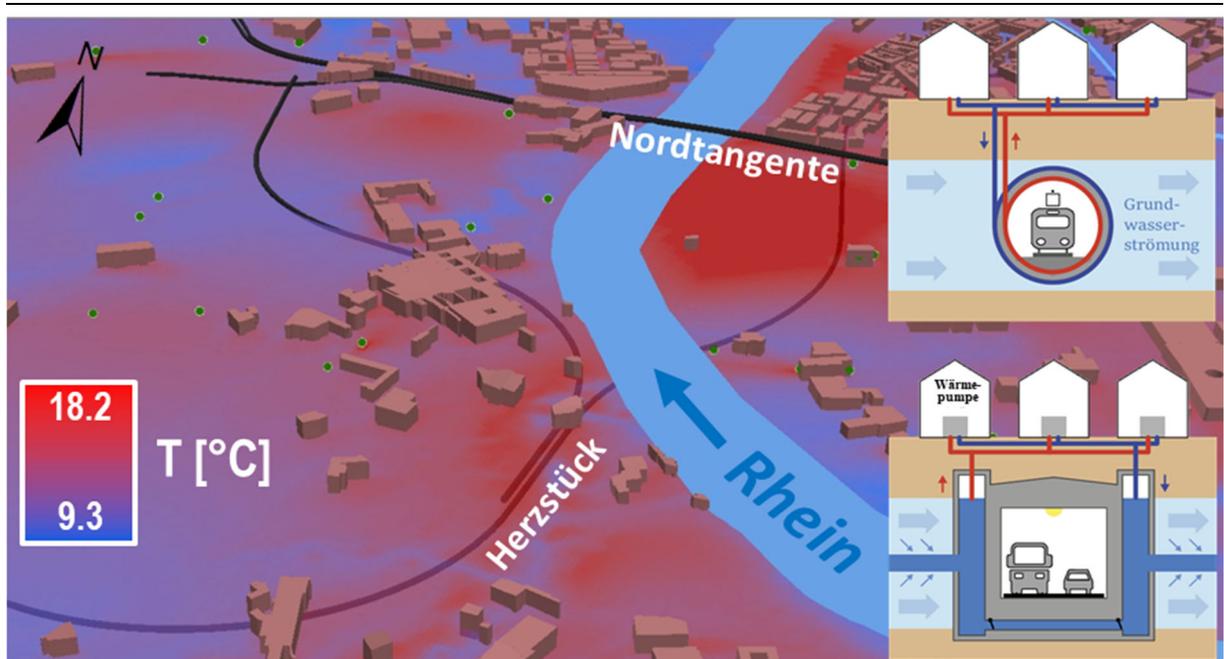




Schlussbericht vom 23.12.2021

ThePoTun Machbarkeitsstudie: Thermisches Potential urbaner Tunnelinfrastruktur in Lockergesteinsgrundwasservorkommen



Grundwassertemperaturen und städtische Untergrundstrukturen, einschliesslich geplanter und vorhandener Tunnel, am Rheinknie von Basel: Thermische Nutzung mittels Tunnel Absorbersysteme für S-Bahntunnel (oben rechts) sowie in Kombination mit Dükersystemen (unten rechts).



UNIVERSITÄT BASEL

Datum: 23-12-2021

Ort: Basel

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm SI/501646-01
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch
energieforschung@bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Angewandte und Umweltgeologie
Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel
CH-4056 Basel

Autor/in:

Jannis Epting, jannis.epting@unibas.ch
Peter Huggenberger, peter.huggenberger@unibas.ch

BFE-Projektbegleitung:

Gunter Siddiqi, gunter.siddiqi@bfe.admin.ch
Rita Kobler, rita.kobler@bfe.admin.ch
Céline Weber, cweber@focus-e.ch

BFE-Vertragsnummer:

SI/501646-01

Zitiervorschlag: Epting J, Huggenberger P (2020) ThePoTun Machbarkeitsstudie: Thermisches Potential urbaner Tunnelinfrastruktur in Lockergesteinsgrundwasservorkommen. Auftrag SI/501646-01 Bundesamt für Energie (BFE), 3003 Bern, Switzerland. 85 Seiten, doi: 10.5451/unibas-ep86522

DOI: 10.5451/unibas-ep86522

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Im Rahmen der vom BFE finanzierten Machbarkeitsstudie «Thermisches Potential urbaner Tunnelinfrastruktur in Lockergesteinsgrundwasservorkommen – ThePoTun» wurden von der Forschungsgruppe Angewandte und Umweltgeologie (AUG) der Universität Basel Konzepte für eine koordinierte effiziente **thermische Nutzung von Tunnelbauwerken im Stadtgebiet von Basel (Projektschwerpunkt A)** und verschiedene **Strategien zur saisonalen Wärmespeicherung im Festgestein (Projektschwerpunkt B)** evaluiert.

Im Rahmen von **Projektschwerpunkt A** wurde einerseits der thermische Austausch von Tunnelinfrastrukturen mit dem Untergrund (Festgestein und Grundwasser) und andererseits jener mit der Tunnelinnenluft (Abwärme von Fahrzeugen) betrachtet. Exemplarisch konnten für geplante Bauprojekte in Basel, einschliesslich dem S-Bahntunnel «Herzstück» (Kantone BS/BL, SBB) und dem Autobahnbauwerk «Rheintunnel» (ASTRA), unterschiedliche geothermische Energiesysteme (GES) untersucht und das thermischen Potential abgeschätzt werden. Im Rahmen von **Projektschwerpunkt B** konnten neben der saisonalen Wärmespeicherung im Festgestein durch verschiedene GES auch Konzepte zur Tunnel- und Grundwasserkühlung diskutiert werden.

Die Ergebnisse für **Projektschwerpunkt A** und dem geplanten **S-Bahntunnel «Herzstück»** zeigen, dass die thermische Aktivierung von Tunnel Absorbersystemen (TAS) in solchen Abschnitten am effizientesten ist, in welchen das Tunnelbauwerk in den Grundwasser-gesättigten Lockergesteinen verläuft. So könnte im Winter eine Energiemenge von 5.2 bzw. 1.9 GWh pro Jahr, bei einer Wärmeleistung von bis zu 1.9 bzw. 0.7 MW, aus dem Grundwasser entnommen und mittels Wärmepumpe (Nutzwärme) auf ein nutzbares Temperaturniveau gebracht werden. Die Wärme stammt dabei nur geringfügig aus der Tunnelinnenluft, sondern hauptsächlich aus dem Lockergesteins-Grundwasserleiter. Im Sommer könnte das vergleichsweise kühlere Grundwasser zum Kühlen genutzt werden. Dabei würde die Abwärme einer Kälteanlage ans Grundwasser abgegeben. Für den geplanten S-Bahntunnel eignen sich dafür zwei 736 bzw. 284 m lange Tunnelabschnitte. Sie ermöglichen 3.7 bzw. 1.4 MW Abwärmeleistung oder 5.8 bzw. 2.1 GWh pro Jahr Abwärmeenergie abzuführen. Für das Stadtgebiet von Basel würde dies mit einem gesetzlich unzulässigen Wärmeeintrag in den Lockergesteins-Grundwasserleiter einhergehen. Für andere Standorte ist diese Einschränkung nicht zwingend gegeben und gewässerschutzrechtliche Aspekte müssten entsprechend geprüft werden.

Die Betrachtung des Kühl-Potentials (Wärmeeintrag in das Grundwasser), unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Vorgaben des Grundwasserschutzes, zeigt, dass ein Sommerbetrieb für Kühlzwecke gesetzlich nicht möglich ist. Somit ist für das urbane Gebiet zum aktuellen Zeitpunkt nur der Betrieb von TAS nur zur Wärmeentnahme denkbar. Da auch in Basel der Wärmeentzug aus dem Grundwasser stetig zunimmt, könnte eine rechtliche Änderung die Flexibilität und die Potenzialerschliessung erhöhen. Der Wärmeentzug zur Verwendung für Heizzwecke würde in einer Abkühlung des Untergrundes und der Tunnelinnenluft resultieren. Da die Grundwassertemperaturen in Basel infolge diverser anthropogener Wärmeeinträgen bereits kritisch hoch sind, ist eine Abkühlung der Grundwassertemperaturen durchaus wünschenswert.

Da Tunnelbauwerke zu weiteren unerwünschten Wärmeeinträgen führen wurde im weiteren Verlauf des Projekts die Entwicklung von Konzepten für S-Bahntunnel zum Wärmeentzug für Heizzwecke respektive der damit einhergehender Tunnel- und Grundwasserkühlung weiterverfolgt. Auch vor dem Hintergrund der Klimaänderungen, würde der Betrieb von TAS im S-Bahntunnel eine mögliche Anpassungsstrategie darstellen, um der Temperaturerwärmung urbaner Grundwasserressourcen zu begegnen. Zusammengefasst könnte mit einer Installation von TAS dem Untergrund rund 85 bis 212 W m⁻² Wärme, welche aus dem Grundwasser stammt, entzogen werden. Das urban erwärmte Grundwasser im Bereich



des Tunnelbauwerkes könnte somit, für das untersuchte Betriebsszenario, um bis zu 4 K abgekühlt werden. Für das untersuchte Betriebsszenario konnte auch gezeigt werden, dass in Abhängigkeit der Jahreszeit, 46 bis 101 W m⁻² Wärme über die Tunnelwand und das TAS der Tunnelinnenluft entzogen werden könnte. Dieser Wärmeaustausch ist um ein Vielfaches höher, als der Wärmeeintrag des Bahnbetriebs selbst, welcher geschätzt in der Grössenordnung von 2.2 bis 2.6 W m⁻² liegt.

Für das **Autobahnbauwerk «Rheintunnel»** und die thermische Nutzung von Wasser, welches in Dükersystemen zirkuliert (Drainagewasser), erwies sich nur für Abschnitte, in welchen der Autobahntunnel senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung verläuft und vergleichsweise hohe Grundwassertemperaturen existieren, der Wärmeentzug aus dem Grundwasser als vorteilhaft. Unter diesen Bedingungen könnten entlang eines 320 m langen Tunnelabschnittes Wärmeleistungen für Heizzwecke (z.B. Warmwasser) von bis zu 0.4 im Sommer bzw. 0.8 MW im Winter und Wärmeenergien von 1.1 im Sommer und 2.1 GWh im Winter entzogen werden (Wärmeentzug Drainagewasser). Die jahreszeitlichen Unterschiede ergeben sich aus den Grundwassertemperaturen am Untersuchungsstandort. So sind, vor allem auch urbanen Gebieten, aufgrund einer Phasenverschiebung die Grundwassertemperatur im Winter oft höher als im Sommer.

Im Rahmen von **Projektschwerpunkt B** wurden verschiedene Strategien zur saisonalen Wärmespeicherung im Festgestein untersucht, einschliesslich (1) Erdwärmesonden (EWS) und (2) Energiepfähle (EP). Für den Standort Basel liegt der berechnete Wärmetausch von EWS mit dem Untergrund zwischen 21 und 36 W m⁻¹. Neu konnten die vorgenommenen Simulationen zeigen, dass für die geologischen Standortgegebenheiten im Untergrund von Basel, EWS für Heizzwecke am effizientesten bis in ca. 155 m Tiefe funktionieren. Dies liegt begründet in Kontrasten in den thermischen Eigenschaften der verschiedenen Lithologien im Untergrund von Basel. Der berechnete Wärmetausch von EP mit dem Untergrund liegt zwischen 28 und 47 W m⁻¹. Auch hier zeigen die vorgenommenen Simulationen erstmals, dass für die geologischen Standortgegebenheiten im Untergrund von Basel, EP-Wärmepumpen am effizientesten bis in ca. 30 m Tiefe funktionieren. Für beide GES ist die Effizienz im Sommerbetrieb sehr gering und sollte lediglich dahingegen betrachtet werden, dass die vom TAS abgeführte Wärme, einen Beitrag zur thermischen Regeneration der unterliegenden Felsformationen und somit zu einer leichten Effizienzsteigerung der jeweiligen GES im Winterbetrieb leisten kann.

Das thermische Potential des Grundwassers ist vor allen von der Grundwasserfliessgeschwindigkeit, der Grundwassermächtigkeit, den Eigenschaften des Untergrundes (hydraulische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und -kapazität, Porosität) und den rechtlichen Rahmbedingungen (maximaler erlaubter Temperatur-Einfluss im Grundwasser) abhängig. Die erwähnten hydrogeologischen Daten sind für verschiedene urbane Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen vorhanden. Dies ermöglichte eine erste Abschätzung, respektive Vergleich, zur Realisierung von TAS in verschiedenen Städten. Die Abschätzung deutet darauf hin, dass TAS bei Winterthur und in verschiedenen Abschnitten der Haupttäler des Kantons Basel-Landschaft interessant sein könnten. In Abhängigkeit der jeweiligen geologischen, hydraulischen, aber auch anthropogenen Randbedingungen (Untergrundinfrastruktur & -nutzung) müssen jeweils standortspezifische Abklärungen vorgenommen werden.

Ein wichtiges Ergebnis der Machbarkeitsstudie ist auch, dass das Potential der thermischen Nutzung von Tunnelinfrastrukturen im aktuellen kantonalen Teilrichtplan Energie für den Kanton Basel-Stadt Berücksichtigung fand und, dass schon für den sich in der Planung befindenden «Rheintunnel» Aspekte der thermischen Beeinflussung und Nutzung abgeklärt werden. Auch die im Rahmen von ThePoTun durchgeführten Messungen der Tunnelinnenlufttemperatur des Autobahntunnels «Nordtangente» dienen gegenwärtig als Referenz für eine Abschätzung der thermischen Beeinflussung des Grundwasserfliessregimes durch die geplante Autobahn «Rheintunnel». Dies zeigt auch nochmals die Bedeutung entsprechender Datengrundlagen und Kenntnisse der thermischen Beeinflussung von



Untergrundstrukturen. Vor allem auch vor dem Hintergrund, dass in der Schweiz Infrastrukturbauten vermehrt im Untergrund realisiert werden, welche das Grundwasser sowohl quantitativ (Grundwasserdurchfluss) als auch qualitativ (Grundwassertemperaturen) beeinträchtigen.

Als Fazit lässt sich folgern, dass vor allem der Wärmeentzug aus dem Grundwasser mittels TAS oder auch über Dükersysteme, für den Standort Basel als positiv zu bewerten ist. Zum einen liegen die erzielten Wärmeleistungen in der Grössenordnung des Wärmebedarfs von Stadtquartieren und/oder Einkaufszentren, zum anderen könnten urbane Grundwasserressourcen abgekühlt werden. Der Einsatz von TAS und ein Wärmeentzug der Tunnelinnenluft würde es ermöglichen die durch den Bahnbetrieb eingebrachte Wärme zu kompensieren und damit zur Tunnelklimatisierung beizutragen. Überschusswärme aus den Sommermonaten könnte für die saisonale Wärmespeicherung im Untergrund genutzt werden.

Summary

Within the framework of the feasibility study "Thermal potential of urban tunnel infrastructure in unconsolidated aquifers - ThePoTun" funded by the SFOE, concepts for a coordinated efficient **thermal use of tunnel structures in the urban area of Basel (project focus A)** and different **strategies for seasonal heat storage in bedrock (project focus B)** were evaluated by the Applied and Environmental Geology Research Group (AUG) of the University of Basel.

Within the scope of **project focus A**, the thermal exchange of tunnel infrastructures with the subsurface (solid rock and groundwater) on the one hand and with the tunnel interior air (waste heat from vehicles) on the other hand were considered. Exemplarily, different Geothermal Energy Systems (GES) could be investigated and the thermal potential could be estimated for planned construction projects in Basel, including the suburban railroad tunnel "Herzstück" (cantons BS/BL, SBB) and the highway construction "Rheintunnel" (ASTRA). In the context of **project focus B**, concepts for tunnel and groundwater cooling could be discussed in addition to seasonal heat storage in solid rock by different GES.

The results for **project focus A** and the planned urban **railway tunnel «Herzstück»** show that the thermal activation of Tunnel Absorber Systems (TAS) is most efficient in those sections where the tunnel structure runs in the groundwater-saturated unconsolidated rock. Thus, in winter, an energy quantity of 5.2 and 1.9 GWh per year, respectively, with a heat output of up to 1.9 and 0.7 MW, respectively, could be extracted from the groundwater and converted to a usable temperature level by means of a heat pump (available heat). The heat drives only partly from the tunnel interior air, but mainly from the unconsolidated bedrock aquifer. In summer, the comparatively cooler groundwater could be used for cooling. In this case, the waste heat from a cooling system would be transferred to the groundwater. Two tunnel sections, 736 and 284 m long, are suitable for the planned urban rail tunnel. They allow 3.7 and 1.4 MW of waste heat capacity or 5.8 and 2.1 GWh per year of waste heat energy to be dissipated. For the urban area of Basel, this would involve a legally impermissible heat input into the unconsolidated bedrock aquifer. For other sites, this restriction does not necessarily apply, and water protection aspects would have to be surveyed accordingly.

The consideration of the cooling potential (heat input into the groundwater), considering the current requirements of groundwater protection, shows that summer operation for cooling purposes is not legally possible. Thus today, for the urban area of Basel, only the operation of TAS for heat extraction is possible. Since heat extraction from groundwater is also steadily increasing in Basel, a legal change could increase flexibility and potential development. Heat extraction for heating purposes would result in cooling of the subsurface and the tunnel interior air. Since groundwater temperatures in Basel are already



critically high because of numerous anthropogenic heat inputs, a cooling of groundwater temperatures is desirable.

Since tunnel constructions lead to further undesired heat inputs, the development of concepts for urban rail tunnels for heat extraction for heating purposes and the associated tunnel and groundwater cooling was followed in the further course of the project. Also, in the light of climate change, the operation of TAS in the railway tunnel would represent a possible adaptation strategy to counteract the temperature warming of urban groundwater resources. In summary, with the installation of TAS approximately 85 to 212 W m⁻² of heat could be extracted, which originates from the subsurface and groundwater. The urban heated groundwater around the tunnel structure could thus be cooled by up to 4 K for the investigated operating scenario. It could also be shown that, depending on the season, 46 to 101 W m⁻² of heat could be extracted from the tunnel interior air via the tunnel wall and the TAS. This heat exchange is many times higher than the heat input of the railway operation itself, which is estimated to be in the order of 2.2 to 2.6 W m⁻².

For the **highway «Rheintunnel»** and the thermal use of water circulating in culvert systems (drainage water), heat extraction from groundwater proved to be advantageous only for sections in which the highway tunnel runs perpendicular to the regional groundwater flow and comparatively high groundwater temperatures exist. Under these conditions, along a 320 m long tunnel section, heat capacities for heating purposes (e.g. hot water) of up to 0.4 in summer and 0.8 MW in winter and heat energies of 1.1 in summer and 2.1 GWh in winter could be extracted (heat extraction from drainage water). The seasonal differences result from the groundwater temperatures at the study site. Because of the phase shift of temperature signals, particularly in urban areas, groundwater temperatures are often higher in winter than in summer.

In the framework of **project focus B**, different strategies for seasonal heat storage in bedrock were investigated, including (1) Borehole Heat Exchangers (BHE) and (2) Energy Piles (EP). For the city of Basel, the calculated heat exchange of BHE with the subsurface ranges between 21 and 36 W m⁻¹. For the first time, the performed simulations could show that for the geological site conditions in the subsurface of Basel, BHE work most efficiently for heating purposes down to a depth of about 155 m. This is because of contrasts in the geology and different thermal properties of the lithologies in the subsurface of Basel. The calculated heat exchange of EP with the subsurface ranges between 28 and 47 W m⁻¹. Again, the simulations performed show for the first time that for the geological site conditions in the subsurface of Basel, EP heat pumps function most efficiently down to about 30 m depth. For both GES, the efficiency in summer operation is very low and should only be considered to use the heat dissipated by the TAS for thermal regeneration of the underlying rock formations and thus to slightly increase the efficiency of the respective GES in winter operation.

The thermal potential of groundwater depends mainly on the groundwater flow velocity, the groundwater thickness, the properties of the subsurface (hydraulic conductivity, thermal conductivity and capacity, porosity) and the legal framework (e.g. maximum allowed temperature influence in groundwater). The mentioned hydrogeological data are available for several urban Swiss unconsolidated aquifers. This allowed a first estimation, respectively comparison, for the realization of TAS in different cities. The assessment indicates that TAS could be interesting for the city of Winterthur and in different sections of the main valleys of the canton Basel-Landschaft. Depending on the respective geological, hydraulic, but also anthropogenic boundary conditions (subsurface infrastructure & use), site-specific clarifications must be made in each case.

An important result of the feasibility study is also that the potential of thermal utilization of tunnel infrastructures was considered in the current subdirective plan for energy for the canton of Basel-Stadt and



that aspects of thermal influence and utilization are already being clarified for the «Rheintunnel», which is currently being planned. The measurements of the tunnel internal air temperature of the freeway tunnel «Nordtangente», which were carried out within the framework of ThePoTun, also currently serve as a reference for an estimation of the thermal influence of the groundwater flow regime by the planned Highway «Rheintunnel». This shows again the importance of corresponding data bases and knowledge of the thermal influence of underground structures. Especially against the background of the fact that in Switzerland infrastructure constructions are increasingly realized in the subsurface, which affect the groundwater both quantitatively (groundwater flow) and qualitatively (groundwater temperatures).

In summary, it can be concluded that heat extraction from groundwater by means of TAS or culvert systems has positive effects on groundwater resources, especially for the city of Basel. On the one hand, the heat capacities achieved are in the order of magnitude of the heat demand of city quarters and/or shopping centers, and on the other hand, urban groundwater resources could be cooled down. The use of TAS and a heat extraction of the tunnel interior air would make it possible to compensate the heat brought in by the railroad operation and thus contribute to the tunnel air conditioning. Excess heat from the summer months could be used for seasonal underground heat storage.

Résumé

Dans le cadre de l'étude de faisabilité «Potentiel thermique d'infrastructure de tunnel urbain dans des aquifères en roche meuble – ThePoTun» financé par l'OFEN, le groupe de recherche en géologie appliqué et de l'environnement (AUG) de l'Université de Bâle a évalué des concepts pour une **utilisation thermique efficace des tunnels en zone urbaine de Bâle (axe de recherche A)** ainsi que différentes **stratégies pour le stockage saisonnier de chaleur dans la roche consolidée (axe de recherche B)**.

L'**axe de recherche A** considère l'échange thermique des infrastructures de tunnel avec, d'une part, le sous-sol (roche et eau souterraine) et, d'autre part, l'air à l'intérieur des tunnels (chaleur dissipée par les véhicules). À titre d'exemple, divers systèmes énergétiques géothermiques ont déjà pu être étudiés avec leur potentiel thermique dans le cadre de projets de construction prévus à Bâle, tels que le tunnel du RER "Herzstück" (cantons BS/BL, CFF) et l'ouvrage autoroutier "Rheintunnel" (OFROU). Concernant l'**axe de recherche B**, des concepts de refroidissement des tunnels et des eaux souterraines pourraient être pris en compte à côté des concepts de stockage saisonnier de la chaleur dans la roche consolidée via des systèmes énergétiques géothermiques.

Les résultats obtenus pour l'**axe de recherche A** et le projet de **tunnel ferroviaire "Herzstück"** en milieu urbain montrent que la stimulation thermique des systèmes d'absorption en tunnel (SAT) est plus efficace pour les tronçons du tunnel traversant la roche meuble saturée en eau souterraine. Ainsi, en hiver, une quantité d'énergie de respectivement 5,2 et 1,9 GWh par an, avec une puissance thermique pouvant atteindre respectivement 1,9 et 0,7 MW, pourrait être extraite des eaux souterraines et convertie au moyen d'une pompe à chaleur (chaleur utile) à un niveau de température utilisable. La chaleur provient essentiellement de l'aquifère en roche meuble et que très partiellement de l'air à l'intérieur du tunnel. En été, les eaux souterraines, qui sont comparativement plus froides, pourraient être utilisées pour le refroidissement. La chaleur dissipée par le système de refroidissement serait alors transférée aux eaux souterraines. Dans le cas du projet de tunnel RER, deux tronçons de 736 et 284 m de long conviendraient particulièrement bien à cet usage. Cela permettrait de dissiper la chaleur résiduelle avec une puissance de 3,7 et 1,4 MW ce qui équivaut à 5,8 et à 2,1 GWh par an d'énergie thermique résiduelle dissipée. Dans la zone urbaine de Bâle, cet apport de chaleur dans l'aquifère en roche meuble



ne satisferait pas aux exigences légales. Cependant, d'autres sites ne sont pas forcément concernés par cette restriction légale. Les aspects de protection des eaux souterraines doivent donc être étudiés au cas par cas.

L'évaluation du potentiel de refroidissement (apport de chaleur dans les eaux souterraines) montre qu'une exploitation estivale des systèmes de refroidissement n'est légalement pas possible compte tenu des législations actuelles en matière de protection des eaux souterraines. Ainsi, seuls les SAT avec extraction de chaleur sont actuellement envisageables dans la zone urbaine de Bâle. Comme l'extraction de chaleur des eaux souterraines ne cesse d'augmenter à Bâle, une modification de la législation pourrait apporter une flexibilité accrue ainsi qu'une valorisation du potentiel énergétique. L'extraction de chaleur à des fins de chauffage entraînerait un refroidissement du sous-sol et de l'air à l'intérieur des tunnels. La température élevée des eaux souterraines atteint déjà un niveau critique à Bâle en raison des divers apports de chaleur anthropiques. Un abaissement de cette température est donc souhaitable.

Étant donné que les tunnels provoquent des apports de chaleur indésirables, le projet s'est concentré sur le développement de concepts permettant d'extraire la chaleur du tunnel du RER à des fins de chauffage, c'est-à-dire des concepts de refroidissement du tunnel et donc des eaux souterraines. Compte tenu du changement climatique, la mise en place de SAT dans le tunnel du RER représenterait une stratégie d'adaptation permettant de faire face au réchauffement des eaux souterraines en milieu urbain. En somme, l'installation des SAT permettrait d'extraire du sous-sol environ 85 à 212 W m⁻² de chaleur provenant des eaux souterraines. Les eaux souterraines, qui ont subi en milieu urbain une augmentation de leur température, pourraient être ainsi refroidies de 4 K aux alentours du tunnel selon le scénario d'exploitation étudié. Il a également été démontré que, selon la saison, 46 à 101 W m⁻² de chaleur pourraient être extraits de l'air à l'intérieur du tunnel via la paroi du tunnel et le SAT. Cet échange de chaleur est plusieurs fois supérieur à l'apport thermique issu de l'activité ferroviaire qui est estimé entre 2.2 et 2.6 W m⁻².

Pour l'**ouvrage autoroutier "Rheintunnel"** et l'utilisation thermique de l'eau circulant dans les drains de contournement (eaux de drainage), l'extraction de chaleur des eaux souterraines s'est avérée avantageuse uniquement pour les tronçons du tunnel perpendiculaires à l'écoulement régional des eaux souterraines et où la température des eaux souterraines est relativement élevée. Dans ces conditions, il serait possible d'extraire d'un tronçon long de 320 m des puissances thermiques à des fins de chauffage (par ex. eau chaude) allant jusqu'à 0.4 MW en été et 0.8 MW en hiver et des énergies thermiques de 1.1 GWh en été et 2.1 GWh en hiver (extraction de chaleur des eaux de drainage). Les différences saisonnières résultent du déphasage de température des eaux souterraines du site étudié. La température des eaux souterraines est généralement plus élevée en hiver qu'en été, en particulier dans les zones urbaines.

Dans le cadre de l'**axe de recherche B**, différentes stratégies de captage saisonnier de la chaleur dans la roche ont été étudiées, y compris (1) les sondes géothermiques et (2) les pieux énergétiques. Pour le site de Bâle, l'échange de chaleur entre les sondes géothermiques et le sous-sol est estimé entre 21 et 36 W m⁻¹. Les simulations effectuées ont pu nouvellement montrer que les sondes géothermiques à des fins de chauffage fonctionnent le plus efficacement jusqu'à environ 155 m de profondeur pour le sous-sol de Bâle. Cela s'explique par le contraste entre les propriétés thermiques des lithologies du sous-sol. L'échange de chaleur entre les pieux énergétiques et le sous-sol est estimé entre 28 et 47 W m⁻¹. Ici aussi, les simulations effectuées montrent pour la première fois que les pieux énergétiques fonctionnent le plus efficacement jusqu'à une profondeur d'environ 30 m pour le sous-sol de Bâle. En période estivale, l'efficacité des deux types de systèmes d'énergie géothermique (sondes géothermiques et pieux énergétiques) est très faible et leur utilisation ne devrait être envisagée que dans le but de



régénérer thermiquement les formations rocheuses sous-jacentes avec la chaleur dissipée par le SAT. Cette stratégie permettrait d'augmenter légèrement l'efficacité des systèmes d'énergie géothermique en période hivernale.

Le potentiel thermique des eaux souterraines dépend principalement de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines, de l'épaisseur de la nappe, des propriétés du sous-sol (conductivité hydraulique, conductivité, capacité thermique et porosité) et du cadre législatives (par ex. l'influence maximale de la température des eaux souterraines autorisée). Les données hydrogéologiques étant disponibles pour plusieurs aquifères en roche meubles dans des zones urbaines en Suisse, une évaluation préliminaire des SAT dans plusieurs villes suisses a pu être conduite. L'évaluation indique que les SAT pourraient être intéressants à Winterthur et dans différentes parties des vallées principales du canton de Bâle-Campagne. En fonction des conditions géologiques, hydrauliques, mais aussi anthropiques (infrastructure et utilisation du sous-sol), il est conseillé de procéder à des études approfondies spécifiques à chaque site.

Un aboutissement important de l'étude de faisabilité est que le potentiel d'utilisation thermique des tunnels a été pris en compte dans l'actuel plan sectoriel énergétique du canton de Bâle-Ville et que les aspects de l'influence et de l'utilisation thermique ont déjà été clarifiés pour le "Rheintunnel" qui est en cours de planification. Les mesures de température de l'air à l'intérieur du tunnel de l'autoroute "Nordtangente", qui ont été effectuées dans le cadre du projet ThePoTun, servent actuellement de référence pour l'estimation de l'influence thermique sur les eaux souterraines du projet de tunnel autoroutier "Rheintunnel". Cela montre une fois de plus l'importance de posséder des bases de données et des connaissances préalables sur l'influence thermique des ouvrages souterrains. En effet, en Suisse, les constructions d'infrastructures sont de plus en plus souvent réalisées dans le sous-sol, ce qui a un impact sur les eaux souterraines, tant sur le plan quantitatif (écoulement des eaux souterraines) que qualitatif (température des eaux souterraines).

En résumé, on peut conclure que l'extraction de chaleur des eaux souterraines au moyen de systèmes SAT ou de drains de contournement a des effets positifs sur les ressources en eaux souterraines en particulier pour la ville de Bâle. D'une part, les puissances thermiques obtenues sont de l'ordre de grandeur de la demande de chaleur des quartiers urbains et/ou des centres commerciaux et, d'autre part, les eaux souterraines urbaines peuvent être refroidies. L'utilisation de SAT ainsi que l'extraction de chaleur de l'air à l'intérieur du tunnel permettraient de compenser la chaleur dissipée par l'activité ferroviaire et contribuerait ainsi à la climatisation du tunnel. La chaleur excédentaire des mois d'été pourrait être utilisée pour le stockage saisonnier de la chaleur dans le sous-sol.





Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Summary	5
Résumé	7
Inhaltsverzeichnis	11
Glossar	13
1 Einleitung & Ausgangslage	15
1.1 Vorausgegangene Projekte	15
1.2 Projektziel & Organisation ThePoTun	17
1.3 Anwendungsbeispiele in Basel-Stadt	19
1.4 Grundwasserschutz & Klimaerwärmung	21
2 Projektschwerpunkte	23
2.1 Projektschwerpunkt A: Thermische Nutzung von Tunnelinfrastrukturen	23
2.1.1 TAS – Tunnel Absorber System (S-Bahn-Tunnel)	23
2.1.2 Thermische Nutzung aus Dükersystemen (Autobahntunnel).....	25
2.2 Projektschwerpunkt B: Wärmespeicherung im Untergrund	27
3 Modellierungsansätze	29
3.1 Lokale 3D-Wärmetransportmodelle	29
3.1.1 TAS – Tunnel Absorber System (S-Bahntunnel).....	29
3.1.2 Thermische Nutzung in Kombination mit Dükersystemen (Autobahntunnel).....	31
3.1.3 Saisonale Wärmespeicherung	33
3.2 Regionale 3D-Wärmetransportmodelle	38
4 Resultate Projektschwerpunkt A - Thermische Nutzung von Tunnelinfrastrukturen	41
4.1 Lokale 3D-Wärmetransportmodelle	41
4.1.1 TAS – Tunnel Absorbersystem (S-Bahntunnel «Herzstück»)	41
4.1.2 Dükersysteme (Autobahntunnel).....	50
4.1.3 Vergleich der GES-Systeme TAS vs. Düker	51
4.2 Regionaler thermischer Einfluss von Tunnelstrukturen.....	52
4.2.1 Regionale 3D-Wärmetransportmodelle S-Bahntunnel «Herzstück»	52
4.2.2 Feldexperiment «thermischer Einfluss Autobahntunnel»	54
5 Resultate Projektschwerpunkt B - Wärmespeicherung im Untergrund	57
5.1 Wärmespeicherung mittels Erdwärmesonden (EWS)	58
5.2 Wärmespeicherung mittels Energiepfählen (EP)	59
6 Übertragbarkeit	62
7 Rezeptbuch für die thermische Nutzung urbaner Tunnelbauwerke	64
7.1 Evaluation 3D-Tunnelverlauf	64



7.2	Evaluation thermisches Potential	66
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	68
8.1	Thermische Nutzung von Tunnelinfrastrukturen	68
8.2	Wärmespeicherung	69
8.3	Anwendung, Weiterentwicklung & Empfehlungen	69
	Aktivitäten, Synergien & Publikationen	71
	Verdankung.....	73
	Referenzen	74
	Anhang A: Literaturrecherche thermische Nutzung von Tunnelstrukturen	76
	Anhang B: Standorte der Tiefbohrungen Otterbach 2, Leymen 1 sowie Riehen 1 & 2.....	79
	Anhang C: Feldexperiment zur Messung der Tunnelinnenlufttemperatur.....	80
	Anhang D: Konfiguration EWS	83
	Anhang E: Konfiguration EP	84
	Anhang F: Aquifereigenschaften Grundwasservorkommen CH.....	85



Glossar

Düker	Düker werden oft als technische Massnahmen entlang von im Grundwasser verlaufenden Untergrundbauwerken realisiert, um einerseits einen Grundwasseraustausch zu gewährleisten und andererseits Rückstaueffekte und die Entstehung von stagnierenden Grundwasserzonen zu vermeiden. Für eine thermischen Nutzung kann dem in den Dükersystemen zirkulierenden Wasser (Drainagewasser) Wärme entzogen werden, welche an der Oberfläche zum Heizen genutzt werden kann. Das in den Grundwasserleiter wieder eingeleitete Wasser kühlt das Grundwasser (Abb. 9).
EP	Energiepfähle (Abb. 9) funktionieren wie eine EWS. Der einzige Unterschied ist, dass die Rohre in Beton eingegossen sind. Die Leistung ist abhängig von der Anlagengrösse (z.B. Anzahl der Pfähle).
EWS	Mit Erdwärmesonden (Abb. 9), in welchen eine Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert, wird dem Erdreich Wärme entzogen oder zugeführt. Mit Hilfe einer Wärmepumpe (Nutzwärme) kann das Temperaturniveau erhöht werden, um die Wärmegewinnung zur Gebäudeheizung nutzen zu können.
Free cooling	Kühlung z.B. eines Gebäudes ohne nennenswerten Aufwand an Betriebsenergie und somit ohne Einsatz einer Kältemaschine.
GES	Geothermische Energiesysteme: Sammelbegriff für alle geothermischen Anwendungen im Untergrund, einschliesslich zur Energiegewinnung und saisonalen Speicheranwendungen.
Grundwasserregime	Das hydraulische und thermische Grundwasserregime umfasst Grundwasserströmungen, -geschwindigkeiten und -bilanzen, einschliesslich Temperaturverteilungen und Wärmetransport für eine definierte Region in einem zeitlichen Zusammenhang.
GWB	Groundwater Body: Die Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen in urbanen Gebieten setzt eine Definition von bewirtschaftbaren Einheiten des Untergrundes voraus. Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) führte den Begriff des Grundwasserkörpers (GWB) mit einer neuen Definition ein - "ein GWB ist ein abgegrenztes Grundwasservolumen innerhalb eines Grundwasserleiters oder von Grundwasserleitern". Nach der WRRL ist ein GWB eine Bewirtschaftungseinheit für Grundwassers, welche für eine Unterteilung von Grundwasserleitern notwendig ist, damit diese effektiv bewirtschaftet werden können.
GWHP	Groundwater Heat Pumps: Grundwasser Wärmepumpen nutzen das Grundwasser als alternative erneuerbare Energiequelle für die Raumheizung und -kühlung. Mittels eines Förderbrunnens wird dem Grundwasserleiter Wasser entnommen, welches nach einer thermischen Nutzung (Gebäudeheizbetrieb- und allenfalls Free-Cooling) über einen Wärmetauscher und einen Injektionsbrunnen zurück in den Untergrund geleitet wird. In Abhängigkeit der thermischen Nutzung (Heiz- oder Kühlbetrieb) kühlt oder wärmt das in den Grundwasserleiter wieder eingeleitete Wasser.
Kühlbetrieb	Bei der Anwendung des TAS im Kühlbetrieb (v.a. Sommer) wird über das TAS in der Tunnelwand Wärme in den Untergrund eingetragen und im Fall,



dass der Tunnel im Grundwasser verläuft durch dieses abgeführt (Abb. 7). Das im System zirkulierende Fluid wird abgekühlt und kann zur Kühlung von Gebäuden oder auch der Tunnelinnenluft genutzt werden.

SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio (saisonaler Leistungsfaktor): Der SEER beschreibt die Effizienz von Kältemaschinen und ist definiert als das Verhältnis der jährlichen Nutzenergieabgabe (Nutzkälte) zum jährlichen Stromverbrauch einer Kältemaschinen.
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance (saisonaler Leistungsfaktor): Der SCOP beschreibt die Effizienz von Wärmepumpensystemen und ist definiert als das Verhältnis der jährlichen Nutzenergieabgabe (Nutzwärme) zum jährlichen Stromverbrauch einer Wärmepumpe.
SGE	Shallow Geothermal Energy (oberflächennahe Geothermie): In der Schweiz ist die untere oder oberflächennahe Geothermie so definiert, dass sie bis ca. 500 Meter Tiefe reicht.
TAS	Tunnel Absorbersysteme (Abb. 7): In der Tunnelauskleidung und -segmenten integrierte Wärmeaustauschsysteme, welche mittels Zirkulation von unterschiedlich temperierten Wärmeträgerfluiden thermisch aktiviert werden. Verschiedene mögliche Konfigurationen ermöglichen den Wärmeaustausch mit dem Untergrund (Locker- und Festgestein; Aussenkreislauf) oder der Tunnelinnenluft (Innenkreislauf).
Heizbetrieb	Bei der Anwendung des TAS im Heizbetrieb (v.a. Winter) wird über das TAS in der Tunnelwand dem Untergrund (Grundwasser) und / oder der Tunnelinnenluft Wärme entzogen. Das im System zirkulierende Fluid wird aufgewärmt und kann zum Heizen von Gebäuden genutzt werden (Abb. 7) Durch den Wärmeentzug wird sowohl der Untergrund (Grundwasser) als auch die Tunnelinnenluft (Tunnelklimatisierung) aktiv abgekühlt.



1 Einleitung & Ausgangslage

Begrenzter Raum in urbanen Gebieten führt dazu, dass neue Infrastruktur zunehmend im Untergrund realisiert wird, oft unter schwierigen geotechnischen und hydrogeologischen Bedingungen. Unterirdische Bauwerke können zu erheblichen Veränderungen des hydraulischen und thermischen Grundwasserfließregimes führen. Die Realisation neuer Untergrundstrukturen kann aber auch als Chance genutzt werden um notwendige Anpassungsstrategien, sei es wegen lokaler, anthropogener Eingriffe oder aber auch der zu erwartenden Klimaänderungen, gezielt anzugehen.

Im Zusammenhang mit Fragen in der Debatte über Klimawandel und der Energiewende sowie zum Erreichen formulierter Entwicklungsziele, wie z.B. der «2000W Gesellschaft», werden gegenwärtig in vielen urbanen Gebieten Lösungen für eine nachhaltige Untergrundplanung, einschliesslich des Wärmemanagements von Untergrundressourcen, gesucht. Die vom BFE finanzierte Machbarkeitsstudie «Thermisches Potential urbaner Tunnelinfrastruktur in Lockergesteinsgrundwasservorkommen – The-PoTun» nimmt Bezug auf die Raum- und Energierichtplanung und umfasst die Evaluation koordinierter effizienter thermischer Nutzung von Tunnelbauwerken zur Nutzung erneuerbarer Wärmeenergie.

Untergrundressourcen werden zunehmend für die Erzeugung von geothermischer Wärme und Kälte genutzt. Insbesondere das Kühlen mit Grundwasser ist energieeffizient und vergleichsweise kostengünstig. Es führt zu einem Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter, welcher durch das Gewässerschutzrecht limitiert ist. Im Falle von Basel, wie in vielen urbanen Gebieten, ist das Grundwasser bereits aufgrund anthropogener Wärmeeinträge zu warm.

Mit der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob eine thermische Nutzung von Tunnelinfrastrukturen mit einem zusätzlichen Energiemanagement eine Variante für eine Wärmeversorgung ohne fossile Energien darstellt. Das Energiemanagement beinhaltet zusätzlich eine Evaluation der Anwendung von Erdwärmesonden und Energiepfählen, in welchen die aus Gewässerschutzgründen kritische Wärmeeinträge im Sommerhalbjahr für die Verwendung im Winter zwischenspeichert werden können.

1.1 Vorausgegangene Projekte

Anhang A umfasst Resultate eine zu Beginn dieser Studie durchgeführten Literaturrecherche für die thermische Nutzung von Tunnelstrukturen, einschliesslich abgeleiteter Erfahrungswerte. Es werden auch vorausgegangene Projekte zur Nutzung von Tunnelinfrastrukturen für die Energieerzeugung zusammengefasst, einschliesslich Machbarkeitsstudien sowie realisierter Projekte.

Vorangegangene Projekte in der Schweiz zur Nutzung von Tunnelinfrastrukturen zur Wärmeversorgung haben ergeben, dass die Weiterentwicklung solcher Technologien aufgrund unattraktiven Gesteinskosten nicht verheissungsvoll sei (Forschungsauftrag FGU 2012/005¹). Diese Projekte konzentrierten sich jedoch weitgehend auf Gebirgstunnel. Die Situation von städtischen Tunnelinfrastrukturen, welche durch Grundwasservorkommen in Lockergesteinsablagerungen verlaufen, unterscheidet sich vor allem auch wegen des zu berücksichtigenden Grundwasserfließregimes, der vielfältigen Interaktionen der verschiedenen Nutzer des urbanen Untergrundes aber auch allein deshalb, dass solche Tunnelbaustrukturen oft über weite Strecken unter überbauten Gebieten verlaufen. In vielen urbanen Regionen müssen bei unterirdischen Bauten Lösungen gefunden werden, die mit den Baustrukturen eingebrachte Wärme sinnvoll zu nutzen, damit die oft ohnehin schon erhöhten Grundwassertemperaturen nicht weiter

¹ Forschungsauftrag Fachgruppe Untertagebau (FGU 2012/005) «Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Pilotversuch».



ansteigen. Gegenwärtig existieren wenige Kenntnisse über thermische Einflüsse und thermische Potentiale im Zusammenhang mit Tunnelinfrastrukturen in urbanen Gebieten auch in Verbindung mit der temporären Energiespeicherung im Untergrund und Auswirkungen auf bestehende, bzw. konzessionierte Nutzungen.

Die bisher durchgeführten Tunnelprojekte, in denen die Tunnelstruktur geothermisch genutzt wurde, sind als Pilotversuche zur Untersuchung der grundsätzlichen Machbarkeit anzusehen. Hervorzuheben ist hierbei der Ausbau eines Teilstückes im Tunnel Jenbach (Österreich) mit Energietübbingen, welche den Bauhof der Gemeinde Jenbach mit der gewonnenen Heizenergie versorgen. Des Weiteren ist die Teststrecke im Tunnel U6-Stadtbahnanschluss Fasanenhof Stuttgart (Deutschland) zu erwähnen, bei der die, über Flächenabsorber in der Tunnelinnenwand gewonnene, Wärme zur Klimatisierung des Betriebsraumes der Haltestelle Europaplatz genutzt wurde. In der Schweiz werden bisher sieben Tunnel geothermisch genutzt. Von den Tunneln Gotthard-Strassentunnel, Furka, Mappo-Morettina, Hauenstein, Lötschberg und Ricken wird das Bergwasser und am Grossen St. Bernhard die Tunnelabwärme genutzt (Anhang A).

Für Tunnelabsorbersystemen (TAS) sind Konzeptstudien bei zwei Tunnelbauwerken in der Schweiz durchgeführt worden: Für die untiefen Neubauten der Zentralbahn Luzern «Allmend- und Hubelmatttunnel» erfolgte zudem eine Abschätzung der Machbarkeit einer möglichen Nutzung für die nahe gelegene Messe Luzern durch ein Flächenkollektorsystem (Anhang A). Für das Tunnelbauprojekt CEVA in Genf wurde für verschiedene Abschnitte die Installation eines Flächenkollektorsystems bezüglich der thermischen Leistung evaluiert (Anhang A). Berücksichtigt sind dabei auch die Variation der Tunnelinnenlufttemperaturen. In keinem der beiden Fälle ist ein TAS technisch umgesetzt worden.

Im Rahmen des Forschungsauftrages FGU 2012/005 «Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Pilotversuch» wurde die Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit von TAS sowie deren Eignung als angewandte Planungsinstrumente untersucht. Der Einfluss des Grundwassers wurde nicht berücksichtigt. Auch wurde bewusst darauf geachtet, dass die Versuchsanlage in einem Querschnitt aufgebaut wurde, der in einer gewissen Entfernung zum Portal liegt, so dass sogenannte Portaleffekte ausgeschlossen werden konnten. Im Rahmen des Projektes wurde die spezifische Normwärmeleistung der TAS an einem typischen saisonalen Heizlastprofil in der Schweiz und einer initialen Fels-, respektive Tunneltemperatur von 14 bis 15 °C (dies liegt im Bereich der Grundwassertemperaturen in urban geprägten Bereichen von Basel) von durchschnittlich 25 W m⁻² abgeleitet, welches einem spezifischen Jahreswärmeentzug von ca. 47 kWh m⁻² a⁻¹ entspricht. Die Autoren folgerten auch, dass jedoch eine wesentlich höhere Entzugsleistung vermutet werden kann, wenn das umgebende Wasser fliesst. Diese Leistungssteigerung sei sehr schwer abzuschätzen und solle vor einer konkreten Anwendung im Rahmen einer Forschungsinstallation messtechnisch bestimmt werden, folgern die Autoren. Eine Schlussfolgerung dieser Studie war es auch, dass in Schweizer Strassen- und Eisenbahntunneln TAS eine Wärmeproduktion von maximal ca. 15 GWh a⁻¹ zulassen würde. Daraus wurde geschlossen, dass das thermische Potential von TAS begrenzt sei und, dass der geothermische Energiebeitrag in der Schweiz lediglich um schätzungsweise 0.6 bis 0.7 % gesteigert werden könnte.

Brandl (2016) fasste folgende Annahmen hinsichtlich der Energiegewinnung aus thermoaktiven Anwendungen für generelle Machbarkeitsstudien zusammen. Dabei liegt die spezifische Entzugsleistung für Energiepfähle bei 40 bis 60 W m⁻¹ (Laufmeter) und jene für flächige Absorber-Systeme in der Grössenordnung von 10 bis 30 W m⁻². Ähnliche Werte wurden für TAS abgeleitet, wobei im Rahmen von einzelnen Studien, z.B. Allmend- und Hubelmatttunnel (Zentralbahn, Luzern, Schweiz) auch spezifische Entzugsleistung von bis zu 150 W m⁻² und bei der U-Bahnlinie in Turin (Italien) bis zu 74 W m⁻² evaluiert wurden. Es sei angemerkt, dass die Erfahrungswerte naturgemäss nur als Grössenordnungen für einen Vergleich zu verstehen sind. In Abhängigkeit der jeweiligen geologischen, hydraulischen, aber auch anthropogenen Randbedingungen (Untergrundinfrastruktur & -nutzung) müssen jeweils standortspezifische Abklärungen vorgenommen werden.



1.2 Projektziel & Organisation ThePoTun

Da der urbane Flächenraum immer knapper wird, werden immer mehr Bauwerke im Untergrund realisiert. So sind gegenwärtig in vielen Städten öffentliche Verkehrsinfrastrukturprojekte im Untergrund in Planung, welche den Wärmehaushalt im Untergrund beeinflussen werden. Diese Planungen können als Ausgangspunkt für die Entwicklung von Strategien für das nachhaltige thermische Management urbaner Untergrundressourcen (Wärme und Grundwasser) herangezogen werden. Solche Strategien sollten dabei auf fundierten wissenschaftlichen Grundlagen für die Planung und Entscheidungsfindung basieren.

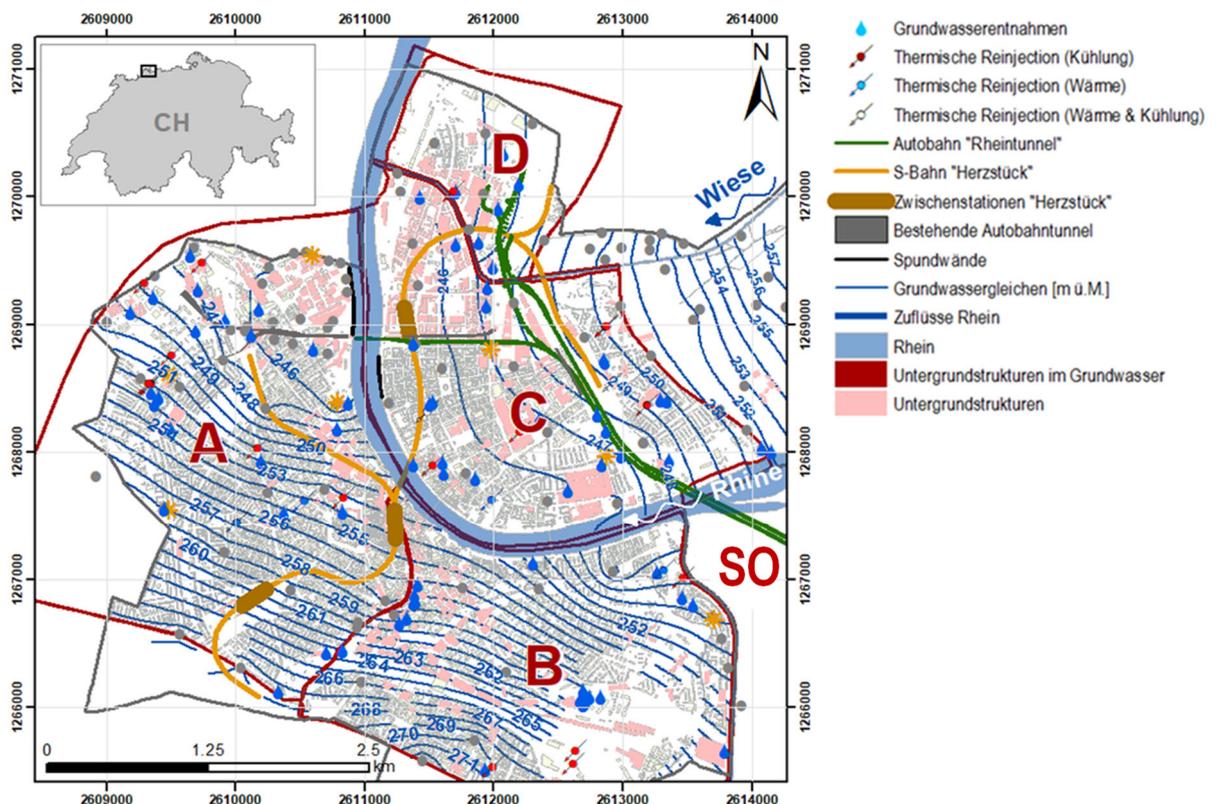


Abb. 1 Grundwasserkörper (A-D) in der urbanen Region Basel-Stadt, einschliesslich Bereiche in Birsfelden (Südosten SO), dargestellt zusammen mit dem Grundwasserfließregime (Mittelwert 2010-2015) Grundwassernutzungen, Untergrundstrukturen sowie den geplanten Tunnelbauwerken.

Abb. 2 fasst die Organisation von ThePoTun zusammen. Projektschwerpunkt A war die Erarbeitung von Grundlagen, welche es erlauben Einflüsse auf das thermische Grundwasserregime und thermische Nutzungspotentiale von geplanten Tunnelbauwerken in der urbanen Region Basel zu untersuchen (Abb. 1). So war, unter anderen auch das Ziel, abzuschätzen welches Potential Tunnelbauwerke für die thermische Nutzung z.B. für Stationsbauwerke oder oberirdische Gebäude bieten. Dabei lag ein besonderes Augenmerk auf den Portalbereichen der Tunnelinfrastrukturen sowie der Zwischenstationen (Abb. 3); hier sind die Wechselwirkung des Bauwerks mit der Atmosphäre, dem Grundwasser und auch der Beeinflussung durch weitere Untergrundnutzungen am stärksten ausgeprägt. Da sich in urbanen Gebieten verschiedene industrielle Nutzungen mit Kühlbedarf befinden, einschliesslich Hotels, Dienstleistungs-



gebäude und Einkaufszentren, fällt im Sommer Überschusswärme an welche meist, wo möglich und erlaubt, an das Grundwasser oder über Rückkühlanlagen an die Aussenluft abgegeben wird. Der Klimawandel wird den Kühlbedarf weiter erhöhen. Um diese überschüssige Wärme im Sommer zu nutzen, wurde in der vorliegenden Studie ThePoTun im Projektschwerpunkt B auch die saisonale Wärmespeicherung mittels Erdsonden und Energiepfählen einbezogen. Die verschiedenen Fragestellungen der Projektschwerpunkte A & B wurden mit verschiedenen Modellierungsansätzen, einschliesslich lokalen und regionalen Wärmetransportmodellen, wie auch durch ein Feldexperiment zur Messung der Tunnelinnenlufttemperatur bearbeitet. Anschliessend, wird die Übertragbarkeit der Resultate zum thermischen Nutzungspotential von Tunnelbauwerke, welche durch Grundwasservorkommen in Lockergesteinsablagerungen verlaufen, für verschiedene Schweizer Städte diskutiert. Auf Grundlage der Ergebnisse aus den Projektschwerpunkten wird abschliessend ein Rezeptbuch, welches ein mögliches Vorgehen bei der Evaluation des thermischen Nutzungspotential von Tunnelbauwerken, vorgestellt.

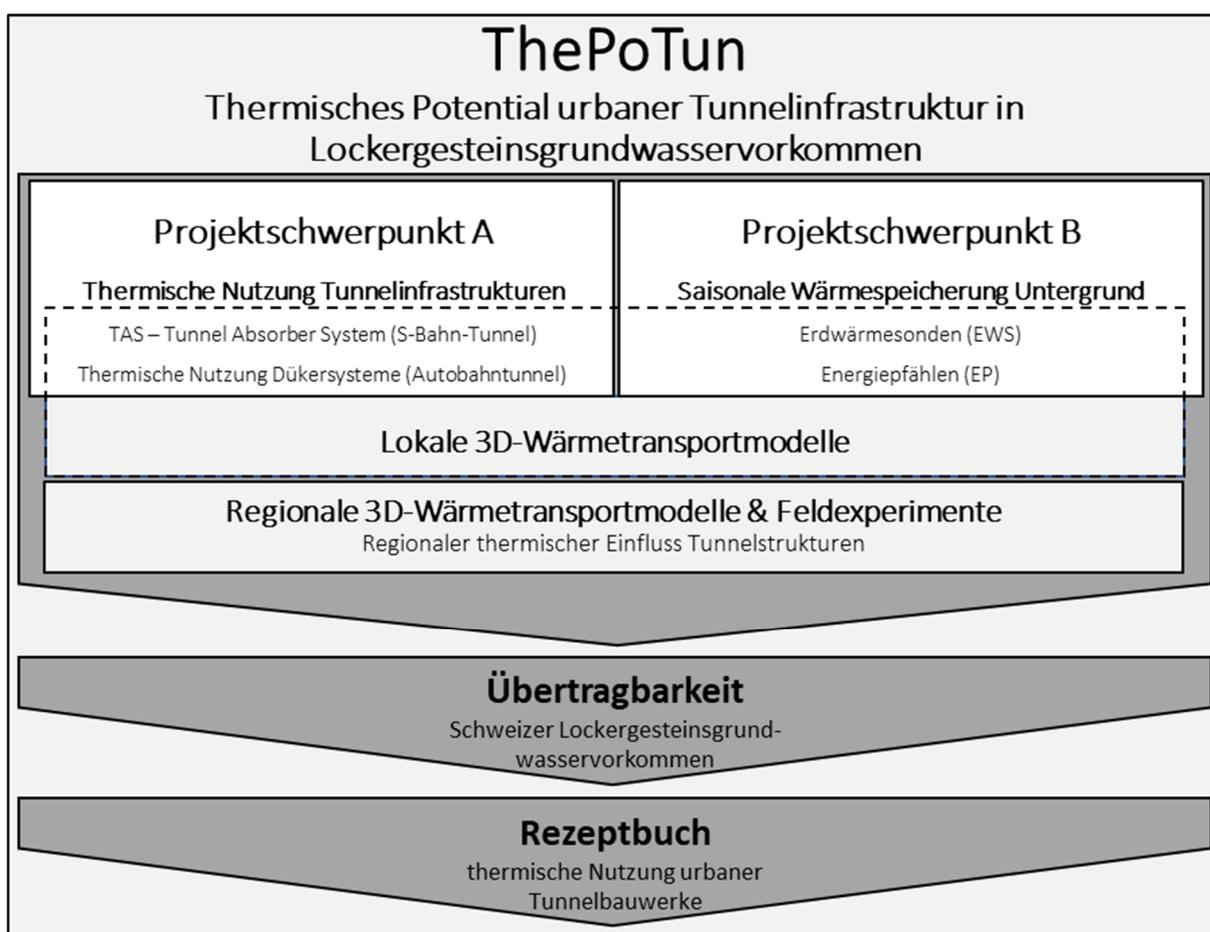


Abb. 2 Organisation ThePoTun

Ein wesentlicher Unterschied von ThePoTun zu allen vorangegangenen Untersuchungen zur thermischen Nutzung von Tunnelbauwerken ist, dass neben dem Fokus der Wärmeproduktion, Einflussfaktoren wie das Grundwasserregime und die vielfältigen Interaktionen (Grundwassernutzungen, Untergrundstrukturen, etc.) im urbanen Raum Berücksichtigung finden. Zudem fehlen bei der aktuellen Entwicklung von Energiegeostrukturen die wissenschaftlichen Grundlagen und Kenntnisse wie die verschiedenen



Systeme mit oberflächennahem Untergrund interagieren und die hydraulischen und thermischen Regime im Untergrund beeinflussen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden Werkzeuge und Grundlagen erarbeitet, welche eine Gesamtsicht der hydrogeologischen und thermischen Veränderungen im Untergrund ermöglichen und damit für die Projektierung von geplanten Tunnelbauwerken in urbanen Regionen, herangezogen werden können.

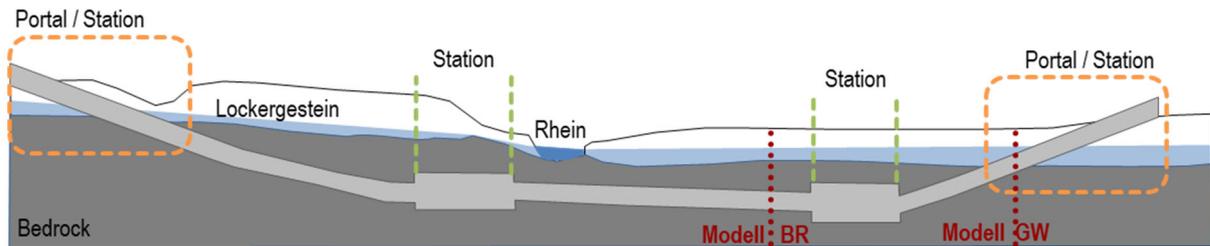


Abb. 3 Schematisches Längsprofil entlang des S-Bahn Tunnelprojektes «Herzstück» zwischen dem Bahnhof SBB (links) und dem Badischen Bahnhof (rechts; verändert nach Epting et al. (2020a)).

1.3 Anwendungsbeispiele in Basel-Stadt

In Basel werden gegenwärtig zwei Tunnelbauprojekte geplant. Die geplante S-Bahn («Herzstück») ist ein 5'960 m langes Tunnelbauwerk, welches drei Bahnhöfe miteinander verbinden soll und sich auf beiden Seiten des Rheins befindet (Abb. 1). Der geplante Autobahntunnel («Rheintunnel») umfasst ein 6'445 m langes Tunnelbauwerk, welches von Kleinbasel nach Birsfelden (Kanton Basel-Landschaft) verlaufen und die Kapazität des Autobahnnetzes nach Frankreich und Deutschland erhöhen soll.

Abb. 4 zeigt die Abschnitte des S-Bahn- und des Autobahntunnels, welche teilweise in der Grundwasser-gesättigten und -ungesättigten Zone der Lockergesteinsablagerungen sowie im Festgestein verlaufen. Zudem zeigt Abb. 4 auch das mittlere Temperatur- und Grundwasserregime für die Jahre 2010 bis 2015 (Mueller et al., 2018), welches die generelle Grundwasserflussrichtung zum Vorfluter Rhein und die Temperaturverteilung des Grundwassers im Stadtgebiet von Basel darstellt.

Der geplante S-Bahntunnel «Herzstück» verläuft weitgehend im Festgestein in Tiefen von bis zu 30 m unter Geländeoberfläche (Tab. 1). Teile der nördlichen gelegenen auf- und absteigenden Abschnitte verlaufen senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung. Das Autobahnbauwerk «Rheintunnel» soll sowohl durch Locker- als auch Festgesteine verlaufen (Tab. 1). Während sich die beiden auf- und absteigenden Tunnelabschnitte TA1 & TA3 innerhalb der Grundwasser-gesättigten Lockergesteine befinden und parallel zur regionalen Grundwasserströmung verlaufen, sind die beiden Tunnelabschnitte TA2 & TA4 teilweise senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung ausgerichtet.

Im Rahmen von ThePoTun wurden für den in Basel geplanten S-Bahntunnel («Herzstück») in der Tunnelwand installierte Wärmeabsorbersegmente (Tunnelabsorbersystem, TAS) untersucht. Diese Lösung wurde für die Tunnelportale und Zwischenstationen untersucht und konzentrierte sich auf den Bereich in der Nähe des geplanten Stationsbauwerks «Tiefhaltestelle Klybeck» sowie den Bereich des Tunnelportals beim Badischen Bahnhof (Abb. 3). Die gewählten Standorte bieten zudem technische Vorteile und die Möglichkeit zur direkten Nutzung der Energie, ausreichende Platzverhältnisse für die Installation von Wärmepumpen sowie die über die Stationsbauwerke existierende Verbindung zur Erdoberfläche.

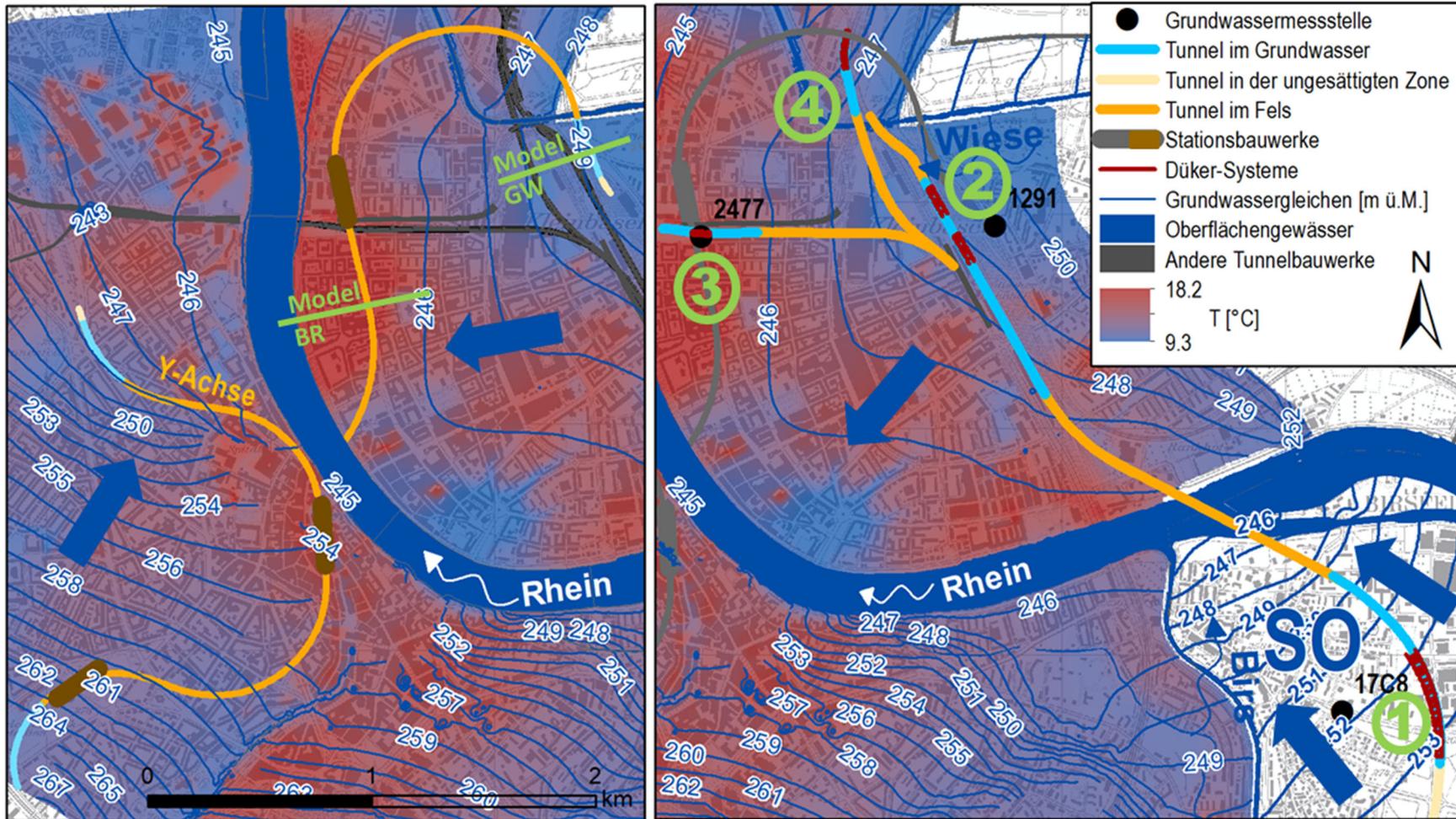


Abb. 4 Links: S-Bahn «Herzstück» (grün: Standorte lokale 3D-Wärmetransportmodelle zur Evaluation der geothermischen Nutzung von TAS). Rechts: Autobahnbauwerk «Rheintunnel» (grün: Tunnelabschnitte TA 1-4 zur Evaluation der geothermischen Nutzung von Dükersystemen). Mittleres simuliertes Temperatur- und Grundwasserregime für die Jahre 2010 bis 2015 (Mueller et al., 2018). Blaue Pfeile zeigen die regionalen Grundwasserströmungsrichtungen; für Standorte im Südosten (SO) existiert kein 3D-Wärmetransportmodell, hier wurden Grundwassergleichen auf Grundlage von Messdaten kantonaler Grundwasserbeobachtungspiezometer interpoliert (GeoView BL).



Für den geplanten Autobahntunnel («Rheintunnel») konzentrierten sich die Untersuchungen auf Tunnelabschnitte, welche in den Grundwasser-gesättigten Lockergesteinen verlaufen. Hier wurde die thermische Nutzung von Wasser, welches in Dükersystemen zirkuliert (Drainagewasser), evaluiert.

Tab. 1 Dimension der geplanten S-Bahn- und Autobahntunnel im Grundwasser (GW) und im Festgestein (FG) in den verschiedenen Grundwasserkörpern (GWB und Bereich im Südosten SO, vgl. Abb. 1) und evaluierte Tunnelabschnitte (TA1-4) des Autobahntunnels.

GWB ⁺	Tunnel	Tunnel Abschnitt (TA)	Grundwasser (GW) Festgestein (FG)	Länge [m]	Kontaktfläche [m ²]
A	Herzstück	-	GW	736	24'378
		-	FG	2'728	89'768
C & D	Herzstück	-	GW	284	8'922
		-	FG	2'215	69'586
	Rheintunnel	TA2	GW	1'080	40'715
		TA3	GW	425	16'022
TA4		GW	320	12'064	
SO⁺⁺	Rheintunnel	-	FG	3'000	113'100
		TA1	GW	1'000	37'700
		-	FG	620	23'370

GWB⁺: GroundWaterBody; SO⁺⁺: Südosten

Abb. 4 zeigt die Standorte, für welche lokale 3D-Wärmetransportmodelle für ausgewählte Tunnelabschnitte entlang der geplanten S-Bahn «Herzstück» entwickelt wurden, sowie Tunnelabschnitte TA1-4 entlang des geplanten Autobahnbauwerks «Rheintunnel», für welche die thermische Nutzung von Wasser, welches in Dükersystemen zirkuliert (Drainagewasser), evaluiert wurde.

1.4 Grundwasserschutz & Klimaerwärmung

Die ThePoTun-Projektbearbeitung umfasste auch die Betrachtung von Aspekten des Grundwasserschutzes und der Klimaerwärmung. Hierfür wurden die relevanten Rahmenbedingungen Grundwasserschutz und Klimaerwärmung im Kontext der thermischen Nutzung der Tunnelinfrastrukturen definiert und bewertet.

In der Schweiz dürfen Änderungen der Grundwassertemperaturen in 100 m Abstrom einer thermischen Nutzung maximal 3 K im Vergleich zu einem natürlichen - anthropogen unbeeinflussten - thermischen Zustand betragen (GSchV, 2001). Im Folgenden werden zudem auch die für Basel-Stadt relevanten Rahmenbedingungen des Grundwasserschutzes zusammengefasst und in den Resultaten im Kontext der thermischen Nutzung der Tunnelinfrastrukturen bewertet. In der Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt (Version: 08.11.2018²) wird festgehalten, dass:

- «Die Ausgangstemperatur für natürliches oder unwesentlich anthropogen beeinflusstes Grundwasser im Kanton Basel-Stadt liegt bei ca. 12 °C. Im Vergleich dazu weisen die kantonalen

²<https://www.aue.bs.ch/wasser/grundwasser/grundwassernutzung.html>



Grundwassermessstellen (82 an der Zahl) eine mittlere Temperatur von ca. 14.8 °C (2017) und einen Schwankungsbereich zwischen 12 und 17.5 °C auf».

- «Bei Nutzungen des Grundwassers zu Heizwecken (Wärmenutzung) wird eine Temperaturspreizung von minus 3 °C gewährt. Im Einzelfall kann in Gebieten mit anthropogen stark erwärmtem Grundwasser auch eine Spreizung von bis zu minus 5 °C gewährt werden, auch wenn damit in 100 m Abstrom die Temperaturen des Grundwassers um mehr als 3 °C verändert werden».

In urbanisierten Gebieten ist der lokale anthropogene Wärmeeintrag in den Untergrund oft höher als die zu erwartende Erwärmung des Untergrundes und des Grundwassers durch die globale Klimaerwärmung (Epting and Huggenberger, 2013). Dennoch wird auch der urbane Untergrund durch den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und die Interaktion mit den Oberflächengewässern beeinflusst werden. Um die Auswirkungen der Klimaerwärmung berücksichtigen zu können, wurden, durch die Klimaerwärmung bedingte, erhöhte Grundwassertemperaturen im Zustrom der Tunnelbauwerke berücksichtigt. Im gekoppelten Grundwasserströmungs-Wärmetransportmodell wurde hierfür die Temperaturrandbedingung im Zustrom der Tunnelbauwerke und der Verlauf der Grundwassertemperaturen um 1, 2, 4 und 6 K erhöht.



2 Projektschwerpunkte

2.1 Projektschwerpunkt A: Thermische Nutzung von Tunnelinfrastrukturen

Im Rahmen von ThePoTun und Projektschwerpunkt A wurden verschiedene thermische Nutzungsoptionen von Tunnelinfrastrukturen untersucht, einschliesslich der Wärmeengewinnung und Kühlung durch thermische Aktivierung der Tunnelwände mittels Tunnel Absorber Systemen (TAS) sowie durch eine thermische Nutzung von Wasser, welches in Dükersystemen zirkuliert (Drainagewasser). Im Folgenden wird die Funktionsweise der verschiedenen Anwendungen erläutert.

Dabei wird für die betrachteten TAS-Anwendungen des S-Bahn-Tunnels der Wärmetransport gesteuert durch die Temperaturdifferenzen zwischen dem im TAS zirkulierenden Fluid und dem Untergrund (Grundwasser) oder der Tunnelinnenluft. Für die betrachtete Anwendung von Dükersystemen wird direkt die Wärme des zirkulierenden Drainagewassers genutzt. Ziel ist zum einem die Wärmebereitstellung für die Gebäudeheizung, eine Klimatisierung erhöhter Tunnelinnenlufttemperaturen (nur S-Bahn) sowie eine Abkühlung erhöhter urbaner Grundwassertemperaturen.

2.1.1 TAS – Tunnel Absorber System (S-Bahn-Tunnel)

TAS sind vergleichbar mit dem in der Gebäudetechnik bekannten thermoaktivierten Bauteilsystem (TABS). Es handelt sich dabei um Wärmetauscher, bei welchen lange Rohrleitungen mäanderförmig und wärmeleitend in Beton eingegossen werden. Abb. 5 zeigt verschiedene mögliche TAS-Konfigurationen, die wahlweise auf den Wärmeaustausch mit dem Untergrund, mit der Tunnelinnenluft oder auch in Kombination optimiert sind. Der Energieaustausch mit dem Untergrund (Locker-, Festgestein und ggf. dem Grundwasser) erfolgt dabei im Aussenkreislauf (blau), jener mit der Tunnelinnenluft im inneren Kreislauf (rot). Das äussere System kann damit auch zur Wärmespeicherung im Untergrund genutzt werden. Das innere System ist für eine Kühlung des Tunnels geeignet, was aufgrund der in urbanen Tunnelbauwerken üblichen Abwärmeeinträge durch die Tunnelnutzung (Fahrzeuge, Personen und Gewerbe im Stationsbereichen etc.) wünschenswert ist.

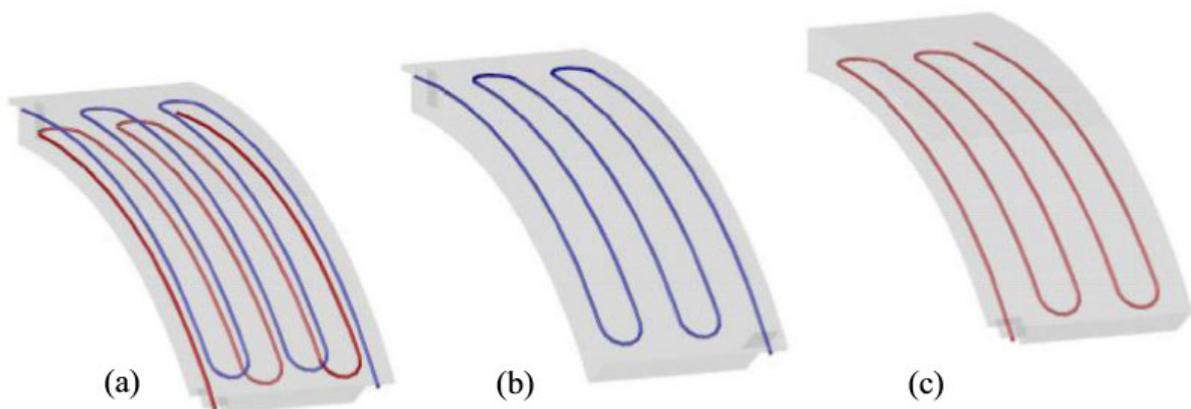


Abb. 5 Unterschiedliche Konfigurationen zur Nutzung des TAS: (a) Tunnelinnen- und -ausserwand, (b) Tunnelausserwand und (c) Tunnelinnenwand (Barla and Di Donna, 2016).



Abb. 6 zeigt die Funktionsweise eines TAS. Gezeigt werden die vorgegebene Eintritts- und die resultierende Austrittstemperatur im Winter und Sommer. Die Temperaturdifferenz zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur definiert das thermische Nutzungspotential.

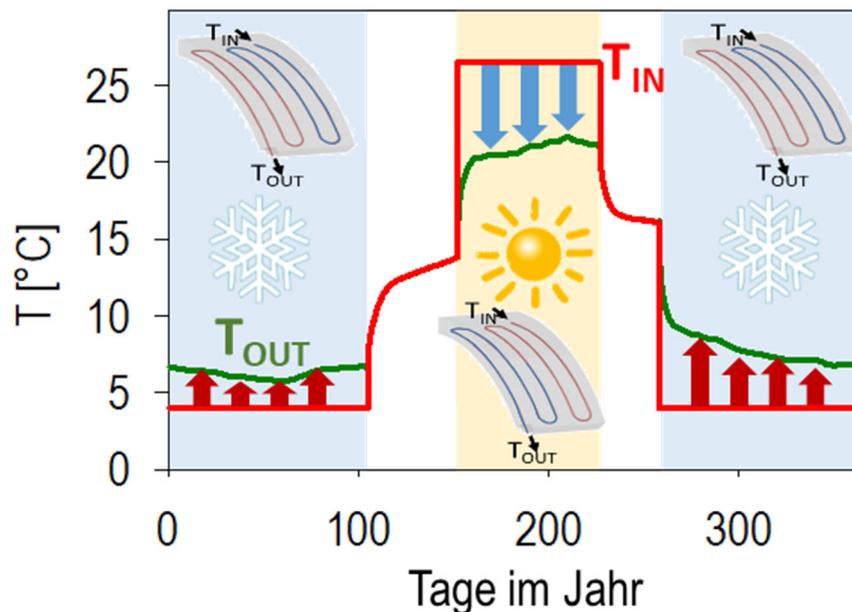


Abb. 6 Funktionsweise des TAS mit vorgegebener Eintritts- (T_{IN} , rot) und resultierender Austrittstemperatur (T_{OUT} , grün) im Winter und Sommer. Die Pfeile illustrieren die Temperaturdifferenz und das thermische Nutzungspotential für eine Wärmepumpe oder Kältemaschine.

Konfigurationen Tunnelaussenwand in Kontakt mit dem Untergrund (Locker- und Festgestein)

Abb. 7 (links) zeigt die Konfigurationen zur Nutzung eines TAS als Wärmeerzeuger zur Gebäudeheizung. Der Wärmeaustausch findet dazu zwischen der äusseren Tunnelwand und dem Untergrund statt, Wärmespeicher im Untergrund umfasst neben Festgesteinen auch das in den Lockergesteinsablagerungen strömende Grundwasser. Das in den TAS zirkulierende, vergleichsweise kalte Fluid entzieht dem Untergrund Erd- und/oder Grundwasserwärme und transportiert diese in der Vorlaufleitung zur Nutzung an die Oberfläche. Über eine Wärmepumpe (Nutzwärme) kann dort die entzogene Wärme auf das notwendige Nutztemperaturniveau erhöht und zur Beheizung von Gebäuden verwendet werden (1). Das durch die Wärmepumpe abgekühlte Fluid wird schliesslich über die Rücklaufleitung wieder zurück zum TAS geführt (2).

Abb. 7 (rechts) zeigt die Anwendung des TAS im Gebäudekühlbetrieb (v.a. Sommer). Über das in den TAS zirkulierende, vergleichsweise warme Fluid wird Überschusswärme von der Oberfläche in den Untergrund übertragen. Das im System zirkulierende Fluid wird somit vom Untergrund abgekühlt und kann wieder zum kühlen von Gebäuden und Prozessen an der Oberfläche genutzt werden (1). Nach der Nutzung als Kälteträger wird das vergleichsweise warme Fluid zurück in den Untergrund geführt. An Stellen, in welchen die Tunnelwand im Grundwasserleiter liegt, wird neben dem Gestein auch das Grundwasser aufgeheizt (2).

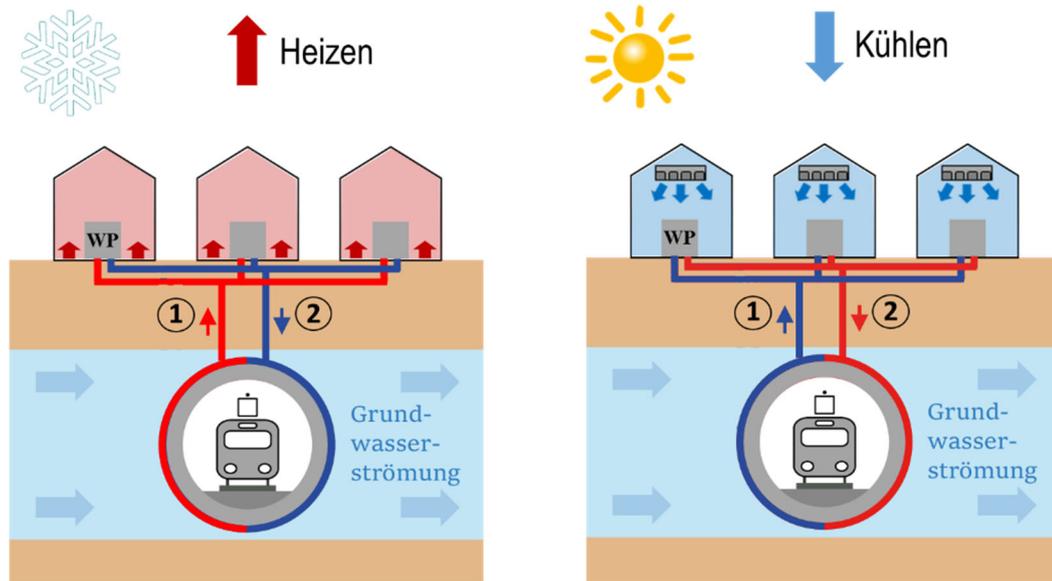


Abb. 7 Funktionsweise der saisonalen thermischen Nutzung des TAS (S-Bahn) in der äusseren Tunnelwand im Kontakt mit dem Untergrund (Grundwasser-gesättigte Lockergesteine) als Wärmeerzeuger zur Gebäudeheizung im Winter (links) und im Gebäudekühlbetrieb im Sommer (rechts).

Konfigurationen Tunnelinnenwand in Kontakt mit der Tunnelinnenluft

Abb. 8 (links) zeigt die Konfigurationen zur Nutzung des TAS in der inneren Tunnelwand, wo der Wärmeaustausch primär mit der strömenden Tunnelinnenluft stattfindet. Im Gebäudeheizbetrieb (v.a. Winter) kann über das in den TAS zirkulierende, vergleichsweise kalte Fluid der Tunnelinnenluft Umweltwärme oder auch Abwärme aus Stationsbauwerken entzogen werden. Das Fluid wird somit aufgeheizt und kann an der Oberfläche über eine Wärmepumpe (Nutzwärme) für Heizzwecke genutzt werden (1). Bei der Rückführung des, durch die Wärmepumpe abgekühlten, Fluids wird die Tunnelinnenluft abgekühlt (2).

Abb. 8 (rechts) zeigt die Anwendung des TAS in der inneren Tunnelwand im Gebäudekühlbetrieb (v.a. Sommer). Über das in den TAS zirkulierende, vergleichsweise warme Fluid wird der Tunnelinnenluft Abwärme zugeführt. Das im System zirkulierende Fluid wird somit abgekühlt und kann als Kälte-träger zum Kühlen an der Oberfläche genutzt werden (1). Bei der Rückführung des, an der Oberfläche aufgewärmten, Fluids zum TAS wird damit die Tunnelinnenluft aufgeheizt. Dieser Betriebsmodus wird hier nur vollständigshalber aufgeführt, da er aufgrund der weiteren Aufheizung der Tunnelinnenluft sicherlich nicht anzustreben ist. Ausnahmen könnten Portalbereiche sein mit dem Ziel, diese im Winter eisfrei zu halten.

2.1.2 Thermische Nutzung aus Dükersystemen (Autobahntunnel)

Abb. 9 zeigt die Funktionsweise von Dükersystemen. Düker werden oft als technische Massnahme entlang von im Grundwasser verlaufenden Untergrundbauwerken realisiert, um einerseits einen Grundwasseraustausch zu gewährleisten und andererseits Rückstau-effekte und die Entstehung von



stagnierenden Grundwasserzonen zu vermeiden. Das durch ein Dükersystemen strömende Wasser (Drainagewasser) kann teilweise oder vollständig zum Wärmeentzug an die Oberfläche gepumpt und danach wieder infiltriert werden (v.a. Winter). Auch hier kommen üblicherweise Wärmepumpensysteme zum Einsatz, die die Grundwasserwärme auf das notwendige Nutztemperaturniveau heben lassen (1). Durch den Wärmeentzug wird dem Grundwasserleiter auf der Tunnelseite im Grundwasserabstrom kühleres Wasser zugeführt (2).

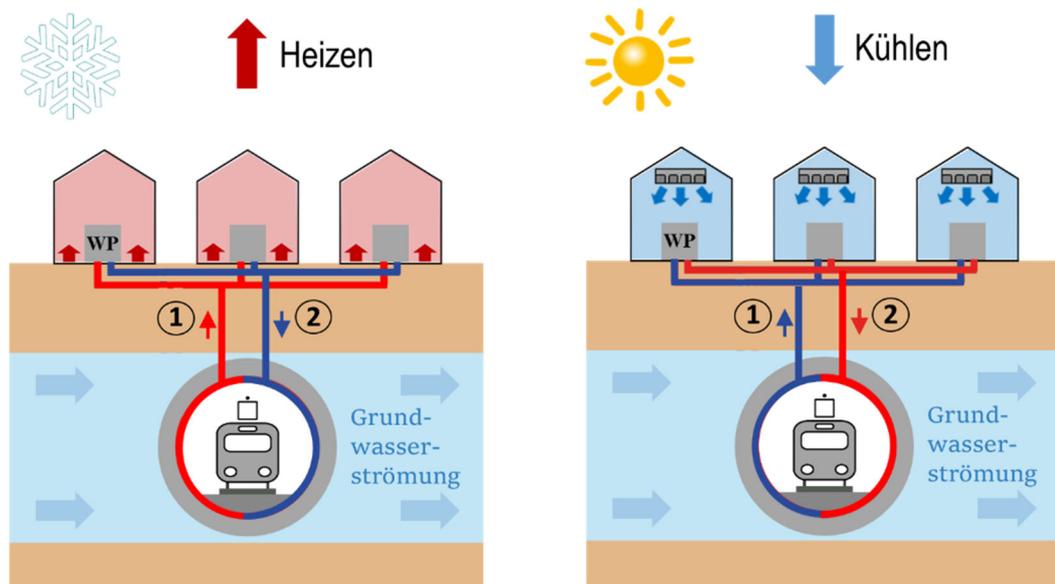


Abb. 8 Funktionsweise der saisonalen thermischen Nutzung des TAS (S-Bahn) in der inneren Tunnelwand als Wärmeerzeuger zur Gebäudeheizung im Winter (links) und im Gebäudekühlbetrieb im Sommer (rechts).

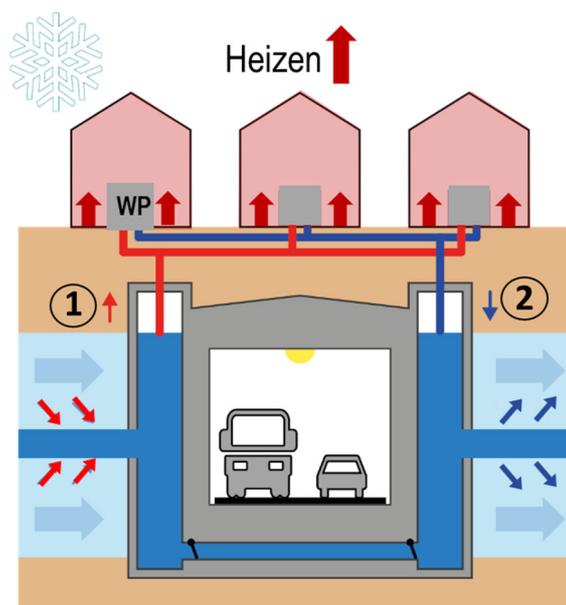


Abb. 9 Funktionsweise der thermischen Nutzung des Grundwassers in Dükersystemen (Autobahn).



2.2 Projektschwerpunkt B: Wärmespeicherung im Untergrund

Im Idealfall kann thermische Energie unter Städten gespeichert werden, so dass das Speicherpotential des urbanen Untergrundes aktiv genutzt wird. Gegenwärtig existieren jedoch nur wenige Untersuchungen, und vor allem auch Energiebewirtschaftungsstrategien, zur Kombination der thermischen Nutzung von urbanen Tunnelinfrastrukturen mit Speicheranwendungen. Da thermisch aktivierte Bauteile vor allem oberflächennah eingesetzt werden, sind nicht zuletzt andere Randbedingungen (jahrzeitlich schwankende Temperaturverteilung im Untergrund, unterirdische Wärmequellen, gegenseitige Beeinflussung von benachbarten Bauteilen etc.) zu beachten. Auch stehen Abwärme aus der Gebäudekühlung und natürliche Wärmeströme von der Oberfläche vor allem im Sommer zur Verfügung. Um diese thermische Energie in den Wintermonaten zum Heizen nutzen zu können, müssen Lösungen gefunden werden, um die Wärmeenergie saisonal zu speichern und zu gegebener Zeit zurückzugewinnen, z.B. mittels thermischen Energiespeichern (Bloemendal and Olsthoorn (2018)).

Im Rahmen des ThePoTun Projektschwerpunktes B veranschaulichen wir verschiedene Strategien zur saisonalen Wärmespeicherung im Festgestein, einschliesslich (1) Erdwärmesonden (EWS) und (2) Energiepfähle (EP). Abb. 10 und Abb. 11 illustrieren für beide Systeme die saisonale Wärmespeicherung im Untergrund in Kombination mit TAS und Dükersystemen. Jede dieser Strategien ist unterschiedlich im Hinblick auf Speicherkapazität, Speichereffizienz, Anforderungen an die lokalen Untergrund- und an die Systemrandbedingungen (z.B. Temperaturniveaus; Schmidt et al. (2018)).

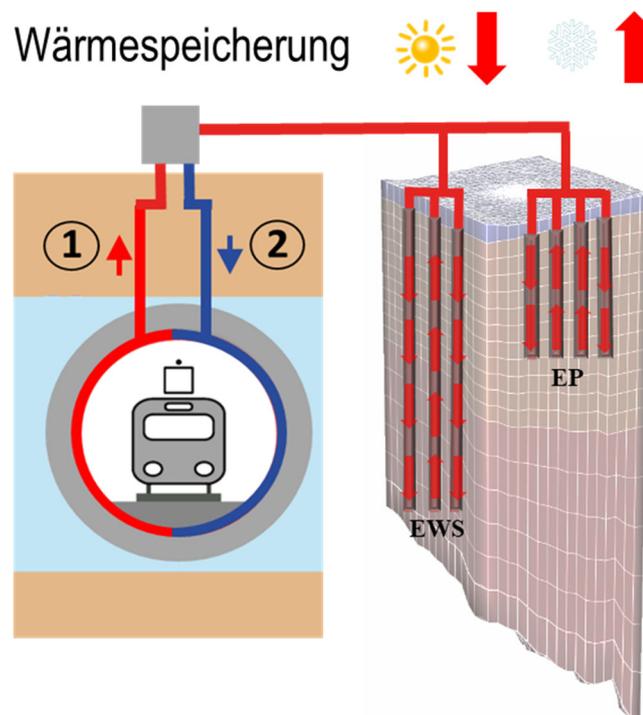


Abb. 10 Funktionsweise der saisonalen Wärmespeicherung mittels EWS und EP (rechts) von Überschusswärme im Sommer und Winter aus TAS (links).

Die Berechnung bzw. Dimensionierung der verschiedenen GES stellt eine komplexe Herausforderung dar, da sowohl die geometrischen Bedingungen des jeweiligen Systems (Bauteilabmessungen,



Rohrführung, Rohranzahl etc.) als auch die Untergrundverhältnisse, einschliesslich Bodenart, Temperatur, Grundwasser sowie deren Interaktion zu berücksichtigen sind. Es existieren eine Vielzahl Rechenmethoden (e.g. EED-Earth Energy Designer oder VDI (2019)) sowohl für EWS als auch für EP, weshalb im Rahmen dieser Untersuchungen nicht näher auf Systemkonfigurationen von EWS und EP (z.B. Länge, Anzahl, ...) eingegangen wurde. Vielmehr wurde für die spezifischen geologisch / hydrogeologischen Randbedingungen von Basel eine erste Bewertung der verschiedenen GES vorgenommen. In diesem Rahmen wurde die Systemauslegung insbesondere auf eine bzgl. Systemtiefe, im Zusammenhang mit der aus dem TAS saisonal zur Verfügung stehenden thermischen Energie, optimiert.

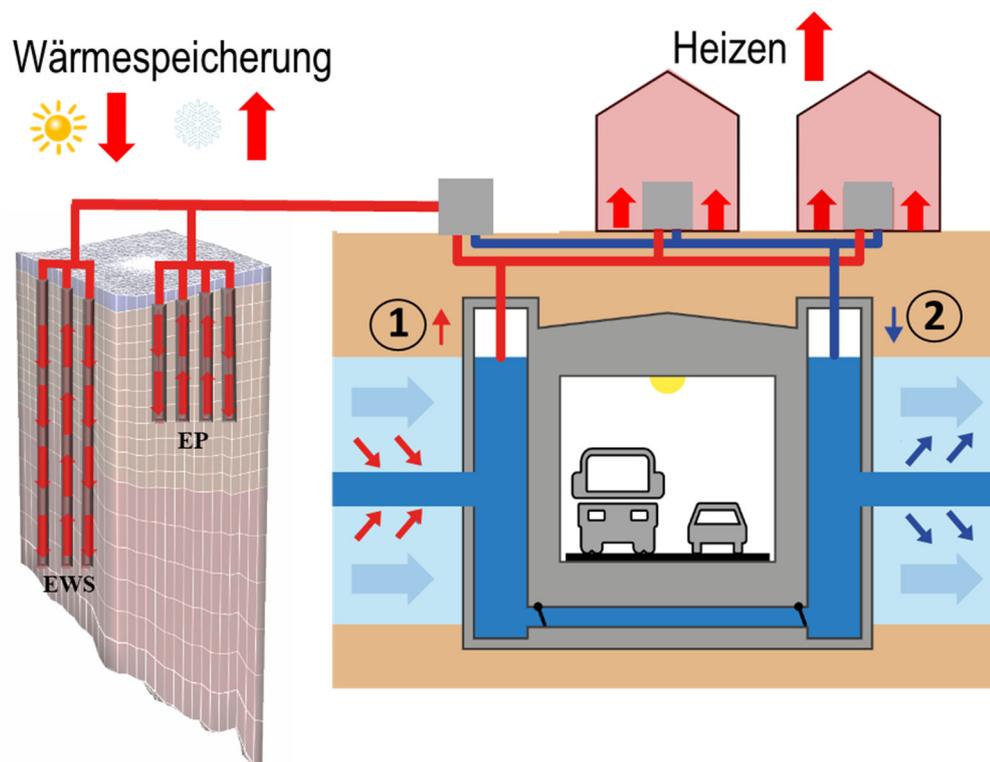


Abb. 11 Funktionsweise der saisonalen Wärmespeicherung mittels EWS und EP (links) von Überschusswärme im Sommer und Winter aus der thermischen Nutzung des Grundwassers in Dükersystemen (rechts).



3 Modellierungsansätze

3.1 Lokale 3D-Wärmetransportmodelle

Für ausgewählte Standorte wurden zur Detailuntersuchung von Wärmetransportprozessen lokale 3D-Wärmetransportmodelle aufgesetzt. Auf Grundlage der im Rahmen des Projektes angepassten regionalen 3D-Wärmetransportmodelle (FEFLOW®, Kapitel 3.2) und der 3D-Integration der Tunnelbauwerke konnten Standorte ermittelt werden, welche für die weitergehenden Untersuchungen mittels lokaler 3D-Wärmetransportmodelle relevant sind (siehe Geometrie des Modells in Abb. 4). Die Dimensionierung der Prozessmodelle, zur adäquaten Parametrisierung der hydraulischen und thermischen Randbedingungen, fand auf Grundlage der Ergebnisse der regionalen 3D-Wärmetransportmodelle statt (Kapitel 3.2).

3.1.1 TAS – Tunnel Absorber System (S-Bahntunnel)

Für den geplanten Doppel-S-Bahntunnel «Herzstück» mit einem Durchmesser von ca. 10 m wurden zwei Abschnitte ausgewählt, die vollständig im Festgestein bzw. in den Grundwasser-gesättigten Lockergesteinen verlaufen und sich zudem in der Nähe des geplanten Stationsbauwerks «Tiefhaltestelle Klybeck» sowie den Bereich des Tunnelportals beim Badischen Bahnhof (Abb. 4 & Abb. 12) befinden. Beide Tunnelabschnitte sind senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung ausgerichtet. In der Nähe der ausgewählten Abschnitte existieren keine Grundwassernutzer, somit sind keine direkten Beeinträchtigung der hydraulischen und thermischen Randbedingungen zu erwarten. Das lokale 3D-Wärmetransportmodell, in welchem sich der geplante Doppel-S-Bahntunnel im Festgestein im Bereich des geplanten Stationsbauwerks «Tiefhaltestelle Klybeck» befindet, verläuft bis zum Rhein und resultiert in einer Profillänge von 892 m (Abb. 4 & Abb. 12). Das lokale 3D-Wärmetransportmodell, in welchem der Doppel-S-Bahntunnel innerhalb der Grundwasser-gesättigten Lockergesteine verläuft, hat eine Profillänge von 540 m (Abb. 4 & Abb. 12).

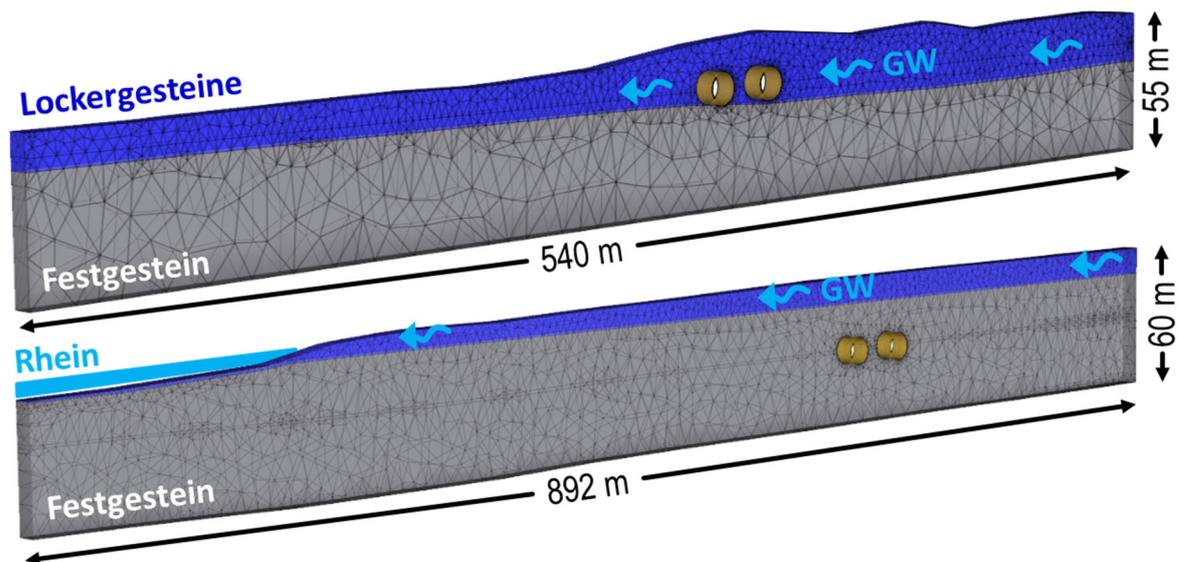


Abb. 12 Geometrie der lokalen 3D-Wärmetransportmodelle mit dem Doppel-S-Bahntunnel «Herzstück» (braune Ringe, oben: im Grundwasser, unten: im Festgestein). Ebenfalls dargestellt ist die regionale Grundwasserströmung innerhalb der Lockergesteine (blaue Pfeile).



In Kooperation mit der Politecnico di Torino (I) konnten technisch und numerisch validierte Tunnelabsorbersysteme (EnerTun[®]) in die hochaufgelösten lokalen 3D-Wärmetransportmodelle der geplanten Tunnelabschnitte im Fels und den Lockergesteinen der S-Bahn implementiert werden. Mit den Prozessmodellen konnte so mittels Szenarienberechnungen die technische Machbarkeit von TAS (Tunnelinnen- und -ausseiwand und deren Kombination, Abb. 5) evaluiert werden.

Tunnelbauwerke in urbanem Gebiet werden häufig durch maschinellen Vortrieb und mittels TBM (Tunnelbohrmaschine) realisiert. Dabei kann die Tunnelauskleidung mit vorgefertigten Segmenten erfolgen in welche TAS direkt in den Giessbeton eingebaut werden. Abb. 5 und Abb. 13 zeigen das patentierte TAS ENERTUN[®] (Barla and Di Donna, 2016), welches bereits bezüglich verschiedener möglicher Konfigurationen zur Optimierung des Wärmeaustauschs mit dem Boden oder der Tunnelinnenluft technisch und numerisch validiert wurde.

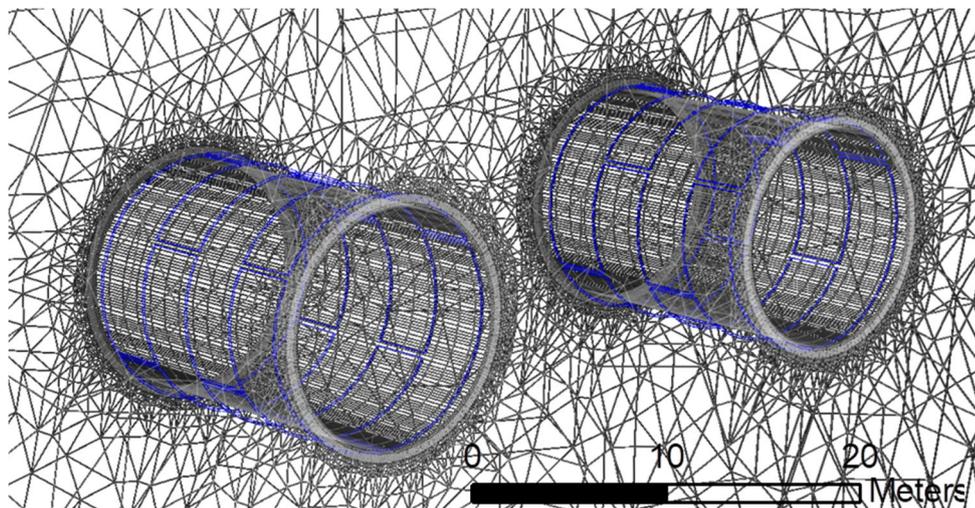


Abb. 13 Implementierung von EnerTun[®] in den lokalen 3D-Wärmetransportmodelle in FEFLOW[®].

Für die thermische Aktivierung der Tunnelabschnitte wurde davon ausgegangen, dass die Anlagen in beiden Tunnelbauwerken jedes Jahr vom 1. Juni bis 15. August (75 Tagen) im Gebäudekühlbetrieb (Eintrittstemperatur 26.5 °C) und vom 15. September bis 15. April (212 Tage) im Gebäudeheizbetrieb (Eintrittstemperatur 4 °C) kontinuierlich betrieben werden (Abb. 7 und Abb. 8). Die ausgetauschte Wärmeleistung Q_i kann dann berechnet werden nach:

$$Q_i [\text{kW}] = C_f [\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}] * q_i [\text{kg s}^{-1}] * \Delta T [\text{K}] \quad \text{Gleichung 1}$$

mit C_f der spezifischen Wärmekapazität des Fluides, q_i dem Durchfluss durch das Kreislaufsystem (vorgegeben mit 0.2 kg s⁻¹) und ΔT der Temperaturdifferenz von Eintritts- und simulierter Austrittstemperatur. Um den Wirkungsgrad des Systems besser vergleichen zu können, kann die spezifische Wärmeleistung E_n [W m⁻²] auf die aktivierte Tunneloberfläche (Tab. 1) normiert werden. Dies ermöglicht es dann direkt die Dimension von notwendigen Installationen abzuschätzen, um vorgegebene Kälte- und Wärmebedarfsanforderungen zu genügen.

Die Modellgeometrien (Oberflächentopografie und Verlauf Felsoberfläche) als auch Daten für die hydraulische und thermische Parametrisierung der Modellrandbedingungen wurden aus den regionalen 3D-Wärmetransportmodellen übernommen. Auch die obere (Atmosphäre) und untere (basaler Wärmestrom) Modellrandbedingungen entsprechen denen der regionalen 3D-Wärmetransportmodelle



(Kapitel 3.2). Thermische Wechselwirkungen mit der Tunnelinnenluft in den Tunnelbauwerken wurden als Cauchy-Randbedingungen (definierte Temperatur und Wärmeübergangskoeffizient) parametrisiert. Darüber hinaus konnte die heterogene Verteilung mit unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften der Lockergesteinsablagerungen aus den invers kalibrierten und validierten regionalen 3D-Wärmetransportmodellen übernommen werden. Beide lokalen Modelle sind 1.4 m mächtig, um einen Ring der TAS ENERTUN[®] einbinden zu können und reichen bis 200 m ü.M. (ca. 55 bzw. 60 m unter Geländeoberkante, Abb. 12).

Simulationen mit den lokalen 3D-Wärmetransportmodellen erlaubten es den jährlichen Temperaturverlauf an der Tunnelausenwand zu berechnen. Diese Temperaturzeitreihen wurden für die Parametrisierung der Tunnelinfrastruktur in den regionalen 3D-Wärmetransportmodellen berücksichtigt (Abb. 14; Kapitel 3.2).

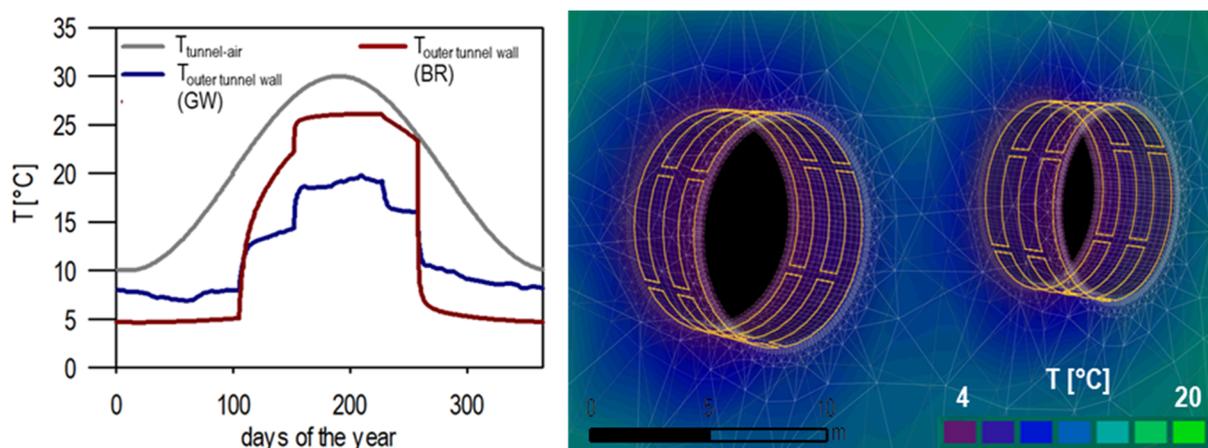


Abb. 14 Links: Analytisch berechnete jährliche Tunnelinnenlufttemperaturen und simulierte Temperaturen im TAS der äusseren Tunnelwand. Rechts: Zoom des lokalen 3D-Wärmetransportmodells für den Tunnelabschnitt im Festgestein und des TAS im Gebäudekühlbetrieb (Diskretisierung ENERTUN[®]-Rohrleitungssystem in der Tunnelverkleidung; modifiziert von Barla et al. (2016)).

3.1.2 Thermische Nutzung in Kombination mit Dükersystemen (Autobahntunnel)

Für Tunnelbauwerke, welche innerhalb von Grundwasser-gesättigten Lockergesteinen verlaufen und bei welchen mit Rückstauwirkungen und der Entwicklung stagnierender Grundwasserzonen zu rechnen ist, verlangt die Schweizerische Gewässerschutzverordnung (GSchV, 2001) technische Massnahmen zur Verbesserung des Grundwasseraustausches. Zu diesen technischen Massnahmen gehört auch der Einbau von Dükersystemen oder ziehbaren Spundwänden und Schieberpfählen (Epting et al., 2008). Für den geplanten Bau des Autobahntunnels wurde letztere Option wegen der negativen Erfahrungen beim Bau des Autobahntunnels «Nordtangente», welcher zwischen 1994 und 2007 in Basel realisiert wurde, ausgeschlossen³.

Für die aktuelle Projektplanung des «Rheintunnels» sind daher zweiseitige horizontale Filter vorgesehen, welche hydraulisch über eine Dükerleitung miteinander verbunden sind (Abb. 15). Die Anzahl der Dükersysteme muss dabei so ausgelegt sein, dass das ursprüngliche Grundwasserfließregime

³ Insgesamt konnten 17 von 100 (17%) Schieberpfählen nicht gezogen werden.



beibehalten werden kann. Die hydraulische Leistung verschiedener Konfigurationen konnte mit einem hochauflösenden 3D-Grundwasserströmungsmodell, welches auch eine differenzierte Integration des Tunnelbauwerkes und der Baugrube ermöglichte, evaluiert werden. Voruntersuchungen für die geplanten Tunnelbauwerke (TA1-4, Abb. 4 und Tab. 1) wurden von TK CONSULT mit der Grundwassermodellsoftware SPRING durchgeführt (König et al., 2012). Die Simulationen konzentrierten sich auf die Anzahl der notwendigen vertikalen Filter und den Abstand zwischen den verschiedenen Dükersystemen, die zur Wiederherstellung des ursprünglichen Grundwasserfließregimes erforderlich sind. Es wurde eine maximal technisch realisierbare Filterrohrlänge von 10 m implementiert und zwei Konfigurationen vertieft untersucht, einschliesslich ein: (A) einschichtiges Dükersystem mit einem Abstand von 10 m; und (B) dreischichtiges Dükersystem mit einem Abstand von 30 m. Beide Systeme ermöglichen eine nahezu vollständige Wiederherstellung des ursprünglichen Grundwasserfließregimes.

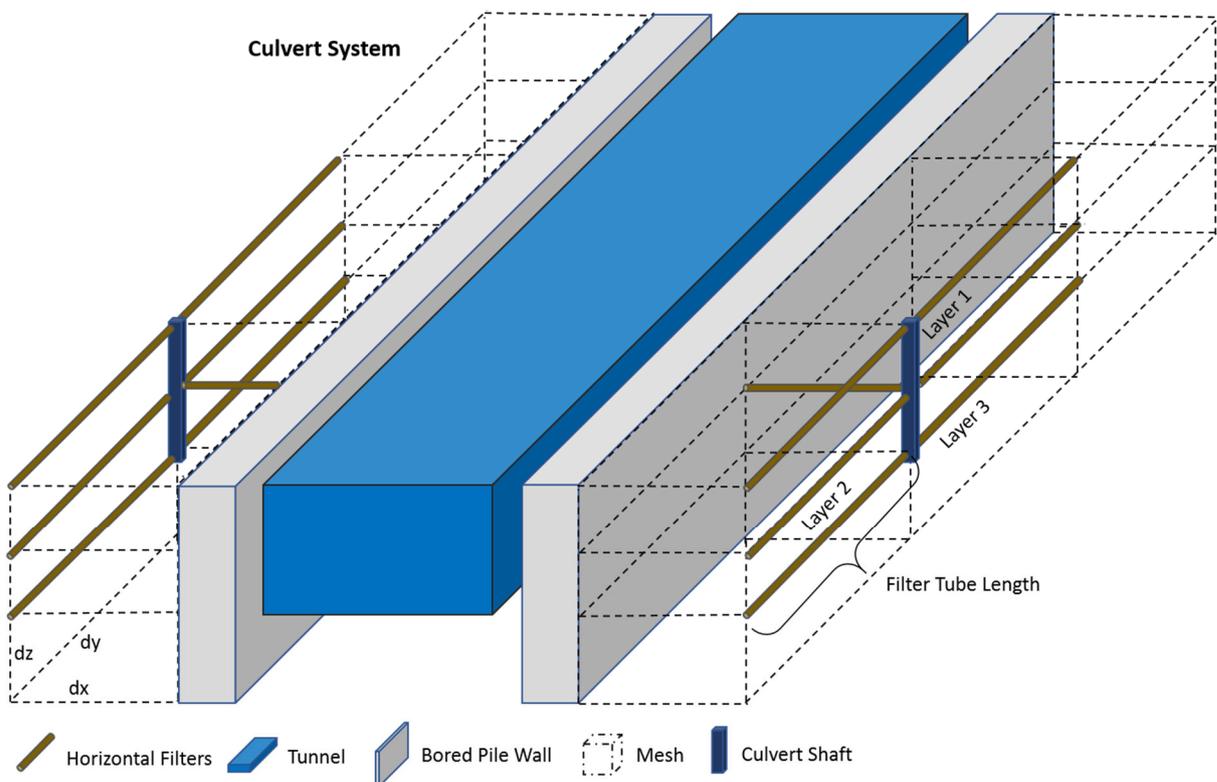


Abb. 15 Numerisches Modell der Tunnelautobahn mit Dükersystem (TK CONSULT).

Anschliessend wurden die Ergebnisse der Durchflussberechnungen (q_i) dazu verwendet das thermische Potential von, durch die Dükersysteme gespeisten Wärmetauschern, zu bewerten. Für die Temperaturspreizungen im Sommer und Winter fand die Information von Grundwassertemperaturmessungen Verwendung (Abb. 4), welche in Bezug zu einer potenziell natürlichen Grundwassertemperatur von 10 °C gesetzt wurde. Die Wärmeentzugsleistung Q_i konnte dann für verschiedene hydrologische Randbedingungen untersucht werden (siehe Gleichung 1).

Der erste Tunnelabschnitt des geplanten «Rheintunnels» (TA1, Abb. 4) befindet sich südöstlich von Basel; hier verläuft der Tunnelabschnitt weitgehend parallel zur regionalen Grundwasserströmung. Die



Temperaturmessungen in einer nahegelegenen Grundwassermessstelle sind mit einem Mittelwert von 12.2 °C und Schwankungen zwischen 12 und 12.6 °C (Zeitraum 2006 bis 2017; Grundwassermessstelle 17C8, Abb. 4) relativ konstant.

Der zweite Tunnelabschnitt des geplanten «Rheintunnels» (TA2, Abb. 4) befindet sich im Grundwasserkörper GWB C (Abb. 1), hier verläuft der Tunnelabschnitt senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung. Temperaturmessungen in einer nahegelegenen Grundwassermessstelle zeigen eine relativ hohe Variabilität zwischen 8.8 bis 15.1 °C, der Mittelwert liegt bei 12.6 °C (Zeitraum 2006 bis 2017; Grundwassermessstelle 1291, Abb. 4). Maximalwerte werden in der Regel in Winter- und Minimalwerte in Sommermonaten gemessen.

Der dritte Tunnelabschnitt des geplanten «Rheintunnels» (TA3, Abb. 4) befindet sich ebenfalls im Grundwasserkörper GWB C (Abb. 1) in der Nähe des Rheins; hier verläuft der Tunnelabschnitt parallel zur regionalen Grundwasserströmung. Die Temperaturmessungen in einer nahegelegenen Grundwassermessstelle sind mit einem hohen Mittelwert von 16.8 °C und Schwankungen zwischen 14.8 und 18.9 °C (Zeitraum 2010 bis 2017; Grundwassermessstelle 2477, Abb. 4) relativ konstant. Maximalwerte werden in der Regel in den frühen Winter- und Minimalwerte in den Sommermonat gemessen.

Der vierte Tunnelabschnitt des geplanten «Rheintunnels» (TA4, Abb. 4) befindet sich im Grundwasserkörper GWB D (Abb. 1), hier verläuft der Tunnelabschnitt schräg zur regionalen Grundwasserströmung. Temperaturmessungen in einer nahegelegenen Grundwassermessstelle zeigen eine relativ hohe Variabilität zwischen 12.6 und 17.8 °C, der Mittelwert liegt bei 15.3 °C (Zeitraum 2006 bis 2017; Grundwassermessstelle 4448, Abb. 4). Maximalwerte werden in der Regel in den frühen Wintermonaten und Minimalwerte in den frühen Sommermonaten gemessen.

3.1.3 Saisonale Wärmespeicherung

Im Rahmen der Untersuchungen von ThePoTun wurden verschiedene Strategien zur saisonalen Wärmespeicherung im Festgestein untersucht, einschliesslich Erdwärmesonden (EWS) und Energiepfähle (EP).

Abb. 16 zeigt den ausgewählten Modellperimeter (1 km²) des lokalen 3D-Wärmetransportmodells für die Simulation der Wärmespeicherung im Festgestein im Bereich des geplanten Stationsbauwerkes im Klybeckareal, Kleinbasel. Die Modellgeometrien sind definiert über die Oberflächentopografie, die Kontaktfläche zwischen dem quartären Lockergesteinen und dem Festgestein, gefolgt von den Meletta-Schichten, welche bis in Tiefen von ca. 90 m ü.M. reichen und Schichten des frühen Känozoikums, welche bis in eine Tiefe von maximal ca. 0 m ü.M. reicht. Die Flächen des Festgesteins wurden aus einem regionalen geologischen Modell der Nordwestschweiz exportiert (Dresmann and Huggenberger, 2011, 2012; Dresmann et al., 2013; GeORG-Projektteam, 2013)

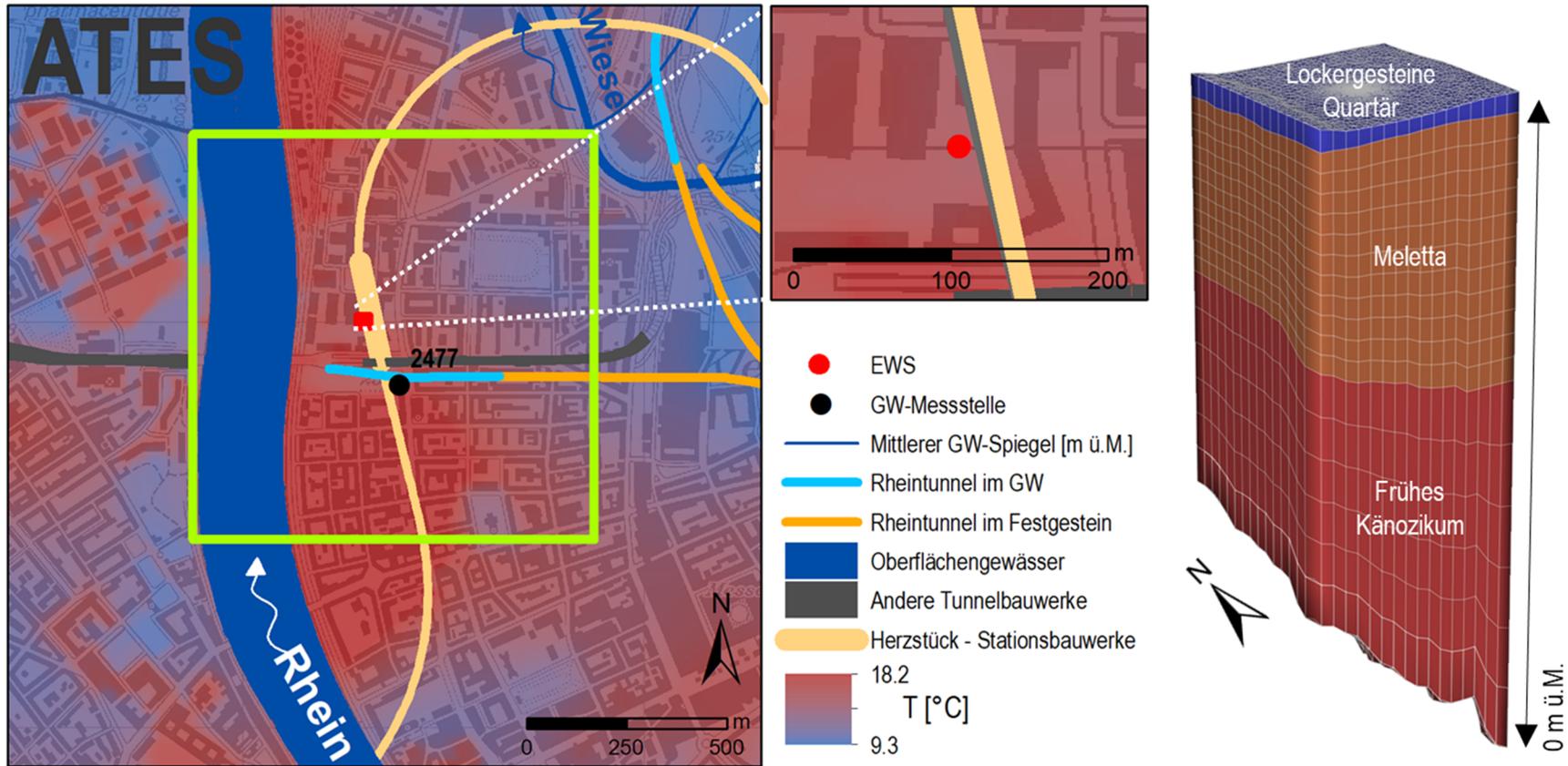


Abb. 16 Links: Abschnitte der geplanten Tunnelbauwerke S-Bahn («Herzstück») und der Autobahn («Rheintunnel») sowie der «Nordtangente»; mittleres simuliertes thermisches Grundwasserregime für die Jahre 2010 bis 2015 sowie Perimeter des lokalen 3D-Wärmetransportmodelle für die Untersuchungen der saisonalen Wärmespeicherung im Bereich des geplanten Stationsbauwerkes im Klybeckareal, Kleinbasel. Mitte oben: Zoom Modellgebiet. Rechts: Geometrien des 3D-Wärmetransportmodells in FEFLOW®, dargestellt sind die quartären Lockergesteine (Modellschicht 1), gefolgt von den Melettaschichten (Modellschichten 2 bis 12) und dem Schichten des frühen Känozoikums (Modellschichten 13 bis 18).



Im Folgenden werden die thermischen Parameter des Untergrundes, die Parametrisierung der Modellrandbedingungen, der Modellaufbau und die Kalibrierung der lokalen 3D-Wärmetransportmodelle (FEFLOW[®]) für die Untersuchungen der saisonalen Wärmespeicherung erläutert.

Parametrisierung und Modellrandbedingungen

Basaler Wärmestrom - Basal Heat Flux

Für den Erdwärmestrom aus tieferen Schichten fanden Messergebnisse der Tiefbohrungen Otterbach 2 (1490; 2'612'431 / 1'269'686) und Leymen 1 (507; 2'602'740 / 1'261'300) Berücksichtigung (Standorte siehe Anhang B). Als Resultat der Messungen in der Otterbachbohrung wurde ein geothermischer Tiefengradient von ca. 3.3 K pro 100 m abgeleitet (Häring, 2002). Zusammen mit der abgeleiteten Wärmeleitfähigkeit für den Blauen Letten / Septarienton von $1.19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und der Gleichung 2 für den spezifischen Wärmestrom:

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta z}, \quad \text{Gleichung 2}$$

mit der Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$] und dem geothermischen Tiefengradient $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ [K m^{-1}], resultiert ein spezifischer Wärmestrom von 0.04 W m^{-2} . Als Resultat der Thermalbohrungen Leymen 1 wurde ein spezifischer Wärmestrom von 0.07 bis 0.075 W m^{-2} abgeleitet. Der Wert der Wärmeleitfähigkeit ist wahrscheinlich wegen der Probenahme in verwitterten Bereichen der Blauen Letten / Septarienton zu tief. Da die Wärmeleitfähigkeit des Felsmaterials wahrscheinlich höher ist, wurde für den Erdwärmestrom im Modell ein Wert von 0.07 W m^{-2} (entspricht ca. $6000 \text{ J m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) berücksichtigt und durch die Modellkalibrierung (siehe unten) bestätigt.

Interaktion Fest-Lockergestein

Für den Wärmestrom am Kontakt der Festgesteine zu den quartären Lockergesteinsablagerungen (Felsoberfläche) wurde auf Berechnungen des regionalen 3D-Wärmetransportmodells von Kleinbasel zurückgegriffen (Kapitel 3.2). Wobei der basale Wärmestrom aus der Tiefe (abgeleitet aus dem geothermischen Tiefengradienten, Epting et al. (2013)) konstant ist, ist der Wärmestrom über die Felsoberfläche aus den quartären Lockergesteinsablagerungen stark instationär. Dies ist auf die starke Instationarität der verschiedenen natürlichen und anthropogenen Randbedingungen zurückzuführen. Der Wärmestrom über die Felsoberfläche für die Jahre 2010 bis 2015 (Abb. 17) konnte als Heat Flux auf Modellschicht 2 des lokalen 3D-Wärmetransportmodells für die Untersuchungen der saisonalen Wärmespeicherung integriert werden.

Der Wärmeaustausch zwischen den quartären Lockergesteinsablagerungen und dem Festgestein liegt in der gleichen Grössenordnung wie der basale Wärmestrom. Dabei ist kein saisonales Muster zu erkennen, es existieren vielmehr Jahre oder Jahresabschnitte in welchen Wärmeenergie vom Fest- in das Lockergestein (z.B. erstes Halbjahr 2012, 2013, 2015) und solche, in welchen Wärmeenergie vom Locker- in das Festgestein übertragen wird (z.B. zweites Halbjahr 2012, Sommer 2014). Über die Jahre gesehen ist der Energieaustausch über die Kontaktfläche der quartären Lockergesteinsablagerungen und dem Festgestein mehr oder weniger ausgeglichen.

Für das Lockergestein selbst wurden aus dem regionalen 3D-Wärmetransportmodell von Kleinbasel die hydraulischen und thermischen Randbedingungen abgegriffen und in das lokale 3D-Wärmetransportmodell integriert.

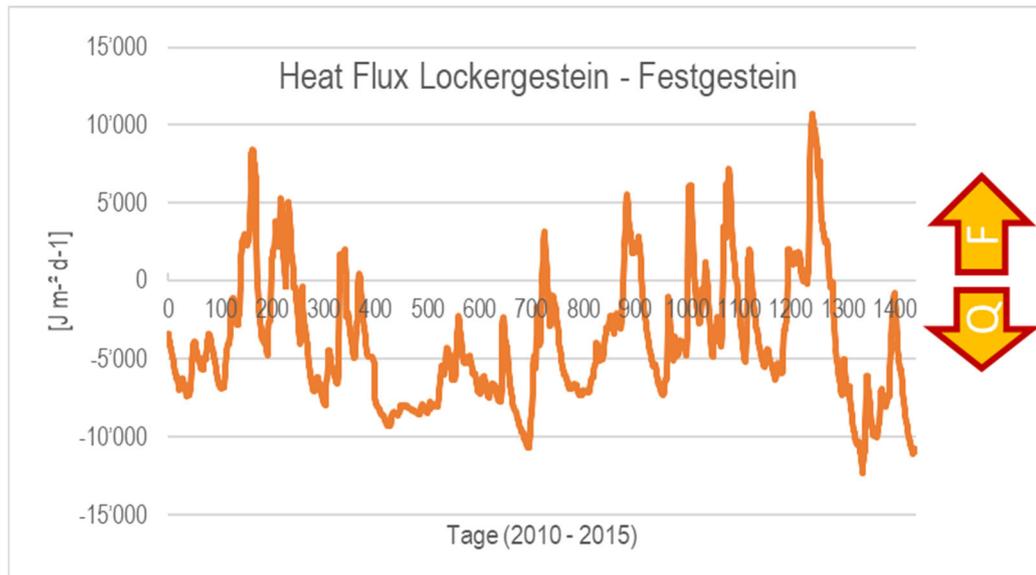


Abb. 17 Mit dem regionalen 3D-Wärmetransportmodell modellierter Energieaustausch (Heat-Flux) zwischen quartären Locker- (Q-Quartär) und Festgestein (F–Fels) für die Jahre 2010 -2015.

Thermische Parameter des Untergrundes und Kalibrierung

Die thermischen Parameter Wärmeleitfähigkeit und -kapazität der quartären Lockergesteinsablagerungen wurden aus dem regionalen 3D-Wärmetransportmodell von Kleinbasel übernommen (Tab. 2). Die thermischen Parameter der Festgesteine wurden kalibriert, wobei Referenzen aus der Literatur als realistische Bandbreiten der thermischen Parameter Berücksichtigung fanden (Tab. 2).

Tab. 2 Literatur- und Referenzwerte für die Wärmeleitfähigkeit und -kapazität der Lockergesteinsablagerungen und Festgesteine (grau hervorgehoben Erfahrungswerte aus Basel).

Referenz	Lithologie	Wärmeleitfähigkeit λ_s [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmekapazität C_s [MJ m ⁻³ K ⁻¹]	Porosität N_{eff} [-]
Markle et al. (2006)	quartäre Lockersteine	3	2.52	0.12
Dresmann et al. (2011) Schärli and Kohl (2002)⁴	Molasse (Rupélien und Sannoisien)	1.5 – 2.0	-	-
Häring (2002)	Meletta Schichten (Blauen Letten / Septarienton)	1.07 – 4.57 (1.19)	-	0.04 - 0.1
VDI (2019)	Sand, wassergesättigt	1.7 – 5 (2.4)	2.2 – 2.9	-
	Ton/Schluff, wassergesättigt	0.9 – 2.3 (1.7)	1.6 – 3.4	-
BFE (2006)	Schlamm-Siltstein*	2.25 – 2.67	2.1 – 2.2	-

*Otterbach 2; **Mittelland Molasse

⁴ http://www.sgpk.ethz.ch/opencms/opencms/publications/pub_contrib_ch/pubcon_30_39/pubcon_36/



Als Grundlage für die Kalibrierung dient das Temperaturtiefenprofil, welches für die Otterbach 2 Bohrung aufgezeichnet wurde (Häring, 2002). Zum Vergleich zeigt Abb. 18 das Temperaturtiefenprofil zusammen mit Temperaturmessungen in den Bohrungen Riehen 1 und 2 (Standorte siehe Anhang B).

Abb. 18 zeigt auch die Ergebnisse der Modellsimulationen vor (Basis) und nach der Kalibrierung der thermischen Parameter. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in Tab. 3 zusammengefasst. Dabei liegen die Werte für die Wärmeleitfähigkeit in den Melettaschichten für den oberen Bereich (Modellschicht 2) bei $1.19 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, was den Messungen der Otterbachbohrung entspricht. Beste Kalibrierresultate konnten für die folgenden Meletta-Modellschichten mit einer erst zunehmenden und dann wieder abnehmenden Wärmeleitfähigkeit erzielt werden. Dabei liegen die abgeleiteten Werte im Bereich der Referenzwerte für die Melettaschichten (Tab. 2). Für die Schichten des frühen Känozoikums konnten beste Resultate wiederum mit der mittleren Wärmeleitfähigkeit, welche aus den Messungen der Otterbachbohrung abgeleitet wurden, erzielt werden.

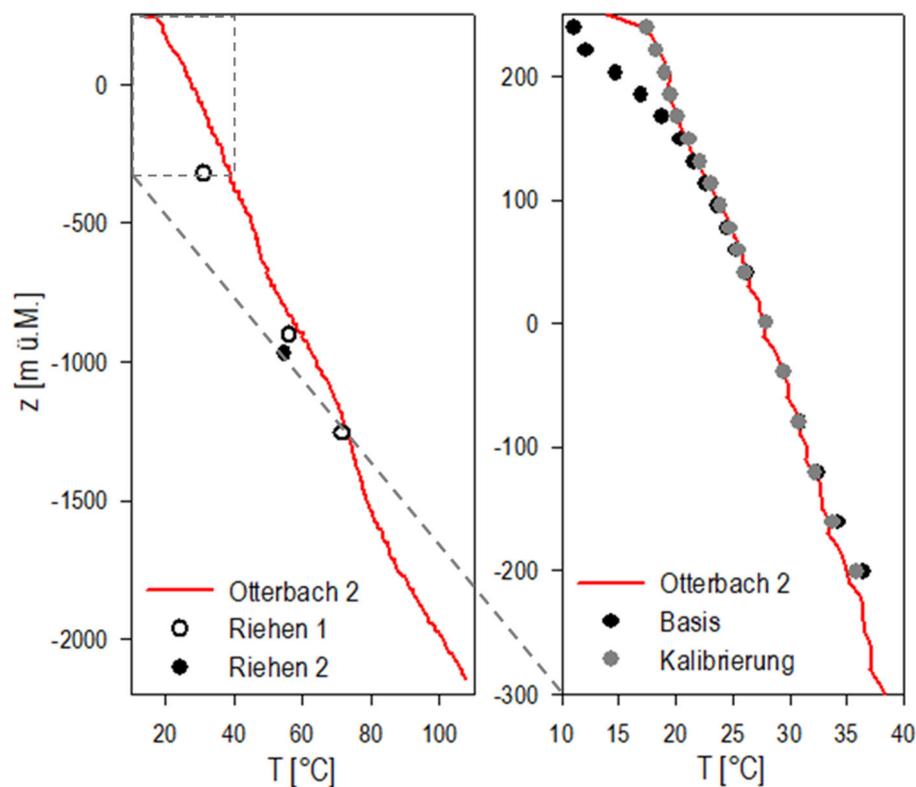


Abb. 18 Links: Temperaturtiefenprofil der Otterbach 2 Bohrung sowie einzelne Temperaturmessungen in den Bohrungen Riehen 1 und 2. Rechts: Ergebnisse der Simulationen vor (Basis) und nach der Kalibrierung der thermischen Parameter in den verschiedenen Modellschichten.

Zudem zeigte sich, dass v.a. die Wärmeleitfähigkeit und, für die oberen Modellschichten 2 bis 4, die Temperaturrandbedingung im quartären Lockergestein die sensibelsten Parameter waren. Untersuchte Bandbreiten der thermischen Kapazitäten und Porositäten der Festgesteine zeigten sich als wenig sensitiv auf die Kalibrierergebnisse. Die sehr guten Resultate der Kalibrierung bestätigen, dass das kalibrierte lokale 3D-Wärmetransportmodell für die Untersuchungen der saisonalen Wärmespeicherung der verschiedenen GES im Festgestein geeignet ist (Abb. 18).



Tab. 3 Kalibrierte Parameterwerte Wärmeleitfähigkeit und -kapazität der Festgesteine in den verschiedenen Modellschichten.

	Meletta				Frühes Känozoikum
Modellschicht	2	3	4 - 5	6 - 12	13 - 18
Wärmeleitfähigkeit λ_s [W m ⁻¹ K ⁻¹]	1.19	3	4	2	1.19
Wärmekapazität C_s [MJ m ⁻³ K ⁻¹]	2.5	1.6			1.6
Porosität N_{eff} [-]	0.05				0.05

3.2 Regionale 3D-Wärmetransportmodelle

Der Aufbau sowie die Kalibrierung und Validierung der numerischen regionalen 3D-Wärmetransportmodelle basiert auf dem BFE-Vorgängerprojekt «Thermische Bewirtschaftungssysteme für den oberflächennahen Untergrund der Region Basel (SI/501044-01)». Die bestehenden 3D-Wärmetransportmodelle (FEFLOW[®]) ermöglichen es neben der Grundwasserströmung auch den advektiven und konduktiven Wärmetransport im Untergrund zu simulieren. Da die 3D-Wärmetransportmodelle im regionalen Massstab kalibriert und mit hochauflösenden Datensätzen über die wichtigsten Zustandsgrößen für Strömungs- und Wärmetransport validiert wurden, sind Unsicherheiten deutlich geringer als bei analytischen Ansätzen aus anderen Verfahren.

Auf Basis der regionalen 3D-Wärmetransportmodelle konnten Standorte für die Realisierung von lokalen 3D-Wärmetransportmodellen für die detaillierte Evaluation von TAS des geplanten S-Bahntunnels «Herzstück» sowie für die Untersuchungen von GES zur Wärmespeicherung definiert werden (Abb. 4; Kapitel 3.1).

Integration 3D-Tunnelstrukturen

Die Arbeiten zur 3D-Integration der Tunnelbauwerke umfassten vor allem die Anpassung der Modellgeometrien. Das ursprüngliche 3D-Wärmetransportmodell wurde mit Schichten der Lockergesteinsablagerungen und des oberflächennahen Felsuntergrundes realisiert. Um das Ab- und Auftauchen der Tunnelbauwerke adäquat zu berücksichtigen, wurde für ThePoTun im Bereich der Bauwerksstrukturen der sogenannte «unstructured mesh-approach» realisiert. Dieser Ansatz ermöglicht eine hohe räumliche Auflösung in der Nähe der Tunnelinfrastrukturen bei gleichzeitiger Optimierung der Rechenleistung durch Reduzierung der notwendigen Anzahl von Netzelementen.

Für die Energiefragestellungen relevante Informationen sind die Lage der Tunnelabschnitte bezüglich Grundwasser-ungesättigter und -gesättigter Zonen sowie der Verlauf der Felsoberfläche (Abb. 4). Abb. 19 zeigt, am Beispiel des Autobahntunnels «Nordtangente»⁵ in Grossbasel, den Verlauf der Nord- und

⁵ Die «Nordtangente» in Basel ist ein Teil der Autobahn 3. Sie verbindet die schweizerische Autobahn 2 mit der französischen A 35. Im Bereich des Tunnelanschlusses «Luzernerring» verläuft die Abfahrt unter der Stammlinie des Autobahntunnels. Hier dringt das Tunnelbauwerk entsprechend tief, bis zur Felsoberfläche, in den Untergrund und beeinflusst das hydraulische und thermische Grundwasserregime.



Südröhre sowie die Tunnelauf- und -abfahrt Luzernerring in der Grundwasser-gesättigten und -unge-sättigten Zone. Der Autobahntunnel «Nordtangente» verläuft über weite Bereiche im Grundwasser und erreicht im Bereich der Tunnelabfahrt Luzernerring sogar die Felsoberfläche. Im Bereich der Tunnelpor-tale verlaufen die Tunnelbauwerke durch die ungesättigte Zone bis zum Erreichen der Erdoberfläche.

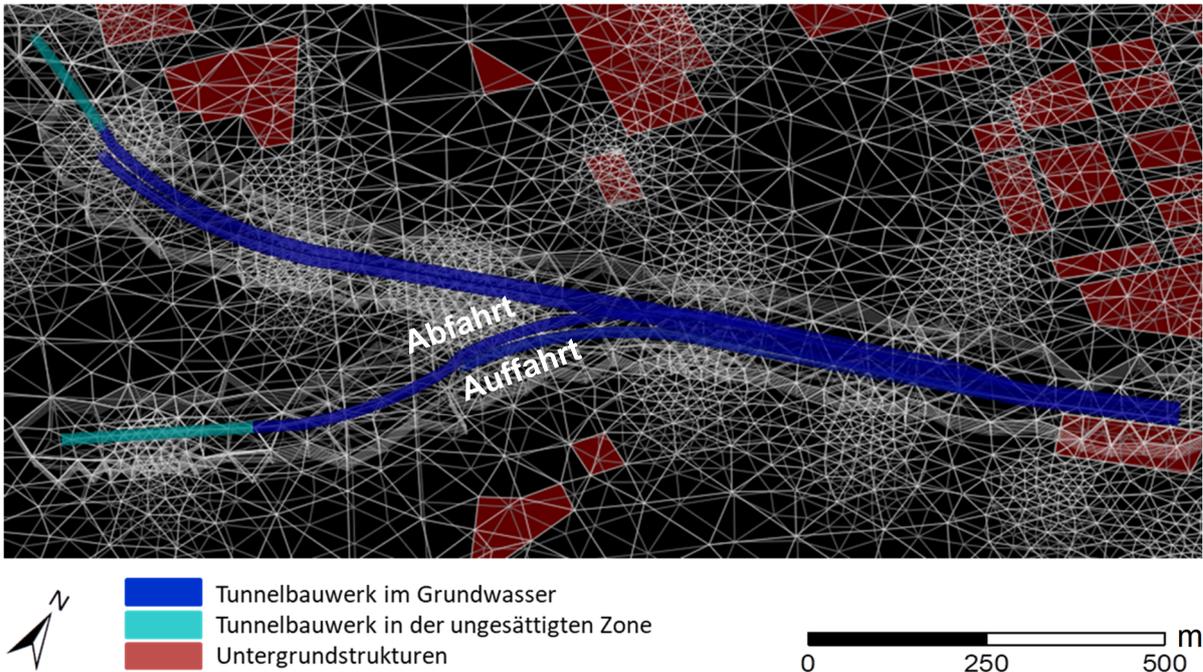


Abb. 19 3D-Integration der Tunnelbauwerke in das Modell Mesh illustriert zusammen mit weiteren Bauwerken im Untergrund am Beispiel des Autobahntunnels «Nordtangente», einschliesslich Tunnelanschluss (Auto-bahnauf- und -abfahrt) «Luzernerring», in Grossbasel.

Parametrisierung und Modellrandbedingungen

Thermischer Einfluss S-Bahn Tunnelbauwerk «Herzstück»

Simulationen mit den lokalen 3D-Wärmetransportmodellen (Kapitel 3.1) erlaubten es den jährlichen Temperaturverlauf an der Tunnelausenwand zu berechnen. Diese Temperaturzeitreihen konnten anschliessend für die Parametrisierung der Tunnelinfrastruktur in den regionalen 3D-Wärmetransportmodellen als transiente Dirichlet-Randbedingung (definierte Temperatur) berücksichtigt werden (Abb. 14).

Mit den regionalen 3D-Wärmetransportmodellen konnten dann Zeitreihen der Grundwasser- und Erdwärmebudgets über die verschiedenen simulierten Tunnelabschnitte direkt extrahiert und entsprechend auf m^2 Tunnelfläche sowie m Tunnellänge normiert werden. Die dargestellten Wärmebudgets verstehen sich ohne Beeinflussung durch Wärmeübertragung aus der Tunnelinnenluft.

Thermischer Einfluss Autobahnbauwerk

Neben der Struktur des Tunnelbauwerkes selbst, ist der wichtigste Parameter für die Wärmetransportmodellierung die Tunnelinnenlufttemperatur, welche von verschiedenen Faktoren abhängig ist, einschliesslich (A) der Aussenlufttemperatur, (B) der Durchströmung des Tunnels, (C) der Länge des Tunnels und der Entfernung zum Tunnelportal, (D) der Wand- bzw. Erdreichtemperaturen sowie (E) inneren



Wärmequellen. Der Einfluss der Aussenlufttemperatur nimmt bei langen Tunneln mit grösser werdendem Abstand zum Tunnelportal ab. So wird die Tunnelinnenlufttemperatur bei kurzen Tunnelbauwerken überwiegend durch die Aussenlufttemperatur beeinflusst.

Zu Projektbeginn existierten keine kontinuierlichen Temperaturmessungen der Tunnelinnenluft. Deshalb wurden in Kooperation mit dem ASTRA (Bundesamt für Strassen) und der NSNW (Nationalstrassen Nordwestschweiz) im September 2018 und über einen Zeitraum von einem Jahr die Temperaturen der Tunnelinnenluft im bereits existierenden Autobahntunnel «Nordtangente» an sechs Standorten gemessen (Tunnelportal sowie verschiedene Tiefen entlang der Tunnelbauwerke auf Gross- und Kleibasler Seite; Anhang C). Die Daten dienen als Grundlage für eine Quantifizierung der Grössenordnung des thermischen Einflusses des Autobahntunnels «Nordtangente» auf den Untergrund und können auch als Referenz für eine Abschätzung des thermischen Einflusses für den geplanten «Rheintunnel» betrachtet werden.



4 Resultate Projektschwerpunkt A - Thermische Nutzung von Tunnelinfrastrukturen

4.1 Lokale 3D-Wärmetransportmodelle

4.1.1 TAS – Tunnel Absorbersystem (S-Bahntunnel «Herzstück»)

Im Folgenden werden die Resultate der TAS-Anwendungen für den geplanten Doppel-S-Bahntunnel «Herzstück» vorgestellt. Die thermische Aktivierung der Tunnelabschnitte wurde für den sommerlichen Gebäudekühlbetrieb mit einer TAS-Eintrittstemperatur von 26.5 °C und im winterlichen Gebäudeheizbetrieb von 4 °C mit einem konstanten Durchfluss von 0.2 l s⁻¹ definiert. Dies kann als Momentaufnahme, jeweils an einem Sommer und einem Wintertag, eines gebäudetechnischen Kühl- bzw. Heizsystems mit kombinierter Tunnelwärme-Kältemaschine/Wärmepumpe verstanden werden (Abb. 20). Verwendete Wertebereiche orientieren sich am patentierten TAS ENERTUN® (Barla and Di Donna, 2016), welches bereits bezüglich verschiedener möglicher Konfigurationen zur Optimierung des Wärmeaustauschs mit dem Boden oder der Tunnelinnenluft technisch und numerisch validiert wurde.

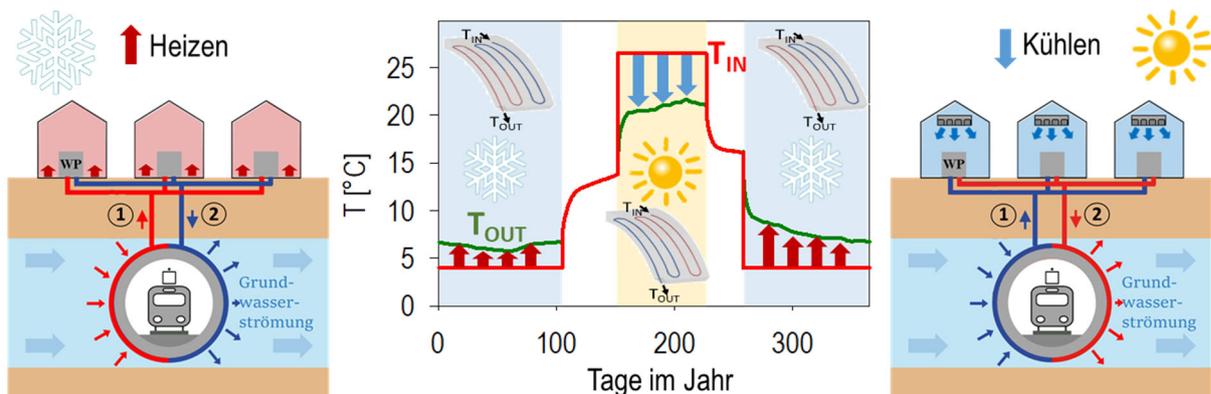


Abb. 20 Saisonale thermische Nutzung des TAS in der äusseren Tunnelwand im Kontakt mit dem Untergrund (Grundwasser-gesättigte Lockergesteine) als Wärmeerzeuger zur Gebäudeheizung im Winter (links) zur im Gebäudekühlung im Sommer (rechts). Mitte: Standard-Funktionsweise des TAS auf Grundlage einer vorgegebenen Eintritts- (T_{IN} , rot) und der resultierenden Austrittstemperatur (T_{OUT} , grün) im Winter und Sommer.

Die TAS-Austrittstemperatur (1) ist somit gleichzeitig die Wärmepumpen-Eintrittstemperatur und die berechnete Wärmeübertragungsleistung der Tunnelwand (Q_i) entspricht Wärmestrom (1) minus Wärmestrom (2). Die Nutzleistungen auf der Gebäudeseite einer Wärmepumpe sind abhängig vom spezifischen Wärmeabgabesystem im Gebäude und werden hier nicht weiter vertieft.

Abb. 21 veranschaulicht die simulierte TAS-Austrittstemperatur aus dem TAS in der äusseren Tunnelwand für die jeweils ober- und unterstromig positionierten Doppel-S-Bahntunnel (Abb. 12). Hervorgehoben sind die durchschnittlich resultierenden Temperaturspreizungen (ΔT), welche für die verschiedenen Betriebszyklen repräsentativ sind (für konservativere Betrachtungen sollten die niedrigsten Temperaturspreizungen verwendet werden). Auf eine zusätzliche Darstellung der Temperaturprofile für die Installation der TAS in der inneren Tunnelwand wurde verzichtet, da die simulierten TAS-Austrittstemperaturen im Allgemeinen wenig sensitiv auf die Veränderung der Lufttemperatur (Abb. 14) reagieren und



damit den gleichen Verlauf aufweisen mit einer etwas geringeren resultierenden Temperaturspreizung (Tab. 4). Abb. 21 zeigt auch ausgewählte simulierte Zeitreihen der Grundwassertemperatur im Grundwasserzu- und -abstrom.

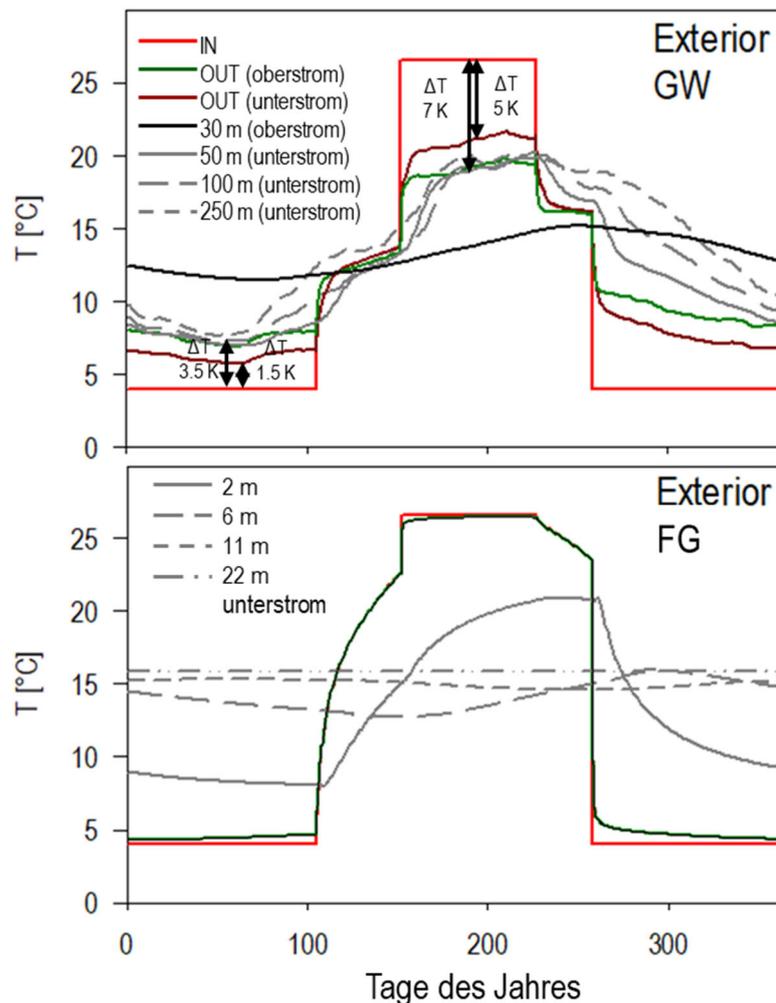


Abb. 21 Resultate der lokalen 3D-Wärmestromtransportmodelle für die Tunnelabschnitte im Grundwasser (oben) sowie im Festgestein (unten) und dem TAS in der äusseren Tunnelwand (Exterior). Jahresverlauf der vorgegebenen Eintritts- (T_{IN} , rot) und simulierten Austrittstemperatur für die ober- (T_{OUT} , grün) und unterstromig (T_{OUT} , dunkelrot) positionierten Tunnelabschnitte bei einem konstanten TAS-Durchfluss von 0.2 l s^{-1} . Auch dargestellt sind simulierte Zeitreihen der Grundwassertemperatur im Grundwasserzu- und -abstrom.

Obwohl die Trends ähnlich sind, wird im Gebäudekühlbetrieb im Sommer eine höhere Temperaturspreizung (ΔT) zwischen TAS-Eintritt und TAS-Austritt erzielt. Darüber hinaus ist die Betriebsdauer im Gebäudeheizbetrieb im Winter länger, was zu einer besseren Leistung im darauffolgenden Sommer im Gebäudekühlbetrieb führt. Der rechteckige Verlauf der Eintritts- und Austrittstemperaturen ist auf die vergleichsweise schnellen Grundwasserfließgeschwindigkeiten zurückzuführen. Der Tunnelabschnitt verläuft hier in den Lockergesteinen parallel zum Fließgewässer Wiese, die mittlere Darcy-



Fliessgeschwindigkeit beträgt 2 m d^{-1} ; unter Berücksichtigung einer Porosität von 0.12 ergeben sich daraus mit 17 m d^{-1} vergleichsweise hohe Grundwasserfliessgeschwindigkeiten. Die simulierten Zeitreihen der Grundwassertemperaturen 100 und 250 m im Abstrom des Tunnels liegen bei über $19.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (Spätsommer) und unter $7.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (Frühjahr). Ebenfalls dargestellt ist der Verlauf der Grundwassertemperaturen im Zustrom des Tunnels, welche im Mittel $13.2 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen.

Abb. 22 zeigt Verteilungen der Grundwassertemperatur im Sommer und Winter, welche mit den lokalen 3D-Wärmetransportmodellen für die thermisch aktivierten ober- und unterstromig positionierten Doppel-S-Bahntunnel «Herzstück» im Festgestein und im Grundwasser simuliert wurden. Für den thermisch aktivierten Tunnel im Grundwasser können unterschiedliche Ausdehnungen der Wärmefahne im Gebäudekühlbetrieb (Sommer) und Gebäudeheizbetrieb (Winter) beobachtet werden. Für den thermisch aktivierten Tunnel im Festgestein kann eine Temperaturkorona um den Tunnel beobachtet werden, die durch den grösseren Temperaturgradienten des aktivierten Tunnels gegenüber dem Untergrund im Gebäudekühlbetrieb (Sommer) stärker ausgeprägt ist. Die Ausdehnung der $15 \text{ }^\circ\text{C}$ -Isotherme ist jedoch im Sommer und Winter ähnlich und erstreckt sich bis zu einem Radius von ca. 25 m um den Doppel-S-Bahntunnel (Abb. 22). Innerhalb der Grundwasser-gesättigten Lockergesteine sind keine thermischen Effekte zu beobachten.

Tab. 4 fasst die Ergebnisse der beiden lokalen 3D-Wärmetransportmodelle zusammen. Die spezifische Wärmeleistungen E_n wurden auf 1 m^2 Tunnelfläche und 10°C Grundwassertemperatur normiert. Die resultierende Temperaturspreizung ΔT für den Tunnelabschnitt innerhalb der Grundwasser-gesättigten Lockergesteine und der Installation des TAS in der äusseren Tunnelwand des S-Bahn-Tunnelbauwerks «Herzstück» beträgt etwa 7 K im Sommer- bzw. 3.5 K im Winterbetrieb. Aufgrund der beobachteten sehr hohen Grundwasserfliessgeschwindigkeiten (siehe oben) resultieren vergleichsweise hohe Wärmeleistungen Q_i mit Werten von 6.7 und 3.4 kW bzw. Energieerträge E_n von 152.9 und 76.5 W m^{-2} . Im Vergleich zur Anwendung in der oberstromig positionierten Tunnelröhre, resultieren für die Tunnelröhre im Grundwasserabstrom, im Vergleich zu jener im Grundwasserzustrom, deutlich geringere Energieerträge (71 % im Sommer- und 43 % im Winterbetrieb). Auch die Installationen der TAS im Inneren der Tunnelauskleidung resultieren in einer weiteren Reduzierung der Energieerträge von 43 bis 67 % in Abhängigkeit der betrachteten Röhre der Doppel-S-Bahntunnel sowie im Gebäudekühl- (Sommer) und Gebäudeheizbetrieb (Winter).

Im Vergleich zum Gebäudeheizbetrieb (Winter) ist die Leistung des TAS des S-Bahntunnels «Herzstück» im Gebäudekühlbetrieb (Sommer) aufgrund der höheren Differenz zwischen Eintritts- und Bodentemperatur grösser. Durch den advektiven Wärmetransport mit der Grundwasserströmung (E_{adv}) ist der Wirkungsgrad des Systems wesentlich höher, wenn sich der Tunnelabschnitt innerhalb der Grundwasser-gesättigten Lockergesteine befindet.

Im Allgemeinen liegen die abgeleiteten Werte im Erfahrungsspektrum anderer Studien (Schlosser et al., 2007; Unterberger et al., 2004), auch unter Berücksichtigung von unterschiedlichen charakteristischen Standortbedingungen der verschiedenen Studien. Brandl (2016) fasste das thermische Potential verschiedener SGE zusammen, welches in der Grössenordnung von 10 bis 30 W m^{-2} für Flächenabsorbersysteme liegt. Für die aktuell weltweit betriebenen 8 TAS wurden Wärmestromdichten zwischen 6 und 170 W m^{-2} dokumentiert (Moormann et al., 2018). Ebenso wurden für die Bewertung des ENERTUN-Prototyps in Turin (Italien) Werte von bis zu 51 W m^{-2} im Heizbetrieb dokumentiert (Barla et al., 2019).

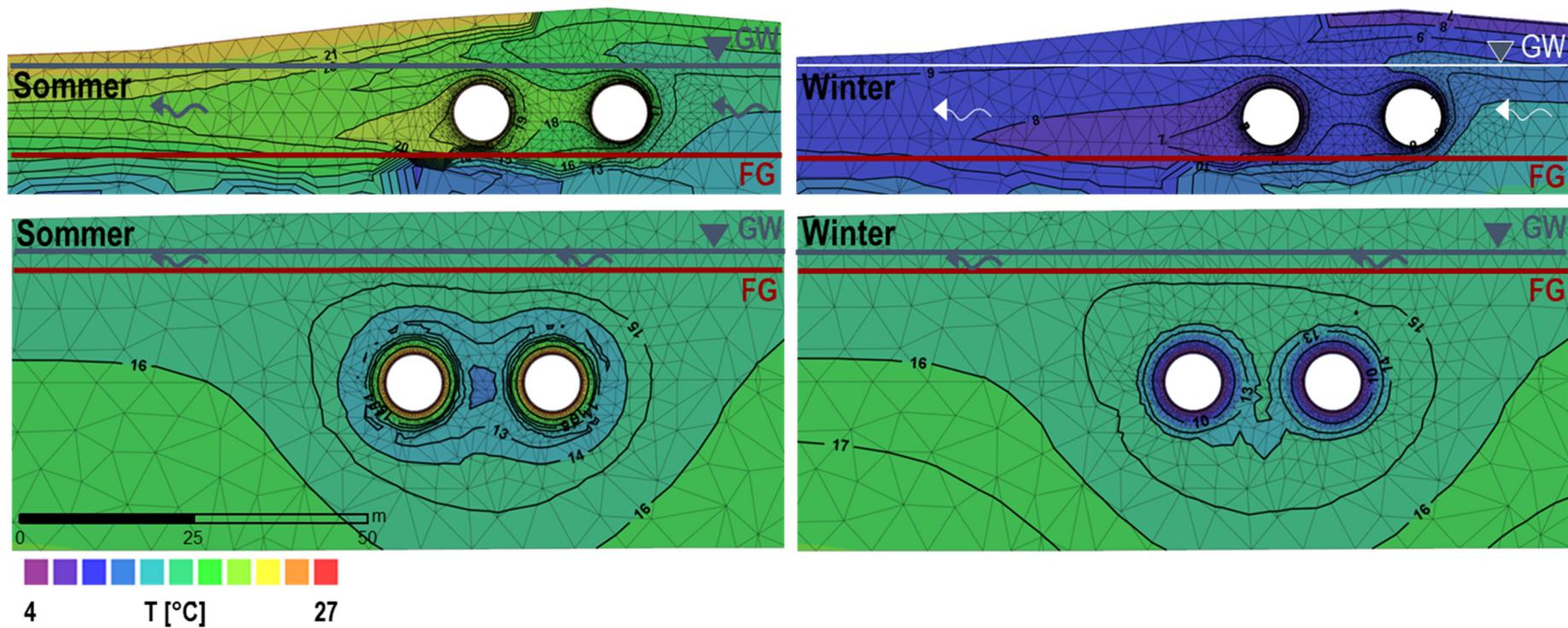


Abb. 22 Temperaturverteilung der lokalen 3D-Wärmetransportmodelle für den thermisch aktivierten Doppel-S-Bahntunnel «Herzstück» im Grundwasser (GW, oben) und im Festgestein (FG, unten) sowie für den Sommer (links) und Winter (rechts). Ebenfalls dargestellt ist der Verlauf der Felsoberfläche (rote Linie) und der simulierte Grundwasserspiegel (blaue Linie).



Tab. 4 Anwendung des TAS im Heiz- und Gebäudekühlbetrieb. Simulierte Temperaturspreizung ΔT (Differenz zwischen Eintritts- und simulierter Austrittstemperatur, welche zustande kommt über die Temperaturänderung entlang des Absorberkreises) sowie berechnete Wärmeleistungen Q_i und spezifische Wärmeleistung E_n (normiert auf Tunneloberfläche und -länge), welche sich aus den Simulationen mit den lokalen 3D-Wärmetransportmodellen und der Anwendung der verschiedenen Installationen der TAS in der Tunnelinnen- und -ausseiwand der Tunnelabschnitte (TA) des S-Bahntunnels «Herzstück» für Sommer und Winter ergeben (negatives Vorzeichen – Wärmeabgabe vom TAS in den Untergrund; positives Vorzeichen - Wärmeeintrag vom Untergrund in das TAS).

Lokale 3D-Wärmetransportmodelle	TAS ENERTUN®	Saison	ΔT [K]	Q_i [kW]	E_n [W m ⁻²]	E_n [W m ⁻¹]
TA im Grundwasser (oberstrom)	TAS _{ausse}	Sommer	-7	-6.7	-152.9	-4621.3
		Winter	3.5	3.4	76.5	2310.6
	TAS _{innen}	Sommer	-4.0	-3.8	-87.4	-2640.7
		Winter	1.5	1.4	32.8	990.3
TA im Grundwasser (unterstrom)	TAS _{ausse}	Sommer	-5.0	-4.8	-109.2	-3300.9
		Winter	1.5	1.4	32.8	990.3
	TAS _{innen}	Sommer	-2.5	-2.4	-54.6	-1650.4
		Winter	1.0	1.0	21.8	660.2
TA im Festgestein (ober- und unterstrom)	TAS _{ausse}	Sommer	0.0	0.0	0.0	0.0
		Winter	0.5	0.5	10.9	330.1
	TAS _{innen}	Sommer	0.0	0.0	0.0	0.0
		Winter	0.5	0.5	10.9	330.1

Rahmenbedingungen Grundwasserschutz

Auf Grundlage der Rahmenbedingungen zum Grundwasserschutz wurden ausgewählte lokale 3D-Wärmetransportmodelle neu berechnet. Unter Berücksichtigung natürlicher oder unwesentlich anthropogen beeinflusster Grundwassertemperaturen im Kanton Basel-Stadt von ca. 12 °C und einer tendenziell gewünschten Abkühlung des Aquifers, sollten Temperaturveränderungen in 100 m Abstrom des thermischen Eingriffs im Bereich zwischen 7 bis 15 °C liegen (grüner Bereich Abb. 23). Die bisherigen Modellierungen zeigten, dass die Erwärmung des Grundwassers im Gebäudekühlbetrieb des TAS (Sommer) in 100 m Abstrom mit 19.7 °C, unter Berücksichtigung der gegenwärtigen gesetzlichen Vorgaben, um 4.7 K zu hoch ist (rot hervorgehoben Abb. 23); die Abkühlung des Grundwassers im Gebäudeheizbetrieb des TAS (Winter) in 100 m Abstrom genügt hingegen den gesetzlichen Vorgaben.

Um den gesetzlichen Vorgaben zu genügen musste deshalb der Sommerbetrieb des TAS des S-Bahntunnels «Herzstück» entsprechend angepasst werden. Da für den betrachteten Standort bereits die, vom Tunnelbauwerk unbeeinflussten Temperaturen des Grundwasserzustroms, zum relevanten Zeitpunkt eine maximale Beeinflussung von 15 °C erreichen, existiert kein thermisches Potential des TAS für den Gebäudekühlbetrieb (Sommer).

Die Ausgangslage wäre anders, wenn ein anderer Referenzwert für die Hintergrundtemperatur des Grundwassers Berücksichtigung fände, wie z.B. der Mittelwert der für Basel abgeleiteten Grundwassertemperaturen von 14.8 °C oder der im Zuström gemessene maximale Wert der Grundwassertemperaturen von 15 °C. In diesem Fall wären Erhöhungen der Grundwassertemperatur auf 17.8 °C oder entsprechend 18 °C in 100 m Abstrom möglich. Aber auch dann ist der Wirkungsgrad des TAS im Vergleich zum Ausgangsmodell vergleichsweise klein und nicht effizient.

Für das urbane Gebiet von Basel und unter Berücksichtigung der gegenwärtigen gesetzlichen Vorgaben ist somit der Betrieb von TAS nur im Gebäudeheizbetrieb des TAS vorstellbar. Dementsprechend konzentrierten sich die weitergehenden Arbeiten auf den Gebäudeheizbetrieb von TAS und v.a. auch auf Konzepten zur Tunnel- und Grundwasserkühlung.

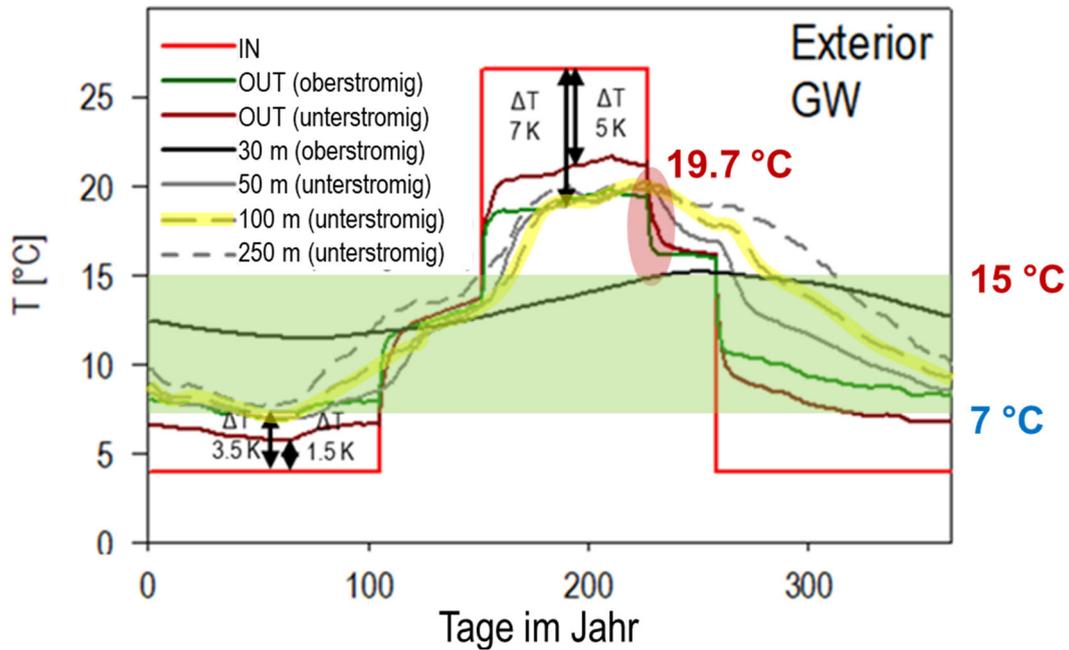


Abb. 23 TAS-Betrieb des S-Bahntunnels «Herzstück» (vgl. Abb. 21) bezugnehmend zu den Rahmenbedingungen Grundwasserschutz. Gelb hervorgehoben ist die gesetzlich relevante Temperaturveränderungen in 100 m Abstrom des thermischen Eingriffs; Grüner Bereich, gesetzlich tolerierbare Temperaturveränderungen des Grundwassers in Basel; rot hervorgehoben, unzulässige Temperaturerhöhung als Resultat des TAS-Sommerbetriebs.

Rahmenbedingungen Klimaerwärmung

Im Folgenden wurde der Frage nachgegangen inwiefern die erwarteten Klimaänderungen den Betrieb von TAS des S-Bahn-Tunnelbauwerks «Herzstück» beeinflussen können. Um die Auswirkungen der Klimaerwärmung in den lokalen 3D-Wärmetransportmodellen berücksichtigen zu können wurde die Temperaturrandbedingung im Zustrom der Tunnelbauwerke und der Verlauf der Grundwassertemperaturen um 1, 2, 4 und 6 K erhöht (Abb. 24).

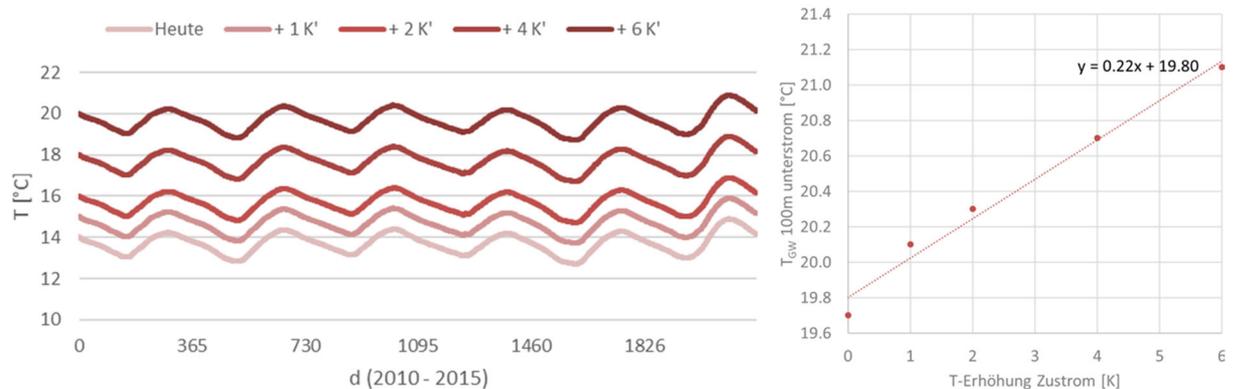


Abb. 24 Entwicklung der Grundwassertemperaturen im Zustrom der Tunnelbauwerke (links) unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien der Klimaerwärmung und Zusammenhang mit der Temperaturerhöhung des Grundwassers in 100 m Abstrom (rechts).



Wie zu erwarten, nimmt das thermische Potential eines Betriebs von TAS des S-Bahn-Tunnelbauwerks «Herzstück» im Gebäudekühlbetrieb (Sommer) weiter ab und im Gebäudeheizbetrieb (Winter) im Vergleich zum Ausgangsmodell entsprechend zu (1 K: +3%; 2 K: 6%; 4 K: 17 % und 6 K: 29%). Zudem ist zu beobachten, dass im Vergleich zur oberstromigen Randbedingung mit der durch die Klimaerwärmung definierten Temperaturerhöhung, die Temperaturerhöhung in 100 m Abstrom um 20 % (siehe Steigung Abb. 24 rechts) reduziert ist. Dies liegt an der kühlenden Wirkung des TAS im Gebäudeheizbetrieb (Winter). Ein Betrieb des TAS im Gebäudeheizbetrieb (Winter) und ggf. auch ganzjährig spricht wiederum für eine mögliche Anpassungsstrategie, um den Temperaturerhöhungen urbaner Grundwasserressourcen zu begegnen, vor allem auch im Hinblick auf die zu erwarteten Klimaänderungen.

Kühlung der Tunnelinnenluft der S-Bahn und des Grundwassers

Aufgrund der schon heute beobachteten hohen Grundwassertemperaturen wurde im Rahmen von ThePoTun eine Nutzung des Grundwassers zu Gebäudekühlzwecken nicht weiterverfolgt (siehe oben). Der Betrieb eines Tunnelbauwerks und dessen stetiger Luftwechsel führt jedoch zu einer weiteren Erwärmung des umströmenden Grundwassers. So werden z.B. in London bereits heute aktive Massnahmen zur Kühlung des Untergrunds bzw. von Tunnelbauwerken getroffen (Botelle et al., 2010), so auch deren thermische Aktivierung (Nicholson et al., 2014). Für eine Abschätzung der durch den Betrieb des S-Bahntunnels «Herzstück» (Motoren, Klimaanlage und Bremsen) eingebrachten Wärmeenergie innerhalb der Tunnelbauwerke wurden Berechnungen nach Nicholson et al. (2014) durchgeführt (Kasten 1).

Kasten 1: Abschätzung Wärmeeintrag S-Bahn-Betrieb

Für die Abschätzung des Wärmeeintrags durch den S-Bahn-Betrieb wurde angenommen, dass alle 15 Minuten (Zugfrequenz: 4 Züge pro Stunde) eine S-Bahn mit einer durchschnittlichen Zuggeschwindigkeit von 60 km h⁻¹ in eine Richtung unterwegs ist. Für die Strecke von ca. 3.5 km auf Grossbasler Seite (GWB A) benötigt ein Zug 3.5 Minuten für die Fahrt, für die Strecke von ca. 2.5 km auf Kleinbasler Seite (GWB C & D) entsprechend 2.5 Minuten. Tabelle 10 fasst die Auslastung der Tunnelröhren für Klein- und Grossbasel zusammen. Geht man davon aus, dass ein Zugmotor durchschnittlich 1 MW und seine Klimaanlage etwa 0.1 MW Nettowärme erzeugt (Nicholson et al., 2014), ergeben sich die in Tab. 5 dargestellte Gesamtwärmeleistung.

Tab. 5 Wärmeeintrag durch den Betrieb des S-Bahntunnels «Herzstück» (Motoren, Klimaanlage und Bremsen).

		Kleinbasel	Grossbasel
Tunnellänge	[km]	3.46	2.78
Kontaktfläche	[m ²]	114'146	78'508
Reisedauer	[min]	3.46	2.78
Auslastung*	[#]	0.23	0.19
Gesamtwärmeleistung	[kW]	254	204
Wärmeeintrag	[W m ⁻²]	2.2	2.6

*Quotient aus Fahrzeit und Zugfrequenz

Im Folgenden werden Konzepte zur Kühlung der Tunnelinnenluft und des Grundwassers behandelt. Zur Evaluation von TAS des S-Bahn-Tunnelbauwerks «Herzstück» für die Tunnel- und Grundwasserkühlung wurde in den lokalen 3D-Wärmtransportmodellen sowohl für den Tunnelverlauf in den Lockergesteinsablagerungen als auch im Festgestein das TAS in der inneren und äusseren Tunnelwand thermisch aktiviert und mit einem kontinuierlichen Betrieb simuliert. Die im TAS zirkulierende Flüssigkeit von



(0.2 l s⁻¹) hat eine konstante Eintrittstemperatur von 4 °C und die Austrittstemperatur verändert sich in Abhängigkeit des saisonalen Verlaufs der Tunnelinnenluft- und Grundwassertemperatur (Abb. 25).

Die thermische Aktivierung des TAS in der äusseren Tunnelwand resultiert in höheren Temperaturspreizungen als jene für das TAS in der inneren Tunnelwand sowohl für den Tunnelverlauf in den Lockergesteinsablagerungen als auch im Festgestein (Abb. 25 und Tab. 6).

Tab. 6 Anwendung des TAS zur kontinuierlichen Kühlung des Untergrunds (konstanter TAS-Durchfluss von 0.2 l s⁻¹ und Eintrittstemperatur von 4 °C). Simulierte Temperaturspreizung ΔT sowie berechnete Wärmeleistungen Q_i und Energieerträge E_n (normiert auf Tunneloberfläche und -länge), welche sich aus den Simulationen mit den lokalen 3D-Wärmetransportmodellen und der Anwendung der verschiedenen Installationen der TAS in der inneren (TAS_{innen}) und äusseren (TAS_{ausssen}) Tunnelwand für Sommer und Winter ergeben.

Lokale 3D-Wärmetransportmodelle	TAS ENERTUN®		ΔT [K]	Q_i [kW]	E_n [W m ⁻²]	E_n [W m ⁻¹]
TA* im Grundwasser (oberstromig)	TAS _{ausssen}	Sommer	9.7	9.3	211.9	6661.0
		Winter	5.5	5.3	120.2	3776.9
	TAS _{innen}	Sommer	4.6	4.4	100.5	3158.8
		Winter	2.7	2.6	59.0	1854.1
TA* im Grundwasser (unterstromig)	TAS _{ausssen}	Sommer	8.8	8.5	192.3	6043.0
		Winter	4.7	4.5	102.7	3227.5
	TAS _{innen}	Sommer	3.9	3.7	85.2	2678.1
		Winter	2.1	2.0	45.9	1442.1
TA* im Festgestein (ober- und unterstromig)	TAS _{ausssen}	Sommer	3.0	2.9	65.5	2060.1
		Winter	0.9	0.9	19.7	618.0
	TAS _{innen}	Sommer	2.4	2.3	52.4	1648.1
		Winter	0.7	0.7	15.3	480.7

*TA: Tunnelabschnitt

Für den Tunnelverlauf im Grundwasser und der Installation des TAS zur Tunnelkühlung über die äussere Tunnelwand ist das Wärmeaustauschpotential im Sommer für den unter- und oberstromigen Tunnelabschnitt mit entsprechend 192 bis 212 W m⁻² vergleichsweise hoch. Im Winter können aber auch noch ca. 85 bis 120 W m⁻² Wärme über die Tunnelwand und das TAS mit dem Untergrund ausgetauscht werden. Somit kann mit dieser Konfiguration des TAS dem Untergrund Wärme entzogen werden, was in einer Abkühlung des Grundwassers resultiert. Dies lässt sich auch in den Temperaturganglinien des Grundwassers beobachten. Im Vergleich zu den Grundwassertemperaturen im Zustrom der Tunnelbauwerke werden die Temperaturen bis 50 m unterstrom ganzjährig um bis zu 4 K reduziert. Erhöhte Temperaturen bei 100 und 250 m unterstrom sind nicht auf das Tunnelbauwerk zurückzuführen, sondern auf andere urbane Einflüsse (v.a. Abwärme von Untergrundstrukturen), welche sich im Modellperimeter befinden (vgl. Abb. 1).

Für den Tunnelverlauf im Grundwasser und der Installation des TAS zur Tunnelkühlung über die innere Tunnelwand liegt das Wärmeaustauschpotential im Sommerbetrieb für den unter- und oberstromigen Tunnelabschnitt entsprechend bei 85 bis 101 W m⁻². Im Winter können aber noch ca. 46 bis 59 W m⁻² Wärme über die Tunnelwand und das TAS der Tunnelinnenluft entzogen werden. Im Zusammenhang mit der vorgenommenen Abschätzung zum Energieeintrag durch den Betrieb der S-Bahn (Tab. 5), könnte somit nicht nur der Energieeintrag des Bahnbetriebs selbst um ein Vielfaches kompensiert, sondern vor allem auch im Sommer der Tunnel und das umgebende Grundwasser gekühlt werden.

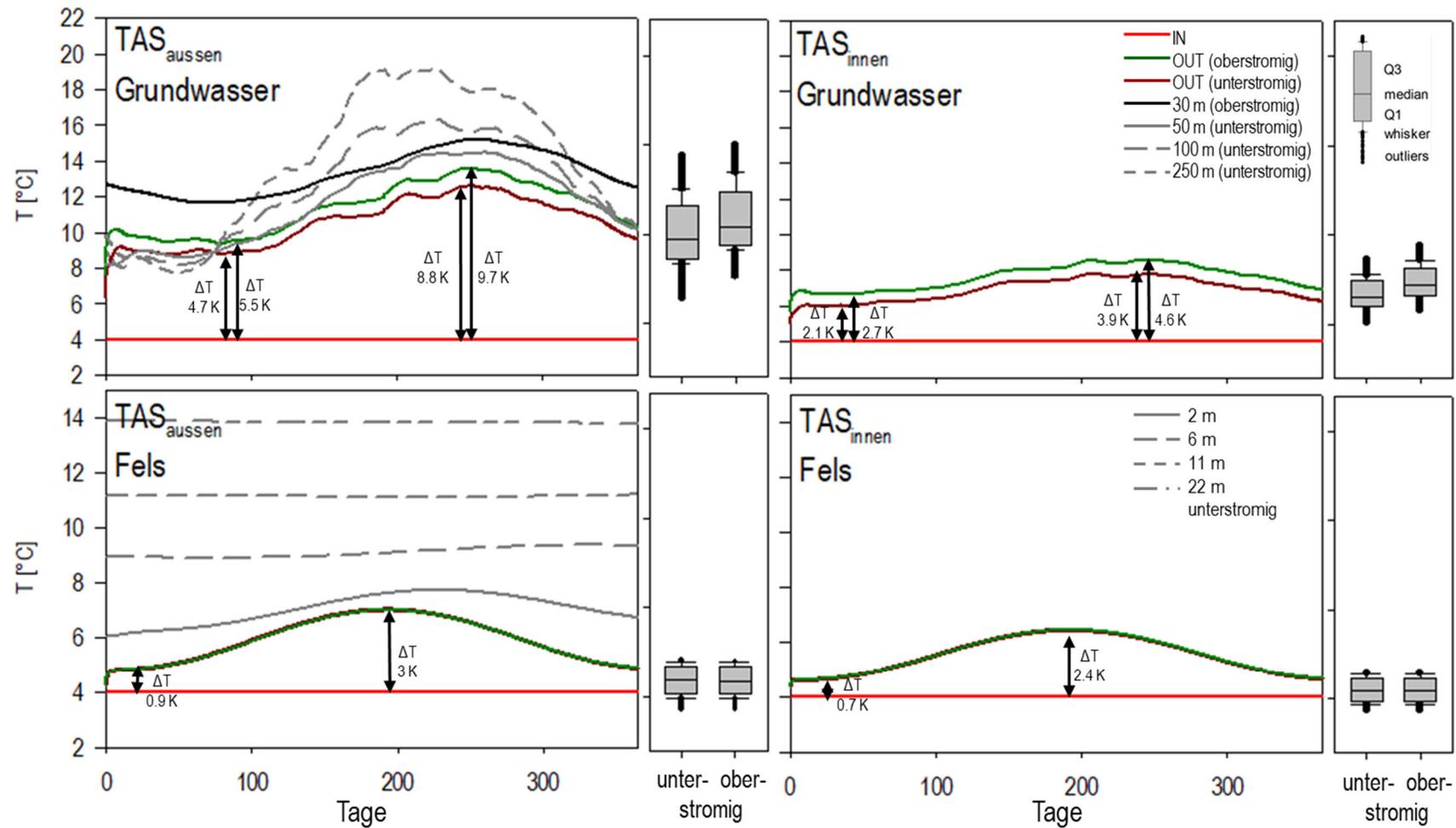


Abb. 25 Anwendung des TAS zur kontinuierlichen Kühlung des Untergrunds. Simulationsergebnisse der lokalen 3D-Wärmetransportmodelle, bei denen sich die Tunnelabschnitte im Grundwasser (jeweils oben) und Festgestein (jeweils unten) befinden, illustriert sind die Ein- und Austrittstemperaturen der TAS. Auch dargestellt sind simulierte Temperaturen ober- und unterstromig der Tunnelbauwerke. Jeweils rechts: Box-Plots mit Statistik (Erläuterung siehe oben rechts) der simulierten Temperaturen für das ober- und unterstromig (Grundwasserhydraulik) positionierte Tunnelbauwerk.



Für den Tunnelverlauf im Fels und der Installation des TAS im Kühlbetrieb in der äusseren Tunnelwand liegt das Wärmeaustauschpotential im Sommer für den unter- und oberstromigen Tunnelabschnitt bei 66 W m^{-2} . Im Winter können aber auch noch ca. 20 W m^{-2} Wärme über die Tunnelwand und das TAS dem Untergrund entzogen werden. Die Reduzierung der Untergrundtemperaturen lässt sich auch im Nahbereich des Tunnelbauwerkes im Untergrund beobachten.

Für den Tunnelverlauf im Fels und der Installation des TAS im Kühlbetrieb in der inneren Tunnelwand liegt das Wärmeaustauschpotential im Sommer für den unter- und oberstromigen Tunnelabschnitt bei 52 W m^{-2} . Im Winter können aber auch noch ca. 15 W m^{-2} Wärme über die Tunnelwand und dem TAS im Kühlbetrieb mit dem Untergrund ausgetauscht und dem Untergrund entzogen werden. Auch dieser Wärmeentzug würde den abgeschätzten Energieeintrag (Tab. 5) durch den Betrieb der S-Bahn (Kasten 1) um ein Vielfaches kompensieren. Auch würde eine solche TAS-Konfiguration vor allem im Sommer der weiteren Abkühlung der Tunnelbauwerke dienen.

4.1.2 Dükersysteme (Autobahntunnel)

Im Folgenden werden die Resultate von Dükersystemen als GES-Anwendungen für verschiedene Abschnitte des Tunnelbauwerkes «Rheintunnel» vorgestellt. Tab. 7 stellt die simulierten Durchflussmengen für die beiden ausgewählten Ausführungen von ein- und dreischichtigen Dükersystemen zusammen. Ebenfalls zusammengefasst werden die Temperaturspreizungen ΔT im Winter bzw. Sommer, welche von Grundwassertemperaturmessungen, unter Annahme potenziell natürlicher Grundwassertemperaturen von $10 \text{ }^\circ\text{C}$, abgeleitet wurden. Die berechnete Wärmezugsleistung Q_i bezieht sich sowohl auf mittlere als auch auf hohe Grundwasserspiegel (Gleichung 1).

Tab. 7 Simulierte Durchflussmengen q_i durch das Dükersystem für verschiedene Abschnitte des Tunnelbauwerkes «Rheintunnel» sowie berechnete Temperaturspreizungen ΔT (Differenz zwischen Eintritts- und simulierter Austrittstemperatur) und Wärmeleistung Q_i für Sommer und Winter (negatives Vorzeichen – Wärmeeintrag in das Grundwasser; positives Vorzeichen – Wärmeentzug aus dem Grundwasser).

	Saison	q_i [l s ⁻¹]	ΔT [K]	Q_i MQ* [kW]	Q_i HQ** [kW]
TA1 GWB SO ⁺	Sommer	19 - 21	2	158 – 178	-
	Winter		2.6	206 – 231	-
TA2 GWB C	Sommer	11 - 14	-1.2	- 55 – -60*	- 65 – -69*
	Winter		5.1	232 – 253	276 – 293
TA3 GWB C	Sommer	< 1	2.8	8	7 – 8
	Winter		7.8	24	22 – 25
TA4 GWB D	Sommer	17 - 24	4.8	341 – 370	451 – 479
	Winter		8.9	633 – 685	837 – 889

SO⁺: Südost; MQ*: mittlerer Grundwasserspiegel; HQ**: hoher Grundwasserspiegel; *Kühlung

Trotz der, im Vergleich zu anderen Tunnelabschnitten, niedrigen Temperaturspreizungen ΔT für Tunnelabschnitt TA1 von nur 2 K im Sommer und 2.6 K im Winter und obwohl der Tunnelabschnitt weitgehend parallel zur regionalen Grundwasserströmung verläuft, wird eine relativ hohe Wärmeentzugsleistung Q_i von 168 kW im Sommer bzw. von 219 kW für einen Gebäudeheizbetrieb im Winter erreicht. Dementsprechend ist für Tunnelabschnitt TA2, welcher senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung verläuft, die Temperaturspreizung ΔT von nur 1.2 K vergleichsweise gering, was im Sommer auch nur geringe Wärmeentzugsleistungen Q_i von 55 bis 69 kW bei mittleren und hohen Grundwasserspiegeln ermöglicht. Da die Temperaturspreizung ΔT im Sommer negativ ist, könnte das Grundwasser für «Free Cooling»-Anwendungen genutzt werden. Demgegenüber führt eine besonders hohe Temperaturspreizung ΔT von 5.1 K im Winter zu einer hohen Wärmeleistung Q_i von 243 kW bei mittleren und 285 kW



bei hohen Grundwasserspiegeln. Für den Tunnelabschnitt TA3, welcher parallel zur regionalen Grundwasserströmung verläuft, resultieren trotz einer vergleichsweise hohen Temperaturspreizung ΔT von 7.8 K im Winter vergleichsweise geringe Wärmeleistungen Q_i , welche im Sommer und Winter für die verschiedenen untersuchten hydrologischen Randbedingungen bei 7 bis 25 kW liegen. Hohe Temperaturspreizungen ΔT von 4.8 K im Sommer und 8.9 K im Winter in der Nähe des Tunnelabschnittes TA4, welcher weitgehend senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung verläuft, führen für die verschiedenen untersuchten hydrologischen Randbedingungen zu hohen Wärmeleistungen Q_i von 341 bis 479 kW im Sommer und 633 bis 889 kW im Winter.

4.1.3 Vergleich der GES-Systeme TAS vs. Düker

Tab. 8 fasst die Ergebnisse der spezifische Wärmeleistung E_n ab Tunnelbauwerk und den jährlichen Wärmeaustausch bei einer kombinierten Heiz-/Kühlnutzung zusammen. Zusätzlich zu den bisher diskutierten Erträgen aus dem Untergrund wurden in dieser Tabelle nun auf Basis der Wärmeerträge aus dem Untergrund auch die durch den kombinierten Betrieb von Wärmepumpen (Nutzwärme) im Winter und Kältemaschinen (Nutzkälte) im Sommer lieferbare Nutzenergieerträge abgeschätzt. Dies sowohl für die Installation von TAS in der äusseren Tunnelwand des S-Bahntunnels «Herzstück», als auch der Realisierung von Dükersystemen für verschiedene Abschnitte des Tunnelbauwerks «Rheintunnel». Die Energieerträge für die TAS werden auf die Oberflächen der verschiedenen Tunnelabschnitte innerhalb der Grundwasser-gesättigten Lockergesteine und im Festgestein hochgerechnet (Tab. 8). Nach der Studie von Miara et al. (2011), welche eine detaillierte Analyse des Wirkungsgrades von Grundwasser-Wärmepumpensystemen durchgeführt haben, findet ein saisonaler Leistungsfaktor SCOP von 4 Verwendung, um die lieferbare Nutzwärmeenergie zu berechnen. Für den Wirkungsgrad von Kältemaschinen findet ein konservativer saisonaler Leistungsfaktor SEER von 3 Verwendung (SIA 382/1⁶), um die lieferbare Nutzkälteenergie zu berechnen.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine thermische Aktivierung der geplanten TAS des S-Bahntunnels «Herzstück» am effizientesten ist, wenn sich die Tunnelsegmente innerhalb der Grundwasser-gesättigten Lockergesteine befinden. So könnte im Sommer das vergleichsweise kühlere Grundwasser dazu genutzt werden, um durch zwei 736 bzw. 284 m lange Tunnelabschnitte 3.7 bzw. 1.4 MW Abwärmeleistung oder 5.8 bzw. 2.1 GWh pro Jahr Abwärmeenergie aus einer Kältemaschine abzuführen. Dies würde mit einem gesetzlich unzulässigen Wärmeeintrag in den Lockergesteins-Grundwasserleiter einhergehen. Dementsprechend könnte im Winter eine Energiemenge von 5.2 bzw. 1.9 GWh pro Jahr, bei einer Wärmeleistung von bis zu 1.9 bzw. 0.7 MW, entnommen und mittels Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau gebracht werden (Wärmeentzug Lockergesteins-Grundwasserleiter).

Da Tunnelabschnitte innerhalb der regionalen 3D-Wärmetransportmodelle nicht ausschliesslich senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung verlaufen, sind die Energieerträge, wie sie sich aus den Berechnungen der Extrapolation ergeben, teilweise geringer (VDI-Wärmeatlas (2006)⁷).

Die Ergebnisse für die thermische Nutzung von Dükersystemen für verschiedene Abschnitte des Tunnelbauwerks «Rheintunnel» zeigen, dass nur für Tunnelabschnitt TA2 im Sommer das vergleichsweise kühlere Grundwasser dazu genutzt werden kann um 62.0 kW Abwärmeleistung oder 0.1 GWh pro Jahr Abwärmeenergie aus einer Kältemaschine abzuführen. Dies würde jedoch mit einem ggf. gesetzlich unzulässigen Wärmeeintrag in den Lockergesteins-Grundwasserleiter einhergehen. Dementsprechend

⁶ Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen

⁷ Nach VDI-Wärmeatlas (2006) spielt die Grundwasserströmungsrichtung eine Rolle, wenn diese mit einem Winkel zwischen 0° und 60°, also von parallel bis 60°, zum Tunnelbauwerk verläuft. In diesem Fall müsste bei der Simulation der Einfluss der Grundwasserströmungsrichtung bei der Analyse berücksichtigt werden. Bei Winkeln zwischen 60° und 90° hingegen ist die Grundwasserströmungsrichtung vernachlässigbar.



könnte im Winter eine Energiemenge zwischen 0.1 und 2.1 GWh pro Jahr, bei einer Wärmeleistung zwischen 7.5 und 761.0 kW, entnommen und mittels Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau gebracht werden (Wärmeentzug Lockergesteins-Grundwasserleiter). Der Unterschied von zwei Gröszenordnungen in der Wärmeleistung ist auf unterschiedliche Durchflussraten und berechnete Temperaturspreizungen für die verschiedenen Tunnelabschnitte zurückzuführen (Tab. 7).

Tab. 8 Zusammenstellung der spezifischen Gesamtwärmeleistung E_n , des saisonalen Wärmeaustausches und die durch Wärmepumpen lieferbare Wärmeenergie für die Installation von TAS im Grundwasser (GW) und Festgestein (FG) in der äusseren Tunnelwand des S-Bahntunnels «Herzstück» und der Realisierung von Wärmetauschern in Dükersystemen in verschiedenen Tunnelabschnitten des Autobahnbauwerks «Rheintunnel» für die verschiedenen Grundwasserkörper (GWB A, C und D, sowie den Bereich im SO; Abb. 1).

GWB	Tunnel Typ	Tunnelabschnitt GW / FG	E_n [kW]		saisonaler Wärmeaustausch [GWh]		lieferbare Wärmeenergie [GWh]	
			Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
A	S-Bahn Doppeltunnel	GW	3728.5	1864.3	7.8	3.9	5.8 (kühlen)	5.2 (heizen ^{**})
		FG	0.0	980.7	0.0	2.0	0.0	2.7 (heizen ^{**})
C & D	S-Bahn Doppeltunnel	GW	1366.0	683.0	2.9	1.4	2.1 (kühlen)	1.9 (heizen ^{**})
		FG	0.0	760.4	0.0	1.6	0.0	2.1 (heizen ^{**})
	Autobahntunnel	TA2 GW	62.0	262.5	0.1	0.5	0.1 (kühlen)	0.7 (heizen ^{**})
		TA ⁺⁺ 3 GW	7.5	24.5	0.0	0.1	0.0	0.1 (heizen ^{**})
SO ⁺	Autobahntunnel	TA ⁺⁺ 4 GW	410.0	761.0	0.9	1.6	1.1 (heizen ^{**})	2.1 (heizen ^{**})
		TA ⁺⁺ 1 GW	168.0	219.0	0.4	0.5	0.5 (heizen ^{**})	0.6 (heizen ^{**})

SO⁺: Süd-Ost; TA⁺⁺: Tunnelabschnitt; SCOP^{**} = 4: Seasonal Coefficient Of Performance; SEER^{***} = 3: Seasonal Energy Efficiency Ratio

4.2 Regionaler thermischer Einfluss von Tunnelstrukturen

4.2.1 Regionale 3D-Wärmetransportmodelle S-Bahntunnel «Herzstück»

Auf Basis der regionalen 3D-Wärmetransportmodelle wurde der thermische Einfluss von TAS des geplanten S-Bahntunnels «Herzstück» auf den Untergrund und das thermische Grundwasserfließregime untersucht. Abb. 26 zeigt den auf 1 m² Tunneloberfläche (Tab. 1) und 10 °C Grundwassertemperatur normierten Wärmeaustausch für die verschiedenen Tunnelabschnitte des geplanten S-Bahntunnels in den Grundwasser-gesättigten Lockergesteinen und im Festgestein der verschiedenen Grundwasserkörper (Abb. 1) als Ergebnis der regionalen 3D-Wärmetransportmodellierung.

Für alle Tunnelabschnitte des geplanten S-Bahntunnels «Herzstück», welche durch das Festgestein verlaufen, ist das Wärmeaustauschpotential vergleichsweise klein und liegt bei unter 15.6 W m⁻². Aufgrund einer geringen Grundwassermächtigkeit von wenigen Metern und des parallelen Verlaufs zum Grundwasserströmungsfeld ist der Tunnelabschnitt, welcher sich in der Nähe des SBB-Hauptbahnhofes in Grundwasserkörper GWB A befindet (Abb. 1), durch ein vergleichsweise geringes Wärmeaustauschpotential von unter 9.7 W m⁻² charakterisiert. Im Gegensatz dazu, ist der Tunnelabschnitt des Seitenarms im GWB A, welcher in den Grundwasser-gesättigten Lockergesteinen senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung verläuft, durch ein relativ grosses Wärmeaustauschpotential von im Mittel 71.6 W m⁻² charakterisiert. Gleiches gilt für den Tunnelabschnitt der Hauptstrecke des S-Bahntunnels im



GWB C, welcher innerhalb der Grundwasser-gesättigten Lockergesteine verläuft. Auch dieser Tunnelabschnitt verläuft senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung, was in einem relativ grossen Wärmeaustauschpotential von im Mittel 66.3 W m^{-2} resultiert.

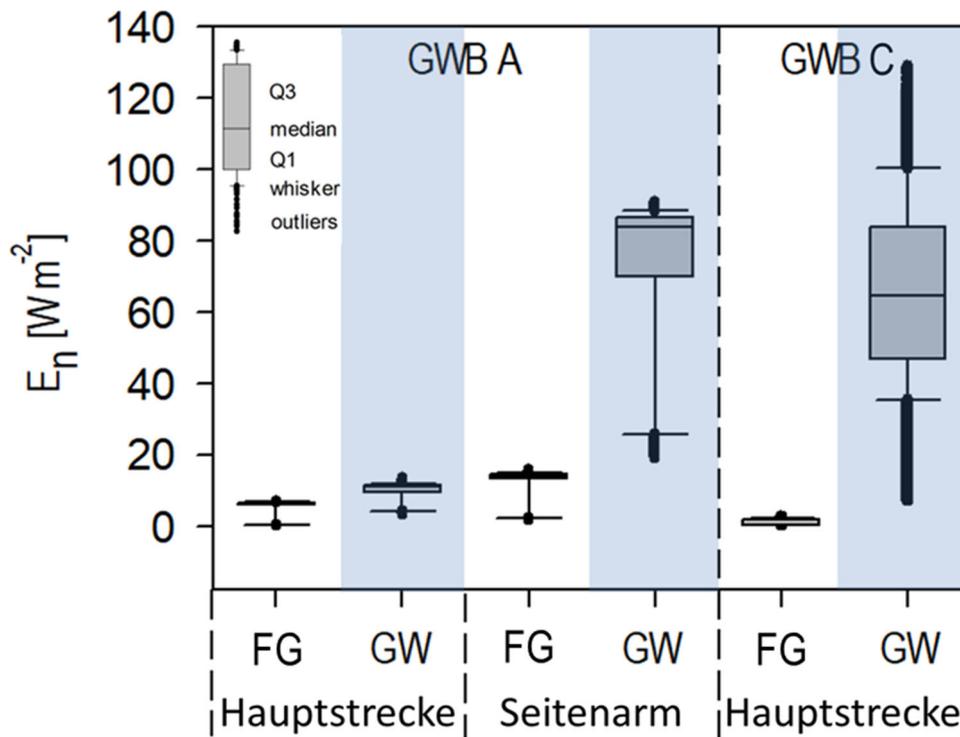


Abb. 26 Thermischer Einfluss (Wärmeaustausch normiert auf 1 m^2 Tunneloberfläche) des geplanten S-Bahn-Doppeltunnels «Herzstück» auf den Untergrund unter Berücksichtigung des Betriebs des TAS für die verschiedenen Tunnelabschnitte (TA) im Grundwasser (GW, blau schattiert) und im Festgestein (FG) in den Grundwasserkörpern GWB (GroundWaterBody) A und C (Abb. 1).

Da dieser Tunnelabschnitt auch parallel zum Fließgewässer Wiese verläuft (Abb. 1), zeigt das Wärmeaustauschpotential aufgrund der Infiltration der Wiese eine grosse jährliche Variabilität (Abb. 27). Während ein Teil dieser Variabilität auf das Betriebsregime des TAS zurückzuführen ist, ist der thermische Einfluss des regionalen Grundwasserfließregimes und des thermischen Regimes für den untersuchten Zeitraum von 2010 bis 2015 offensichtlich. Neben einer deutlichen Saisonalität (mit steigendem Wärmeaustausch im Sommermonat und Höchstwerten im Herbst von über 1000 kW) sind auch einzelne charakteristische Hochwasserereignisse der Wiese in den einzelnen Jahren zu beobachten. Ebenso infiltriert in der nahegelegenen Wiese bei Hochwasserereignissen im Sommer vergleichsweise wärmeres und im Winter vergleichsweise kühleres Wasser aus dem Fluss in den Grundwasserleiter; ein Prozess, der bereits in hochauflösenden tiefendifferenzierten Temperaturmessungen entlang des Rheins im Grundwasserkörper GWB A beobachtet wurde (Epting and Huggenberger, 2013).

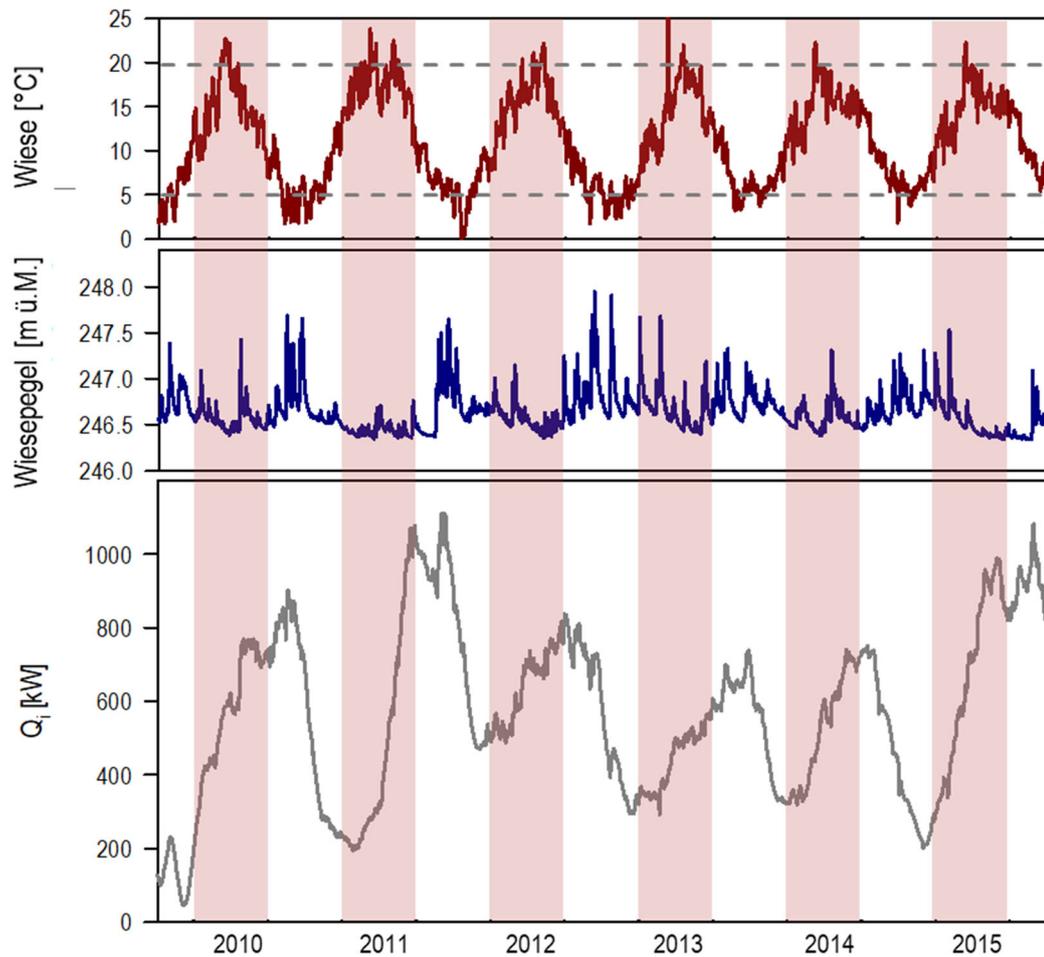


Abb. 27 Thermischer Einfluss des TAS des geplanten S-Bahntunnel «Herzstück» auf den Untergrund und Variabilität des gesamten Wärmeaustausches (vgl. Gleichung 1) für den Tunnelabschnitt im Grundwasserkörper GWB B innerhalb der Grundwasser-gesättigten Lockergesteine, dargestellt zusammen mit den Temperaturen (oben) und des Pegels (Mitte) des nahe gelegenen Oberflächengewässers Wiese (Abb. 1).

4.2.2 Feldexperiment «thermischer Einfluss Autobahntunnel»

Temperaturmessungen

In Kooperation mit dem ASTRA und der NSNW AG, konnten für den Zeitraum vom 16.11.2018 bis 20.11.2019 an 6 Standorten im Autobahntunnel «Nordtangente» Messungen der Tunnelinnenlufttemperatur vorgenommen werden (Abb. 28). Standorte für die kontinuierlichen Temperaturmessungen der Tunnelinnenluft umfassen die Tunnelportale sowie verschiedene Tiefen entlang der Tunnelbauwerke auf Gross- und Kleinbasler Seite (siehe Anhang C).

Wie erwartet, nimmt der Einfluss der Aussenlufttemperatur mit grösser werdendem Abstand zum Tunnelportal ab. Vor allem im Bereich der Tunnelportale ist die Tunnelinnenlufttemperatur überwiegend durch die Aussenlufttemperatur beeinflusst.



Sowohl der saisonale als auch der Tagesverlauf der Tunnelinnenlufttemperaturen ist leicht zeitverzögert und gedämpft an den verschiedenen Messstandorten zu beobachten. Es können auch wöchentliche Zyklen im Temperaturverlauf beobachtet werden, welche auf den Einfluss des Fahrzeugverkehrs (Werk-tage, Wochenende) zurückzuführen ist.

Der Verlauf der Tunnelinnenlufttemperaturen an den verschiedenen Standorten ist ähnlich, wobei die Temperaturschwankungen im Bereich des Tunnelportals und im Tunnel Horburg grösser sind (Abb. 28). Generell sind die Temperaturunterschiede zwischen den verschiedenen Standorten im Winter am grössten. Im Sommer ist der Temperaturverlauf nahezu identisch für die verschiedenen Standorte.

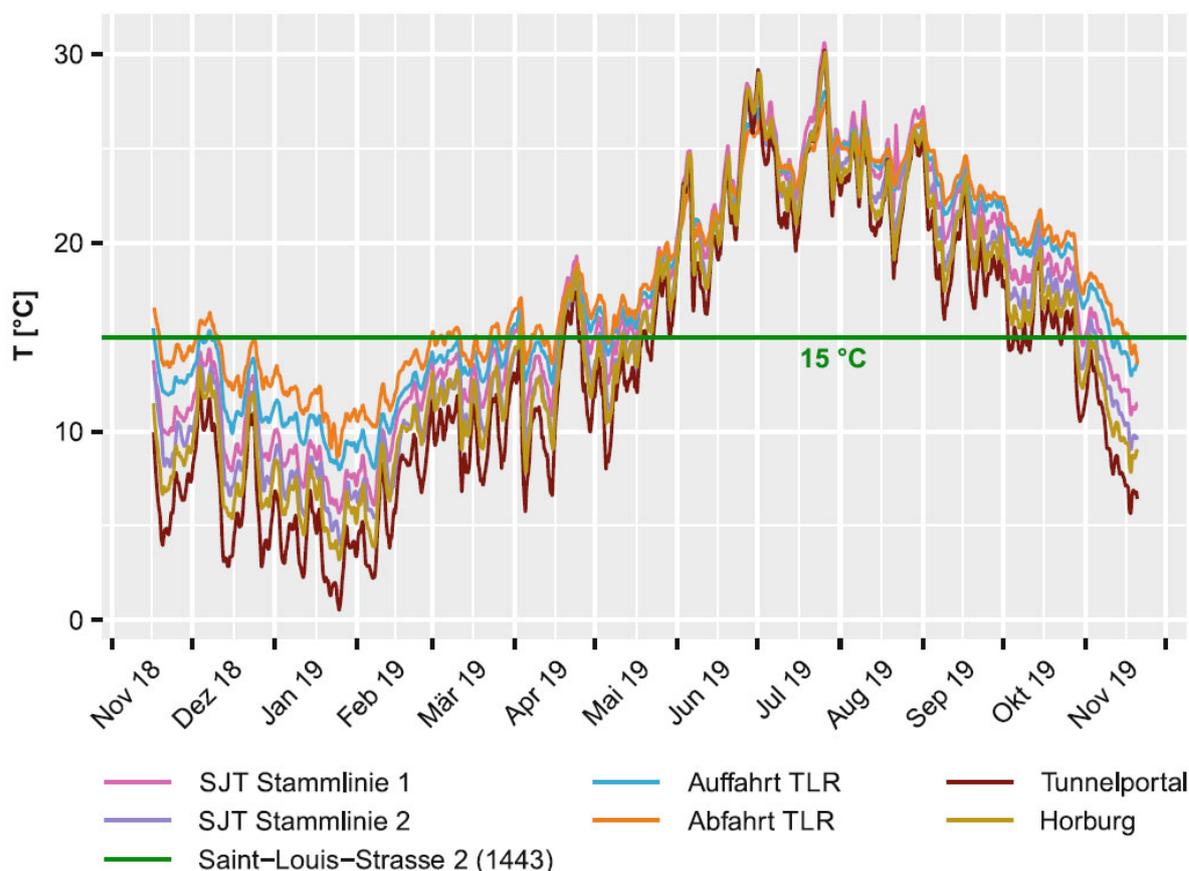


Abb. 28 Gemessene Temperaturtagesmittel der Tunnelinnenluft an verschiedenen Standorten des Autobahntunnels «Nordtangente»; dargestellt zusammen mit der mittleren Grundwassertemperaturen von ca. 15 °C (Becker and Epting, 2021).

Abgesehen von den Temperaturmessungen im Bereich des Tunnelportals (SJT NS R026; Anhang C), wo die Temperaturen im Februar bis auf nahezu 0 °C absinken, liegen die Messungen für alle untersuchten Tunnelabschnitte zwischen 3 und bis zu 32 °C und somit mehr oder weniger im gleichen Bereich wie bei anderen Untersuchungen (Jagdberg-Autobahntunnel, Thüringen, Deutschland; z.B. Moormann et al. (2018)). Bei Meteo-Tunnels werden generell höhere Minimaltemperaturen gemessen (z.B. 13 bis 15 °C in Châtelet-les-Halles, Paris, Frankreich; Rognon et al. (2019) oder 11 bis 19 °C in London, England; Botelle et al. (2010)). Dies bedeutet, dass bei mittleren Grundwassertemperaturen für dieses Gebiet von ca. 15 °C, die Tunnelinnenlufttemperatur im Autobahntunnel «Nordtangente» im



Winterhalbjahr niedriger ist und tendenziell zu einer Abkühlung des Grundwassers führt. Im Sommerhalbjahr hingegen findet ein Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter statt.

Quantifizierung des thermischen Einflusses

Eine Quantifizierung der Grössenordnung des thermischen Einflusses Q_{ges} [kW] des Autobahntunnels «Nordtangente» auf das Grundwasser, kann mit folgender einfachen Gleichung abgeschätzt werden (Becker and Epting, 2021):

$$Q_{ges} = k * A_{GW} * \Delta T, \quad \text{Gleichung 3}$$

mit dem Wärmeübergangskoeffizienten k [$W m^{-2} K^{-1}$] der Gebäudeausseiwand, der Gebäudefläche A_{GW} [m^2] in der Grundwasser-gesättigten Zone und des Temperaturunterschieds ΔT [K] zwischen der Temperatur in der Untergrundstruktur und den Grundwassertemperaturen im Zustrom. Basierend auf dem Normenwerk des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA 380/1) wurde eine vergleichsweise gute Gebäudeisolation angenommen und ein Wärmeübergangskoeffizient von $0.3 W m^{-2} K^{-1}$ berücksichtigt. Zusätzlich wurde der Wärmeaustausch auf $1 m^2$ Tunneloberfläche normiert.

Tab. 9 fasst den Wärmeaustausch der Autobahntunnel mit dem Grundwasserkörper zusammen. Es existieren deutliche saisonale Unterschiede mit einem Wärmeentzug aus dem Grundwasser im Winter und einem Wärmeeintrag in das Grundwasser im Sommer. Für den Autobahntunnel «Nordtangente» liegt der geschätzte Wärmeentzug aus dem Grundwasser im Winter bei 196.4 kW ($6.5 W m^{-2}$ Tunneloberfläche) und der Wärmeeintrag in das Grundwasser im Sommer bei 263.5 kW ($8.8 W m^{-2}$ Tunneloberfläche).

Tab. 9 Wärmeaustausch des Autobahntunnels «Nordtangente» und der verschiedenen Tunnelabschnitte (TA1-4; GWB und Bereich im Südosten SO, vgl. Abb. 1) des «Rheintunnels» mit dem Grundwasserkörper für die gesamte Gebäudekontaktfläche Q_{ges} (-: Wärmentzug; +: Wärmeeintrag).

Tunnel	GWB ⁺	Tunnel Abschnitt (TA)	Kontaktfläche [m ²]	Q_{ges} [kW]	
				Winter	Sommer
Nordtangente	A & C	-	111'000	-196.4	+263.5
		TA2	40'715	-72.0	+96.7
Rheintunnel	C & D	TA3	16'022	-28.3	+38.0
		TA4	12'064	-21.3	+28.6
		SO ⁺⁺	TA1	37'700	-66.7
Rheintunnel gesamt			106'501	-188.4	+252.8

GWB⁺: GroundWaterBody; SO⁺⁺: Südosten

Die Resultate der Untersuchungen dienen als Referenz für eine Abschätzung der thermischen Beeinflussung der geplanten Autobahn «Rheintunnel». Tab. 9 zeigt den geschätzten Wärmeaustausch für die verschiedenen Tunnelabschnitte des «Rheintunnels». Da die Dimension des «Rheintunnels», betreffend Kontaktfläche mit dem Grundwasser, vergleichbar mit dem Autobahntunnel «Nordtangente» ist, ist der zu erwartende saisonale Wärmeaustausch auch in der gleichen Grössenordnung. Verglichen mit dem Wärmeaustausch der thermischen aktivierten TAS (Kapital 4.2.1) ist der Wärmeaustausch der Autobahntunnel mit dem Grundwasserkörper gering. Dies gilt sowohl für den gesamten als auch für den auf $1 m^2$ Tunneloberfläche normierten Wärmeaustausch. Dies kann neben dem thermischen Betrieb des TAS auf die vergleichsweise grosse Tunneloberfläche der Autobahntunnel erklärt werden.



5 Resultate Projektschwerpunkt B - Wärmespeicherung im Untergrund

Im Folgenden werden die Resultate im Zusammenhang mit der saisonalen Speicherung der Wärme aus dem TAS des S-Bahntunnel «Herzstück» im Untergrund mittels Erdwärmesonden (EWS) und Energiepfählen (EP) vorgestellt. Ziel war es für die Standortgegebenheiten und den Untergrund von Basel die optimale Systemtiefe im Zusammenhang mit dem thermischen Potential von TAS abzuleiten.

In einem ersten Schritt wurde mit jeweils einer EWS und einem EP die optimale Systemtiefe für die Standortgegebenheiten im Untergrund von Basel abgeleitet. Vor allem für die Wärme- und Kälteversorgung von Büro-, Gewerbe-, Industrie- oder Hotelbauten kommen häufig mehrere, nebeneinander angeordnete EWS- und EP-Felder zum Einsatz, da somit ein grösseres Erdspeichervolumen ausgeschöpft werden kann. Deshalb wurde anschliessend ein Sondenfeld von insgesamt 5 EWS und 5 EP mit Systemabständen von 5 m simuliert (Abb. 29). Mit den Sondenfeldern konnte auch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen EWS und EP evaluiert werden. Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Systeme zu ermöglichen wurde die Entzugsleistung auf Meter Systemlänge normiert (W m^{-1}).

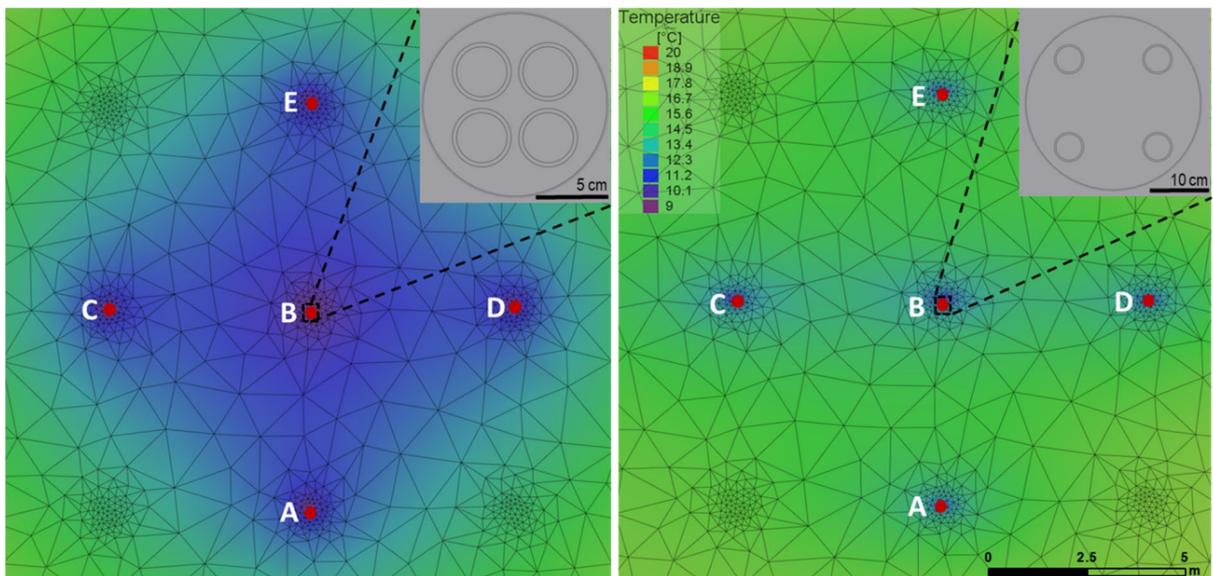


Abb. 29 EWS- (ca. 137 m Tiefe unter Gelände) und EP-Feld (ca. 30 m Tiefe unter Gelände) und Temperaturverteilung im Winter (1ster Januar). Jeweils oben rechts: Konfiguration der EWS (Details Anhang D) und EP (Details Anhang E).

Der thermische Betrieb der EWS (Konfiguration siehe Anhang D) und EP (Konfiguration siehe Anhang E) wurde für eine sommerliche Gebäudekühlung mit einer Eintrittstemperatur von 22 °C simuliert, die Temperatur entspricht dabei der Austrittstemperatur des TAS der S-Bahn (vgl. dunkelrote Linie Abb. 21). Im winterlichen Gebäudeheizbetrieb wurde eine Eintrittstemperatur von 4 °C simuliert. Der Durchfluss für die einzelnen EWS und EP liegt konstant bei 0.2 l s^{-1} und entspricht somit dem Durchfluss eines Segments von 1.4 m Länge des TAS (Kapitel 3.1.1).



Um die Effizienzsteigerung durch die Wärmespeicherung im Sommer beurteilen zu können wurde auch ein thermischer Betrieb der EWS und EP mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 4 °C simuliert.

5.1 Wärmespeicherung mittels Erdwärmesonden (EWS)

Der S-Bahntunnel «Herzstück», verläuft in seiner gesamten Länge in einem Bereich in welchem, nach der Erdwärmesondenkarte⁸ des Kantons Basel-Stadt, EWS bis 250 m Tiefe grundsätzlich mit Standardauflagen (ohne geologischen Bericht) zugelassen sind. Die untersuchten EWS durchdringen die grundwasserführenden Lockergesteine, wobei die thermische Aktivierung nur für die unterliegenden Felsformationen vorgenommen wurde.

Abb. 29 zeigt die simulierte Temperaturverteilung im Winter (1ster Januar) in ca. 137 m Tiefe unter Gelände für ein Sondenfeld mit insgesamt 5 EWS und Systemabständen von 5 m. Deutlich ist die Abkühlung des Untergrundes durch den Einfluss des Wärmeentzugs der EWS im Winter zu erkennen.

Tab. 10 Szenarien für verschiedene EWS Systemlängen und simulierte Temperaturspreizung ΔT (Differenz zwischen Eintritts- und simulierter Austrittstemperatur) sowie berechnete Wärmeleistungen Q_i und Energieerträge E_n (normiert auf 1 m EWS-Länge).

Sonden-tiefe [m ü.M.]	Tiefe u. GOK* [m]	Sonden-länge [m]	Temperaturspreizung ΔT		Wärmeleistungen Q_i		Energieerträge E_n	
			Wi [K]	So [K]	Wi [kW]	So [kW]	Wi [W m ⁻¹]	So [W m ⁻¹]
95.0	155.5	143.8	3.0	0.1	5.1	0.2	35.5	1.4
77.0	173.5	161.8	2.3	0.7	3.8	1.1	23.8	6.8
59.0	191.5	179.8	2.4	0.7	4.1	1.2	22.7	6.6
41.0	209.5	197.8	2.7	0.6	4.6	1.0	23.2	4.8
0.6	249.9	238.2	2.9	0.7	4.9	1.2	20.6	4.9

*Geländeoberkante

Tab. 10 und Abb. 30 fassen die Resultate für die Simulationen mit einer EWS zusammen. Die berechneten Temperaturspreizungen für die verschiedenen Systemtiefen liegen unter 3 K (Tab. 10) und entsprechen somit einem EWS-Normalbetrieb für welchen häufig mit möglichst kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf (2 bis 4 K) gearbeitet wird.

Die spezifische Wärmeleistung der EWS im Sommerbetrieb ist sehr gering und sollte lediglich dahingehend betrachtet werden, dass die abgeführte Wärme des TAS im Kühlbetrieb (Sommer), welche z.B. von der Tunnelkühlung des TAS stammt, einen Beitrag zur thermischen Regeneration des tieferen Aquifers und somit zu einer leichten Energieertragssteigerung des EWS im Gebäudeheizbetrieb (Winter) leisten kann. Die berechnete Energieausbeute pro Meter Sondenlänge liegt zwischen 21 und 36 W m⁻¹ und entspricht somit Erfahrungswerten für EWS (z.B. Brandl (2016)).

Die vorgenommenen Simulationen zeigen, dass im Untergrund von Basel, EWS am effizientesten bis in ca. 155.5 m Tiefe unter Gelände (95.0 m ü.M.) funktionieren. Aufgrund der thermischen Eigenschaften

⁸ <https://www.aue.bs.ch/dam/jcr:794acac0-13da-473c-b701-80b348ccde84/Erdwaermesondenkarte.pdf>



der tieferen geologischen Einheiten (Tab. 2 & Tab. 3) nimmt die spezifische Wärmeleistung in grösseren Tiefen ab (Tab. 10).

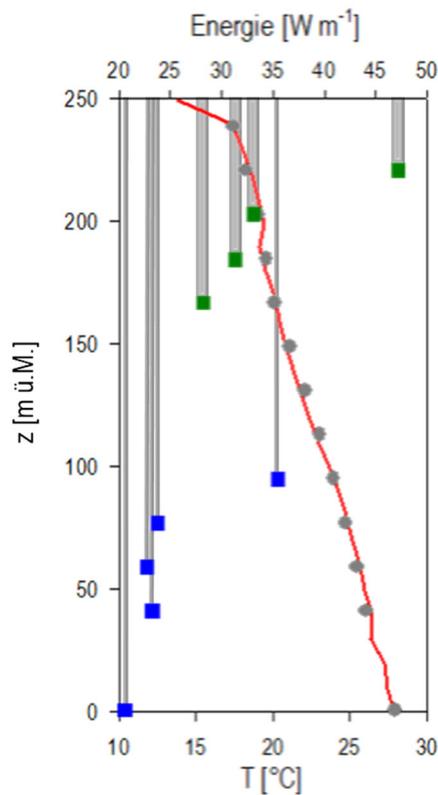


Abb. 30 Ergebnisse der Simulationen der untersuchten EWS (schmale graue Balken) und EP (breite graue Balken), einschliesslich berechnete Energiepotentiale der EWS (blau) und EP (grün) und Temperaturverlauf in der Tiefe (rote Linie, Messpunkte - graue Punkte).

Die Berechnungen mit einem EWS-Feld mit insgesamt 5 EWS zeigen, dass für die äusseren EWS (A,C,D & E; Abb. 29) die simulierte Temperaturspreizung, sowie berechnete Wärmeleistung und Energieertrag annähernd gleich ist wie für die Berechnung mit nur einer EWS. Für die zentral gelegene EWS (B; Abb. 29) nimmt die Effizienz hingegen um ca. 15 % ab.

Ein thermischer Betrieb der EWS mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 4 °C resultiert in einem langfristiger Austrittstemperatur von 5.1 °C und somit einer Temperaturspreizung von lediglich 1.1 K. Verglichen mit dem Betrieb mit Wärmespeicherung im Sommer, für welche eine Temperaturspreizung von 3 K simuliert wurde (Tab. 10) ist die Wärmeleistungen und auch der Energieertrag somit nahezu 3-mal höher bei einem Betrieb mit Wärmespeicherung im Sommer.

5.2 Wärmespeicherung mittels Energiepfählen (EP)

EP sind Tiefen- oder Pfahlfundationen, die mit Rohrleitungen ausgerüstet sind, in denen eine Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert. EP werden im Baubewilligungsverfahren wie Fundationspfähle behandelt. Für die Erstellung und den Betrieb derartiger Anlagen braucht es nur eine Bewilligung, wenn diese in das Grundwasser reichen. Generell haben EP Durchmesser von 0.3 bis 3.0 m und Längen von bis zu 60 m.



Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde ein Durchmesser von 0.3 m gewählt⁹. Die untersuchten EP durchdringen die grundwasserführenden Lockergesteine, wobei die thermische Aktivierung nur für die unterliegenden Felsformationen vorgenommen wurde.

Abb. 29 zeigt die simulierte Temperaturverteilung im Winter (1ster Januar) in ca. 30 m Tiefe unter Gelände für ein Sondenfeld mit insgesamt 5 EP und Systemabständen von 5 m. Die Abkühlung des Untergrundes durch den Einfluss des Wärmeentzugs der EP im Winter ist lokal, um die einzelnen EP zu erkennen.

Abb. 30 und Tab. 11 fassen die Resultate für die Simulationen mit einer EP zusammen. Wie für die EWS, ist die spezifische Wärmeleistung des EP im Sommerbetrieb sehr gering und sollte lediglich dahingegen betrachtet werden, dass die durch das TAS im Kühlbetrieb (Sommer) abgeführte Wärme, welche z.B. von der Tunnelkühlung des TAS stammt, einen Beitrag zur thermischen Regeneration der unterliegenden Felsformationen und somit zu einer leichten Energieertragssteigerung des EP im Gebäudeheizbetrieb (Winter) resultiert. Die berechnete Energieausbeute pro Meter Sondenlänge liegt zwischen 28 und 47 W m⁻¹ und entspricht somit Erfahrungswerten für EP, welche mit Werten zwischen 40 und 60 W m⁻¹ angegeben werden (z.B. Brandl (2016)).

Tab. 11 Szenarien für verschiedene EP Systemlängen und simulierte Temperaturspreizung ΔT (Differenz zwischen Eintritts- und simulierter Austrittstemperatur) sowie berechnete Wärmeleistungen Q_i und Energieerträge E_n (normiert auf 1 m EP-Länge).

Pfahltiefe [m ü.M.]	Tiefe u. GOK* [m]	Pfahl- länge [m]	Temperatursprei- zung ΔT		Wärmeleistungen Q_i		Energieerträge E_n	
			Wi [K]	So [K]	Wi [kW]	So [kW]	Wi [W m ⁻¹]	So [W m ⁻¹]
220.8	29.7	18.0	0.5	0.2	0.9	0.3	47.2	18.9
202.8	47.7	36.0	0.7	0.3	1.2	0.5	33.1	14.2
184.5	66.0	54.3	1.0	0.3	1.7	0.5	31.3	9.4
166.9	83.7	71.9	1.2	0.4	2.0	0.7	28.2	9.5

*Geländeoberkante

Die vorgenommenen Simulationen zeigen, dass im Untergrund von Basel, EP am effizientesten bis in ca. 29.7 m Tiefe (220.8 m ü.M.) funktionieren. Aufgrund der thermischen Eigenschaften der tieferen geologischen Einheiten (Tab. 2 & Tab. 3) nimmt die spezifische Wärmeleistung in grösseren Tiefen ab (Tab. 11).

Die Berechnungen mit einem Feld von insgesamt 5 EP zeigen, dass für die äusseren EP (A,C,D & E; Abb. 29) die simulierten Temperaturspreizung, sowie berechnete Wärmeleistung und Energieertrag annähernd gleich ist wie für die Berechnung mit nur einer EP. Für die zentral gelegene EP (B; Abb. 29) nimmt die Effizienz hingegen um ca. 12 % ab.

Ein thermischer Betrieb der EP mit einer konstanten Eintrittstemperatur von 4 °C resultiert in einer langfristigen Austrittstemperatur von 4.4 °C und somit einer Temperaturspreizung von 0.4 K. Verglichen mit dem Betrieb mit Wärmespeicherung im Sommer, für welche eine Temperaturspreizung von 0.5 K

⁹ Maximal mögliche Systemkonfiguration in FeFlow



simuliert wurde ist die Wärmeleistungen und auch der Energieertrag ca. 20 % höher bei einem Betrieb mit Wärmespeicherung im Sommer.



6 Übertragbarkeit

Dieses Kapitel stellt die im Rahmen des Schwerpunktes Übertragbarkeit vorgenommene Evaluation des Energiepotentials von Tunnelstrukturen und der Machbarkeit der geothermischen Nutzung von Tunnelbauwerken in unterschiedlichen urbanen und hydrogeologischen Settings vor.

Grundlage waren die im Rahmen des BAFU-Projekts (15.0003.PJ / Q244-0808) vorgenommenen Auswertungen zum «Ist-Zustand und der Temperaturentwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen». Anhang F gibt einen Überblick über Aquifereigenschaften, einschliesslich Grundwasserfliessgeschwindigkeiten, von insgesamt 38 Lockergesteins-Grundwasservorkommen bei Winterthur, Biel, Davos, Basel-Stadt und den Haupttälern des Kantons Basel-Landschaft.

Das thermische Potential des Grundwassers ist v.a. abhängig von den Grundwasserfliessgeschwindigkeiten, der Grundwassermächtigkeit, den Wärmeeigenschaften des Untergrundes und der möglichen Nutzung von Temperaturunterschieden. Deshalb wurden in einem ersten Schritt mit den bestehenden lokalen 3D-Wärmetransportmodellen, bei welchem das Tunnelbauwerk im Grundwasser verläuft, der Effekt von verschiedenen Grundwasserfliessgeschwindigkeiten auf das thermische Potential untersucht. Die Grundwasserfliessgeschwindigkeit nach Darcy resultiert aus:

$$v_D = K_f * \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \text{Gleichung 4}$$

mit hydraulischer Durchlässigkeit K_f und dem hydraulischen Gradienten $\frac{\Delta h}{\Delta l}$ als Quotient aus Höhenunterschied Δh über eine definierte Distanz Δl .

Für die Szenarienberechnungen wurde der K_f -Wert zwischen 1.0 E-04 und 1.0 E-02 m s⁻¹ (homogene Verteilung) variiert, was einer typischen Bandbreite hydraulischer Durchlässigkeiten von Schweizer Lockergesteinsablagerungen entspricht. Für den hydraulischen Gradienten wurden die Zeitreihen der Pegel, an den ober- und unterstromigen Modellrändern der lokalen 3D-Wärmetransportmodelle variiert.

Abb. 31 zeigt die resultierenden Grundwasserfliessgeschwindigkeiten 30 m oberstromig des Tunnelbauwerks zusammen mit der thermischen Leistung, welche für die verschiedenen Konfigurationen des TAS im Winter- und Sommerbetrieb theoretisch realisiert werden könnte.

Neben Daten, welche aus einer Untersuchung aus Turin zur Verfügung standen (Barla and Di Donna, 2018), sind auch die Grundwasserfliessgeschwindigkeiten der Lockergesteins-Grundwasservorkommen von Winterthur, Biel, Davos und exemplarisch für den Bereich der Gemeinden Aesch und Reinach im Kanton Basel-Landschaft dargestellt. Verglichen mit Turin wäre die thermische Leistung eines TAS in Basel effizienter. Noch effizienter wäre eine Realisierung von TAS z.B. im Grundwasservorkommen bei Aesch-Reinach im Kanton Basel-Landschaft oder auch bei Winterthur im Kanton Zürich. Neben hohen Fliessgeschwindigkeiten ist in diesen Grundwasservorkommen auch die Grundwassermächtigkeit (Anhang F) ausreichend, wobei im Vergleich zu Basel die mittleren Grundwassertemperaturen geringer sind (BAFU-Projekt 15.0003.PJ / Q244-0808). Für die Grundwasservorkommen bei Davos und Biel ist das Potential im Vergleich zu Basel geringer. Hier gilt auch zu berücksichtigen, dass die Grundwassermächtigkeit in Davos und das Grundwasserdargebot in Biel vergleichsweise gering sind (Anhang F).

Diese erste Abschätzungen des Energiepotentials von Tunnelstrukturen in anderen Schweizer Städten zeigt für welche Standorte die thermische Leistung eines TAS vielversprechend ist. Wesentliche Grundlage ist dabei eine hydrogeologische Evaluation bzgl. Grundwasserfliessgeschwindigkeit und -mächtigkeit sowie die Ermittlung von möglichen Temperaturspreizungen.

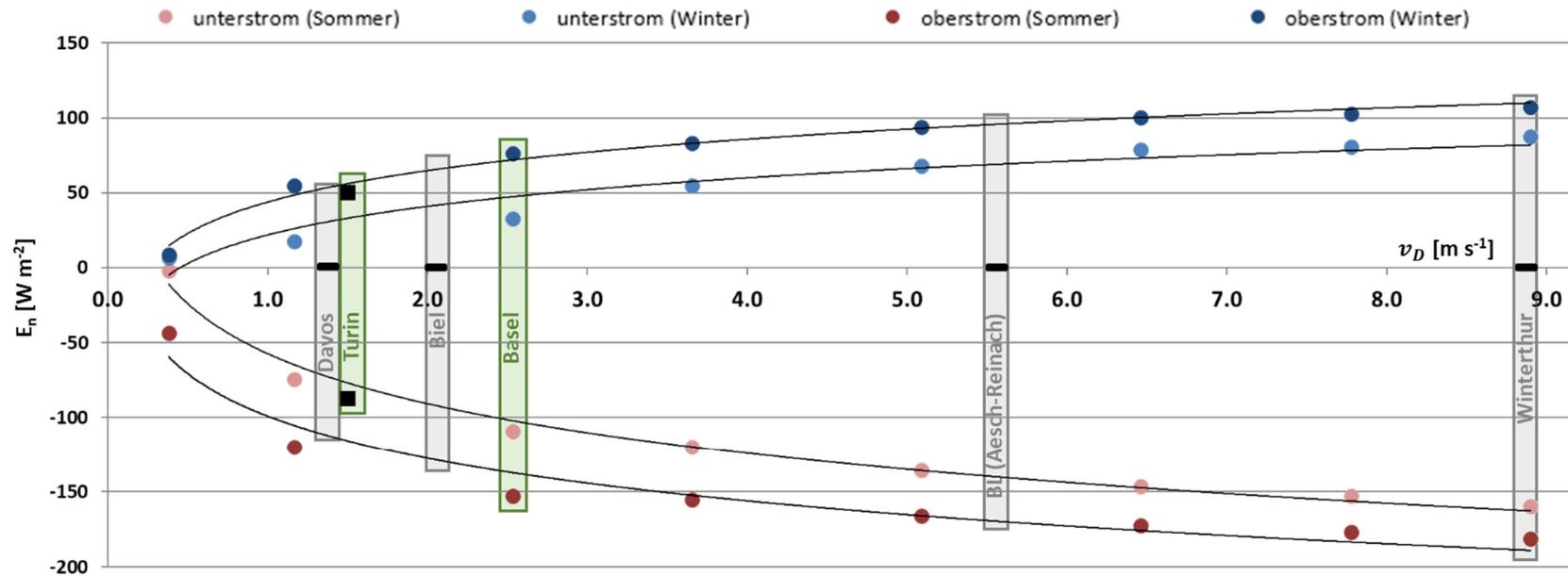


Abb. 31 Thermische Leistung der TAS im Winter- (blau, positive Werte, Gebäudeheizbetrieb) und Sommerbetrieb (rot, negative Werte, Gebäudekühlbetrieb) für verschiedene Grundwasserfliessgeschwindigkeiten in Lockergesteinsablagerungen (Szenarienanalyse Basel). Simulationsergebnisse und eine Ableitung thermischer Leistungen existieren gegenwärtig nur für Basel (grüner Balken, Tab. 4) und Turin (grüner Balken und schwarze Quadrate). Für Davos, Biel, Aesch-Reinach und Winterthur existieren lediglich Angaben zu Grundwasserfliessgeschwindigkeiten (Anhang F), die grauen Balken zeigen entsprechend mögliche Potentiale der thermischen Leistung in Abhängigkeit des TAS im Winter- und im Sommerbetrieb.



7 Rezeptbuch für die thermische Nutzung urbaner Tunnelbauwerke

Im Folgenden wird ein „Rezeptbuch“ für die thermische Nutzung des Untergrunds durch Tunnelbauwerke in Lockergesteins-Grundwasservorkommen vorgestellt. Es soll dem Vollzug, aber auch Architekten und Stadtplanern aufzeigen, welche Grundlagen für die Entwicklung von anwendungsorientierten Bewirtschaftungs-Werkzeugen notwendig sind, um bereits in der Planungsphase von urbanen Tunnelinfrastrukturen die Machbarkeit der thermischen Nutzung abschätzen zu können.

Schwerpunkt des Rezeptbuchs liegt auf den im Rahmen von ThePoTun evaluierten thermischen Anwendungen, einschliesslich TAS und der thermischen Nutzung von Grundwasser, welches in Dükersystemen zirkuliert. Es sei aber darauf hingewiesen, dass vor allem im Bereich von Stationsbauwerken auch weitere Kombination von GES und unterirdische geotechnische Strukturen, wie tiefe und flache Fundamente, Schlitzwände sowie Energie-Anker als Energiegeostrukturen als thermische Anwendungen in Betracht gezogen werden können. Diese thermischen Anwendungen wurden im Rahmen von ThePoTun nicht behandelt.

Abb. 32 zeigt schematisch das schrittweise Vorgehen für die Evaluation technischer Anwendungen für die thermische Nutzung von Tunnelbauwerken in Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Dabei nimmt der Detaillierungsgrad für notwendige Untersuchungen und Herangehensweisen von ersten Machbarkeitsstudien und der Evaluation des 3D-Tunnelverlaufs sowie des Energiepotentials bis zu Detailuntersuchungen und der Integration neuer thermischer Anwendungen in die urbane Energieplanung zu. Das Konzept berücksichtigt dabei sowohl kleinkalibrige S-Bahntunnel (oft ein-, maximal zweispurig) mit vergleichsweise geringem Durchmesser (Grössenordnung < 10 m) als auch grosskalibrige Autobahntunnel (mehrspurig und beide Fahrtrichtungen) mit vergleichsweise grossen Durchmesser (Grössenordnung > 10 m) des Bauwerkes. Dabei konzentrieren sich die thermischen Anwendungen für die S-Bahntunnel auf TAS, einschliesslich verschiedener System-Konfigurationen und saisonaler Betriebskonzepte, und für Autobahntunnel auf die thermische Nutzung von Grundwasser, welches in Dükersystemen zirkuliert (Drainagewasser).

7.1 Evaluation 3D-Tunnelverlauf

Im Rahmen einer ersten Evaluation und einer generellen Machbarkeitsstudie sollte der 3D-Tunnelverlauf im Untergrund beurteilt werden, bzgl.:

Geologie / Hydrogeologie:

- *Kartendarstellungen im GIS, welche den Streckenverlauf des Tunnelbauwerkes in Relation zur Grundwasser-ungesättigten und -gesättigten Zone der Lockergesteinen sowie den Festgesteinen im Projektperimeter zeigen (vgl. Abb. 4).*
- *Längsprofil entlang der Tunnelachse und Darstellung des Ab- und Auftauchens der Tunnelbauwerke sowie des Verlaufs im Untergrund (vgl. Abb. 3).*
- *Für das Gesamtverständnis der geologischen / hydrogeologischen Situation ist es empfehlenswert weiterhin charakteristische Längsprofile im Projektperimeter zu definieren (z.B. direkte Verbindung von Anfangs- und Endpunkten; für die S-Bahn «Herzstück» z.B. Bahnhof SBB bis Bahnhof St. Johann und Badischer Bahnhof).*
- *Erarbeitung von detaillierten Querprofilen unter anderen im Bereich der Tunnelportale, von Stationsbauwerken und Verzweigungen, sowie in Bereichen komplexer geologischer / hydrogeologischer Randbedingungen.*

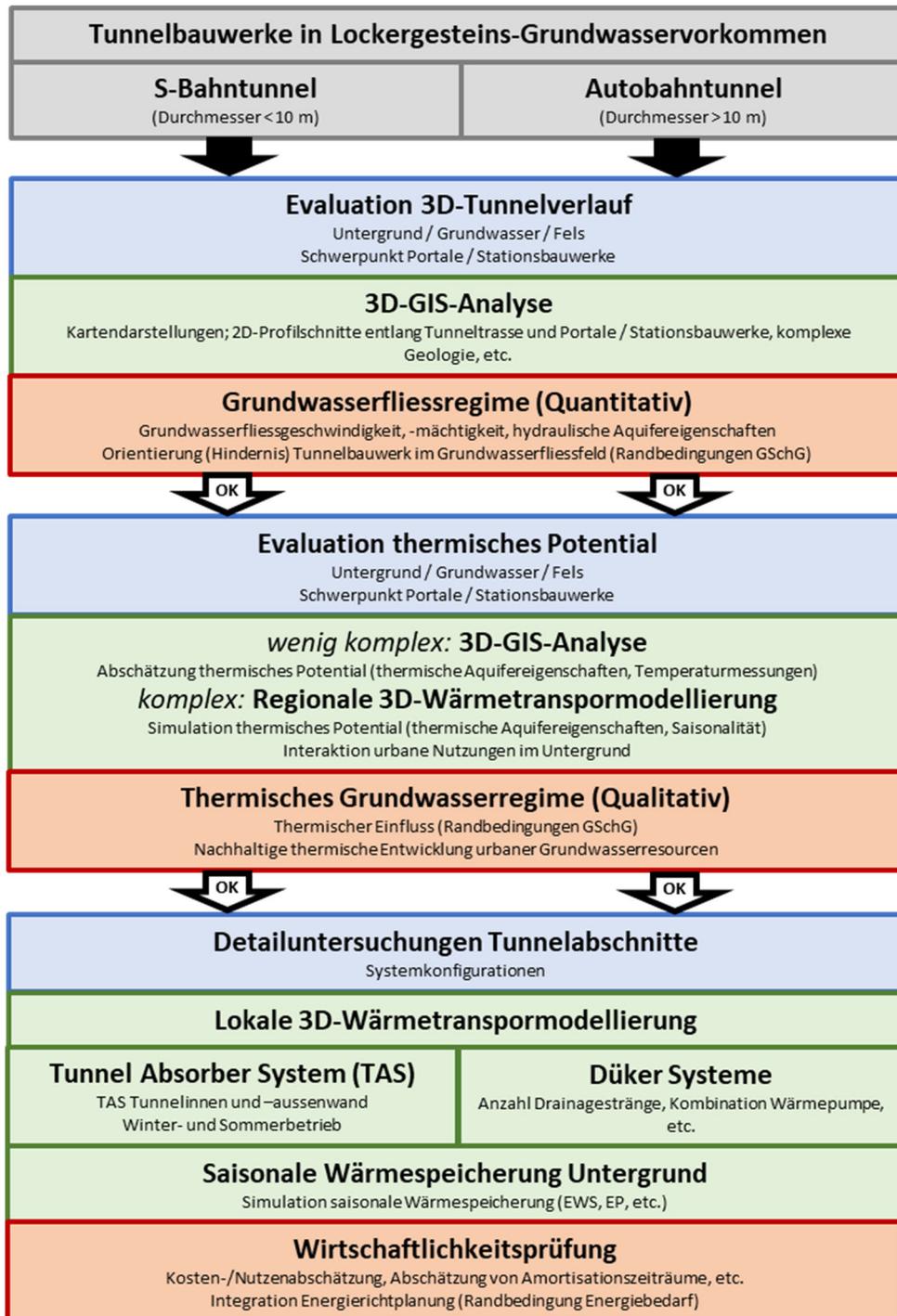


Abb. 32 Rezeptbuch und Herangehensweise für die Evaluation technischer Möglichkeiten und die thermische Nutzung von Tunnelbauwerken in Lockergesteins-Grundwasservorkommen mit Schwerpunkt auf kleinkalibrige S-Bahntunnel und grosskalibrige Autobahntunnel sowie verschiedenen thermischen Anwendungen, einschliesslich der saisonalen Wärmespeicherung im Untergrund. Eine Wirtschaftlichkeitsprüfung wurde im Rahmen von ThePoTun nicht behandelt.





Hydrogeologie / Hydrologie

- *Evaluation des geplanten Tunnelbauwerkes im Zusammenhang mit dem Grundwasserfließregime Streckenverlauf des Tunnelbauwerkes in Relation zur regionalen Grundwasserfließrichtung (senkrecht / parallel).
Auswertung hydrometrischer Messungen im Grundwasserleiter, einschliesslich Variabilität (minimale und maximale Grundwasserstände).
Falls ein Grundwassermodell vorhanden ist, bieten sich Auswertungen von Grundwasserbilanzen entlang des Streckenverlaufs des Tunnelbauwerkes und durch definierte Querschnitte an (bestenfalls für minimale, mittlere und maximale hydrologische Randbedingungen).*

Diese erste Evaluation ermöglicht bereits in einer frühen Projektphase die generelle Machbarkeit, auch im Zusammenhang mit quantitativen Aspekten des Grundwasserschutzes, zu beurteilen. Die quantitative Beurteilung des Einflusses von Tunnelbauwerken auf das Grundwasserfließregime erlaubt eine erste Einschätzung ob, z.B. für S-Bahn eine Realisation von TAS, für verschiedene Abschnitte realisierbar ist. Für grosskalibrige Tunnelbauwerke wie Autobahnen, und vor allem wenn diese senkrecht zur Grundwasserfließrichtung verlaufen, kann beurteilt werden für welche Abschnitte aufgrund des Grundwasserschutzes Dükersysteme für die Grundwasserdurchgängigkeit realisiert werden müssen, welche potenziell mittels Wärmetauschern auch thermisch genutzt werden können.

7.2 Evaluation thermisches Potential

Der Umfang weiterer Machbarkeits- und darauf aufbauenden Detailstudien für die vertiefte Evaluationen des thermischen Potentials der unterschiedlichen Tunnelbauwerke und für verschiedene thermische Anwendungen ist abhängig von der Komplexität des betrachteten urbanen Systems.

Urbane Systeme mit geringer Komplexität

- *In urbanen Gebieten, in welchen wenige Aktivitäten und Nutzungskonflikte des Untergrundes bestehen, kann eine erste Evaluation des thermischen Potentials mittels einfacher GIS-Analysen erfolgen (vgl. Anhang F), einschliesslich der Abschätzung von:
Grundwasserfließgeschwindigkeiten (siehe Kapitel 6)
Hydraulischer und thermischer Aquifereigenschaften (Zusammenstellung von Pumpversuchen und Messung thermischer Parameter, einschliesslich Wärmeleitfähigkeit und -kapazität)
Auswertung vorhandener Pegel- und Temperaturzeitreihen des Grundwassers (z.B. kantonale Grundwasserbeobachtungsmessnetze)*

Urbane Systeme mit hoher Komplexität

- *In urbanen Gebieten mit einer Vielzahl von Aktivitäten und sich gegenseitig konkurrenzierenden Nutzungen des Untergrundes, bedarf es Detailuntersuchungen und der Entwicklung von 3D-Wärmetransportmodellen, um hydraulische und thermische Beeinflussungen des Wärme- und Grundwasserregimes adäquat beurteilen zu können.*
- *Auf Grundlage einer Evaluation des regionalen Grundwasser- und Wärmetransports kann das Grundwasserdargebot und das energetische Potential räumlich quantifiziert und der zeitliche Verlauf des Wärmetransports im Untergrund für die verschiedenen GES ausgewertet werden. Neben einer räumlichen Optimierung von GES kann somit auch die saisonale Komponente von Wärmeverfügbarkeit und -bedarf zusammenhängend betrachtet werden. Zudem erlauben 3D-Wärmetransportmodelle eine Evaluation von verschiedenen System-Konfigurationen.*
- *Im Rahmen von ThePoTun wurde aufgezeigt, wie auf Grundlage von lokalen und regionalen 3D-*



Wärmetransportmodellen, sowohl TAS als auch die thermische Anwendung von Dükersystemen, modelltechnisch berücksichtigt werden können. Die Parametrisierung (betrieblichen Randbedingungen) der verschiedenen GES können den ThePoTun-Dimensionierungen entnommen und für die zu evaluierenden Infrastrukturen entsprechend angepasst werden (Kapitel 3, Anhänge D&E). Auch können die im Rahmen von ThePoTun untersuchten Systemkonfigurationen sowie Auswerteroutinen übernommen werden.

Diese weitergehenden Evaluationen erlauben eine Beurteilung der Machbarkeit bzgl. thermischen Potential und im Zusammenhang mit qualitativen Aspekten des Grundwasserschutzes. Abschliessend bedarf es einer Wirtschaftlichkeitsprüfung, welche im Rahmen von ThePoTun nicht behandelt wurde.



8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine nachhaltige Untergrundplanung, einschliesslich Wärmemanagement von Untergrundressourcen, sowie eine koordiniertere effiziente thermische Nutzung sind unabdingbar im Zusammenhang mit Fragen der Debatte über Klimawandel und Energiewende, sowie um formulierte Entwicklungsziele, wie z.B. der 2000W Gesellschaft, zu erreichen.

Im Rahmen von ThePoTun wurden zwei Schwerpunkte bearbeitet, einschliesslich (A) einer systematischen Auswertung des Potentials zur thermischen Nutzung des urbanen Untergrundes mittels unterschiedlicher thermischer Anwendungen verschiedener Tunnelbauwerke, einschliesslich S-Bahn- und Autobahntunnel; und (B) der Evaluation der saisonalen Wärmespeicherung im Untergrund.

8.1 Thermische Nutzung von Tunnelinfrastrukturen

Auf Grundlage einer Evaluation des regionalen Grundwasser- und Wärmetransports konnte das räumliche Grundwasserdargebot und das Potential der thermischen Nutzung von Tunnelinfrastrukturen quantifiziert und der zeitliche Verlauf des Wärmetransports im Untergrund ausgewertet werden.

Für die Bewertung des thermischen Potentials von urbanen Tunnelinfrastrukturen wurden regionale und lokale 3D-Wärmetransportmodelle entwickelt. Mit den Modellen können die erforderlichen Detailberechnungen von Wärmetransportprozessen im Bereich der Tunnelinfrastrukturen, einschliesslich des thermischen Potentials sowie der thermischen Beeinflussung des Grundwassers in Basel, bestimmt werden. Sowohl lokal als auch regional konnte die Dynamik hydrodynamischer und thermischer Prozesse und die zahlreichen Wechselwirkungen der verschiedenen natürlichen und anthropogenen Randbedingungen untersucht und quantifiziert werden.

In Abhängigkeit vom Tunneltyp (S-Bahn oder Autobahn) sowie der Lage in Bezug zu den geologischen und hydrogeologischen Settings im Stadtgebiet von Basel sind verschiedene Lösungen für oberflächennahe GES denkbar. So wurden in der Tunnelwand installierte Wärmeabsorbersysteme (TAS) sowie die thermische Nutzung von Wasser, welches in Dükersystemen zirkuliert (Drainagewasser), evaluiert. Die Modelle ermöglichten somit eine erste Bewertung der operativen und technischen Machbarkeit von TAS und einer Realisierung von Wärmetauschern in Dükersystemen in verschiedenen urbanen Settings.

Auf Basis von lokalen 3D-Wärmetransportmodellen wurde der Einsatz von TAS in Tunnelabschnitten, welche senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung verlaufen, evaluiert. Mit regionalen 3D-Wärmetransportmodellen konnte das gesamte geothermische Potential für die Installation von TAS für den geplanten Doppel-S-Bahntunnel «Herzstück» abgeleitet werden. Für Tunnelabschnitte, welche sich in den Grundwasser-gesättigten Lockergesteinen und in der Nähe von Tunnelportalen befinden, ist ein Betrieb von TAS in der äusseren Tunnelwand am effizientesten. Unter Berücksichtigung eines konservativen saisonalen Leistungsfaktors (SEER = 3), könnte im Sommer das vergleichsweise kühlere Grundwasser dazu genutzt werden, um durch zwei 736 bzw. 284 m lange Tunnelabschnitte 3.7 bzw. 1.4 MW Abwärmeleistung oder 5.8 bzw. 2.1 GWh/Jahr Abwärmeenergie aus einer Kältemaschine abzuführen. Dies würde allerdings mit einem gesetzlich unzulässigen Wärmeeintrag in den Lockergesteins-Grundwasserleiter einhergehen. Andererseits könnte, unter Berücksichtigung eines konservativen saisonalen Leistungsfaktors (SCOP = 4) im Winter eine Energiemenge von 5.2 bzw. 1.9 GWh/Jahr, bei einer Wärmeleistung von bis zu 1.9 bzw. 0.7 MW, entnommen und mittels Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau gebracht werden (Wärmeentzug Lockergesteins-Grundwasserleiter).

Die ersten Ergebnisse zeigten jedoch auch, dass eine Betrachtung des thermischen Potentials der TAS in S-Bahn Tunnelbauwerken, unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Vorgaben des Grundwasserschutzes, im Sommerbetrieb für Kühlzwecke gesetzlich nicht möglich und auch nicht effizient ist.



Deshalb konzentrierte sich die nachfolgende Projektbearbeitung von ThePoTun auf die Wärmeentnahme zur Tunnel- und Grundwasserkühlung. So konnte gezeigt werden, dass TAS in der äusseren Tunnelwand eingesetzt werden können, um dem Untergrund oder dem Grundwasser Wärme zu entziehen (Abkühlung des Grundwassers). Für das untersuchte Betriebsszenario konnte gezeigt werden, dass das urban erwärmte Grundwasser um bis zu 4 K abgekühlt werden könnte. Andererseits, konnte auch gezeigt werden, dass mit einer Installation von TAS in der inneren Tunnelwand dem Tunnelinneren Wärme entzogen werden kann (Abkühlung der Tunnelinnenluft). Für das untersuchte Betriebsszenario konnte gezeigt werden, dass in Abhängigkeit der Jahreszeit, 46 bis 101 W m⁻² Wärme über die Tunnelwand und das TAS der Tunnelinnenluft entzogen werden könnte. Dieser Wärmeaustausch ist um ein Vielfaches höher, als der Wärmeeintrag des Bahnbetriebs selbst, welcher geschätzt in der Grössenordnung von 2.2 bis 2.6 W m⁻² liegt.

Die Evaluation einer Installation von Wärmetauschern in Dükersystemen für verschiedene Abschnitte des geplanten Autobahnbauwerks «Rheintunnel» zeigte, dass bei hohen Grundwassertemperaturen und nur an Standorten an denen der Tunnel senkrecht zur regionalen Grundwasserströmung verläuft, eine thermische Nutzung (nur Gebäudeheizbetrieb mit Wärmeentzug Grundwasser) des Grundwassers geeignet ist. Unter Berücksichtigung eines konservativen saisonalen Leistungsfaktors (SCOP) könnten für diese Bedingungen entlang eines 320 m langen Tunnelabschnittes Wärmeleistungen für Heizzwecke (z.B. Warmwasser) von bis zu 0.4 im Sommer bzw. 0.8 MW im Winter und Wärmeenergien von 1.1 im Sommer und 2.1 GWh im Winter bereitgestellt werden (Wärmeentzug Drainagewasser). Somit stellen Wärmetauscher in Dükersystemen eine ideale Infrastruktur dar, da Düker aus Gründen des Grundwasserschutzes oft ohnehin realisiert werden müssen. Es ist jedoch zu beachten, dass für Dükersysteme technische Wartungsmöglichkeiten vorgesehen werden müssen.

8.2 Wärmespeicherung

Da Überschusswärme vor allem im Sommer anfällt lag der zweite Schwerpunkt des Projektes auf der saisonalen Wärmespeicherung im Untergrund. Als Speicherstrategie wurden oberflächennahe Erdwärmesonden (EWS) und Energiepfählen (EP) untersucht.

Berechnete Energieerträge von EWS für den Standort Basel liegen zwischen 21 und 36 W m⁻¹. Neu konnten die vorgenommenen Simulationen zeigen, dass für die geologischen Standortgegebenheiten im Untergrund von Basel, EWS am effizientesten bis in ca. 155 m Tiefe funktionieren. Berechnete Energieerträge von EP liegen zwischen 28 und 47 W m⁻¹. Auch hier zeigen die vorgenommenen Simulationen erstmals, dass für die geologischen Standortgegebenheiten im Untergrund von Basel, EP am effizientesten bis in ca. 30 m Tiefe funktionieren. Für beide GES ist die Effizienz im Sommerbetrieb sehr gering und sollte lediglich dahingehend betrachtet werden, dass die vom TAS abgeführte Wärme, einen Beitrag zur thermischen Regeneration der unterliegenden Felsformationen und somit zu einer leichten Effizienzsteigerung der jeweiligen GES im Winterbetrieb leisten kann.

Berechnungen mit EWS- und EP-Feldern zeigten, dass aufgrund des gewählten Sondenabstandes von 5 m und den lokalen thermischen Eigenschaften des Felsuntergrundes, die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen GES gering ist. Nur die zentral in den EWS- und EP-Feldern gelegenen Systeme zeigen eine Verringerung der Effizienz von 15 % (EWS) und 12 % (EP). Durch die Wärmespeicherung im Sommer nimmt der Energieertrag sowohl für die EWS (Faktor 3) als auch für die EP (+ 20 %) im Vergleich mit einem konventionellen EWS-Betrieb zu.

8.3 Anwendung, Weiterentwicklung & Empfehlungen

Das Projekt ThePoTun nimmt Bezug auf den «Energie-Richtplan von Basel-Stadt» und befasst sich mit dem Ressourcenmanagement und der Nutzung des oberflächennahen Untergrundes von urbanen



Grundwasserkörpern. Resultate aus ThePoTun konnten als Grundlage bei der Erstellung des «Energie-Richtplanes von Basel-Stadt» einfließen. Nicht zu unterschätzen ist auch, dass eine Nutzung von Tunnelbauwerken zur Gewinnung von erneuerbarer Wärmeenergie für die Versorgung der angrenzenden Anwohner einen positiven Effekt bei der Akzeptanz der Anwohner gegenüber einer Tunnelbaumaßnahme darstellen kann. Es wird empfohlen, dass das nun vorhandene Wissen zum Potential der thermischen Nutzung urbaner Tunnelbauwerke bei der Konkretisierung des «Energie-Richtplan von Basel-Stadt» weitergehend Berücksichtigung findet.

Das präsentierte «Rezeptbuch» zeigt die Möglichkeiten auf, wie mit vergleichsweise einfachen Methoden erste Potentialanalysen für die thermische Nutzung von urbanen Tunnelbauwerken in anderen Städten vorgenommen werden können, welche auch in diesen Städten in die Energierichtplanung integriert werden sollte. Im Rahmen der Projektbearbeitung von ThePoTun konnten ökonomische Aspekte, einschliesslich einer Kosten-/Nutzenabschätzung und Abschätzung von Amortisationszeiträumen, nicht explizit behandelt werden. So sollte eine differenzierte Wirtschaftlichkeitsprüfung bei Konkretisierung der Projektierung stattfinden. Das «Rezeptbuch» zeigt auch auf, mit welchen Basisdaten und Herangehensweisen (Anforderungen an technische Unterlagen für die Planung) es möglich ist, den Einfluss von Tunnelstrukturen und die Implementierung von TAS oder der thermischen Nutzung von Dükersystemen in Verbindung mit Speicheranwendungen in verschiedenen Städten zu untersuchen und miteinander zu vergleichen.

Die für den Untergrund von Basel-Stadt erarbeiteten Modellwerkzeuge dienen als Instrumente für die Evaluation von Auswirkungen der Tunnelbauwerke (v.a. Portalbereiche, Zwischenstationen) auf das Grundwasserfließregime und werden fortlaufend weiterentwickelt, wobei neue geologische und hydrogeologische Informationen Berücksichtigung finden. Für andere urbane Standorte kann die Parametrisierung, einschliesslich betrieblicher Randbedingungen, verschiedener GES den ThePoTun-Dimensionierungen entnommen und für die zu evaluierenden Infrastrukturen entsprechend angepasst werden. Auch können die im Rahmen von ThePoTun untersuchten Systemkonfigurationen sowie Auswerterroutinen für andere urbane Standorte übernommen werden.

Die Resultate der Temperaturmessungen im Tunnelbauwerk «Nordtangente» zeigen, dass die Tunnelinnenlufttemperaturen im Winterhalbjahr niedriger sind und tendenziell zu einer Abkühlung des Grundwassers führen. Im Sommerhalbjahr hingegen findet ein Wärmeeintrag in den Grundwasserleiter statt. Solche Studien erlauben eine realitätsnahe Beschreibung des Verlaufs der Tunnelinnenlufttemperatur, nicht nur für existierende Tunnelbauwerke, sondern auch bei der Evaluation von thermischen Einflüssen geplanter Tunnelbauprojekten wie dem «Rheintunnel» auf urbane Untergrundressourcen. Sowohl bei der Projektierung als auch bei der Auslegung solcher Anlagen können Resultate solcher Pilotstudien von entscheidender Bedeutung sein.

Die wissenschaftliche Basis und die entwickelten Werkzeuge sollen die Koordination und Spezifizierung von geothermischen Anwendungen, die in frühen Stadien der Planung und Projektierung grosser Infrastrukturprojekte angemessen sind, ermöglichen. Mit ThePoTun konnte aufgezeigt werden, dass die entwickelten Methoden und Werkzeuge anwendbar sind, um die allgemeine Machbarkeit zur thermischen Nutzung von Tunnelbauwerken und der thermischen Speicherung im Untergrund zu bewerten.

Dabei sollten Aspekte der «Energienutzung und Abwärme von Untergrundstrukturen» sowie umweltrelevante Aspekte bereits in einer frühen Phase der Projektierung und Planung von Infrastrukturprojekten thematisiert werden. Die Nutzung von Tunnelinfrastrukturen zur thermischen Nutzung des Untergrundes können eine Lösung zum Erreichen dieser ehrgeizigen Ziele sein.



Aktivitäten, Synergien & Publikationen

Aktivitäten und Publikationen im Zusammenhang mit dem Projekt ThePoTun.

Forschungsprojekte

Mit folgenden kantonalen und nationalen Projekten konnten während der Projektbearbeitung Synergien genutzt werden:

Bundesamt für Umwelt (CH) BAFU-Projekt «Energetische Potenziale - Nutzung Oberflächenwasser für künstliche Grundwasseranreicherung» 00.5044.PZ / 05C10FA3F (01.07.2020-31.12.2021)

Bundesamt für Umwelt (CH) BAFU-Projekt «Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteinsgrundwasservorkommen» 15.0003.PJ / Q244-0808 (abgeschlossen)

Grossräumige hydrogeologische, geologische und geotechnische Grundlagenerarbeitung für die Planung der Tunnelbauprojekte der S-Bahn «Herzstück» (BGA-BS-138-141, 142-146, 148) und der Autobahn «Rheintunnel» (BGA-RegionBasel-21, BGA-BL-170A, BGA-BL-170B, BGA-BL-173)

«Rezeptbuch» für die energetische Nutzung von Untergrundstrukturen - Erarbeitung von Grundlagen für die Entwicklung von anwendungsorientierten Bewirtschaftungs-Werkzeugen im Vollzug. Auftrag AUE BS, Abteilung Energie (BGA-BS-147)

Zusammenarbeit mit dem AUE BS (Abteilung Energie) sowie mit dem Ingenieurbüro Planar AG zur Erarbeitung von Grundlagen bei der Erstellung des «Energie-Richtplanes von Basel-Stadt»

BAFU Projekt 15.0003.PJ / Q244-0808 «Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen»

Veröffentlichungen

Previati A, Epting J, Crosta GB (2021) The subsurface urban heat island in Milan (Italy) - A modeling approach covering present and future thermal effects on groundwater regimes. *Science of The Total Environment*, 152119

Becker D, Epting J (2021) Urbane Wärmeinseln auch im Untergrund, *AQUA & GAS* No 11, 78-84

Becker D, Epting J (2021) Thermal impact of urban subsurface structures on groundwater temperatures in the city Basel. Thermischer Einfluss urbaner Untergrundstrukturen auf die Grundwassertemperaturen im Kanton Basel-Stadt. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 26, 269–288 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00767-021-00483-1>

Epting J, Baralis M, Künze R, Mueller MH, Insana A, Barla M, Huggenberger P (2021) Thermal activation of tunnel infrastructures: city-scale solutions for Basel, Switzerland. Barla M et al. (Eds.) *Challenges and Innovations in Geomechanics - Proceedings of the 16th International conference of IACMAG 2021*, pp. 1–9, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64518-2_118

Epting J, Baralis M, Künze R, Mueller MH, Insana A, Barla M, Huggenberger P (2019) Geothermal Potential of Tunnel Infrastructures – Development of Tools at the City-Scale of Basel, Switzerland. *Geothermics*, 10.1016/j.geothermics.2019.101734

Garcia-Gil A, Goetzl G, Klonowski MR, Borovic S, Boon DP, Abesser C, Janza M, Herms I, Petitclerc E, Erlstrom M, Holecek J, Hunter T, Vandeweyer VP, Cernak R, Moreno MM, Epting J (2020) «Governance of shallow geothermal energy resources», *Energy Policy*, 138, S. 11. doi: 11128310.1016/j.enpol.2020.111283



- Epting J, Böttcher F, Mueller MH, García-Gil A, Zosseder K, Huggenberger P (2020) City-scale solutions for the energy use of shallow urban subsurface resources – Bridging the gap between theoretical and technical potentials. *Renew Energ* 147, 751-763
- Epting J, Mueller MH, Genske D, Huggenberger P (2019) Grundwasser zum Heizen und Kühlen. *TEC21*, Ausgabe 6. September 2019, No. 36
- Scheidler S, Anders B, Regli C, Bolay S, Huggenberger P (2019) Geothermal use of an Alpine aquifer – Davos pilot study. *Grundwasser*, DOI: 10.1007/s00767-019-00433-y.
- Scheidler S, Anders B, Huggenberger P (2019) GRETA Davos, Geologisches Modell – Grundwassermodellierung, Technischer Bericht (BGA Graubünden 4), Angewandte und Umweltgeologie, Universität Basel
- Epting J, Huggenberger P (2018) Verständnis hydraulischer und thermischer Prozesse in urbanen Gebieten als Grundlage für die Parametrisierung von Wärmetransportmodellen. Invited talk KGM-MODREG-Abschlusskonferenz Hotel Schloss Seggau, Leibniz, Österreich (20.11.2018)
- Scheidler S, Anders B, Dresmann H, Huggenberger P (2018) Integration Geological Structures into 3D Numerical Groundwater Flow Models as the basis for geothermal management of alpine aquifer. Poster at COMSOL Conference 2018, Lausanne
- Huggenberger P, Scheidler S, Anders B (2018) Integrating geological structures into hydraulic-geothermal models to evaluate the productivity of alpine geological systems. GRETA und GNA-MA Abschlusspräsentation 18 Juli 2018, Chur, Schweiz

Kurse / Präsentationen / Öffentlichkeitsarbeit

- Epting J (18.08.2020): Invited Talk Hofmann-La Roche AG «Energie als Abfall? – Thermisches Nutzungspotential urbaner Grundwasserressourcen»
- Teilnahme Uni am Markt (2020) Themen: (1) Unterirdische Abfallwärme: das thermische Potenzial von Tunnelinfrastrukturen in der Region Basel und (2) Erdwärme nutzen im Kanton Basel-Landschaft: Tools zur Risikobeurteilung und Beschleunigung von Bewilligungsverfahren. <https://www.unibas.ch/de/Aktuell/-Veranstaltungen/Uni-am-Markt.html>
- CAS ETH in Applied Earth Sciences on the subject of «shallow subsurface geothermal energy» from 10 to 13. September 2019 in Zurich. Lecture and workshop on «urban temperature development and its significance for groundwater heat utilisation».
- Epting J, Huggenberger P (2019) Urban Geology – Process-Oriented Concepts for Adaptive and Integrated Resource Management. Invited introduction talk for pico session HS8.2.7 - Urban groundwater: a strategic resource. *EGU General Assembly, Geophysical Res. Abstr.*, Vol. 21, EGU 2019-5755, 2019
- Huggenberger P, Anders B, Scheidler S (2018) The role of hydraulic models in the evaluation-process of geothermal use of alpine aquifers; Example of the touristic center Davos, Switzerland. *Der Geothermie Kongress, Essen*
- Scheidler S, Anders B, Huggenberger P (2018) Geothermal use of an alpine aquifer – pilot study Davos. *Der Geothermie Kongress, Essen*
- Epting J, Huggenberger P, Müller MH (2018) Thermal Management of Urban Subsurface Resources - Delineation of Boundary Conditions. Invited seminar talk at the Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, 13 April 2018, Torino, Italia



Mitgliedschaften, Kommissionen

Epting J, Affolter A: MC-Mitglied COST action CA 18219 Geothermal-DHC (European research network for including geothermal technologies into decarbonized heating and cooling grids)

Epting J: Mitglied der Schweizer Hydrologischen Kommission (CHy)

Abschlüsse, Betreuung von Master- und Bachelorarbeiten

MSc Roth E (2021 – today): "Geothermal modeling - Interrelated evaluation of measurement data from geothermal boreholes and heat transport in the geological subsurface"

MSc Chavez Caceres AM (2021): «Application of Electrical Resistivity Tomography (ERT) to detect thermal impacts of artificial groundwater recharge». Betreuung: Epting J, Scheidler S

BSc Becker D (2020): «Auswirkungen urbaner Untergrundstrukturen auf die Grundwassertemperaturen». Betreuung: Epting J

BSc Remund R (2020): «Mikrobiologischer Zustand urbaner Grundwasserressourcen». Betreuung: Epting J, Zopfi J

Epting J (15.07.2020) PhD Matteo Baralis: «Optimisation of geothermal resources in urban areas». Ernennung zum Mitglied der Prüfungskommission durch das Politecnico di Torino, Italien

Epting J (05.11.2019): Antrittsvorlesung Habilitation «Energie als Abfall? – Thermisches Nutzungspotential urbaner Grundwasserressourcen»

PhD Kandidat Previati A (2019): Wissenschaftlicher Austausch «Consideration of aquifer heterogeneity for heat-transport modelling». Università degli Studi di Milano-Bicocca, Dept. of Earth and Environmental Sciences. Betreuung: Epting J

MSc Uhlig A (2019): «Regional modeling of heat transport in urban aquifers (Basel, Switzerland)»; Co-operation with TU Dresden. Betreuung: Epting J

BSc Lutz C (2019): «Entwicklung der Grundwassertemperatur während der Hitzesommer». Betreuung: Epting J, Scheidler S

18 - 22.02.2019: Short Term Scientific Mission STSM-COST Gabi TU1405 PhD Matteo Baralis: «Development of concepts for the management of thermal resources in urban areas». Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

STSM - COST 1405 (08.10.2018 - 27.10.2018): Development of concepts for the management of thermal resources in urban areas. Visiting scientist Matteo Baralis Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Torino, Italia

Verdankung

An dieser Stelle möchten sich die Autoren bei der Begleitgruppe bedanken, welche sich im Rahmen der ThePoTun-Projektbearbeitung viermal traf, um die Projektergebnisse zu diskutieren und Vorschläge für weitergehende Untersuchungen einbrachte. Die Begleitgruppe umfasste: (1) das Bundesamt für Strassen ASTRA, (2) das Amt für Umwelt und Energie Kanton BS, (3) das Amt für Umweltschutz und Energie Kanton BL, (4) die Industriellen Werke Basel – IWB, (5) die Jauslin Stebler AG (Tunnelbau), und (6) d'INTEGRALIA SA. Weiterhin wollen wir uns bei Céline Weber und Rita Kobler für die Projektbegleitung durch das BFE als auch für das Korrekturlesen des Berichts recht herzlich bedanken. Herzlichen Dank auch an Stephan Février, Projektleiter Energie der Holinger AG für das Korrekturlesen durch die Brille



eines Energieingenieurs, sowie Emanuel Huber und Eric Zechner für die französische Übersetzung der Zusammenfassung.

Referenzen

- Barla, M., Di Donna, A., 2016. Concio energetico modulare prefabbricato, rivestimento per gallerie realizzato con una pluralità di tali conci e metodo per scambiare calore in una galleria mediante la realizzazione di un rivestimento con una pluralità di tali conci, Italian Patent (in Italian). Italian Patent 102 016 000 020 821, .
- Barla, M., Di Donna, A., 2018. Energy tunnels: concept and design aspects. *Underground Space* 3, 268-276.
- Barla, M., Di Donna, A., Insana, A., 2019. A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel. *Tunn Undergr Sp Tech* 87, 1-14.
- Barla, M., Di Donna, A., Perino, A., 2016. Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics* 61, 104–113.
- Becker, D., Epting, J., 2021. Thermischer Einfluss urbaner Untergrundstrukturen auf die Grundwassertemperaturen im Kanton Basel-Stadt. *Grundwasser*.
- BFE, 2006. Geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0 – 500 m). Datenbank für Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Gesteinsdichte und Porosität (Überarbeitung).
- Bloemendal, M., Olsthoorn, T., 2018. ATEs systems in aquifers with high ambient groundwater flow velocity. *Geothermics* 75, 81-92.
- Botelle, M., Payne, K., Redhead, B., 2010. Squeezing the heat out of London's Tube. *P I Civil Eng-Civ En* 163, 114-122.
- Brandl, H., 2016. Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds. *Procedia Engineer* 165, 747-764.
- Dresmann, H., Huggenberger, P., 2011. GeORG sucht die Geopotenziale. *Bulletin Geothermie.ch* 51.
- Dresmann, H., Huggenberger, P., 2012. Geologisches 3D-Modell der Region Basel als Planungsinstrument. *Geoscience actuel*, 23-29.
- Dresmann, H., Huggenberger, P., Epting, J., Wiesmeier, S., Scheidler, S., 2013. A 3D spatial planning tool – application examples from the Basel region, in: team, G.-p. (Ed.), *Proceedings of the 33rd GOCAD Meeting*, 17.-20. Sep. 2013, Nancy, France.
- Dresmann, H., Wiesmeier, S., Simovic Rota, J., Bernet, K., Huggenberger, P., 2011. Geo-physical Parameters (hydraulic and thermal) of basement-rocks in the region of Basel, in: (BFE), B.f.E. (Ed.). *Applied and Environmental Geology*, Department of Environmental Sciences, University of Basel.
- Epting, J., Baralis, M., Kunze, R., Mueller, M.H., Insana, A., Barla, M., Huggenberger, P., 2020a. Geothermal potential of tunnel infrastructures - development of tools at the city-scale of Basel, Switzerland. *Geothermics* 83.
- Epting, J., Böttcher, F., Mueller, M.H., García-Gil, A., Zosseder, K., Huggenberger, P., 2020b. City-scale solutions for the energy use of shallow urban subsurface resources – Bridging the gap between theoretical and technical potentials. *Renew Energ* 147, 751-763.
- Epting, J., Handel, F., Huggenberger, P., 2013. Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 1851-1869.
- Epting, J., Huggenberger, P., 2013. Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies - Definition of a potential natural state. *Journal of Hydrology* 501, 193-204.
- Epting, J., Huggenberger, P., Rauber, M., 2008. Integrated methods and scenario development for urban groundwater management and protection during tunnel road construction: a case study of urban hydrogeology in the city of Basel, Switzerland. *Hydrogeology Journal* 16, 575-591.



- GeORG-Projektteam, 2013. Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG, Teil 2: Geologische Ergebnisse und Nutzungsmöglichkeiten, Freiburg i. Br., p. 346.
- GSchV, 2001. Gewässerschutzverordnung (regulation for water protection), Switzerland.
- Häring, M., 2002. Sondierbohrung Otterbach, Basel. Der erste Schritt zur Entwicklung eines geothermischen Heiz-Kraftwerks nach dem Hot-Dry-Rock Verfahren. Bull. angew. Geol. 7, 19-30.
- Markle, J.M., Schincariol, R.A., Sass, J.H., Molson, J.W., 2006. Characterizing the two-dimensional thermal conductivity distribution in a sand and gravel aquifer. Soil Science Society of America Journal 70, 1281-1294.
- Miara, M., Günther, D., Kramer, T., Oltersdorf, T.-., Wapler, J., 2011. Heat pump efficiency: analysis and evaluation of heat pump efficiency in real-life conditions. Fraunhofer ISE.
- Moormann, C., Buhmann, P., Westrich, B., 2018. Web-based Application for the Investigation of thermally activated Tunnels. Tunnel Jg. 37.2018, Heft 6, 42-54.
- Mueller, M.H., Huggenberger, P., Epting, J., 2018. Combining monitoring and modelling tools as a basis for city-scale concepts for a sustainable thermal management of urban groundwater resources. Science of the Total Environment 627, 1121–1136.
- Nicholson, D.P., Chen, Q., de Silva, M., Winter, A., Winterling, R., 2014. The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK. P I Civil Eng-Eng Su 167, 118-134.
- Rognon, F., Marco, P., Chappuis, B., Moradpour, E., Calame, N., 2019. Feasibility Study on the Implementation of Energy Recovery Tunnel Segmental Lining in the Lot 3 Tunnel on Railway Line 16 of the Grand Paris Express. Springer International Publishing, Cham, pp. 203-210.
- Schärli, U., Kohl, T., 2002. Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete, Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik. SGPK, p. 140.
- Schlosser, T., Schmidt, M., Schneider, M., Vermeer, P., 2007. Potenzial der Tunnelbaustrecke des Bahnprojektes Stuttgart 21 zur Wärme- und Kältenutzung, Schlussbericht, Universität Stuttgart.
- Schmidt, T., Pauschinger, T., Sørensen, P.A., Snijders, A., Djebbar, R., Boulter, R., Thornton, J., 2018. Design Aspects for Large-scale Pit and Aquifer Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling. Energy Procedia 149, 585-594.
- Unterberger, W., Hofinger, H., Grünstäudl, T., Adam, D., Markiewicz, R., 2004. Utilization of Tunnels as Source of Ground Heat and Colling – Practical Applications in Austria. Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS, Kyoto, 421–426.
- VDI-Wärmeatlas, 2006. 10th Edition, VDI Buch. Springer, Berlin.
- VDI, 2019. Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, in: Umwelt, V.-G.E.u. (Ed.), p. 139.



Anhang A: Literaturrecherche thermische Nutzung von Tunnelstrukturen

Standort – Settings <i>Status</i>	Technische Anwendung (Typ Absorber) Potential / Wirkungsweise	Projekt / Referenz
Genf, Schweiz: Tunnelbauprojekt CEVA <i>Studie, nicht realisiert</i>	Flächenkollektorsystem spez. Entzugsleistung 30 Wm^{-2} Saisonale Heiz- und Kühlzyklen	
Unterinntal, Österreich: Tunnel Jenbach (Eisenbahntunnel) <i>Pilotversuch</i> Tunnel (3470 m) liegt in Grundwasser führenden Sand- und Kieslagen	Energietübbing (4700 m, \varnothing 25 mm) über 54 m mit einer Oberfläche von 2200 m^2 Versorgung: Heizenergie Gemeindebauhof	Franzius (2011); Franzius and Pralle (2011); Frodl et al. (2010)
Wien, Österreich: U2/2-Taborstrasse, U2 (U-Bahnlinie) <i>Pilotversuch</i> Tunnel (9 km) liegt im Grundwasserbegleitstrom der Donau im Quartär sowie in Grundwasser führenden Sanden des Tertiärs	Energiebodenplatten, Energieschlitzwände, Energievliese (500 m^2 flächig) spez. Entzugsleistung [Wm^{-2}]: 15 - 30 Installierte Gesamtenergiekapazität [kW]: 10	
Wien, Österreich: Lainzer Tunnel (Eisenbahntunnel) <i>Pilotversuch</i> 1.7 km	8 Energievliesbahnen (flächig 32.9 m^2 , 4 für Energieentzug, 4 für Energieeintrag) spez. Entzugsleistung [Wm^{-2}]: 15 - 30 21 Energieanker (Nadelstichartig, 2-4 m Abstände, 12 m Länge) spez. Entzugsleistung [Wm^{-2}]: 8 - 12 Installierte Gesamtenergiekapazität [kW]: 5	Unterberger et al. (2004)
Stuttgart, Deutschland: U6-Stadtbahnanschluss Fasanenhof (U-Bahnlinie) <i>Pilotversuch</i> Tunnel (380 m) in Sandstein ($1 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$)	Flächenabsorber in Tunnelinnenschale (800 m, \varnothing 25 mm, 2 Blöcke a 10 m) 360 m^2 geothermisch aktiviert Versorgung: Klimatisierung Betriebsraum	Geimer (2013) Schneider and Vermeer (2010)
Stuttgart, Deutschland: Fildertunnel (Eisenbahntunnel) <i>Studie</i>	Energietübbing spez. Entzugsleistung [Wm^{-2}]: 10 - 30 Energievliesbahnen; Installierte Gesamtenergiekapazität [kW]: 65 kW	Schlosser et al. (2007)



Standort – Settings	Technische Anwendung (Typ Absorber)	Projekt / Referenz
Status Schweiz: Haberbach (Versuchsstollen) Fels-/ Tunneltemperatur 14 – 15 °C <i>Pilotversuch</i>	Potential / Wirkungsweise Tunnelabsorbersysteme (Innen- & Aussenseite) Bewässerungssystem (Simulation Grundwasserfluss) spez. Normwärmeleistung [Wm^{-2}]: 25 spez. Jahreswärmeentzug [$\text{kWhm}^{-2}\text{a}^{-1}$]: ca. 47	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln TP Pilotversuch (2016; FGU 2012/005) und TP Systemevaluation (2010; FGU 2008/006)
Schweiz: Gotthard (Strassentunnel) <i>realisiert</i>	Bergwasser Wärmeleistung [MWh_a]: 860–1.440 Versorgung: Autobahnwerkhof	
Schweiz: Furka (Eisenbahntunnel) <i>realisiert</i>	Bergwasser Wärmeleistung [MWh_a]: 1.700 Versorgung: 177 Wohnungen, Sporthalle	
Schweiz: Mappo-Morettina (Strassentunnel) <i>realisiert</i>	Bergwasser Wärmeleistung [MWh_a]: 180 Versorgung: Sport- und Erholungszentrum	
Schweiz: Hauenstein (Eisenbahntunnel) <i>realisiert</i>	Bergwasser Wärmeleistung [MWh_a]: 2.100 Versorgung: 150 Wohnungen	
Schweiz: Lötschberg (Eisenbahntunnel) <i>realisiert</i>	Bergwasser Wärmeleistung [MWh_a]: 3.000–5.000 Versorgung: Tropenhaus, Fischzucht	
Schweiz: Ricken (Eisenbahntunnel) <i>realisiert</i>	Bergwasser Wärmeleistung [MWh_a]: 249 Versorgung: Mehrzweckhalle	
Schweiz: Grosse St. Bernhard (Strassentunnel) <i>realisiert</i>	Tunnelabwärme Wärmeleistung [MWh_a]: 167 Versorgung: Bürogebäude	
Luzern, Schweiz: Allmend- und Hubelmatttunnel (Zentralbahn) <i>Studie, nicht realisiert</i>	Flächenkollektorsystem / Wärmetauscher-Elemente hinter Tunnelinnenausbau spez. Entzugsleistung 18 - 150 Wm^{-2} Saisonaler bis täglicher Heiz-/Kühlzyklus, Flächig in Abhängigkeit von Heiz- u. Kühlzyklus	



Standort – Settings <i>Status</i>	Technische Anwendung (Typ Absorber) Potential / Wirkungsweise	Projekt / Referenz
Italien – Österreich. Brenner Basistunnel – BBT (Strassentunnel) <i>Numerische Studie</i>		Tinti et al. (2017)
Turin, Italien: Südliche Erweiterung U-Bahnlinie 1 <i>Numerische Studie</i> <i>Gegenwärtig Pilotversuch</i>	Flächenabsorber Tunnelinnen- und -aussenschale (Sommer / Winter) spez. Entzugsleistung [Wm^{-2}]: 53 - 74 Installierte Gesamtenergiekapazität [kW]: 2822 Heizmodus, 3756 Kühlmodus	Barla et al. (2016)
Seocheon, South Korea (Eisenbahntunnel) <i>Numerische Studie</i> <i>Gegenwärtig Pilotversuch</i>	Energievliese spez. Entzugsleistung [Wm^{-1}]: 30 - 60 (Lfm)	Lee et al. (2016); Lee et al. (2012)
Innere Mongolei, China: Linchang Tunnel <i>Pilotversuch</i>	Tunnelabsorbersysteme	Zhang et al. (2016); Zhang et al. (2014)



Anhang C: Feldexperiment zur Messung der Tunnelinnenlufttemperatur

6 Messsysteme (hervorgehoben in Planunterlagen 1 & 2)

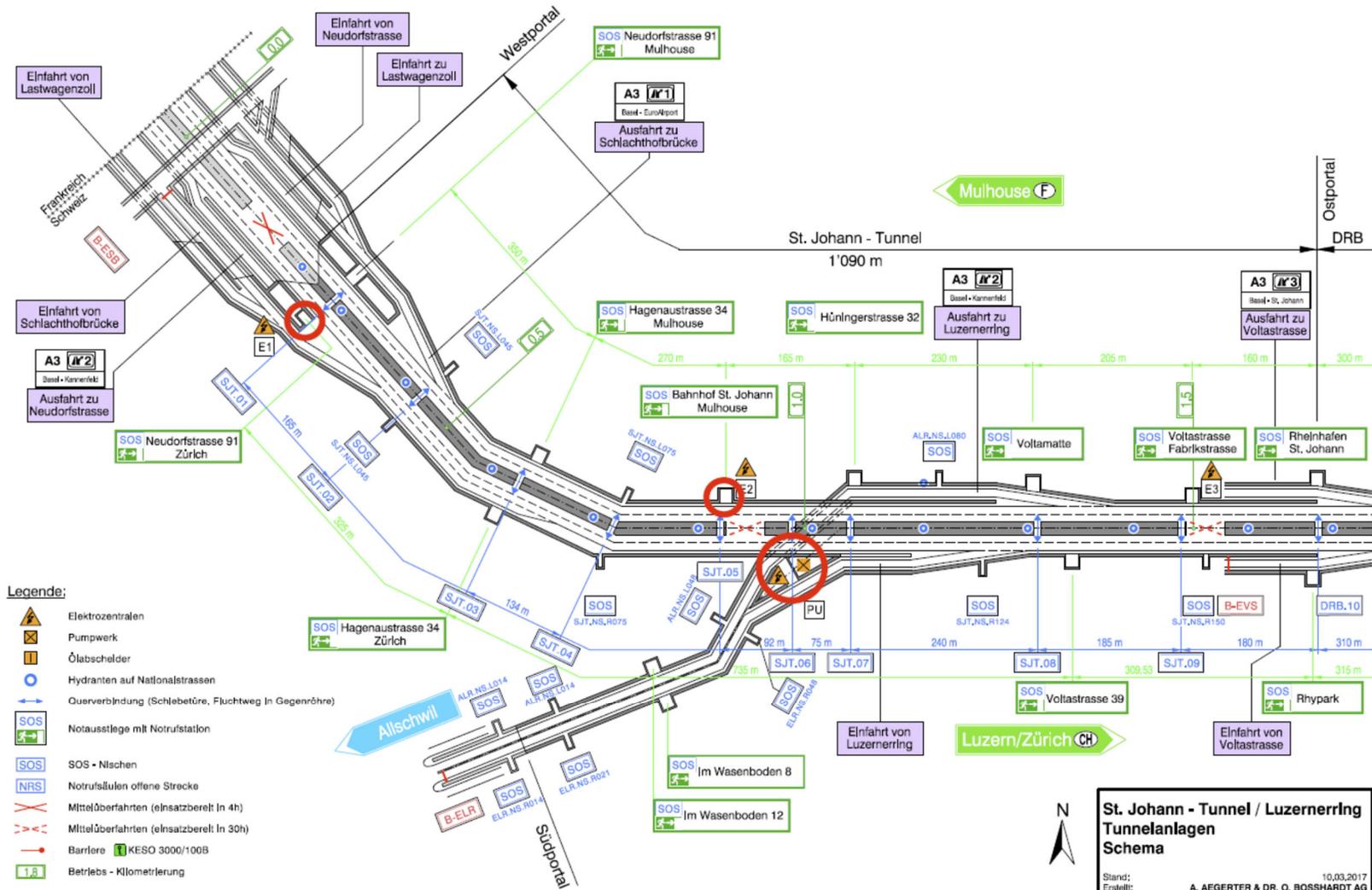
Kennzeichnung	Standort
+SJT.NS.L090; SJT.E2	Tunnel St. Johann Stammlinie Fahrtrichtung D → F
+SJT.NS.R098; SJT.PU	Tunnel St. Johann Stammlinie Fahrtrichtung F → D
+ELR.NS.R098; SJT.PU	Tunnel Anschluss Luzernerring Auffahrt
+ALR.NS.R098; SJT.PU	Tunnel Anschluss Luzernerring Abfahrt
+SJT.NS.R026; SJT.E1	Tunnelportal St. Johann Stammlinie Fahrtrichtung F → D
+HOT.NS.L252	Tunnel Horburg Stammlinie D->F Fahrtrichtung D → F



Planunterlage 1: Messsysteme (rote Kreise) Tunnel St. Johann (Grossbasel) und Horburg (Kleinbasel)

NATIONALSTRASSE A3 BS
St. Johann - Tunnel

Modul 1
A3BS.1.120



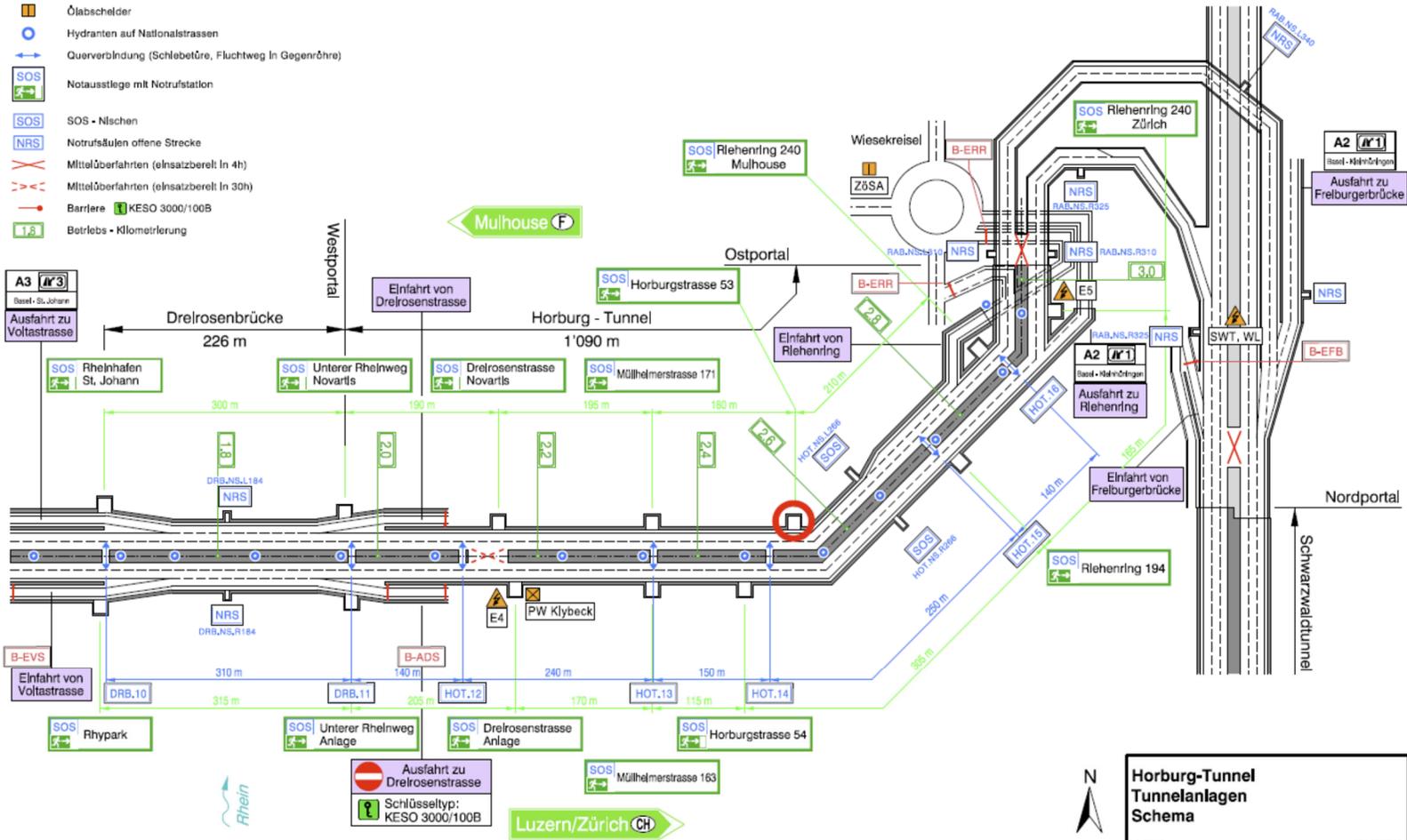


Planunterlage 2: Messsysteme (rote Kreise) Tunnel St. Johann (Grossbasel) und Horburg (Kleinbasel)

NATIONALSTRASSE A3 BS
Horburg-Tunnel

Modul 3
A3BS.3.120

- Legende:
- Elektrozentralen
 - Pumpwerk
 - Ölabschelder
 - Hydranten auf Nationalstrassen
 - Querverbindung (Schlebetüre, Fluchtweg In Gegenöhre)
 - Notausstiege mit Notrufstation
 - SOS - Nischen
 - Notrufsäulen offene Strecke
 - Mittelüberfahrten (einsatzbereit in 4h)
 - Mittelüberfahrten (einsatzbereit in 30h)
 - Barriere KESO 3000/100B
 - Betriebs - Kilometerlung



**Horburg-Tunnel
Tunnelanlagen
Schema**

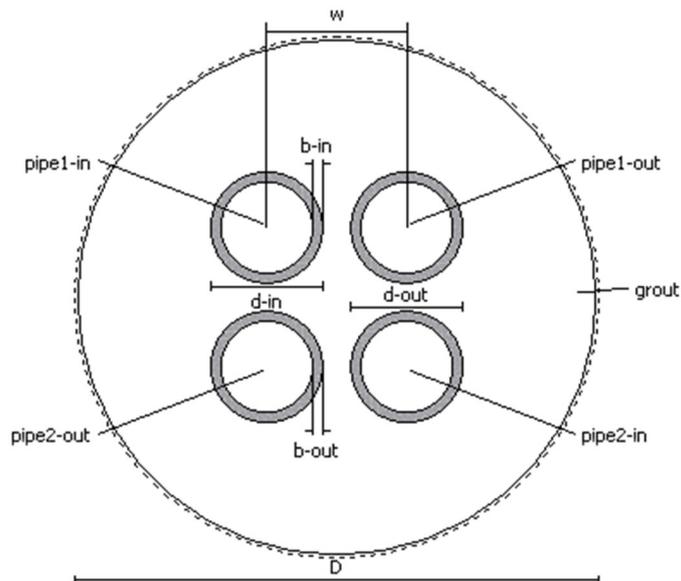
Stand: 10.03.2017
Erstellt: A. AEGERTER & DR. O. BOSSHARDT AG



Anhang D: Konfiguration EWS

Flow rate = $60 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$; $T_{\text{Winter}} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{Sommer}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$

BHE Geometry	Double U-shape	
Borehole Diameter (D)	0.127	[m]
Pipe Distance (w)	0.045	[m]
Inlet Pipe Diameter (d-in)	0.04	[m]
Inlet Pipe Wall Thickness (b-in)	0.0029	[m]
Outlet Pipe Diameter (d-out)	0.04	[m]
Outlet Pipe Wall Thickness (b-out)	0.0029	[m]
Heat-transfer coefficients		
Inlet Pipe Thermal Conductivity (tc-in)	0.42	[J/m/s/K]
Outlet Pipe Thermal Conductivity (tc-out)	0.42	[J/m/s/K]
Grout volume thermal conductivity (tc-grout)	1	[J/m/s/K]
Refrigerant volumetric heat capacity (Ref. heat cap.)	4	[10+6 J/m ³ /K]
Refrigerant thermal conductivity (Ref. cond.)	0.48	[J/m/s/K]
Refrigerant dynamic viscosity (Therm. visc.)	3	[10-3 kg/m/s]
Refrigerant density (Ref. mass dens.)	1.052	[10+3 kg/m ³]

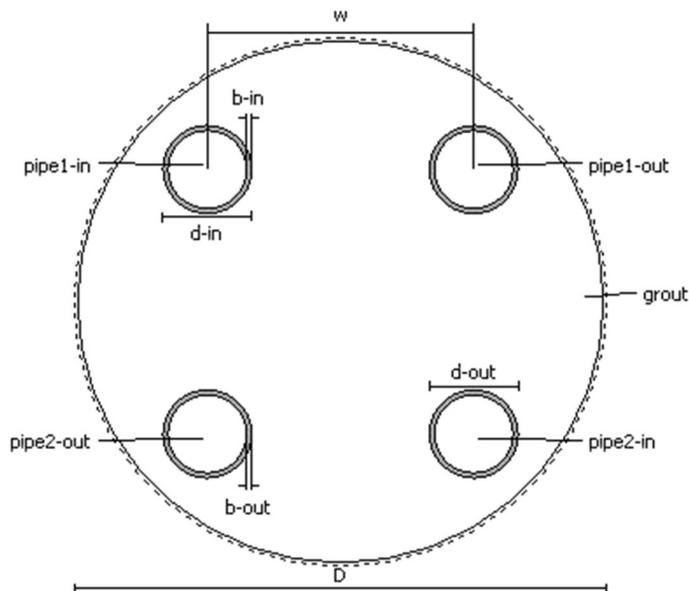




Anhang E: Konfiguration EP

Flow rate = $60 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$; $T_{\text{Winter}} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{Sommer}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$

BHE Geometry	Double U-shape	
Borehole Diameter (D)	0.3	[m]
Pipe Distance (w)	0.15	[m]
Inlet Pipe Diameter (d-in)	0.05	[m]
Inlet Pipe Wall Thickness (b-in)	0.0029	[m]
Outlet Pipe Diameter (d-out)	0.05	[m]
Outlet Pipe Wall Thickness (b-out)	0.0029	[m]
Heat-transfer coefficients		
Inlet Pipe Thermal Conductivity (tc-in)	0.42	[J/m/s/K]
Outlet Pipe Thermal Conductivity (tc-out)	0.42	[J/m/s/K]
Grout volume thermal conductivity (tc-grout)	1	[J/m/s/K]
Refrigerant volumetric heat capacity (Ref. heat cap.)	4	[10+6 J/m ³ /K]
Refrigerant thermal conductivity (Ref. cond.)	0.48	[J/m/s/K]
Refrigerant dynamic viscosity (Therm. visc.)	3	[10-3 kg/m/s]
Refrigerant density (Ref. mass dens.)	1.052	[10+3 kg/m ³]





Anhang F: Aquifereigenschaften Grundwasservorkommen CH

Zusammenfassung einiger wesentlicher Ergebnisse für die untersuchten Lockergesteins-Grundwasservorkommen, einschliesslich Aquifergeometrien, Konnektivität der Grundwasserleiter mit den Oberflächengewässern und abgeschätzten Fliesswegen und -zeiten zusammen (aus Hydro-CH2018 report - „Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen“).

		Mittlere GW-Mächtigkeit	Flurabstand Anteil an Gesamtfläche GW-Bereich			Fließgewässerdichte Länge Fließgewässer / Fläche GW-Bereich	Fließweg	Fließzeit			
			[m]	[0 - 1 m]	[1 - 10 m]				[10 - 50 m]		
Basel-Stadt	GW-Bereiche	[m]	[0 - 1 m]	[1 - 10 m]	[10 - 50 m]	[km km ²]	[m]	[d]			
	Gesamt	5.3	5.4	41.3	53.3	1.2	1745	359.4			
	Kleinhüningen	7.5	7.8	91.5	0.6	4.3	1641	162.7			
	Kleinbasel	7.7	9.6	58.9	31.5	1.6	618	41.7			
	Grossbasel Süd-Ost	2.1	3.0	36.9	60.1	1.5	1682	658.7			
	Grossbasel Nord-West	5.8	2.7	8.9	88.4	0.7	2787	587.2			
Basel-Landschaft	Birs	Liesberg	3.9	12.2	87.6	0.2	6	191	20.8		
		Laufen (Birshollen)	6.3	19.1	80.6	0.3	8.7	168	4.0		
		Laufen (Stadt)	5.6	3.4	96.1	0.6	4.4	489	13.5		
		Zwingen	5.4	4.3	90.2	5.5	5.6	725	20.4		
		Grellingen	7.8	5.2	68.2	26.6	8.3	257	3.7		
		Duggingen	7.6	10.8	78.8	10.4	8.3	463	0.6		
		Aesch-Reinach	6.6	0.6	20.6	78.8	2.1	2533	6.0		
		Arlesheim/Münchenstein	6.5	1.2	81.1	17.7	0.1	769	12.2		
		Münchenstein	4.4	2.2	92.4	5.4	3.2	488	17.8		
			Therwil/Oberwil	3.3	18.1	81.9	0.0	8.8	339	7.0	
			Bottmingen/Binningen	5.2	6.5	93.2	0.3	10.4	405	5.9	
	Ergolz	Ormalingen	4.5	7.2	92.8	0.0	21.1	851	7.6		
		Gelterkinden/Sissach	8.4	1.9	82.0	16.0	6.6	1505	20.0		
		Sissach	10.8	0.9	38.9	60.2	4.5	1367	34.9		
		Lausen	6.7	1.3	60.8	37.9	11.1	479	9.0		
		Liestal	8.5	2.3	47.6	50.1	3.4	738	8.8		
		Füllinsdorf/Augst	6.5	1.7	20.2	78.1	3.7	952	16.4		
			Tecknau/Gelterkinden (Eibach)	4.9	2.9	90.2	6.9	9.7	2168	18.7	
	Ergolz Zutüsse	Rümlingen/Thürnen (Homburgerbach)	6.4	6.6	88.4	5.0	11.2	844	7.3		
		Eptingen (Dietgerbach)	7.0	0.7	86.4	13.0	13.1	570	2.9		
		Dietgen/Sissach (Dietgerbach)	5.0	13.8	61.7	24.5	7.4	664	4.1		
		Waldenburg (Vodere Frenke)	5.3	15.7	76.1	8.2	19.3	510	2.0		
		Oberdorf (Vodere Frenke)	9.2	5.4	91.4	3.2	24.8	487	4.5		
		Bennwil/Hölstein (Walibach)	3.8	5.8	92.2	2.0	17.6	2513	10.7		
		Niederdorf/Hölstein (Vodere Frenke)	5.6	3.0	89.4	7.6	8.3	939	6.0		
		Hölstein/Bubendorf (Vodere Frenke)	4.8	1.0	96.0	3.0	9.1	2683	24.5		
		Reigoldswil/Ziefen (Hintere Frenke)	2.4	71.2	28.7	0.1	29.2	220	1.6		
		Ziefen/Bubendorf (Hintere Frenke)	4.7	5.7	93.7	0.6	10.9	466	3.2		
		Bubendorf (Frenke)	6.8	0.2	85.6	14.2	4.1	807	7.6		
		Bubendorf/Liestal (Frenke)	8.8	1.1	63.8	35.1	3.1	1436	7.6		
			Nuglar_Liestal (Orisbach)	8.8	43.8	49.9	6.3	12.9	746	7.5	
		ZH	Eulach	Winterthur	24.5	1.2	34.1	64.7	2.0	6068	25.6
		BE	Suze	Biel	71.7	2.1	90.6	7.3	3.3	6293	61.4
GR	Landwasser	Davos	1.8	2.3	58.8	38.9	9.0	6811	7.8		