriebsraumes verwendet und erfährt hierdurch eine Temperaturerhöhung gegenüber der natürlichen Austrittstemperatur am Tunnelportal. In den Wintermonaten dient das Tunneldrainagewasser zur Temperierung der Freiflächen vor dem Tunnelbetriebsgebäude und erfährt hierdurch eine Temperaturabsenkung. Das Tunneldrainagewasser soll nach der thermischen Nutzung in die bisher genutzte Vorflut eingeleitet werden. Es erfolgt also weiterhin eine Entwässerung in das ausgewiesene FFH-Gebiet.

Durch den Betrieb der Pilotanlage wird der abiotische Standortfaktor Temperatur verändert. „Veränderungen der Temperaturverhältnisse in Gewässern führen regelmäßig zu Folge- und Synergieeffekten, z. B. zu verändert wirksamen Wachsbedingungen von Organismen, die dann ursächlich für Veränderungen an lebensraumtypspezifischen Charakteristika sind. Direkt artbezogen können veränderte Temperaturverhältnisse reduzierte Nutzung, geringeren Fortpflanzungserfolg bis hin zu Habitatverlust zur Folge haben oder - bei extremeren Werten - direkt letal auf Individuen wirken.“ [9]

Seit dem 1. April 2016 gilt in Bayern die Natura 2000-Verordnung. Durch diese Verordnung wird die Umsetzung der zu Grunde liegenden europäischen Richtlinien sichergestellt. Das FFH-Gebiet nördlich der Betriebsfläche des Tunnels Füssen hat die Gebietsnummer 8430-303. und trägt die Bezeichnung „Falkenstein, Alatsee, Faulenbacher- und Lechtal“. Für die Gesamtfläche von 978 ha wurden zahlreiche Erhaltungsziele definiert. Nach telefonischer Rücksprache bei der Forstbetriebsgemeinschaft Füssen e.V., die bei der Überarbeitung der FFH-Gebiete im Bereich Füssen maßgeblich beteiligt war, kann im genannten FFH-Gebiet vor allem die Population der Groppe ein entscheidender Faktor bei der Beurteilung der Einleitung des thermisch veränderten Tunnelwassers sein.

Gemäß Anlage XVI – NATURA 2000 sind zum Erhalt ggf. zur Wiederherstellung der Population der Groppe entsprechende Maßnahmen zu treffen. Die Groppe ist ein kleiner Süßwasserfisch, der hohe Ansprüche an die Wasserqualität, den Sauerstoffgehalt und niedrige Wassertemperaturen stellt. Die Groppe kommt sowohl in Fließgewässern als auch in sommerkühlen Seen vor. Die Groppe ist in den Anhang II der FFH-Richtlinie aufgenommen worden (Tier- und Pflanzenarten von gemeinschaftlichem Interesse, für deren Erhaltung besondere Schutzgebiete ausgewiesen werden müssen). Die Laichzeit der Groppe fällt je nach Temperaturverlauf in die Zeit von März bis Mitte Mai. Die Eiablage erfolgt bei Wassertemperaturen zwischen 10° und 12,5 °C. Die Eier benötigen bei Temperaturen von 10°C etwa 4 Wochen bis zum Schlupf. Die Larven ernähren sich zunächst 12 Tage lang von ihrem Dottersack, bei einer Wassertemperatur von 13°C, dann gehen sie zur aktiven Ernährung über [25]. Eine detaillierte Betrachtung des Einflusses der veränderten Drainagewassertemperaturen auf die Population der Groppe ist im Zuge der Ausführungsplanung vorzunehmen.

Das Bayerische Landesamt für Umwelt gibt mit dem Merkblatt Nr. 4.5/18 [3] Hinweise, ob eine Wärmeeinleitung als wesentlich oder unwesentlich einzustufen ist und bietet hierzu eine sogenannte Relevanzprüfung an: „Die Relevanzprüfung soll es ermöglichen, mit vereinfachtem Aufwand festzustellen, ob eine bestehende oder geplante Wärmeeinleitung als unwesentlich einzustufen ist, weil sie nach aller Wahrscheinlichkeit zu keiner Verfehlung des guten ökologischen Zustandes führen kann.“ [3]. Die in diesem Merkblatt genannten Temperatureinleitgrenzwerte liegen für den Kühlfall (Betrieb der Pilotanlage zur Klimatisierung des Tunnelbetriebsraumes) außerhalb der im Rahmen des Betriebs der Anlage zur erwartenden Temperaturen. Aus diesem Grund kann ohne weitere Abstimmungen mit den örtlichen Behörden das genannte Merkblatt keine Anwendung finden. Es kann davon ausgegangen werden, da die zu erwartenden Einleittemperaturen deutlich unter den in [3] genannten Grenzwerten liegen, dass eine Relevanzprüfung nach erfolgter Abstimmung mit den zuständigen Stellen ergeben wird, dass die Einleitung des thermisch veränderten Tunneldrainagewassers unwesentlich ist.

#### 4.10 Weiterer Forschungsbedarf

Im Zuge der Entwurfsplanung des Technikums „temperierte Fahrfläche“ haben sich Fragestellungen ergeben, die im Vorfeld bzw. während der Ausführungsplanung einer entsprechenden Testanlage beantwortet werden sollten.

- 1) Erarbeitung eines witterungsabhängigen Prognoseverfahrens der erforderlichen Wärmestromdichte zur Erzielung einer Eis- und Schneefreihaltung
  - Sichtung und Auswertung von [5]
  - Zusammenführung der Messdaten der örtlichen GMA Füssen A mit entsprechenden Daten des SWIS
  - Nachrüstung der GMA Füssen A um die Messung der Windgeschwindigkeit (siehe Anlage XV – Anlagenbestandteile)
  - Entwicklung eines Prognosealgorithmus
- 2) Untersuchung zur Möglichkeiten der Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit von Asphalt- und Betonfahrflächen
  - Literaturrecherche zur Fragestellung
  - Indexversuche unter Laborbedingungen
  - Festlegung geeigneter Materialmischungen

- 3) Untersuchungen zur Anordnung von Rohrleitungen innerhalb eines Fahrflächenaufbaus
  - Befragung von Planern und ausführenden Firmen im Bereich Fahrflächensanierung mit dem Ziel, die Dicke einer erforderlichen Deckschicht und der zu berücksichtigenden Frästoleranzen zu eruieren
- 4) Initialisierung der FFH-Verträglichkeit zur Einleitung der thermisch veränderten Tunnelrainagewässer in das an die Betriebsfläche angrenzende FFH-Gebiet

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Fachtechnische Vorbereitung von geothermischen Pilotanwendungen bei Grund- und Tunnelbauwerken“ (FE 15.0541/2011/BRB) wurden im Bearbeitungszeitraum vom 15.08.2015 bis 30.11.2016 und aufbauend auf drei Planungsphasen das geothermische Potential der Tunnelrainagewässer von drei Tunnelportalen deutscher Straßentunnel ermittelt, potentielle Nutzungen der verfügbaren Energie entwickelt und letztendlich eine Pilotanlage zur Klimatisierung von Tunnelbetriebsräumen sowie ein Technikum zur Temperierung von Freiflächen entwickelt.

Im Zuge der 1. Projektphase wurde das nutzbare geothermische Potential der anfallenden Tunnelrainagewässer an den Tunnelportalen Rennsteig Nord und Süd (Thüringen) sowie am Tunnelportal Füssen Nord (Bayern) für den Heiz- bzw. den Kühlbetrieb auf der Basis von Messungen vor Ort ermittelt. Hierzu wurden zunächst die erforderlichen Messeinrichtungen zur Erfassung der Drainagewasserabstrommengen (Tunnel Rennsteig) und Drainagewassertemperaturen (Tunnel Rennsteig und Füssen) entwickelt, hergestellt und eingerichtet. Unter Berücksichtigung von maximal und minimal zulässigen Temperatureinleitgrenzwerten in die Vorflut nach der thermischen Nutzung des Wassers und unter zu Grundelegung einer äußerst konservativen Vorgehensweise zur Bestimmung des geothermischen Potentials, bei dem minimale Schüttungsmengen mit extremalen Drainagewassertemperaturen kombiniert wurden, ergeben sich für die einzelnen Tunnelportale folgende nutzbare Wärme- bzw. Kältepotentiale:

Rennsteig Nord	$Q_{\text{geo}}$ [kW]
Heizfall	147
Kühlfall	589
Rennsteig Süd	$Q_{\text{geo}}$ [kW]

Heizfall	53
Kühlfall	227
Füssen Nord	$Q_{\text{geo}}$ [kW]
Heizfall	152
Kühlfall	438

Tabelle 27: Übersicht geothermisches Potential

Des Weiteren wurden Konzepte zur Nutzung der geothermischen Energie an den einzelnen Tunnelportalen entwickelt. Hierbei wurden zum einen Nutzungen im direkten Umfeld des Tunnels, wie z.B. die Klimatisierung von tunneleigenen Betriebsräumen oder die Temperierung von Fahrflächen im Tunnelportalbereich, zum anderen aber auch Nutzungen außerhalb der Sphäre des Tunnelbetriebs, wie z.B. die Versorgung von naheliegender Wohnbebauung mit Wärmeenergie untersucht. Sämtliche untersuchte Nutzungen wurden in eine Entscheidungsmatrix überführt, in der neben dem geothermischen Potential des zugehörigen Portals auch weitere Bewertungskriterien wie die Betriebssicherheit, die technische Umsetzbarkeit oder die Öffentlichkeitswirksamkeit der untersuchten Nutzung berücksichtigt wurden. Auf der Basis dieser Entscheidungsmatrix und in Zusammenarbeit mit dem Betreuerkreis des Forschungsprojektes wurden die Tunnelportale Füssen Nord und Rennsteig Nord für die anschließende Phase der Vorplanung ausgewählt. Darüber hinaus wurden die Nutzungen „Temperierung von Freiflächen zur Eis- und Schneefreihaltung“ und „Klimatisierung von Tunnelbetriebsräumen“ für die folgende Planungsphase als Untersuchungsgegenstand ausgewählt.

Neben der Ermittlung des geothermischen Potentials des Tunnelrainagewässers wurde die chemisch-physikalische Eignung zur thermischen Nutzung bewertet. Hierzu wurden entsprechende Laboruntersuchungen an den 3 Tunnelportalen durchgeführt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Tunnelrainagewässer an allen Standorten grundsätzlich zur thermischen Nutzung geeignet sind. Es ist mit eventuellen Geschiebefrachten an allen Tunnelportalen zu rechnen. Für die Tunnelportale Rennsteig Nord und Süd werden weitere Untersuchungen zur Feststellung des endgültigen Korrosionsangriffs durch das Tunnelrainagewasser empfohlen.

Die zweite Projektphase bildete die Vorplanung von Anlagenkonzepten zur Temperierung von Freiflächen sowie zur Klimatisierung von Tunnelbetriebsräumen an den Tunnelportalen Rennsteig Nord und Füssen Nord. Im Rahmen der Vorplanung wurde als Dimensionierungsziel die Aus-

schöpfung des geothermischen Potentials für den Heizfall und die Deckung einer vorhandenen Kühllast für den Kühlfall zu Grunde gelegt. Zunächst wurden die maßgeblichen Anlagenbestandteile wie entsprechende Wasserfassungen oder die Ausbildung erforderlicher Wärmeübertrager entwickelt. Die Basis der hierzu durchgeführten Dimensionierungen bilden auf die jeweilige Örtlichkeit abgestimmte Energiebedarfsermittlungen. Hierzu wurde für die Temperierung der Freiflächen eine entsprechende Energiebilanz formuliert, für die Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume die vorhandene Kühllast eruiert.

Die Ergebnisse der Vorplanung zeigen, dass mit dem vorhandenen geothermischen Heizpotential sowohl am Nordportal des Tunnels Rennsteig als auch am Nordportal des Grenztunnels Füssen eine Fläche von ca. 380 m<sup>2</sup> eis- und schneefrei gehalten werden kann. Die vorhandenen Kühllasten der Tunnelbetriebsgebäude beanspruchen nur ein geringen Anteil von ca. 3% des möglichen Kühlpotentials, so dass an beiden Tunnelportalen die Auskopplung weiterer Kühlenergie für weitere Anwendungen, wie z.B. im Fall Füssen die Versorgung von Gebäuden eines nahegelegenen Gewerbegebietes, denkbar ist.

Die geplanten Anlagenkomponenten und die zur Errichtung der Anlagen erforderlichen Arbeiten wurden zum Abschluss der Vorplanung in entsprechende Langtextleistungsverzeichnisse überführt und auf dieser Basis monetär bewertet. Die Gesamtkosten der geplanten Anlagen belaufen sich sowohl am Tunnel Rennsteig als auch am Tunnel Füssen auf ca. 270.000 Euro (Netto). Ziel der Vorplanung war es, ein Tunnelportal für die an die Vorplanung anschließende Entwurfsplanung auszuwählen. Da sich aufgrund der Kostenschätzung keine eindeutigen Vorteile eines Tunnelportals zeigten, waren die ausschlaggebenden Faktoren zur Wahl des Grenztunnels Füssen im Wesentlichen das über den Jahresgang wenig schwankende geothermische Potential, die bessere Zugänglichkeit zum Projektstandort sowie die wesentlich geringeren erforderlichen Eingriffe in den Bestand bei der Errichtung der Anlagen.

Die abschließende Phase des Forschungsprojektes bildete die Entwicklung eines Pilotprojektes zur Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume sowie eines Technikums zur Temperierung von Freiflächen auf dem Betriebsgelände des Grenztunnels Füssen im Sinne einer Entwurfsplanung. Entgegen der Vorgabe aus der Vorplanung das gesamte geothermische Heizpotential zur Eis- und Schneefreihaltung auszunutzen, hatten sich die Mitglieder der Betreuergruppe zum Forschungsprojekt darauf

verständigt, dass vorlaufend zu einer großskaligen Pilotanlage weitere Voruntersuchungen im Umfang eines Technikums erforderlich werden. Der Grund für diese Entscheidung ist mit der gewählten Betriebsart des Wärmeübertragers zur Temperierung der Freiflächen verbunden, bei dem das Tunnelrainagewasser ohne einen Temperaturhub direkt durch ein Rohrleitungssystem innerhalb des Fahrbahnaufbaus zirkuliert. Mit diesem direkten passiven Betrieb wird lediglich der Betrieb einer Förderpumpe erforderlich und es kann auf zusätzliche Wärmeübertrager und ggf. den Einsatz von Frostschutzmitteln verzichtet werden. Dies reduziert die Herstellungs- und Betriebskosten der Anlage und steigert dadurch ihre Effizienz. Allerdings besteht bei dieser Betriebsart die Gefahr des Auffrierens und damit der Zerstörung der Rohrleitungen und ggf. des Fahrflächenaufbaus. Eigens für dieses mögliche Havarieszenario wurden Regelkreise entwickelt, die bei Frostgefahr die Anlage gezielt außer Betrieb nehmen und ein Auffrieren verhindern sollen. Das Technikum soll vor diesem Hintergrund die erforderlichen Erfahrungen mit der Regelung und dem Betrieb dieser Anlagenart generieren, die dann in weiterer Folge auf eine Anlage im Realmaßstab projiziert werden können. Darüber hinaus bietet das Technikum die Möglichkeit, die bisher auf einer theoretischen Basis basierenden erforderlichen Wärmestromdichten, die zur Sicherstellung der Eis- und Schneefreihaltung erforderlich sind, auf der Basis von Versuchsergebnisse zu bewerten und ggf. anzupassen. Hierdurch wird die Grundlage für eine optimierte Auslegung einer großskaligen Pilotanlage bereitgestellt.

Im Rahmen der Entwurfsplanung wurden die im Zuge der Vorplanung bereits durchgeführten Planungen vertieft und bei Bedarf angepasst. Darüber hinaus wurde ein intensives Monitoring- und Regelungskonzept entwickelt, das sowohl dem Betrieb der Pilotanlage zur Klimatisierung der Tunnelbetriebsräume als auch dem Betrieb und der wissenschaftlichen Begleitung des Technikums „temperierte Freifläche“ Rechnung trägt. Sämtliche Anlagenbestandteile sowie deren Herstellung wurden zusammen mit einer Abschätzung der Kosten für eine wissenschaftliche Begleitung in ein detailliertes Langtextleistungsverzeichnis überführt und monetär bewertet. Hiernach belaufen sich die Gesamtkosten für die Errichtung und wissenschaftlichen Begleitung der Pilotanlage und des Technikums auf ca. 273.000 Euro (Netto).

Die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes haben gezeigt, dass das an den deutschen Straßentunnel Rennsteig und Füssen anfallende Tunnelrainagewasser ein großes thermi-

ches Potential besitzt, für deren Nutzung sich sowohl im direkten Tunnelnahbereich als auch zur Versorgung von Wohn- oder Betriebsgebäuden zahlreiche Möglichkeiten bieten. Besonders das vorhandene Kühlpotential übersteigt die derzeit bekannten Kühllasten um ein Vielfaches. Die Nutzung des Tunneldrainagewassers zur Temperierung von Freiflächen nach dem System direkte passive Heizung stellt ein Novum im Bereich der Eis- und Schneefreihaltung von Betriebs- und Fahrflächen dar, das auf den Kühlbetrieb in den Sommermonaten erweitert werden kann, um z.B. temperaturbedingte Spurrillenbildung zu reduzieren. Die Temperierung von Fahrflächen im Portalbereich eines Tunnels kann ggf. zu einer Reduktion des Taumittleinsatzes in diesem Bereich und damit zu einer Senkung der Chloridbelastung im Tunnel führen. Grundvoraussetzung zur Abschätzung des geothermischen Potentials des anfallenden Tunneldrainagewassers ist die Kenntnis über die zu erwartende Schüttungsmenge und Wassertemperatur. Vor diesem Hintergrund wäre die Nachrüstung bestehender drainierter Tunnel bzw. die Ausrüstung geplanter Tunnel mit zugänglichen geeigneten Messeinrichtungen wünschenswert.

## **6 Anlagenverzeichnis**

### **6.1 Anlagen Grundlagenermittlung**

- Anlage I – Protokolle Ortsbegehung Rennsteig
- Anlage II – Protokolle Ortsbegehung Füssen
- Anlage III – Drainagewasserfassung Rennsteig
- Anlage IV – Drainagewasserfassung Füssen
- Anlage V – Laboruntersuchung Rennsteig
- Anlage VI – Laboruntersuchung Füssen
- Anlage VII – Potentielle Nutzungen Rennsteig
- Anlage VIII – Potentielle Nutzungen Füssen
- Anlage IX – Entscheidungsmatrix

### **6.2 Anlagen Vorplanung**

- Anlage X – Leistungsverzeichnis Tunnel Rennsteig
- Anlage XI – Leistungsverzeichnis Tunnel Füssen
- Anlage XII – Freiflächenheizung Füssen Nord
- Anlage XIII – Freiflächenheizung Rennsteig Nord

### **6.3 Anlagen Entwurfsplanung**

- Anlage XIV – Planunterlagen
- Anlage XV – Anlagenbestandteile

**diese Anlage ist nicht Bestandteil der  
Veröffentlichung, kann jedoch bei der  
BASt eingesehen werden**

- Anlage XVI – NATURA 2000
- Anlage XVII – Leistungsverzeichnis Pilotanlage  
und Technikum

## 7 Literatur

- [1] Agintec. *IRAS-Fischzucht-Kreislaufsystem (3-Becken-System). Afrikanischer Wels (clarias gariepinus)*. <http://www.agintec.de/dateien/dokumente/KUG%20Fisch%2001.05.2014.pdf>. Accessed 27 Januar 2016.
- [2] American Society of Heating, Refrigerating and Air. 2011. *2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance*.
- [3] Bayerisches Landesamt für Umwelt: *Merkblatt Nr. 4.5/18 Beurteilung von Wärmeeinleitungen*, Referat 68. 2013
- [4] *Aquakulturen*. <http://www.wwf.de/themenprojekte/meere-kuesten/fischerei/nachhaltige-fischerei/aquakulturen/>. Accessed 27 Januar 2016.
- [5] Badelt, H. und Breitenstein, J. 2005. *Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst. [Bericht zum Forschungsprojekt AP 99 652]*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: V, Verkehrstechnik H. 129. Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss, Bremerhaven.
- [6] Baer, J., Wedekind, H., Müller-Belecke, A., und Brämick, U. 2011. Warmwasser-Kreislaufanlagen zur Speisefischproduktion: Einfluss der Kopplung mit einer Biogasanlage auf die Rentabilität der Fischerzeugung. *Fischer&Teichwirt*, 07, 248–250.
- [7] *Bauwerksentwurf, Erläuterungsbericht Tunnel Rennsteig*.
- [8] Blossfeld, J. und Rönna, I. August 2014. *Wärmeenergie aus dränierten Bergwässern von Strassentunneln*. Bundesanstalt für Strassenwesen. (unveröffentlicht)
- [9] Bundesamt für Naturschutz. 2014. *FFH-VP-Info: Fachinformationssystem zur FFH-Verträglichkeitsprüfung*. Bundesamt für Naturschutz, Leipzig.
- [10] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 2001. *Hydrologische Atlas von Deutschland*.
- [11] Decker, A. Innenschalenbeton – Erfahrungen am Rennsteigtunnel. In *Tunnelbau-Fachtagung 2002*, 1–7.
- [12] dimplex. März. *Überschlägige Kühllast-Berechnung für Einzelräume. zur Dimensionierung von Dimplex Raumklimageräten nach dem HEA-Verfahren*, Kulmbach.
- [13] dimplex. 2015. *PHB Wärmepumpen für Heizung und Warmwasserbereitung*. [http://www.dimplex.de/fileadmin/dimplex/downloads/projektierungshandbuecher/de/PHB\\_WP\\_Heizen\\_BT1\\_DE\\_2015\\_NEU.pdf](http://www.dimplex.de/fileadmin/dimplex/downloads/projektierungshandbuecher/de/PHB_WP_Heizen_BT1_DE_2015_NEU.pdf). Accessed 18 Dezember 2015.
- [14] Feldmann, M., Döring, B., Hellberg, J., Kuhnhenne, M., Pak, D., Mengerling, I., Beucher, S., Hess, A., Steinhauer, B., Kemper, D., and Scharnigg, K. 2012. *Vermeidung von Glätteisbildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen : B, Brücken- und Ingenieurbau B 87. BASt, Bremerhaven.
- [15] García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M., und Liu, Q. 2009. Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials* 23, 10, 3175–3181.
- [16] Genath, B. 1999. Holland ohne Spurrillen-Not. Freifächensystem kühlt Haringvlietbrücke spurrillenarm. *Sanitär und Heizungstechnik* 1964, 4, 110–112.
- [17] Kath, F. A. 2012. *Technische und betriebswirtschaftliche Analyse von Konzepten zur ganzjährigen Nutzung der Abwärme einer Biogasanlage im dezentralen ländlichen Raum*. Dissertation, Justus-Liebig-Universität.
- [18] Kayane, I. 1980. Groundwater use for snow melting on the road. *GeoJournal* 4, 2, 173–181.
- [19] Keller, M., Mender, R., und Schudel, N. 1996. Wärme aus dem Berg: Projekt Tunnel-Geothermie des Bundesamtes für Energiewirtschaft. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 1996, 14.
- [20] Kruppa, B. *Sanitärtechnik Warmwasserversorgung*. Fachbereich Maschinenbau und Energietechnik.
- [21] Laasch, T. und Laasch, E. 2013. *Haustechnik. Grundlagen, Planung, Ausführung*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- [22] Moormann, C. und Buhmann, P. Technische und ökonomische Perspektiven der Tunnelgeothermie. In *21. Symposium für Felsmechanik und Tunnelbau 2014*.
- [23] Nicolas, J.-P. 1996. *Glättebildung durch Überfrieren. Schwellwerte der Oberflächenfeuchte auf Fahrbahnen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen : V, Verkehrstechnik H. 36. Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss, Bremerhaven.
- [24] Rasmussen, N. 2003. *Ermitteln der Anforderungen für die Kühlung in Datacentern. Weißbuch Nr. 25*.
- [25] Rheinland Pfalz Landesinformationssystem der Naturschutzverwaltung. *Steckbrief zur Art 1163 der FFH-Richtlinie. Groppe (Cottus gobio)*. <http://www.natura2000.rlp.de/steckbriefe/index.php?a=s&b=a&c=ffh&pk=1163>. Accessed 2 September 2016.

- [26] Richter, T. 2009. *Verwendung von Erdwärme zur Schnee- und Eisfreihaltung von Freiflächen*. Berichte des Instituts für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover 2. Fraunhofer IRB-Verl., Stuttgart.
- [27] Richter, T. 2015. Simulation zur Abbildung des thermischen Verhaltens von Oberflächen am Beispiel einer beheizten Freifläche zur Schnee- und Eisfreihaltung. In *Bauphysik Kalender 2015. Simulations- und Berechnungsverfahren*, N. A. Fouad, Ed. Ernst & Sohn, Berlin, 451–520.  
DOI=10.1002/9783433605158.ch13.
- [28] 2012. *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen*. RStO 12. FGSV 499. Forschungsges. für Strassen- und Verkehrswesen, Köln.
- [29] Schmidt-Puckhaber, B. 2010. *Fisch vom Hof?! Fischerzeugung in standortunabhängigen Kreislaufanlagen*. DLG-Verl., Frankfurt am Main.
- [30] Schneider, M., Schlosser, T., und Moormann, C. 2011. Erdwärmennutzung im Tunnelbau - ein Forschungsprojekt in Stuttgart. *bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, Sonderheft 'Oberflächennahe Geothermie 2011', 64–71.
- [31] Schweizerischen Vereinigung für Geothermie SVG. 2008. *Tunnelgeothermie Eine nutzenswerte Energiequelle im Land der Tunnels*, Neuchatel.
- [32] Springer, E. 1977. Einbauvorschriften für Asphaltmischgut im Straßenbau, Anforderungen an alle Schichten des Oberbaues nach dem Einbau. *bitumen* 1977, 5, 139–142.
- [33] 2014. *Temperierte Staße. Machbarkeitsstudie*. Forschung - Strassenbau und Verkehrstechnik 1102. Wirtschaftsverlag NW, Bremen.
- [34] VDI. 2015. *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*. VDI-Verlag, Düsseldorf, VDI 2078:2015-06.
- [35] Verband Beratender Ingenieure. 2012. *Oberflächennahe Geothermie*. VBI-Schriftenreihe 18. VBI, Berlin.
- [36] Verein Deutscher Ingenieure. 2010. *Thermische Nutzung des Untergrunds Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte* ICS 27.010. Beuth Verlag GmbH, Berlin ICS 27.010, VDI 4640 Blatt 1.
- [37] Verein Deutscher Ingenieure. 2015. *Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen* ICS 27.080. Beuth Verlag GmbH, Berlin ICS 27.080, VDI 4640 Blatt 2.
- [38] Wu, J., Liu, J., und Yang, F. 2015. Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction and Building Materials* 75, 129–135.
- [39] 2009. *Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen - Asphaltbauweisen*. ZTV BEA-StB 09. FGSV 798: R1. FGSV, Köln.

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

## 2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung  
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel  
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsabrechnungen  
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis  
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen  
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken  
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen  
Freundt, Böning € 15,00

## 2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen  
Friedrich  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen  
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)  
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem  
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken  
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken  
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse  
Borrmann, Fischer, Dori, Wild  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke  
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken  
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel  
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken  
Neumann, Rauert € 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken  
Hegger, Herbrand € 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton  
Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken  
Müller € 15,00

## 2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken  
Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke, Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen  
Placzek, Pohl  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln  
Mayer, Brennerberger, Großmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln  
Mayer, Brennerberger, Großmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton  
Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells  
Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standesicherheit und Gebrauchstauglichkeit**  
Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln**  
Schmidt, Simon, Guder, Juknat, Hegemann, Dehn € 16,00

**B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger**  
Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 121: Zerstorungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse**  
Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken**  
Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staack  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

**B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**  
Geißler, Krohn € 15,50

**B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**  
Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**  
Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thró  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**  
Mielecke, Graubner, Roth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**  
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

**B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden**  
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

**B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**  
Schmellekamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**  
Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**  
Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**  
Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchtigungskonzepte von Straßenbrücken**  
Gehrelein, Lingemann, Jungwirth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2017

**B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**  
Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**  
Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton**  
Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

**B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken**  
Mayer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie**  
Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau in Vorbereitung

**B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5**  
U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pouroustad  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln**  
Moormann, Buhmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

**Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH**  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. + (0)421/3 69 03-53 · Fax + (0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)