



Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Pilotver- such

**Energy extraction from urban tunnels;
pilot test**

**Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains;
l'essai pilote**

**Amberg Engineering AG
Wencke Zingsheim**

**Geowatt AG
Thomas Mégel
Rohner Ernst**

**VersuchsStollen Hagerbach AG
Volker Wetzig
Maximilian Wietek**

**Forschungsprojekt FGU 2012/005_ENG auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Pilotver- such

**Energy extraction from urban tunnels;
pilot test**

**Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains;
l'essai pilote**

**Amberg Engineering AG
Wencke Zingsheim**

**Geowatt AG
Thomas Mégel
Rohner Ernst**

**VersuchsStollen Hagerbach AG
Volker Wetzig
Maximilian Wietek**

**Forschungsprojekt FGU 2012/005_ENG auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Wencke Zingsheim Amberg Engineering AG

Mitglieder

Thomas Mégel	Geowatt AG
Ernst Rohner	Geowatt AG
Benjamin Montag	Rehau Vertriebs AG
Dominik Baier	Rehau AG Co.
Edi Wehrli	Schoellkopf AG
Urs Streuli	Sika Bau
Volker Wetzig	VersuchsStollen Hagerbach AG
Maximilian Wietek	VersuchsStollen Hagerbach AG
Carmen Willi	Walo Bertschinger AG
Stefan Brunschwiler	Walo Bertschinger AG

Begleitkommission

Präsident

Prof. Dr. Dipl. Anton Schleiss

Mitglieder

Dr. Rudolf Minder
Dr. Roland Wyss
Werner Furrer
Marco Huwiler
Richard Kocherhans

Antragsteller

Fachgruppe für Untertagbau (FGU)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Récapitulatif	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Ausgangslage	13
1.2 Stand der Forschung	14
1.3 Forschungsbedarf und Ziele des Forschungsprojektes	15
1.4 Abgrenzung	16
2 Versuchsanlage	17
2.1 Standort der Versuchsanlage	17
2.2 Aufbau der Versuchsfelder	18
2.2.1 Versuchsfelder	18
2.2.2 Absorbermodule	19
2.2.3 Versorgungsleitungen und Verbindetechnik	22
2.2.4 Durchführungen und Aussparungen	25
2.2.5 Versuche	27
2.3 Bauablauf	28
2.3.1 Bauphase 1 – Vorbereitungsarbeiten	29
2.3.2 Bauphase 2 – Einbau der Abdichtung und der Absorbermodule	31
2.3.3 Bauphase 3 – Abschluss	34
2.4 Prüfungen und Kontrollen	37
2.5 Installierte Messtechnik	39
2.6 Versuchsbetrieb	41
3 Ergebnisse aus den Versuchen	43
3.1 Messresultate	43
3.1.1 Versuch I (Versuchsfeld 2, trocken)	43
3.1.2 Versuch II (Versuchsfeld 1)	45
3.1.3 Versuch III (Versuchsfeld 2, bewässert)	46
3.2 Thermische Leistung der Absorbersysteme	48
3.2.1 Methodik	48
3.2.2 Definition eines typischen Wärmeentzugsprofils	49
3.2.3 Versuch I: Absorberfunktion und spezifische Entzugsleistung, Versuchsfeld 2, trocken .	50
3.2.4 Versuch II: Absorberfunktion und spezifische Entzugsleistung, Versuchsfeld 1	51
3.2.5 Versuch III: Absorberfunktion und spezifische Entzugsleistung, Versuchsfeld 2, mit Bewässerung	52
3.2.6 Leistungsparameter, Einflussradius und Nachhaltigkeit	53
3.2.7 Zusammenfassung	54
3.3 Ergebnisse aus dem Bau der Anlage	54
4 Schlussfolgerungen für die Umsetzung in die Praxis	57
4.1 Anforderungen an die thermische Auslegung / Berechnung	57
4.2 Anforderungen an die Baupraxis	57
4.2.1 Einbau in der Tunnelschale	57
4.2.2 Einbau in der Fahrbahnplatte	60
4.2.3 Einbau im Werkleitungskanal	60
4.2.4 Einbau in Zwischendecke	61
4.2.5 Einbau in bestehende Tunnel	61
4.3 Anforderungen an den Betrieb	63
4.3.1 Konstruktive Anforderungen	63
4.3.2 Anforderungen an den Betrieb	64

5	Wirtschaftliche Folgerungen.....	65
5.1	Investitionskosten.....	65
5.2	Potenzial in der Schweiz.....	66
5.3	Vor- und Nachteile von Tunnelabsorbersystemen.....	67
6	Weiterer Forschungsbedarf	69
	Anhänge	71
	Glossar	117
	Literaturverzeichnis	119
	Projektabschluss	121
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	125

Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt FGU 2008/006 „Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation“ wurden die grundsätzliche Umsetzbarkeit, der Energieertrag und die Wirtschaftlichkeit von geothermischer Wärme-/Kältegewinnung aus innerstädtischen Strassentunneln in der Schweiz untersucht. Um die zentralen Fragestellungen zur Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit von innerstädtischen geothermischen Tunnelabsorbersystemen sowie zur Eignung der angewandten Planungsinstrumente zu beantworten, wurde im vorliegenden Forschungsprojekt FGU 2012/005_ENG ein Pilotversuch im Versuchsstollen Hagerbach durchgeführt.

Hierzu wurden in einem Tunnelabschnitt zwei Versuchsfelder mit Flächenabsorbern in den Tunnelwänden ausgerüstet. Bei Versuchsfeld 1 wurde der Absorber vor der Tunnelabdichtung, resp. an der Innenseite, und bei Versuchsfeld 2 hinter der Abdichtung, resp. an der Aussenseite installiert. Versuchsfeld 2 wurde zudem mit einem Bewässerungssystem ausgestattet, das eine Bewässerung des Bereichs zwischen Tunnelwand und Abdichtung zulässt, so dass die Lage eines Tunnels in einem stehenden Grundwasserleiter simuliert werden konnte.

An die beiden Absorbersysteme wurde eine Wärmepumpe angeschlossen um eine Nutzung durch einen Wärmeentzug simulieren zu können. Die Versuchsfelder wurden mit total 48 Temperaturmesssonden bestückt, die an ein Messdatenerfassungssystem angeschlossen wurden. Aus den drei Versuchen, die zwischen 39 und 76 Tagen dauerten, ergaben sich folgende Resultate:

- Die spezifische Normwärmeleistung der Tunnelabsorber dieses Einbautyps beträgt für ein typisches saisonales Heizlastprofil in der Schweiz bei einer initialen Fels-, resp. Tunneltemperatur von 14 – 15 °C durchschnittlich 25 W/m². Dies entspricht einem spezifischen Jahreswärmeentzug von ca. 47 kWh/(m² Jahr).
- Die spezifische Normwärmeleistung zeigte sich relativ unabhängig vom Vorhandensein einer Abdichtungsfolie. Ebenso war der Effekt einer Bewässerung der Absorberschicht (stehendes Wasser) nur geringfügig.
- Dieser geringe Effekt in Bezug auf die Einbauart der Absorbermodule sowie die Beobachtung, dass die Fluidtemperatur nach ca. 100 - 300 Stunden jeweils einen relativ konstanten Wert erreichte, deutet auf einen signifikanten bis dominierenden Einfluss der konstanten Tunnellufttemperatur hin. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei allen drei Versuchsfeldern ca. 60 % der Absorberwärme ab der ca. 300. Betriebsstunde aus der Tunnelluft stammt.
- Durch den sehr hohen Einfluss der Tunneltemperatur kann davon ausgegangen werden, dass die Leistung des Absorbers verhältnismässig wenig empfindlich auf eine Erhöhung der Volllaststunden der Nutzung reagiert. Damit eignet sich der Absorber im Vergleich zu einer Erdwärmesonde besser für eine Bandlastnutzung.
- Durch die hohe Zahl an Temperaturmessfühlern zeigte sich, dass die markanteste Leistungssteigerung durch eine Reduktion des thermischen Widerstands der Rohrleitungen erreicht werden könnte. Eine materialtechnische Verbesserung des Absorbersystems bis zu einem Wert von 50 W/m² scheint möglich, was einer Verdoppelung gegenüber dem im Pilotversuch angewendeten System entspricht.
- Die spezifischen Investitionskosten eines flächenhaften Tunnelabsorbersystems, wie es im Pilotversuch angewendet wurde, liegen zwischen ca. CHF 10.-/Watt und CHF 16.-/Watt, resp. zwischen CHF 5.-/(kWh Jahr) und CHF 8.-/(kWh Jahr) bei einem typischen saisonalen Heizlastprofil. Dieser Wert ist etwa 2- bis 3-mal so hoch wie bei einer Erd-

wärmesondenanlage. Ist hingegen ein Wärmeabnehmer mit einem Bandlastbedarf vorhanden und kann der thermische Widerstand der Rohrleitungen signifikant verkleinert werden, so nähern sich die Investitionen pro kWh derjenigen einer Erdwärmesondenanlage an.

- Aus den Messwerten wurde die sogenannte Absorberfunktion für das verwendete Produkt der Tunnelabsorber ermittelt. Auf Grundlage dieser Absorberfunktion können zukünftig korrekte Berechnungen für beliebige Nutzungsszenarien eines Wärme- oder auch Kälteentzugs vorgenommen werden. Mit der Forschungsarbeit wurden demnach auf Messwerten abgestützte Berechnungsgrundlagen für die Auslegung von Tunnelabsorbern geschaffen.
- Für die Berechnung der Amortisationskosten kann davon ausgegangen werden, dass die Tunnelabsorberanlage eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahre aufweist. Unterhaltskosten sind vernachlässigbar.
- Tunnelabsorbersysteme sind teurer als Erdwärmesondensysteme, und können daher – vergleichbar mit anderen energetisch genutzten Baustrukturen wie Energiepfähle – in Gebieten sinnvoll sein, wo Erdwärmesonden nicht zulässig sind.
- In bautechnischer Hinsicht hat sich das Produkt der Tunnelabsorber bewährt. Ein schneller, unkomplizierter Einbau der Elemente und eine gute Integration in den Bauablauf beim klassischen Tunnelbau ist möglich.
- Maximal könnten in Schweizer Strassen- und Eisenbahntunneln Tunnelabsorbersysteme auf einer Länge von ca. 41'000 Tunnelmetern beidseitig eingebaut werden. Dies lässt eine Wärmeproduktion von ca. 15 GWh/Jahr zu. Das energetische Potenzial von Tunnelabsorbersystemen ist also begrenzt und kann die geothermische Energienutzung in der Schweiz schätzungsweise um 0.6 – 0.7 % steigern.

Récapitulatif

Dans le projet de recherche FGU 2008/006 „récupération d'énergie à partir des tunnels urbains; système d'évaluation“ ont été examinés la faisabilité fondamentale, le rendement énergétique et efficacité de la récupération de la chaleur géothermique / froid des tunnels de rues urbains en Suisse. Pour répondre aux principales interrogations concernant l'efficacité et la viabilité des systèmes d'absorption géothermiques urbains en tunnel ainsi qu'à la pertinence des instruments de planification, un essai pilote a été réalisé à la galerie d'Hagerbach pour le projet de recherche présent, FGU 2012/005_ENG.

À cet effet, on a équipé les parois de deux sections de tunnel d'absorbeurs plans sur deux parcelles de test. Sur la parcelle n°1, les absorbeurs ont été installés avant la couche étanchéité du tunnel, sur le côté intérieur, et sur la parcelle n°2, derrière la couche étanchéité, sur le côté extérieur. On a en outre muni la parcelle n°2 d'un système d'irrigation alimentant le domaine situé entre le mur du tunnel et la couche d'étanchéité, afin de simuler la situation du tunnel au milieu d'un aquifère.

Une pompe à chaleur a été connectée sur les deux systèmes d'absorption, afin de simuler une exploitation par extraction de la chaleur. Les deux parcelles ont été équipées d'un total de 48 sondes de mesure thermiques raccordées à un système de relevé. Les deux expérimentations conduites sur une durée de resp. 39 et 76 jours ont permis d'établir les conclusions suivantes :

- Pour un profil saisonnier typique de Suisse, la performance thermique standard des absorbeurs de tunnel de ce modèle s'élève, pour une température de roche et de tunnel de 14 à 15°, à 25 W/m² en moyenne. Ceci correspond à une production spécifique annuelle d'environ 47 kWh/(m² par an).
- La présence d'une couche d'étanchéité s'est révélée relativement peu déterminante sur la performance thermique spécifique standard. L'effet de l'irrigation de la couche d'absorption (eau stagnante) s'est révélé de même peu significatif.
- Il a pu être mis en évidence une forte influence de la température de l'air constante du tunnel étant constaté que le type de montage des absorbeurs de modules est peu déterminant et que les fluides atteignent régulièrement une température constante après 100 à 300 heures. Il apparaît que, sur les trois parcelles de test, environ 60% de la chaleur absorbée provient, à partir de la 300^{ème} heure d'exploitation, de l'air du tunnel.
- Le fait que la température du tunnel soit déterminante implique que la performance des absorbeurs est relativement peu liée à une hausse des heures de pointe d'utilisation. Il résulte de ce fait que l'absorbeur présente une meilleure adaptation que la sonde géothermique pour une utilisation à débit constant.
- Le grand nombre de capteurs de mesure thermique a permis de démontrer que la performance pouvait être significativement améliorée par abaissement de la résistance thermique des conduites de fluide. Une amélioration du matériau du système d'absorption pour un gain allant jusqu'à 50 W/m² paraît possible, soit un doublement en comparaison du système utilisé lors de l'essai pilote.
- Les coûts d'investissement d'un système d'absorbeur de tunnel de surface tel qu'utilisé dans l'essai pilote se situent entre 10 CHF/Watt et 16 CHF par Watt, soit entre 5 CHF/kWh par an et 8 kWh par an pour un profil calorifique saisonnier typique. Cette valeur est environ 2 à 3 fois plus élevée que pour une installation à sonde géothermique. Si au contraire on se trouve en présence d'un extracteur de chaleur avec un besoin à débit constant et s'il est possible d'abaisser significativement la résistance thermique des con-

duites thermiques, les coûts d'investissement par kWh rejoignent ceux d'une installation de sonde géothermique.

- Au moyen des valeurs mesurées, il a pu être déterminé ce que l'on peut appeler une fonction d'absorption pour le produit employé sur l'absorbeur de tunnel. Cette fonction d'absorption pourra à l'avenir permettre de réaliser des calculs pertinents pour n'importe quel scénario d'exploitation d'une extraction de chaleur ou de froid. Ainsi, le travail de recherche a permis d'établir les méthodes de calcul étayées par les relevés de mesure pour la pose d'absorbeurs de tunnel.
- Concernant le calcul des coûts d'amortissement, on peut estimer la durée de vie des absorbeurs de tunnel à un minimum de 50 ans. Les coûts d'entretien sont quant à eux négligeables.
- Les systèmes d'absorption en tunnel présentant un coût de revient supérieur à celui des systèmes à sonde géothermique, ils sont plus particulièrement adaptés, de même que d'autres dispositifs énergétiques tels que les pieux énergétiques, sur les zones où les sondes géothermiques sont inappropriées.
- Les absorbeurs en tunnel ont prouvé leur viabilité sur le plan de l'intégration lors de la phase de construction. Une mise en place simple et rapide des éléments est possible, et l'intégration se réalise sans problème lors de la phase de construction d'un tunnel classique.
- Il serait envisageable de réaliser au maximum sur l'étendue des tunnels ferroviaires et routiers suisses une étendue d'environ 41 000 mètres d'absorbeurs sur les deux côtés. Ceci permettrait une production de chaleur d'environ 15 GWh/an. Le potentiel énergétique des absorbeurs de tunnel doit donc être considéré comme limité. Il pourrait conduire à une hausse de l'utilisation d'énergie géothermique en Suisse d'environ 0,6 à 0,7%.

Summary

In the research project FGU 2008/006 „Energy extraction from urban tunnels, Evaluation of systems“ the general applicability, the energy yield and the efficiency of the extraction of geothermal heat / cold from urban road tunnels in Switzerland were examined. To answer the central questions about the performance and practicality of urban geothermal tunnel absorber systems and the appropriateness of the planning tools used, a pilot test was performed in the Hagerbach Test Gallery for the present research project FGU 2012/005_ENG.

For this purpose two test fields in one tunnel section were equipped with surface absorbers in the tunnel walls. In test field 1, the absorber was installed in front of the tunnel seal, on the inner side, and in test field 2 it was installed after the seal, on the outer side. Furthermore, test field 2 was equipped with an irrigation system that permits irrigation of the area between the tunnel wall and seal so the conditions of a tunnel in a standing aquifer could be simulated.

A heat pump was connected to both absorber systems in order to simulate use through extraction of heat. The test fields were equipped with a total of 48 temperature probes, which were connected to a measurement data acquisition system. The tests, which lasted between 39 and 76 days, yielded the following results:

- The specific standard heat capacity of the tunnel absorbers of this installation type is 25 W/m² on average for a typical seasonal heating load profile in Switzerland at an initial rock/tunnel temperature of 14 – 15 °C. This corresponds to a specific annual heat extraction of approx. 47 kWh/(m² year).
- The specific standard heat capacity proved to be relatively independent of the presence of a sealing foil. The effect of irrigation of the absorber layer (standing water) was also only slight.
- This small effect in relation to the installation type of the absorber modules and the observation that the fluid temperature achieved a relatively constant value after approx. 100–300 hours in each case indicates a significant to dominant influence of the constant tunnel air temperature. It is possible to assume that in all three test fields approx. 60% of the absorber heat comes from the tunnel air after about the 300th hour of operation.
- Due to the very significant influence of the tunnel temperature it is possible to assume that the performance of the absorber will react relatively insensitively to an increase in the full load hours of use. Thus the absorber is better suited for base load use compared to a downhole heat exchanger.
- The large number of temperature probes showed that the most striking capacity increase could be achieved through a reduction of the thermal resistance of the piping. A technical improvement of the absorber system material to a value of 50 W/m² seems possible, which is twice the value of the system used in the pilot test.
- The specific investment costs of a surface tunnel absorber system such as was used in the pilot test are between approx. CHF 10.00/watt and CHF 16.00 /watt, or between CHF 5.00/(kWh year) and CHF 8.00/(kWh year) for a typical seasonal heating load profile. This value is about two or three times as high as with a downhole heat exchanger system. In contrast if a heat consumer with a base load demand is present and if the thermal resistance of the piping can be significantly reduced, the investment per kWh approaches that of a downhole heat exchanger system.

- The so-called absorber function for the tunnel absorber product used was determined from the measured values. On the basis of this absorber function correct calculations can be made in the future for any usage scenarios of heat or cold extraction. Thus the research was used to provide bases for calculation for the design of tunnel absorber, based on measured values.
- For the calculation of the amortisation costs, it is possible to assume that the tunnel absorber system has a lifespan of at least 50 years. Maintenance costs are negligible.
- Tunnel absorber system are more expensive than downhole heat exchanger systems and thus – comparable to other structures used for energy such as energy piles – they can make sense in areas where downhole heat exchangers are not permissible.
- Tunnel absorbers have proved themselves from a structural point of view. Rapid, straightforward installation of the elements and good integration into the process of classical tunnel construction is possible.
- In Swiss road and railway tunnels tunnel absorber systems could be installed up to a maximum length of approx. 41,000 tunnel metres on both sides. This permits heat generation of approx. 15 GWh/year. Thus the energy potential of tunnel absorber systems is limited and can increase geothermal energy use in Switzerland by an estimated 0.6 – 0.7%.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Schweiz hat sich zum Ziel gesetzt, ihren CO₂-Ausstoss bis zum Jahr 2020 im Vergleich zum Jahr 1990 um 20% zu senken. Ein grosses Einspar- und Verbesserungspotenzial besteht im Gebäudebereich. Die Schweiz weist im Vergleich zu anderen europäischen Ländern einen sehr hohen Pro-Kopf-Ausstoss von CO₂ für den Heizenergieverbrauch pro Wohnfläche auf. Dies liegt am hohen Heizölanteil bei den Gebäudeheizungen. Diese Heizungen müssen in den nächsten Jahren ersetzt werden.

Die Geothermie eignet sich hervorragend für die Gewinnung von Wärme für Niedertemperaturheizungen, da sie unabhängig von Wind, Wetter und Sonneneinstrahlung jederzeit zur Verfügung steht. Vor allem Erdwärmesondensysteme mit Wärmepumpen, die ausschliesslich für die Wärme- und Kältengewinnung aus Tiefen bis 400 m erstellt werden, haben sich auch für Grossüberbauungen als Standardtechnik durchgesetzt.

Im städtischen Bereich, insbesondere bei energetischen Gebäudesanierungen, ist der Platz für die Bohrungen von Erdwärmesonden jedoch häufig eingeschränkt oder nicht vorhanden. Als alternatives unterirdisches Wärmetauschersystem bieten Tunnelbauwerke im städtischen Bereich die Möglichkeit dem Untergrund Wärme (oder auch Kälte) zur weiteren Verwendung zu entziehen. Ein Vorteil ist dabei die Versorgungsnähe zu den Energieverbrauchern. Diese Systeme werden im Weiteren Tunnelabsorbersysteme genannt. Je nach Bauart des Absorbers wird zwischen Flächenabsorber- und Energieankersystemen unterschieden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes FGU 2008/006 „Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation“ wurden die grundsätzliche Umsetzbarkeit, der Energieertrag und die Wirtschaftlichkeit von geothermischer Wärme-/Kältengewinnung aus innerstädtischen Strassentunneln in der Schweiz untersucht.

Es wurde festgestellt, dass der Beitrag von Tunnelabsorbersystemen zur allgemeinen Energieversorgung eher gering ist: Überschlagsmässig können mit einem Tunnelabsorbersystem von 100 m Länge bei optimalem Einbau in einen Tunnel mit Rechteckquerschnitt ca. 40 Haushalte mit Wärme versorgt werden, bei einem voll ausgebauten runden Tunnelquerschnitt der gleichen Länge etwa 80 Haushalte. Generell wurde eine grosse Streubreite bei den ermittelten Leistungskennzahlen festgestellt.

Wo Erdwärmesonden jedoch nicht bewilligungsfähig sind und die Endabnehmer in geringer Entfernung zum Tunnelabsorbersystem liegen, kann der Einsatz von Tunnelabsorbersystemen sinnvoll sein. Sollten beim Bau neuer Tunnelbauwerke bestehende Erdwärmesonden beeinträchtigt werden, können Tunnelabsorbersysteme als Ersatzmassnahme vorgesehen werden. Des Weiteren kann eine zusätzliche Nutzung des Tunnelbauwerks zur Gewinnung von erneuerbarer Wärmeenergie für die Versorgung der angrenzenden Anwohner einen positiven Effekt bei der Akzeptanz der Anwohner gegenüber einer Tunnelbaumassnahme hervorrufen. Damit dies erreicht werden kann, muss der wirtschaftliche Bau und Betrieb eines Tunnelabsorbersystems gewährleistet sein.

Es besteht Forschungsbedarf, um die Planungs- und Qualitätssicherheit für den Bau und Betrieb von Tunnelabsorbersystemen zu erhöhen und somit die Kalkulierbarkeit der Kosten zu verbessern. Das vorliegende Forschungsprojekt FGU 2012/005_ENG hat die Zielsetzung, die Lücke zwischen den geothermischen sowie konstruktiven und baumethodischen als auch wirtschaftlichen Ausführungsmerkmalen mit Hilfe eines Pilotversuches zu schliessen und eine stabile Basis für die Projektierung und den Bau von zukünftigen Tunnelabsorberanlagen zu liefern.

1.2 Stand der Forschung

Neben Forschungsarbeiten zu durchgeführten Studien, Analysen und Modellierungen wurden insbesondere in Österreich und Deutschland verschiedene Systeme zur Energiegewinnung aus Tunneln an Pilotprojekten getestet. Die Pilotprojekte wurden im Rahmen von realen Tunnelbauprojekten umgesetzt. Diese sind insbesondere:

- Tunnel Jenbach, Unterinntal, Österreich
- U2/2-Taborstrasse, U-Bahnlinie U2, Wien, Österreich
- Lainzer Tunnel, Wien, Österreich
- U6-Stadtbahnanschluss Fasanenhof, Stuttgart, Deutschland

Die bisher durchgeführten Tunnelprojekte, in denen der Tunnel geothermisch genutzt wurde, sind als Pilotversuche zur Untersuchung der grundsätzlichen Machbarkeit anzusehen. Hervorzuheben ist hierbei der Ausbau eines Teilstückes im Tunnel Jenbach mit Energietübingen, welche den Bauhof der Gemeinde Jenbach mit der gewonnenen Heizenergie versorgen. Des Weiteren ist die Teststrecke im Tunnel U6-Stadtbahnanschluss Fasanenhof Stuttgart zu erwähnen, bei der die über Flächenabsorber in der Tunnelinnenschale 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-Moretina, Hauenstein, Lötschberg und Ricken wird das Bergwasser und am Grossen St. Bernhard die Tunnelabwärme genutzt.

Für Tunnelabsorbersysteme wurden Konzeptstudien bei zwei Tunnelbauwerken in der Schweiz durchgeführt:

Für die untiefen Neubauten der Zentralbahn Luzern „Allmendtunnel und Hubelmatttunnel“ wurde die Grössenordnung einer möglichen Nutzung für die nahe gelegene Messe Luzern abgeschätzt. Evaluiert wurde ein Flächenkollektorsystem.

Für das Tunnelbauprojekt CEVA in Genf wurde für verschiedene Abschnitte die Installation eines Flächenkollektorsystems bezüglich der thermischen Leistung evaluiert. Berücksichtigt wurde dabei auch die Variation der Tunnellufttemperaturen.

Bisher wurde in keinem der beiden Fälle die technische Umsetzung eines Tunnelabsorbersystems realisiert. Eine Integration der Einbauarbeiten in den geplanten Bauablauf hätte, aufgrund der vorhandenen spezifischen Randbedingungen, Auswirkungen auf das bestehende Terminprogramm gehabt und wäre zudem mit erhöhten Realisierungskosten verbunden gewesen.

Da es sich bei dem Forschungsprojekt um ein neueres innovatives Thema handelt, finden sich in der Literatur nur wenige wissenschaftliche Arbeiten hierzu. Einen Überblick gibt die Literaturliste am Ende dieses Berichtes.

Forschungsprojekt FGU 2008/006 „Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation“

Die bisherigen Forschungsarbeiten beziehen sich mehrheitlich auf Bahntunnel. Im Forschungsprojekt FGU 2008/006 „Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation“ wurden die grundsätzliche Umsetzbarkeit, der Energieertrag und die Wirtschaftlichkeit von geothermischer Wärme-/Kältegewinnung aus innerstädtischen Strassentunneln in der Schweiz untersucht.

Dabei wurde der Stand der Technik im Bereich der Nutzung geothermischer Energie ermittelt und dokumentiert. Im Rahmen der Systemevaluation wurde anhand von standardisierten Tunnelquerschnitten die grundsätzliche Anwendbarkeit verschiedener Absorberelemen-

te wie Energieanker oder Flächenkollektoren in den Tunnelwänden oder in vorgefertigten Betonbauteilen untersucht. Es wurden sowohl geothermische, konstruktive und baumethodische als auch wirtschaftliche Abklärungen durchgeführt. In Modellberechnungen wurden für ein Energieankersystem und ein System aus Flächenkollektoren in den Tunnelwänden verschiedene Nutzungsarten (reiner Wärmeentzug, Wärme- und Kälteentzug) simuliert, die thermischen Leistungen der Systeme ermittelt und gegenübergestellt. Verschiedene Einflussfaktoren wie z. B. Anzahl und Abstand der Anker sowie Grösse und Form des Tunnelprofils wurden in den Modellberechnungen variiert.

Wie die Ergebnisse des Forschungsprojektes FGU 2008/006 gezeigt haben, variiert der jährliche Wärmeertrag aus einem Tunnelabsorbersystem für ein typisches Nutzungsprofil eines Wohnhauses deutlich: je nach Art des Einbaus des Absorbersystems in die Tunnelwand werden für Flächenabsorber Spitzenleistungen zwischen 20 - 600 W/m², resp. ein Wärmeertrag von ca. 40 – 120 kWh/m² erreicht. Wie bei anderen geothermischen Anlagen verbessert auch hier eine Kältenutzung des Absorbersystems während des Sommers den Wärmeentzug während des Winters. Die Flächenabsorbersysteme wiesen grundsätzlich geringere Kosten-Nutzen-Verhältnisse auf und waren damit effizienter als die Energieankersysteme, unabhängig von der Betriebsart.

Es wurde festgestellt, dass der mögliche Wärmeentzug aus einem Tunnelabsorbersystem und damit die Effizienz massgeblich von der Art der Integration des Absorbersystems in die Tunnelwand abhängen. Wandaufbau, Wandstärken und Material sind entscheidend. Bisherige Forschungsergebnisse dazu beruhen ausschliesslich auf groben Berechnungen und variieren bezüglich Entzugsleistung mindestens um einen Faktor drei.

Die spezifischen Investitionskosten für die Tunnelabsorbersysteme wurden im Rahmen des Forschungsprojektes FGU 2008/006 auf ca. CHF 1.-/kWh bis CHF 4.-/kWh abgeschätzt. Dabei wurde das Kosten-Nutzen-Verhältnis aus den Investitionskosten für die Absorberanlage und der errechneten nutzbaren Wärmemenge ermittelt. Generell wurde festgestellt, dass die Flächenabsorbersysteme grundsätzlich geringere Kosten-Nutzen-Verhältnisse aufwiesen und damit effizienter waren als die Energieankersysteme, unabhängig von der Betriebsart. In Abhängigkeit vom Aufbau der Flächenabsorberanlage und der Nutzungsart variieren die Kosten-Nutzen-Verhältnisse. Die Ausbauart spielt dabei eine massgebende Rolle.

Zum Vergleich: Für eine Erdwärmesondenanlage von 350 kW Heizleistung liegen die spezifischen Investitionskosten bei ca. CHF 1.60/kWh. Auch für Erdwärmesonden gibt es eine Spanne, in der die Kosten-Nutzen-Verhältnisse aufgrund der Preise für das Bohren in Abhängigkeit vom Standort der Anlage und der Bodenbeschaffenheit variieren.

Es hat sich also gezeigt, dass bei einer optimalen Erstellung die spezifischen Investitionskosten (CHF/kWh) eines Tunnelabsorbersystems etwa im Bereich einer Erdwärmesondenanlage liegen können.

1.3 Forschungsbedarf und Ziele des Forschungsprojektes

Die Planung von Tunnelabsorbersystemen muss sehr frühzeitig in die Projektierung einer Tunnelbaumassnahme integriert werden. Änderungen im Layout des Tunnelquerschnitts nach Erteilung der Plangenehmigungsverfügung sind unerwünscht, da sie genehmigungspflichtig sind und zu Verzögerungen im Projektablauf sowie erhöhten Planungskosten führen können. Änderungen gar während der Bauausführung können Auswirkungen auf die Baukosten und die Fertigstellungstermine haben.

Um ein Tunnelabsorbersystem frühzeitig bei einem Tunnelprojekt einplanen zu können, muss einerseits die bau- und betriebstechnisch praktikabelste Lösung und andererseits die Methodik zur energetischen Auslegung ausreichend fundiert sein. Mit den heute bekannten Ergebnissen aus der Forschung und aus dem Betrieb von Teststrecken allein ist eine solide Planung und wirtschaftliche Umsetzung von Tunnelabsorbersystemen derzeit nicht möglich. Die Grundlagen zur Projektierung von Absorbersystemen fehlen bislang.

Das vorliegende Forschungsprojekt FGU 2012/005_ENG hat die Zielsetzung, die Lücke zwischen den geothermischen sowie konstruktiven, baumethodischen als auch wirtschaftlichen Ausführungsmerkmalen mit Hilfe eines Pilotversuches zu schliessen und eine stabile Basis für die Projektierung und den Bau von zukünftigen Tunnelabsorberanlagen zu liefern. Der Pilotversuch verfolgt einen systematischen Ansatz und ist nicht objektspezifisch, so dass die Resultate auf verschiedene Objekte und Systeme übertragen werden können.

Das Forschungsprojekt beinhaltet folgende Schwerpunkte:

- Planung und Vorbereitung der Versuchsanlage inklusive Instrumentalisierung
- Aufbau der Versuchsanlage
- Durchführung der Versuche und Erfassen der Messdaten
- Auswerten der Messdaten und Bestimmung der erzielbaren Wärmeentzugsleistung eines Absorbersystems für ein typisches Wärmebedarfsprofils eines Wohnhauses
- Einschätzung des Potenzials von Tunnelabsorberanlagen in der Schweiz und Ausblick

Die folgenden Fragestellungen und Themen werden dabei genauer untersucht:

- Wie gross ist die ermittelte Leistung der Absorbersysteme?
- Für die Berechnung der thermischen Effizienz der Tunnelabsorbersysteme wird eine Systemfunktion benötigt, die den zeitlichen Zusammenhang zwischen Wärmeentzug und der Temperaturentwicklung des Absorberfluids abbildet. Für jedes der Versuchsfelder wird diese sog. Absorberfunktion aus den Messwerten ermittelt.
- Welchen messbaren Einfluss hat die Lage der Absorberelemente innerhalb des Tunnelausbaus auf den Wärme- und Kälteentzug? Welche Auswirkungen hat die Materialwahl von angrenzenden bzw. umschliessenden Bauteilen wie z. B. Abdichtungs- und Trennschichten?
- Kann sichergestellt werden, dass der Einbau der Absorbersysteme im laufenden Baubetrieb ohne grössere Störungen oder Verzögerungen erfolgen kann?
- Planung der baupraktischen Detailkonstruktionen wie beispielsweise Befestigung der Absorberleitungen auf der Abdichtung, Leitungsdurchführungen, Versorgungsleitungen etc.
- Können Absorbersysteme in bereits bestehende Tunnelbauwerke sinnvoll integriert werden?
- Inwieweit wird der Betrieb und Unterhalt der Primärinfrastruktur eines Strassentunnels durch den Betrieb einer Tunnelabsorberanlage beeinflusst (Tunnelreinigungen, Wartungsarbeiten etc.)? Wie kann eine betriebstechnisch sinnvolle Integration erfolgen?

1.4 Abgrenzung

Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigt sich insbesondere mit dem innerstädtischen, untertägigen und oberflächennahen Tunnelbau. Tunnel in offener Bauweise und die dort angewendeten Absorbersysteme wie Energiepfähle und Energieschlitzwände werden in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Forschungsprojekt 2008/006 hat gezeigt, dass die betrachteten Flächenabsorbersysteme grundsätzlich effizienter sind als die untersuchten Energieankersysteme. Bei Energieankern wäre der Aufwand (Zeit und Kosten) für die Entwicklung eines Testsystems hoch. Flächenabsorber können im Vergleich zu Energieankern in der Baupraxis einfacher umgesetzt werden. Im Pilotversuch wurde daher ein Flächenabsorbersystem umgesetzt.

Der Fokus beim Pilotprojekt wurde auf den zweischaligen Tunnelausbau gelegt, da Strassentunnel in der Schweiz häufig in zweischaliger Bauweise mit Spritzbetonsicherung / Tübbingsicherung und Innenschale erstellt werden.

2 Versuchsanlage

2.1 Standort der Versuchsanlage

Der Pilotversuch wurde im VersuchsStollen Hagerbach (VSH) in Flums durchgeführt. Angesichts der dort vorhandenen Geologie wurde die Versuchsanlage im Fels erstellt. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit und Bewertung der Ergebnisse wurden die Testfelder in gleichen geologischen Verhältnissen platziert. Im VSH sind verschiedene Tunnelquerschnitte realisiert. Die Versuchsanlage wurde in einem Querschnitt aufgebaut, der in einer gewissen Entfernung zum Portal liegt, so dass sog. Portaleffekte ausgeschlossen wurden. Der blaue Pfeil zeigt zur Stelle des Testquerschnittes.

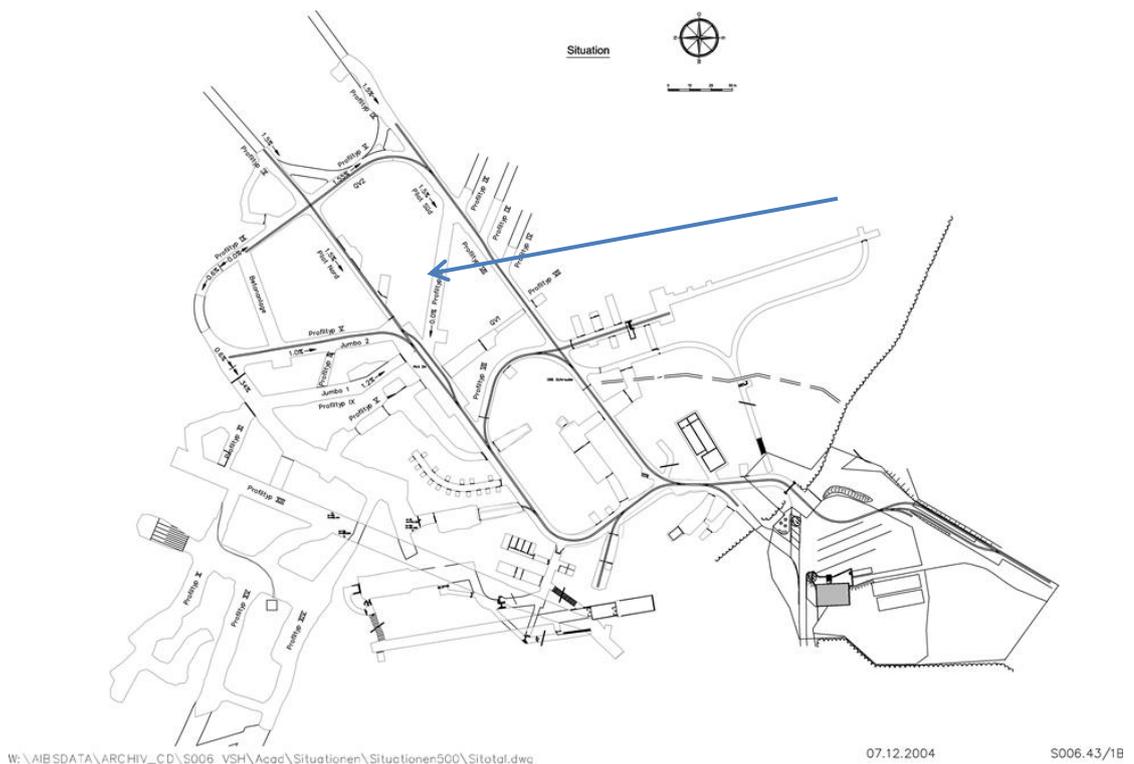


Abb. 1 Grundriss VersuchsStollen Hagerbach

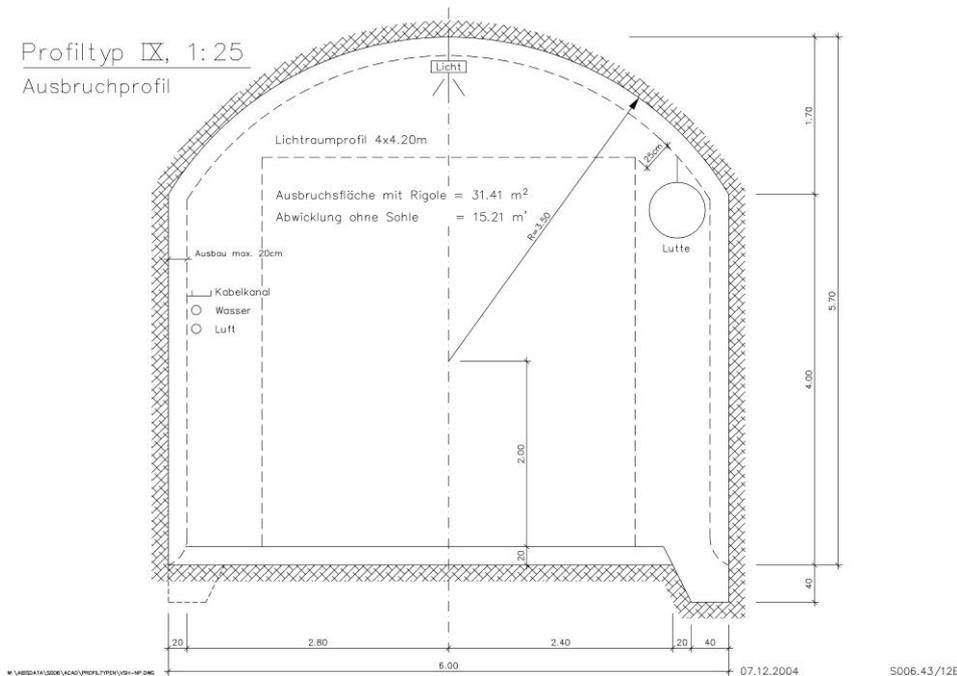


Abb. 2 Testquerschnitt Profiltyp IX

Ein weiteres Auswahlkriterium dieses Stollenabschnittes war die Verfügbarkeit und Grösse der Schalung für den Innenschalenbeton. So war es in diesem Abschnitt unter wirtschaftlich günstigen Bedingungen möglich, den benötigten Querschnitt mit einem Spritzbetonuntergrund entsprechend der geforderten Oberflächenqualität zu erstellen. Details dazu werden im Kapitel 2.3 erläutert.

Des Weiteren wurden bei der Wahl des Standortes die Möglichkeit der Lüftungssteuerung sowie betriebliche Aktivitäten berücksichtigt, die im Bedarfsfall eine Abschottung des Versuchsbereiches erlauben.

2.2 Aufbau der Versuchsfelder

2.2.1 Versuchsfelder

Es wurden zwei Versuchsfelder im Versuchstollen Hagerbach erstellt. Die Versuchsfelder sind auf gegenüberliegenden Seiten im Tunnelquerschnitt platziert.

Der detaillierte Aufbau der Versuchsfelder ist in den Plänen (siehe Anhang A1) dargestellt.

Für die Versuche wurde von einem zweischaligen Ausbau des Tunnels bestehend aus Spritzbetonsicherung und Ortbetoninnenschale ausgegangen, der vor allem in Schweizer Strassentunneln üblich ist. Das Absorbermodul wird bei diesem Ausbautyp in der Abdichtungsebene installiert.

Die Versuchsfelder sind gemäss *Tab. 1* aufgebaut.

Tab. 1 Aufbau Versuchsfelder

	Versuchsfeld 1	Versuchsfeld 2
Aussen	Spritzbetonsicherung (d = 0.30 m) Schutzvlies Abdichtungsbahn aus PVC Absorbermodul Typ 1	Spritzbetonsicherung (d = 0.30 m) Absorbermodul Typ 2 Abdichtungsbahn aus PVC Ortbetoninnenschale (d = 0.30 m)
Innen	Ortbetoninnenschale (d = 0.30 m)	

In Versuchsfeld 2 wurde zusätzlich ein Bewässerungssystem installiert, so dass ein Zuströmen von Bergwasser simuliert werden konnte (siehe Kap. 2.2.5).

Die Anforderungen an die Beschaffenheit des Spritzbetonuntergrundes (Welligkeit, Rauigkeit) werden durch das Abdichtungssystem bestimmt. Dies gilt auch für das Absorbermodul Typ 2, wo die Absorberleitungen in die Noppenbahn als Bestandteil des Abdichtungssystem integriert sind.

Die Dicken der Spritzbetonsicherung und der Ortbetoninnenschale wurden entsprechend den häufig zur Anwendung kommenden Dicken im zweischaligen Ausbau festgelegt.

Im Versuchsfeld 1 wird der Wärmeentzug vom Tunnelraum simuliert, da die bergseitige Abdichtungsfolie als wärmeisolierende Schicht zum Gebirge wirkt. Im Versuchsfeld 2 wird der Wärmeentzug aus dem Fels simuliert, da die Absorbermodule auf der Aussenseite der wärmeisolierenden Abdichtungsfolie liegen.

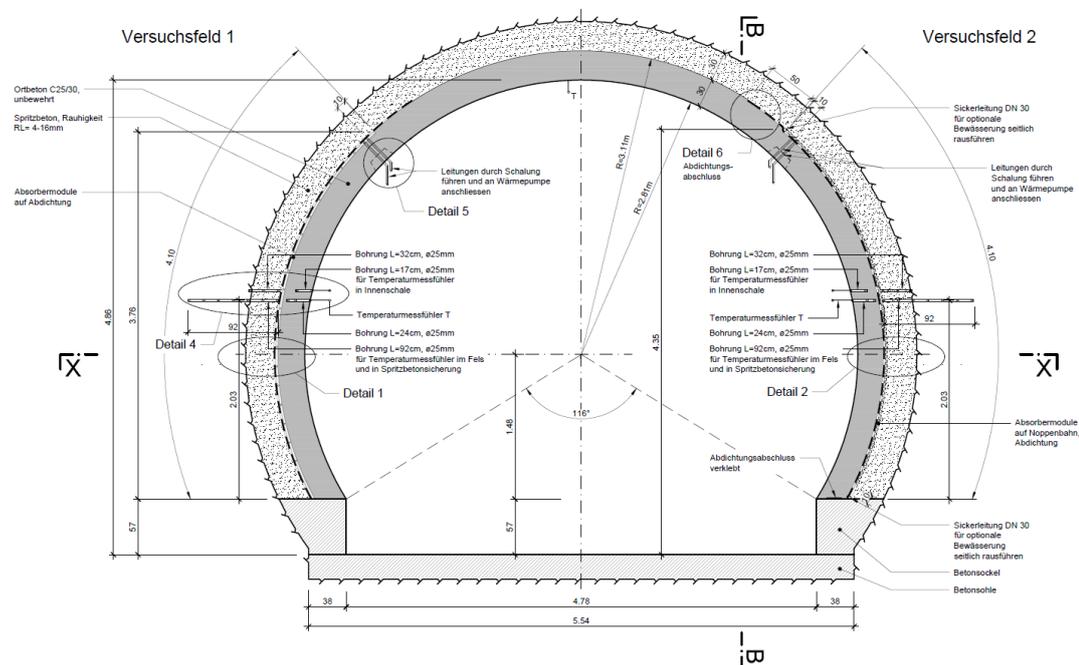


Abb. 3 Aufbau der Testfelder, Querschnitt

2.2.2 Absorbermodule

Die Absorbermodule bestehen aus folgenden Elementen:

Absorbermodul Typ 1 (für Versuchsfeld 1):

- Absorberleitungen zwischen zwei Trennvliesen verlegt und befestigt

Absorbermodul Typ 2 (für Versuchsfeld 2):

- Absorberleitungen auf Noppenbahn verlegt und befestigt sowie mit Trennvlies überdeckt

Die Trennvliese dienen gleichzeitig als Schutz für die Absorberleitungen vor Beschädigungen beim Einbau.

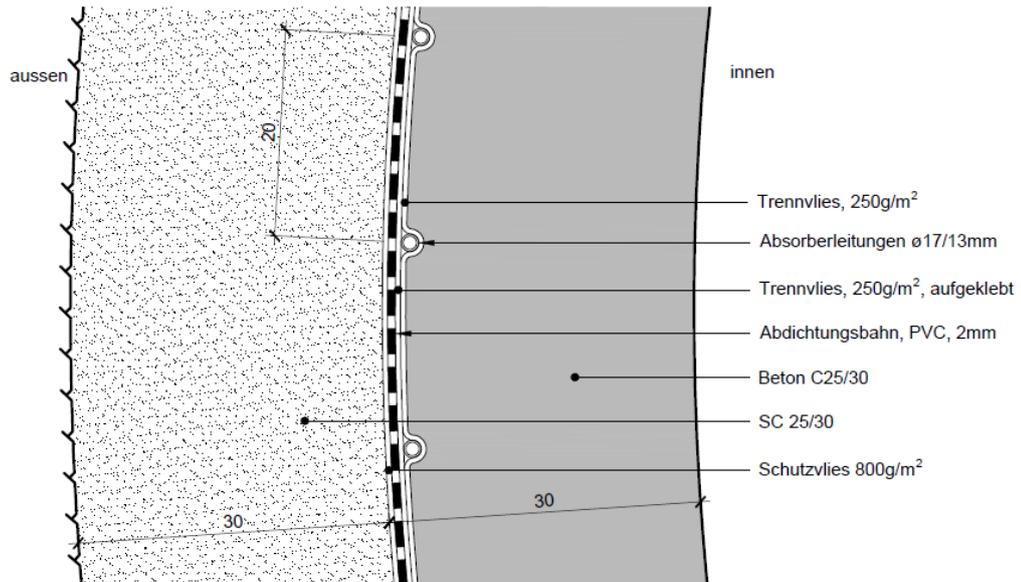


Abb. 4 Detail Aufbau Absorbermodul Typ 1 für Versuchsfeld 1

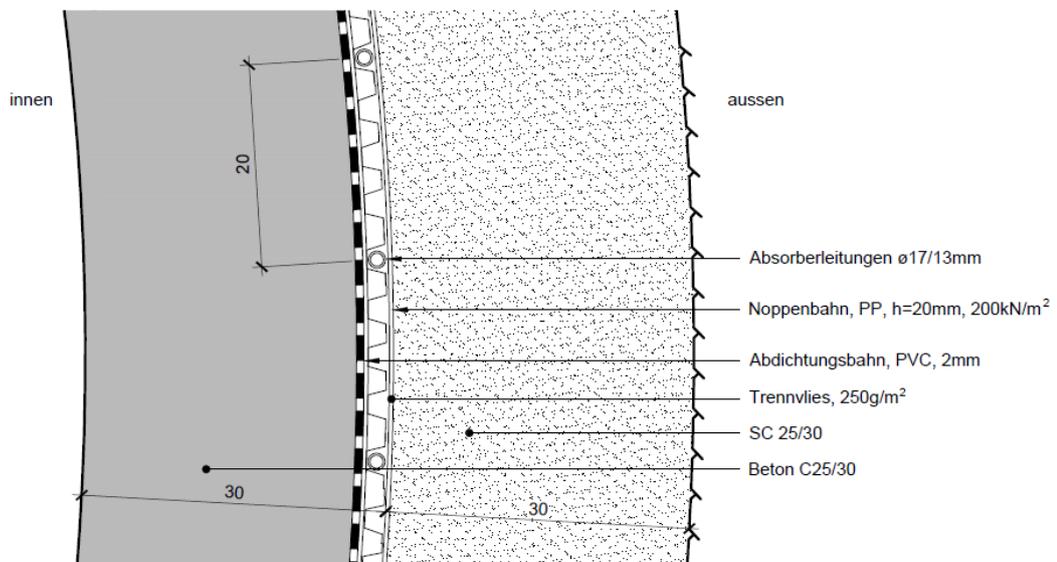


Abb. 5 Detail Aufbau Absorbermodul Typ 2 für Versuchsfeld 2

Die Absorbermodule wurden im Werk ausserhalb der Einbaustelle vorgefertigt.

Die Absorbermodule haben Abmessungen von $B \times H = 2.05 \text{ m} \times 4.1 \text{ m}$. Die Abmessungen wurden so festgelegt, dass folgende Anforderungen erfüllt sind:

- Transport der im Werk vorgefertigten Module auf die Baustelle mit Standardfahrzeugen auf gängigen Strassen
- Einfache Handhabung durch Baustellenpersonal beim Platzieren und Befestigen der Module ohne Spezialgeräte

Die Absorberleitungen sind in mäanderförmigen Schlaufen horizontal angeordnet. Der vertikale Abstand der Leitungen beträgt 20 cm. Der Randabstand der Leitungen beträgt mindestens 20 cm. Im Vergleich zu schneckenförmig angeordneten Leitungen ist bei paralleler Anordnung der Leitungen ein Aufrollen und somit ein Transport der Module in Rollen möglich.

Da die Absorberleitungen in das Tunnelbauwerk integriert sind, müssen diese wie auch das Bauwerk selbst eine hohe Lebensdauer (teilweise bis 100 Jahre) aufweisen. Im vorliegenden Fall wurde daher mit dem REHAU PE-Xa 17x2,0 vorkonfektioniert auf Rohrträgermatten eine Rohrleitung aus vernetztem Polyethylen (PE-Xa) verwendet. Diese ermöglichen enge Biegeradien und weisen geeignete Leistungswerte (zum Beispiel Full Notch Creep Test) auf, welche herkömmliche Rohre aus PE-HD übertreffen. Der Leitungsdurchmesser beträgt aussen 17 mm bei einer Wandstärke von 2 mm.

Beim Absorbermodul Typ 2 wurden die Absorberleitungen mit Metallklammern an der Noppenbahn befestigt. Beim Absorbermodul Typ 1 wurden Klettbefestigungen für das Anbringen der Absorberleitungen am Vlies verwendet.

Je Versuchsfeld wurden zwei Absorbermodule nebeneinander installiert und die Absorberleitungen über ein mittig angeordnetes Verbindungsstück miteinander verbunden.

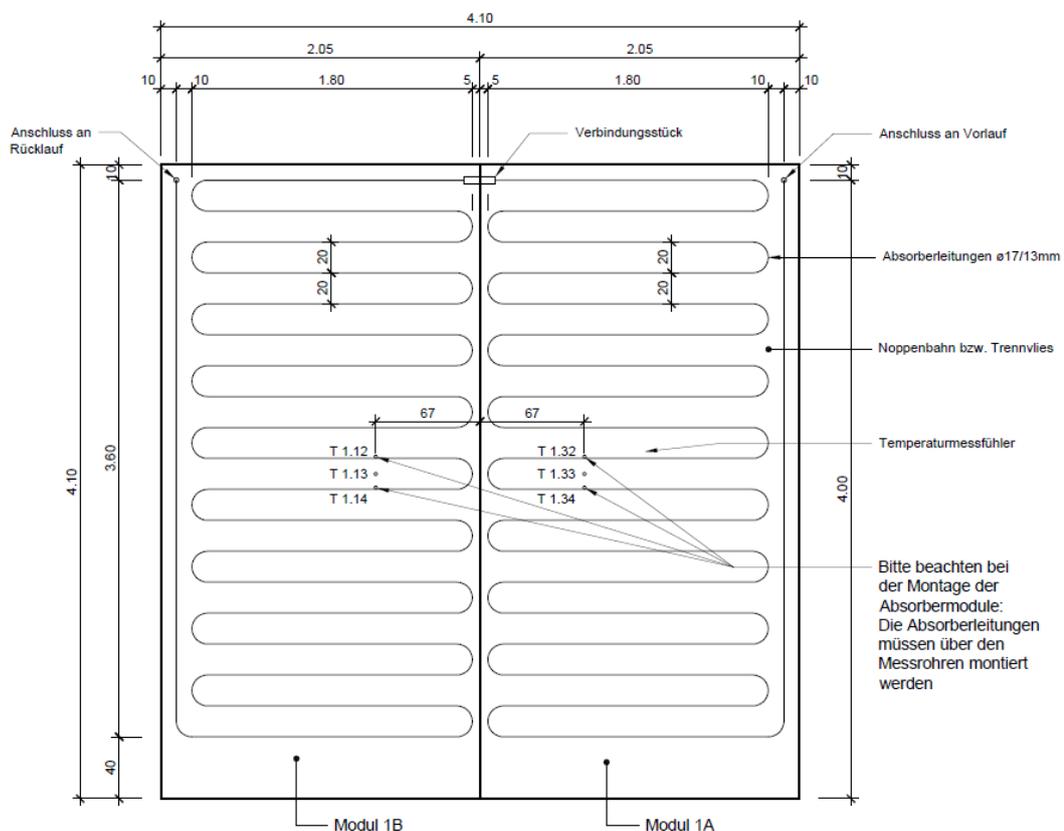


Abb. 6 Ansicht Absorbermodul Typ 1 [Auszug aus Plan Anhang A1]

Beim Versuchsfeld 1 wurde das Trennvlies des Absorbermoduls mit 2-K-Kleber auf der Abdichtung befestigt und so gegen Aufschwimmen beim Betonieren gesichert. Im Versuchsfeld 2 wurde wie im Tunnelbau üblich mit Hilfe von auf die Noppenbahn aufgeschraubten Folienrondellen die Abdichtung auf der Noppenbahn befestigt. Die Noppenbahn mit den integrierten Absorberleitungen wurde wie üblich mit Nägeln auf dem Spritzbetonuntergrund befestigt.

2.2.3 Versorgungsleitungen und Verbindetechnik

Die zwei Absorbermodule je Versuchsfeld wurden miteinander zu einem Kreislauf verbunden. Die Kreisläufe wurden jeweils an eine Vor- und eine Rücklaufleitung über Sperrventile angeschlossen, so dass sie unabhängig voneinander betrieben werden konnten, d.h. eine separate Regelung/Absperrung der Felder war möglich. In „ruhenden“ Feldern blieben die Absorberleitungen mit Flüssigkeit gefüllt. Das Hydraulikschema ist in **Abb. 31** in Kapitel 2.5 dargestellt.

Für den Versuch war es nicht erforderlich, die Absorbermodule nach Tichelmann-Prinzip zu verbinden, da die Druckverluste aufgrund der geringen Versuchsstrecke zu vernachlässigen sind. Werden im Betriebsfall mehrere Module hintereinander geschaltet, sind die Kreisläufe nach Tichelmann-Prinzip zu verbinden um ein selbst ausbalanciertes System zu gewährleisten. Zusätzlich zu je einer Vor- und einer Rücklaufleitung, ist dann eine Sammelleitung zu installieren.

Für die Versorgungsleitungen im Versuch wurden einfache PE-Rohre verwendet. Im Betriebsfall könnte es erforderlich sein, insbesondere bei niedrigen Tunneltemperaturen von $< 0\text{ °C}$ (im Portalbereich möglich), die Versorgungsleitungen thermisch zu isolieren, um die Wärmeverluste zu minimieren.

Hinsichtlich des Brandschutzes im Fahrraum müssen die Versorgungsleitungen aus einem

hitzebeständigen Material sein, das beim ASTRA zugelassen ist (PE-LD oder PE-HD zugelassen, PVC ist nicht zugelassen), oder andernfalls in einem brandsicheren Kanal geführt werden. Als Alternative wären auch Leitungen aus Edelstahl möglich.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die folgenden zwei Konstruktionsvarianten erarbeitet, bei denen sowohl die Anforderungen an die thermische Isolation als auch den Brandschutz gewährleistet sind.

Variante „RAUFRIGO-Rohre“

Das RAUFRIGO-Rohr von REHAU ist ein vorisoliertes Rohrsystem, bestehend aus einem Basisrohr aus Polyethylen, einer hochwirksamen Isolierung aus Polyurethan-Hartschaum und einem Aussenmantel aus verzinktem Stahl. Das vorisolierte Rohrsystem bietet den Vorteil der schnellen, einfachen, sicheren Montage und führt zu einer erheblich reduzierten Einbauzeit sowie geringeren Montagekosten. Alternativ zum verzinkten Stahlmantel ist auch die Ausführung in Edelstahl V2A möglich.

Variante „PE-Rohre im Kanal“

Um die geforderte Korrosionsbeständigkeit der Einbauten im Fahrraum zu gewährleisten, werden die Rohrleitungen aus Polyethylen in einem Kanal aus Edelstahl geführt. Der Zwischenraum zwischen Rohrleitungen und Kanal wird mit z.B. Steinwolle lose verfüllt.

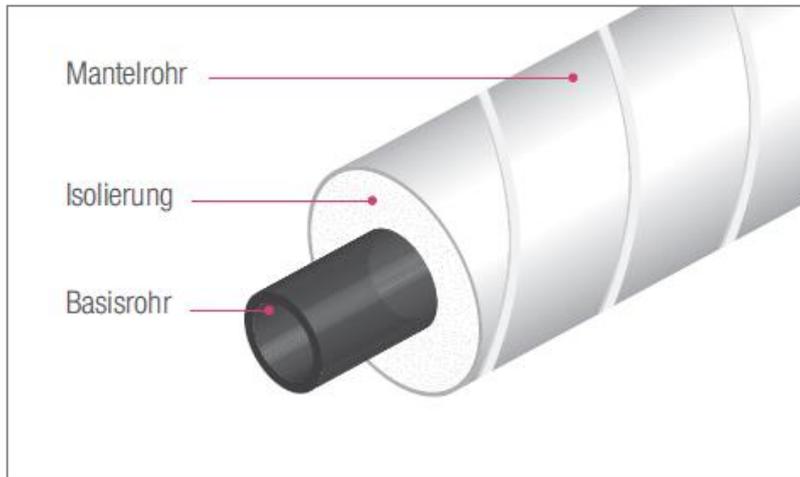


Abb. 7 RAUFRIGO-Rohr von REHAU

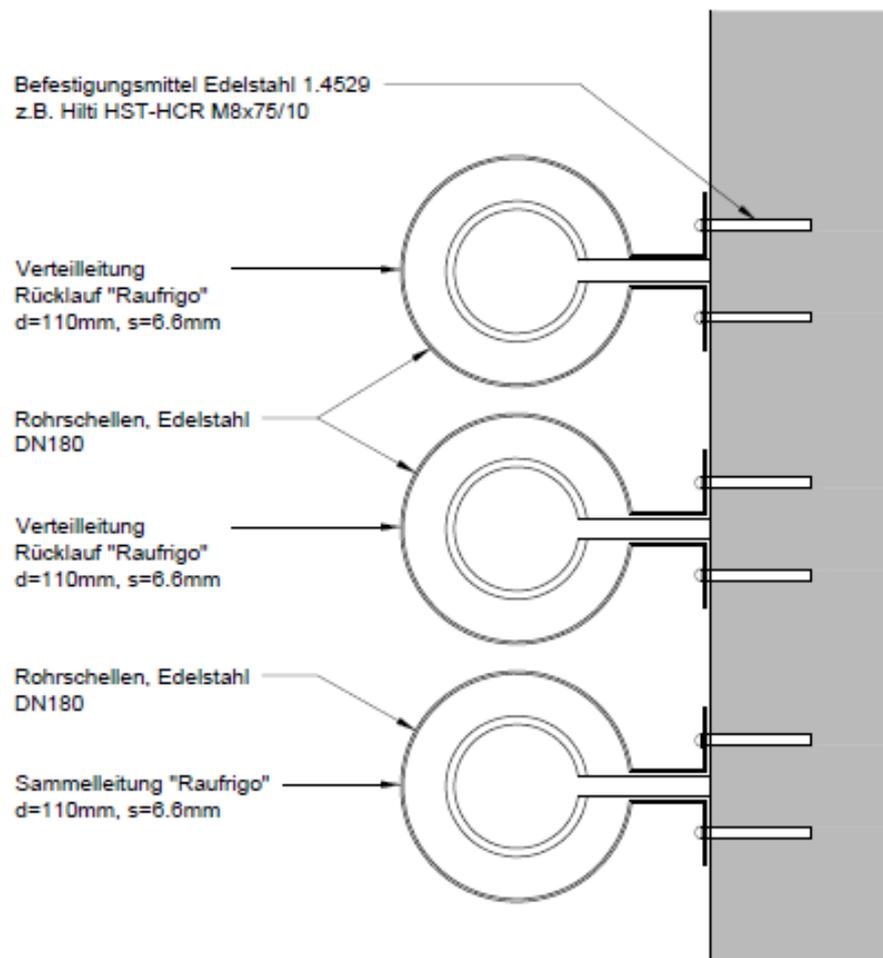


Abb. 8 Variante Versorgungsleitungen mit RAUFRIGO-Rohren von REHAU

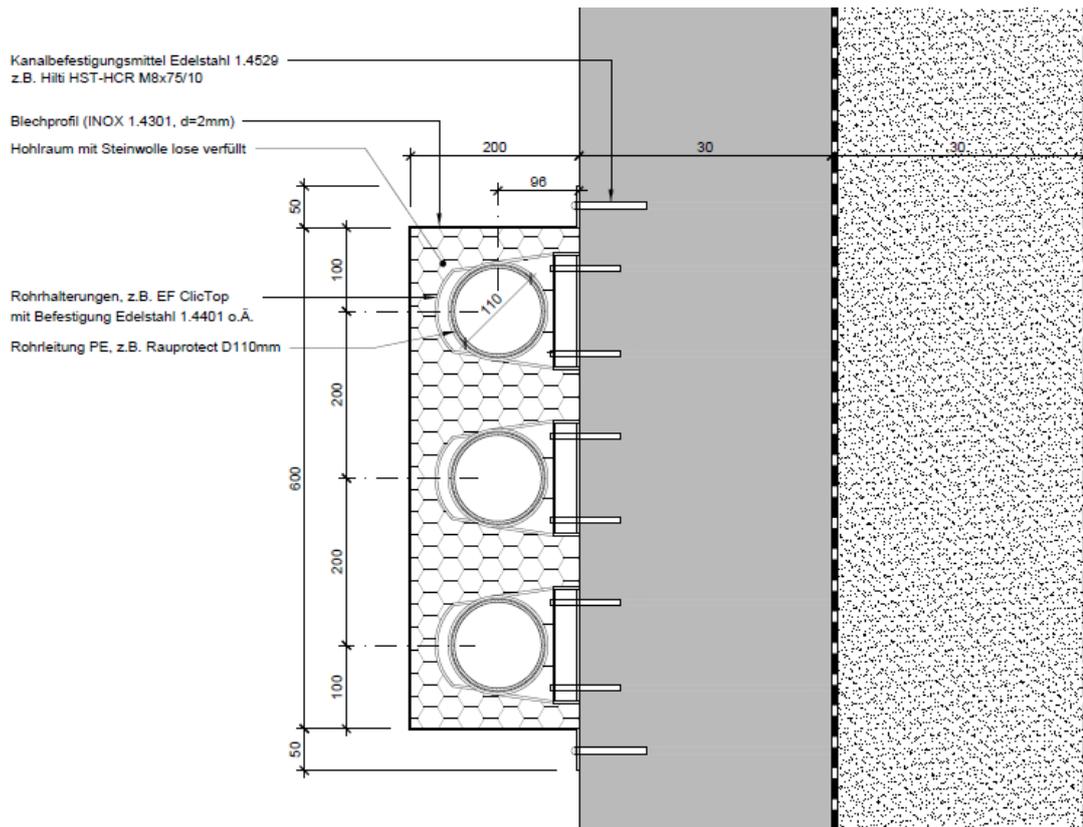


Abb. 9 Versorgungsleitungen mit PE-Rohren im Kanal geführt

Der Unterhalt der Leitungen muss einfach sein, nach Möglichkeit ohne Spezialwerkzeug oder teures Ersatzmaterial. Ausserdem muss die Konstruktion bei der regulären Tunnelreinigung überwaschbar sein. Beide vorgestellten Systeme erfüllen diese Anforderungen.

Tab. 2 Vergleich Varianten Versorgungsleitungen

RAUFRIGO-Rohr Vorisoliertes Rohrsystem (Fertigteil)	PE-Rohr in Kanal Mehrteilige Konstruktion, Isolierung erfolgt auf Baustelle
<ul style="list-style-type: none"> + erheblich reduzierte Einbauzeit sowie geringeren Montagekosten - hoher Materialpreis + Unterhalt einfach, da gute Zugänglichkeit - Ersatzmaterial teuer + bei regulärer Tunnelreinigung überwaschbar - händische Isolierung der Anschlussknoten aufwendig 	<ul style="list-style-type: none"> - Einbauzeit erhöht sowie höhere Montagekosten + geringer Materialpreis - Unterhalt aufwendiger, da Kanal geöffnet werden muss + Ersatzmaterial günstig + bei regulärer Tunnelreinigung überwaschbar

Die Versorgungsleitungen wurden im Tunnelquerschnitt oben an der Wand auf einer Höhe von ca. 4 m installiert. Das Risiko für Fahrzeuganprall ist auf dieser Höhe sehr gering, ein Anprallschutz entfällt somit. Die Modulhöhe beträgt ebenfalls ca. 4 m (Abwicklungslänge). Ziel war es, eine Anordnung zu finden, die für möglichst viele Tunnel gleichermassen funktioniert (einspurige/zweispurige Strassentunnel, mit/ohne Zwischendecke, Bahntunnel etc.). Vergleiche von verschiedenen Tunnelquerschnitten haben ergeben, dass die Wandhöhe von ca. 4 m bei den meisten Tunneln mindestens vorhanden ist.

Im Hinblick auf eine einfache Entlüftung der Absorberanlage für den Betrieb wäre eine Anordnung im Tunnelfirst optimal. In diesem Fall wäre auch nur jeweils ein Vor- und Rücklauf notwendig, an die von beiden Tunnelwandseiten aus angeschlossen würde.

In den Banketten hingegen sind im Normalfall bereits Kabelrohre und andere Versorgungsleitungen verlegt, es ist daher wenig Platz für weitere Leitungen vorhanden.

Die Verbindung der Absorbermodule miteinander bzw. der Anschluss an die Versorgungsleitungen in den Aussparungen erfolgt rein mechanisch mittels REHAU-Schiebehülse. Die Vorteile dieser Verbindungstechnik sind:

- geringer Platzbedarf der Verbindungstechnik,
- einfacher und schneller Einbau,
- hohe Druckbeständigkeit und
- dauerhaft dichte Verbindung ohne Dichtringe.



Abb. 10 REHAU Schiebehülse

2.2.4 Durchführungen und Aussparungen

Werden die Versorgungsleitungen im Tunnelinneren geführt, ist das Durchführen der Absorberleitungen durch die Innenschale zu den Versorgungsleitungen zu berücksichtigen. Dieses Durchführungsdetail variiert je nach Aufbau des Tunnels und richtet sich in erster Linie nach der Art der Abdichtung (Vollabdichtung, Regenschirmabdichtung).

Bei druckhaltenden Abdichtungssystemen sollte im Hinblick auf das Risiko von Leckagen gänzlich auf Durchführungen in der Abdichtung verzichtet werden. Hier könnte das Absorbermodul Typ 1 zur Anwendung kommen, bei dem das Absorbermodul innen auf der Abdichtung befestigt wird.

In den Versuchsfeldern 1 und 2 wurden im Bereich der Anschlüsse der Versorgungsleitungen an die Absorbermodule Aussparungen in der Innenschale erstellt (siehe **Abb. 11**). Die Aussparungen sind mit 25/22.5 cm so gross bemessen, dass das händische Verbinden der Absorbermodule mit den entsprechenden Verbindungswerkzeugen ungehindert erfolgen kann.

Die Aussparungsschalungen wurden direkt auf der Schalung der Innenschale befestigt. Die Aussparungen liegen am Rande eines Betonierblockes, da nur hier ein seitlicher Zugriff hinter die gestellte Gewölbeschalung für das Einführen der Absorberleitungen in die Aussparungskästen möglich ist.

Im Rahmen der Planung der Versuchsfelder wurde eine Variante mit „Blattfeder“ für die Leitungsdurchführung untersucht (siehe **Abb. 13**), die jedoch aufgrund folgender Problematiken verworfen wurde:

- Risiko des Abplatzens des Überdeckungsbetons, was zu unschönen Betonkanten im Bereich der Durchführungen führt (keine glatte Schalkante),
- Lagegenauigkeit der Absorberleitungen nicht kontrolliert herstellbar.

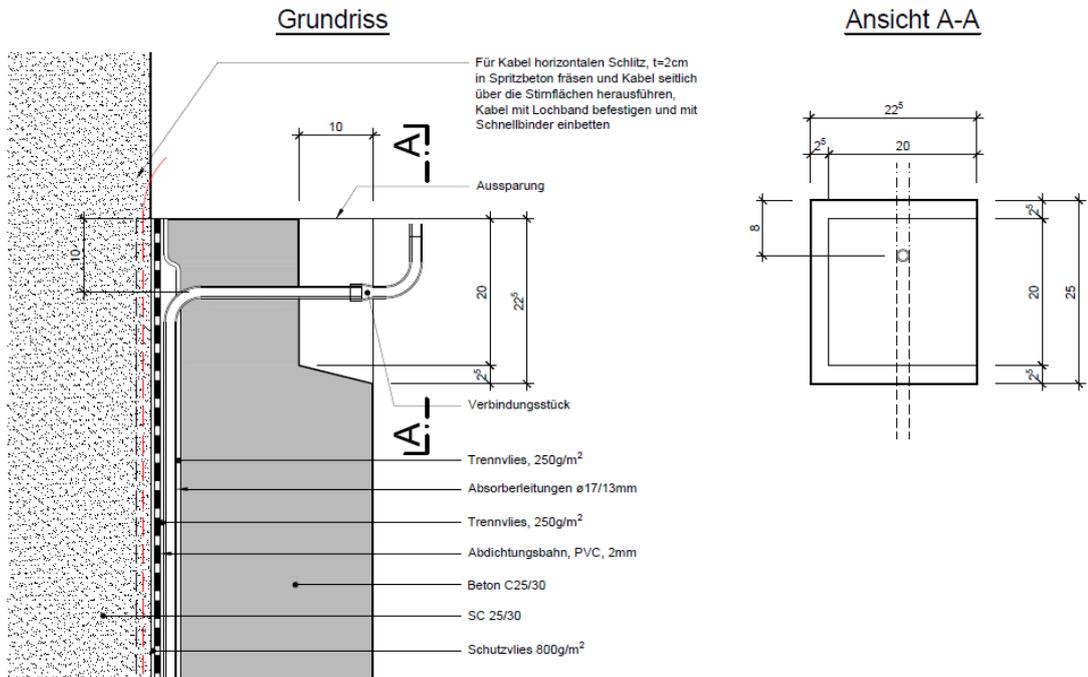


Abb. 11 Leitungsdurchführung in Aussparung [Auszug aus Plan Anhang A1]

Im Versuchsfeld 2 sind zusätzlich zu Betondurchdringungen ausserdem Durchführungen der Absorberleitungen durch die Abdichtung erforderlich. Hier wurde mit dem Sikaplan® Trumpet Flansch, welcher im Tunnelbau Stand der Technik ist, eine wasserdichte Abdichtungsdurchdringung hergestellt.

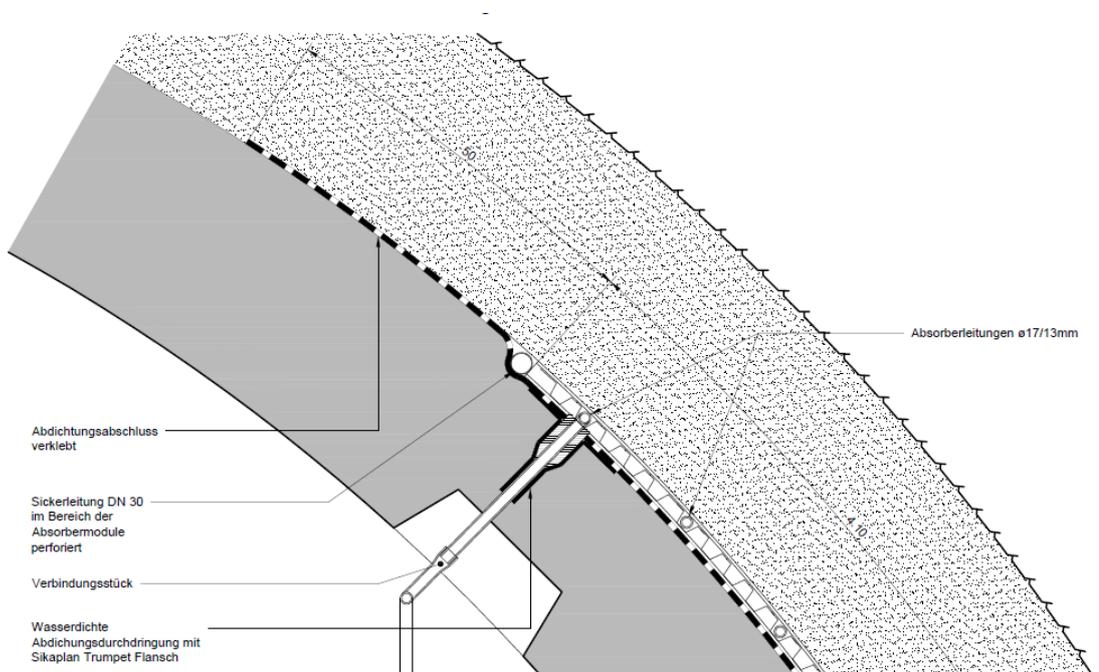


Abb. 12 Detail Abdichtungsdurchdringung [Auszug aus Plan Anhang A1]

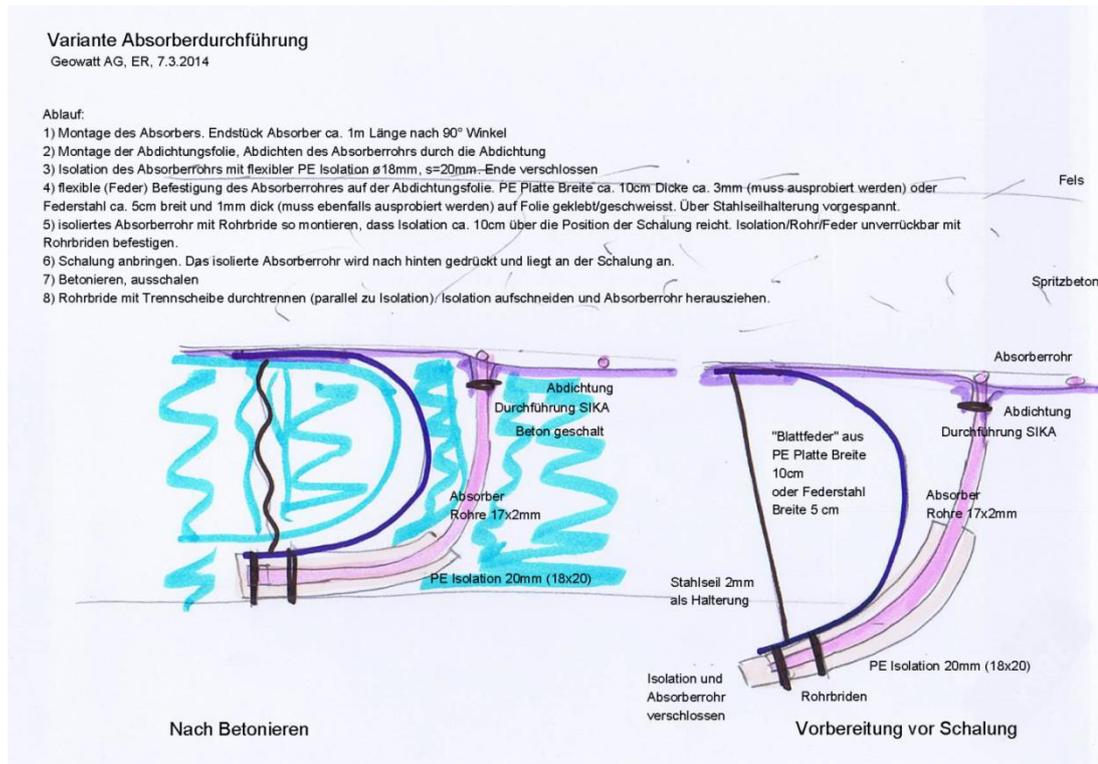


Abb. 13 Skizze Variante Blattfeder

2.2.5 Versuche

Der Pilotversuch wurde mit folgendem Ablauf durchgeführt:

- Aufbau der Versuchsfelder
- Anschluss der Mess- und Regeltechnik
- Anschluss der Versuchsfelder an die Infrastruktur des Versuchsstollens Hagerbach
- Betreiben und Überwachen der Versuchsfelder
- Auswertung und Interpretation der Messdaten

An den Versuchsfeldern wurden drei verschiedene Versuche durchgeführt:

Versuch I: Versuchsfeld 2 (Absorbermodul Typ 2), Betriebszustand trocken

Versuch II: Versuchsfeld 1 (Absorbermodul Typ 1), Betriebszustand trocken

Versuch III: Versuchsfeld 2 (Absorbermodul Typ 2), Betriebszustand bewässert

Dabei wurden zwei verschiedene Typen von Absorbermodulen unter gleichen Verhältnissen getestet (Versuch I und Versuch II). Als Versuch III wurde ein weiterer Versuch am Versuchsfeld 2 durchgeführt, bei dem der Effekt von Bergwasser getestet wurde. Dazu wurde bei Versuchsfeld 2 ein Bewässerungssystem installiert, mit welchem ein Einspeisen von Wasser in die Ebene des Absorbermoduls ermöglicht wurde. Es sollte ermittelt werden, ob aufgrund der weniger stark wärmeisolierenden Eigenschaften von Wasser gegenüber Luft höhere Entzugsleistungen bei Tunneln im Grundwasser erreicht werden. Es wurde stehendes Wasser simuliert, da dies thermisch der ungünstigere Fall ist, im Vergleich zu fließendem Wasser.

Das Versuchsfeld wurde rundherum abgedichtet, so dass ein Abfließen des zugeführten Wassers verhindert wurde. Über oben und unten angeordnete Sickerleitungen wurde das Wasser eingespeist bzw. wieder abgelassen. Es wurde ein Wasserzähler installiert, um die eingespeiste Wassermenge zu erfassen.

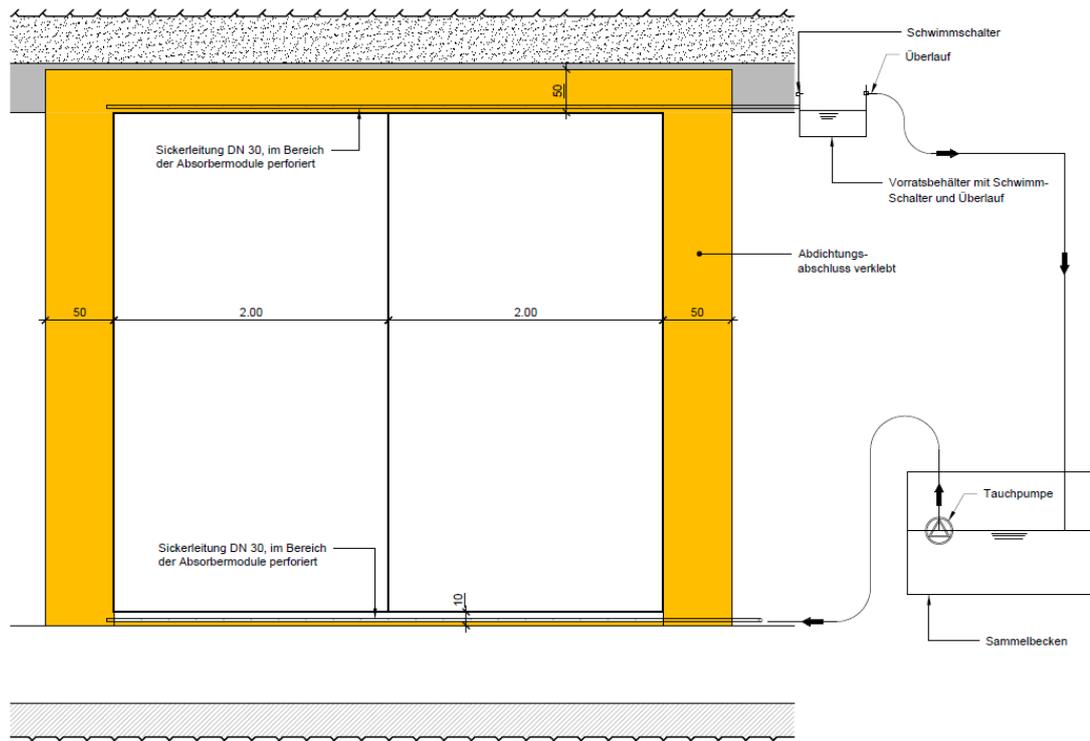


Abb. 14 Längsschnitt Bewässerungssystem [Auszug aus Plan Anhang A1]

Die Versuchsfelder 1 und 2 entsprechen dem Ausbau bei einem Tunnelneubau und decken ausserdem ebenso den Sanierungsfall mit Gewölbeersatz ab.

Ein Nachrüsten im Sinne von Anbringen der Absorbermodule im Fahrraum von Nationalstrassentunneln, ohne schützende Verkleidung, ist sowohl hinsichtlich baulicher als auch thermischer Aspekte und unter Berücksichtigung der geltenden ASTRA Richtlinien nicht ausführbar. Im Rahmen von Tunnelanierungen mit mindestens teilweise Gewölbeersatz ist jedoch ein nachträgliches Installieren von Absorbermodulen innerhalb der Betonschale möglich. Dieser Fall ist insbesondere mit Versuchsfeld 1 abgedeckt.

2.3 Bauablauf

Basierend auf der vorangegangenen Diskussion und den daraus resultierenden Anforderungen an die bauliche Umsetzung der Versuchsfelder wurde der Bauablauf in drei Phasen unterteilt:

In der Vorbereitungsphase wurde die Spritzbetonsicherung appliziert sowie das Bewässerungssystem (für den Versuch III) installiert. Die geometrischen Rahmenbedingungen wurden mittels Profilmessungen der Ausbruch- und Spritzbetonoberfläche erfasst.

In der zweiten Phase wurden die Abdichtung und die zwei verschiedenen Typen Absorbermodule in die Versuchsfelder eingebaut. Die beim Einbau der Absorbermodule spezifischen bautechnischen Details wurden genau untersucht und diskutiert.

Abschliessend wurde in der dritten Phase die Messtechnik installiert sowie die Innenschale aus selbstverdichtendem Beton erstellt. In dieser letzten Bauphase wurde die Aufmerksamkeit vor allem auf betonietechnische Besonderheiten gelegt, wie z.B. das Verhindern aufschwimmender Absorber oder die Lage, Grösse und solide Befestigung der Aussparungsschalung für die Leitungsanschlüsse.

Der Bau der Versuchsfelder ist im Anhang A4 mit Fotos dokumentiert.

2.3.1 Bauphase 1 – Vorbereitungsarbeiten

Um die genaue Lage der Versuchsfelder aus sowohl technischer als auch wirtschaftlicher Sicht optimieren zu können, wurde der Versuchsbereich in Lage und Höhe sowie mit Profilen im Abstand von 0.5 m vermessen.

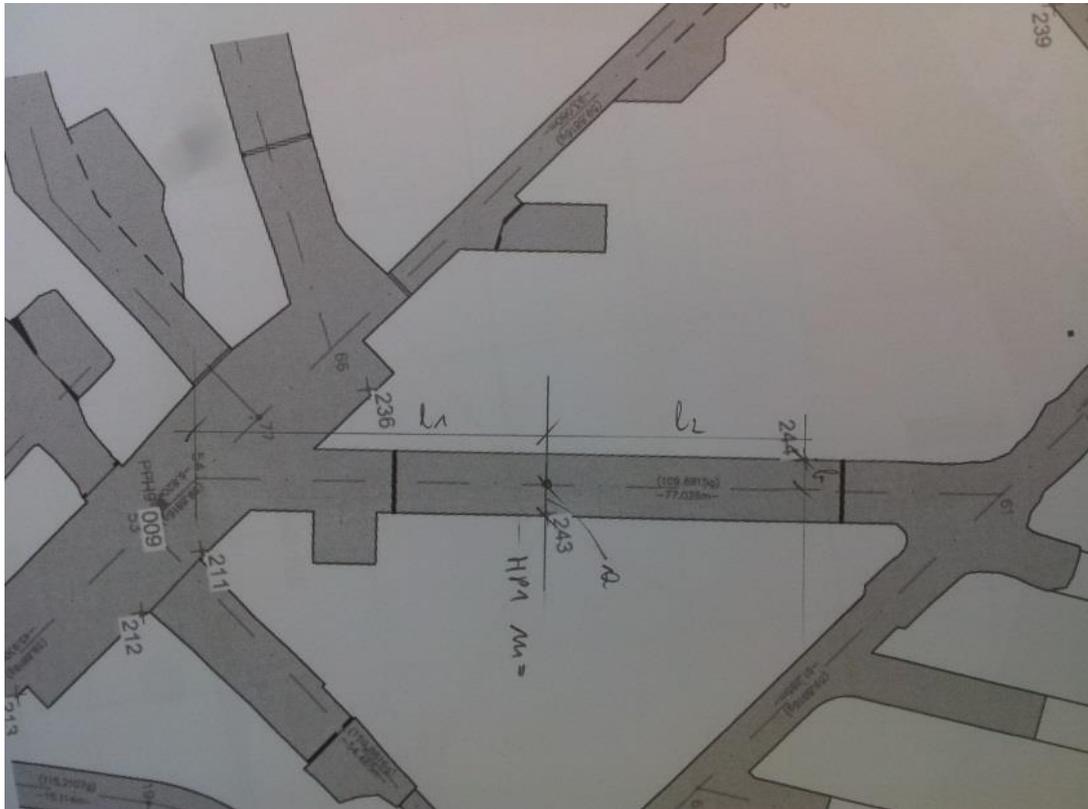


Abb. 15 Achsen und Hilfspunkte für die Vermessungsarbeiten

Die Versuchsfelder wurden längs der Tunnelachse in dem Bereich platziert, der bezüglich Oberfläche, Welligkeit und Profilform ein optimales Umsetzen der Planvorgaben erlaubte.

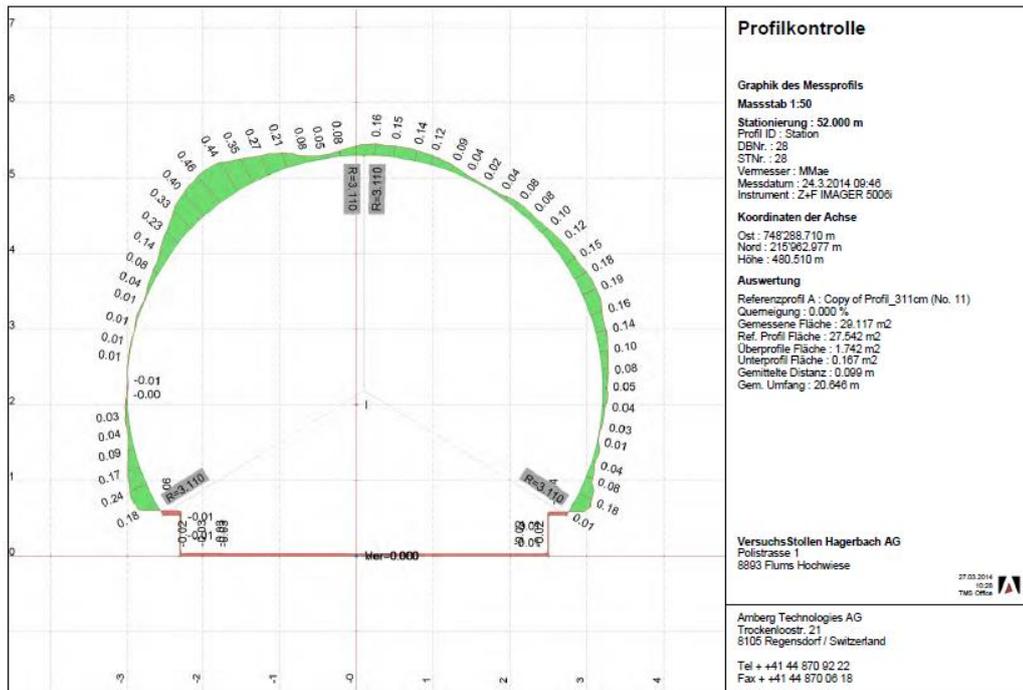


Abb. 16 Profilkontrolle im Zuge der Vorbereitungsarbeiten

Die Ausbruchoberfläche wurde mittels Spritzbeton gesichert. Mit Hilfe von Profilkontrollen wurde die Einhaltung der Vorgaben zur Mindestdicke der Spritzbetonschale sichergestellt.



Abb. 17 Überprüfung der Ebenheit der Oberfläche

Zur Sicherstellung der Qualität beim Einbau der Absorbermodule wurden Anforderungen an die Ebenheit und Rauigkeit des Untergrundes gestellt (siehe Kontrollplan). Das Verhältnis von Bossenabstand zu Bossentiefe darf 10:1 nicht unterschreiten. Legt man also eine Messlatte von 1 m Länge zwischen zwei Punkten an, darf der Abstand der Spritzbetonoberfläche zur Messlatte nirgendwo 10 cm überschreiten.

Als Bewässerungs- und Drainageleitung wurde im rechten Versuchsfeld 2 am oberen und unteren Rand jeweils ein perforierter Gummischlauch verlegt. Die aus dem Versuchsfeld

herausragenden Schlauchenden wurden mit Mörtel überdeckt, um auch an diesen Durchdringungsstellen der Versuchsfelder die Abdichtung sauber verlegen zu können.

In dieser Phase wurden auch die ersten Temperaturmessfühler versetzt und angeschlossen. Die Messkabel wurden gebündelt seitlich aus dem Versuchsfeld geführt.

2.3.2 Bauphase 2 – Einbau der Abdichtung und der Absorbermodule

Im Versuchsfeld 1 wurde die Abdichtungsfolie direkt an der Spritzbetonwand befestigt. Auf der Folie wurden die Absorberelemente vom Typ 1 (zwischen zwei Trennvliesen) befestigt. Die Sicherung der Absorberelemente gegen Auftrieb während des Betonierens wurde mit Hilfe von Klettverschlussstreifen links, mittig und rechts in vertikaler Richtung sowie horizontal am unteren Absorbermodulrand ausgeführt.

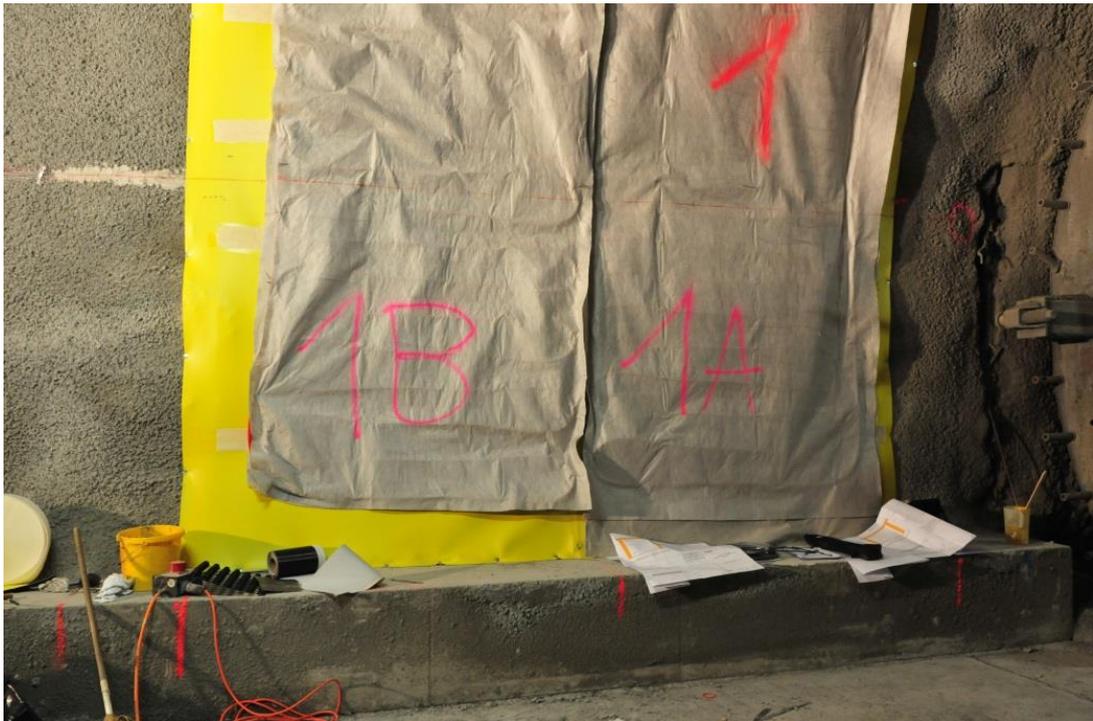


Abb. 18 Versuchsfeld 1 mit spritzbetonseitiger Abdichtung

Abb. 18 zeigt das Versuchsfeld 1 mit spritzbetonseitig liegender Abdichtung und den Absorberelementen 1B und 1A vom Typ 1. Der waagerechte, helle Streifen auf dem Spritzbeton links oben im Bild markiert die Mörtelabdeckung der Messkabel für die Temperaturmessfühler. Die auf dieser Höhe über die Module laufende rote Linie kennzeichnet die Lage der Temperaturmessfühler.

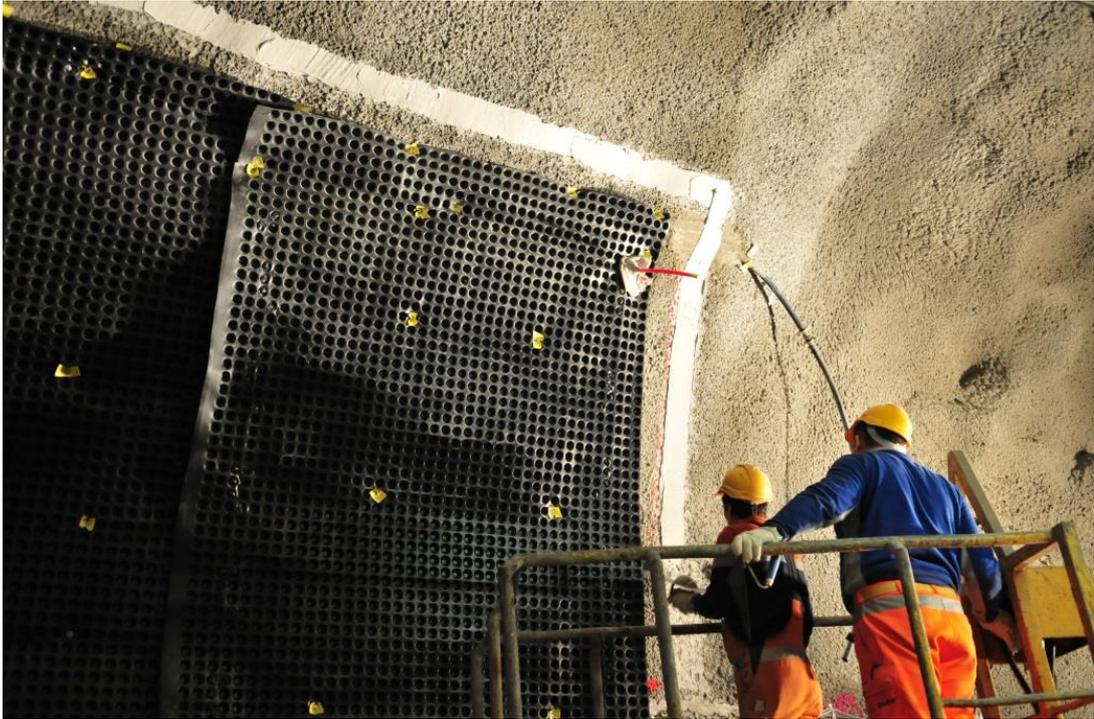


Abb. 19 Versuchsfeld 2 mit spritzbetonseitigem Absorbermodul

Das Versuchsfeld 2 war aufwändiger in der Erstellung, da das Absorbermodul hinter der Abdichtung platziert war. **Abb. 19** zeigt die bereits installierten Module, die Absorberleitungen sind bergseitig auf der Noppenfolie fixiert. Der rote Schlauch am rechten, oberen Rand der Noppenfolie ist die Anschlussleitung der Absorbermodule für den Anschluss an den Vor- bzw. Rücklauf. Der rechts daneben aus dem Spritzbeton ragende Schlauch ist der Anschluss für das Bewässerungssystem des Versuchsfeldes, welches im Versuch III zum Einsatz kam. Das helle Band, das die Noppenfolie umrandet, ist die Grundierung für die Verklebung der Abdichtung.

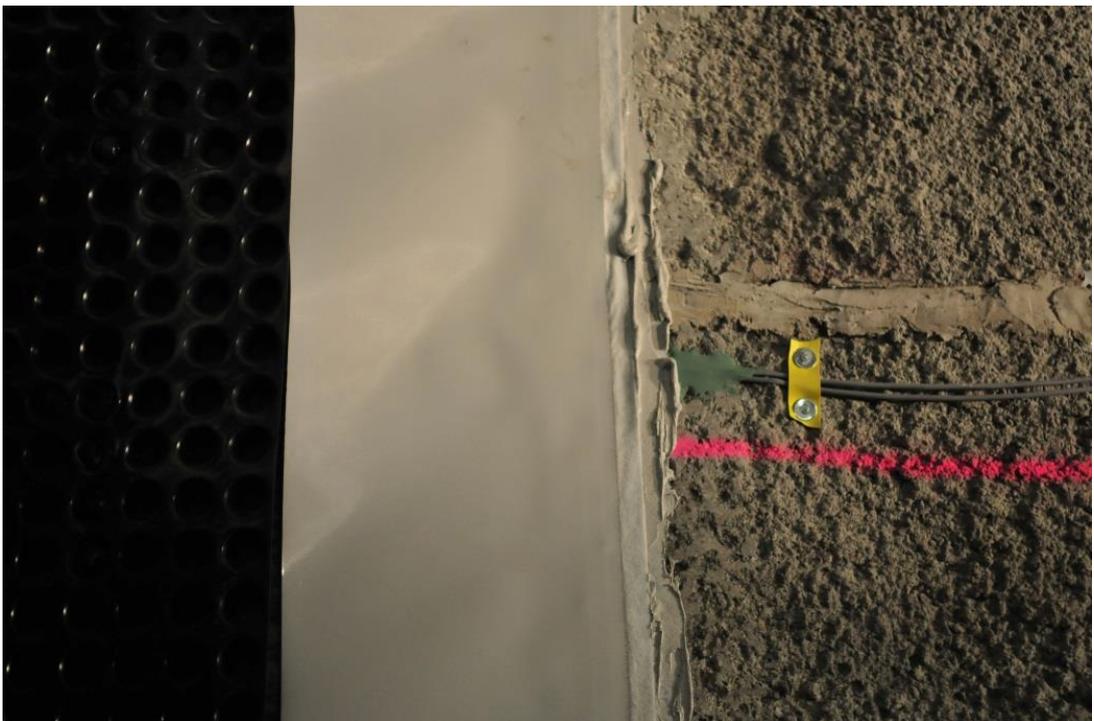


Abb. 20 Abdichtungsabschluss und Messkabeldurchführung

In **Abb. 20** erkennt man den mit Komponentenkleber fixierten Abschlussstreifen für die Abdichtungsfolie. Die Messkabeldurchführung wurde mit grösstmöglicher Sorgfalt mit Dichtungsmasse abgeschlossen. Wie sich jedoch anschliessend im Versuch herausgestellt hat, wurde eine vollständige Abdichtung der in Spritzbeton eingelegten Messkabeldurchführungen nicht erreicht.

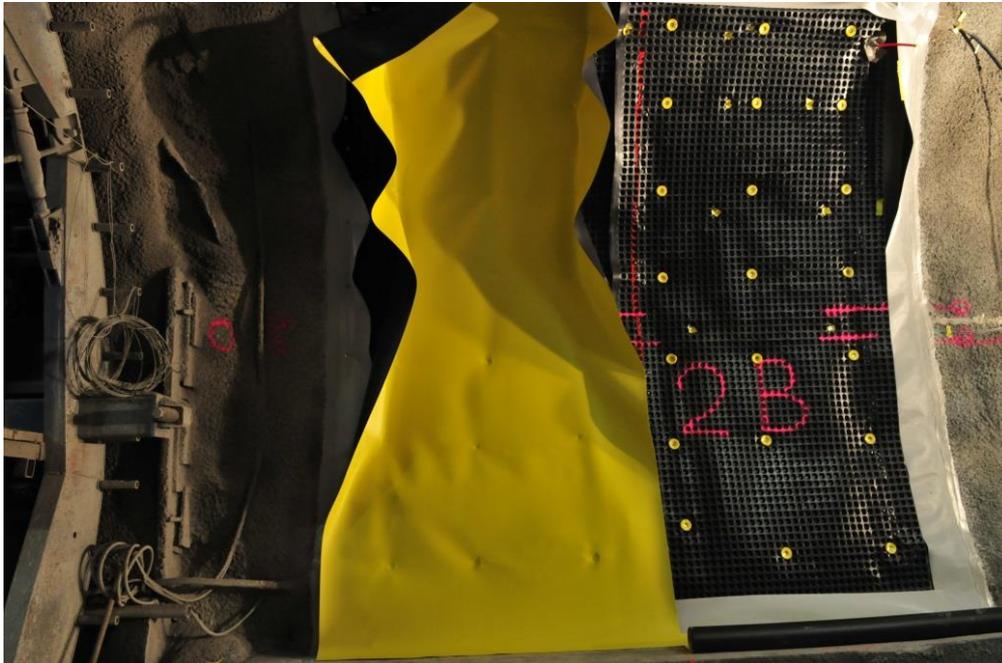


Abb. 21 Einbau der Abdichtungsfolie

Der anschliessende Einbau der Abdichtungsfolie wurde zügig und professionell von den Partnern der Sika AG durchgeführt. Da die Folie ein Standardprodukt ist, waren in diesem Schritt keine aussergewöhnlichen Beobachtungen zu machen. Das Feld wurde mit zwei Folienbahnen, die in der Feldmitte miteinander verschweisst wurden, abgedeckt.



Abb. 22 Verkleben der Umrandung des gesamten Versuchsfeldes

Abb. 22 und **Abb. 23** zeigen den Abdichtungsabschluss der Versuchsfelder. In der **Abb. 23** sieht man zusätzlich die Sensorkabel der in Feldmitte liegenden Temperaturmessfühler des Versuchsfeldes 2.



Abb. 23 Sensorkabel der Temperaturmessfühler im Versuchsfeld 2

2.3.3 Bauphase 3 – Abschluss

In Phase 3 wurde die Betoninnenschale erstellt, die den inneren Abschluss des zweischaligen Tunnelausbaues darstellt. Als erstes wurde die Gewölbeshalung im Versuchsfeld platziert, wo erstmals der Bedarf nach Detaillösungen vor Ort sichtbar wurde. Um die Verbindung zwischen den Absorbermodulen bzw. vom Modul zu den Versorgungsleitungen herstellen zu können, muss die Länge der Anschlussleitungen (überstehendes Leitungsstück) auf die Dicke der Innenschale abgestimmt sein. Unregelmäßigkeiten in der Innenschalendicke usw. müssen aufgefangen werden können.



Abb. 24 Platzieren der Gewölbeshalung im Versuchsbereich



Abb. 25 Gewölbeschalung und Absorberanschlussleitung



Abb. 26 Stirnschalung frontseitig

Das Anbringen der Stirnschalung war mit einem sehr grossen Aufwand verbunden, da jedes einzelne Holz nach Mass zugeschnitten und gegen die Gewölbeschalung verkeilt werden musste. Zusätzlich musste die Schalung gegen Aufschwimmen beim Betonieren gesichert werden, was durch die seitlichen und obenliegenden Spindeln gewährleistet wird.



Abb. 27 Stirnschalung mit Dichtungsschaum



Abb. 28 Ausschalen der Innenschale

Abb. 28 zeigt die Stirnfläche der Innenschale mit den Aussparungen für die Anschlussleitungen der Absorbermodule.

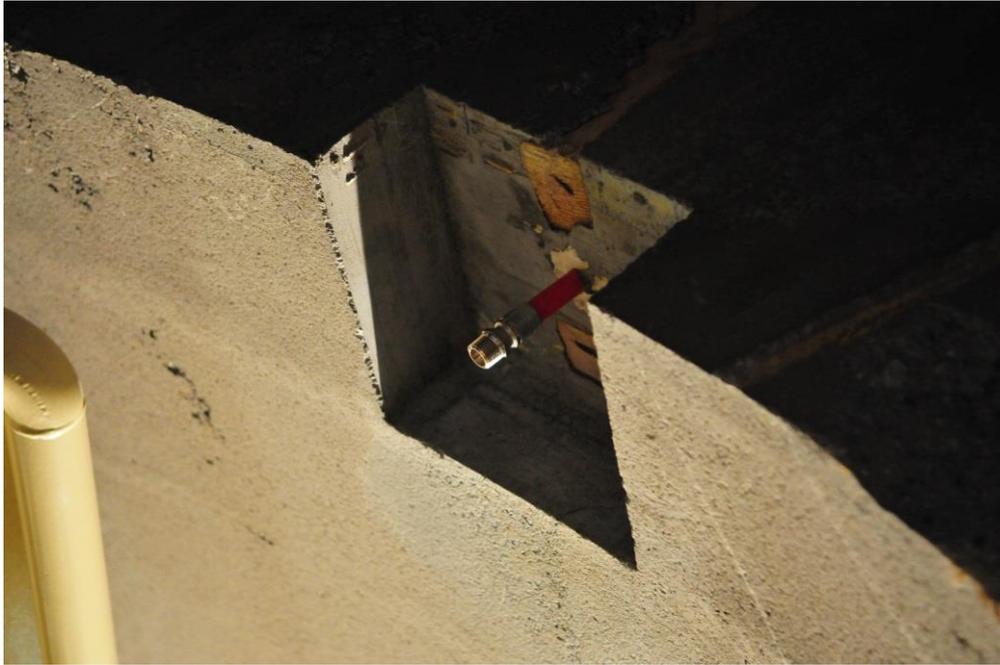


Abb. 29 Detail Anschluss der Absorberleitung

2.4 Prüfungen und Kontrollen

Im Hinblick auf die Qualitätssicherung der ausgeführten Arbeiten und der verbauten Materialien wurde im Rahmen der Planungsphase des Pilotversuches ein Kontroll- und Prüfplan erstellt (siehe Anhang A2). Ein Kontroll- und Prüfplan ist in Tunnelbauprojekten ein Standardinstrument zur Qualitätssicherung. Er beinhaltet die gemäss Normen und Stand der Technik auszuführenden Prüfungen durch die Bauunternehmer und Kontrollen durch den Bauherrn für die einzelnen Bauteile. Die Absorbermodule sind in diesen gesamthaften Kontroll- und Prüfplan aufzunehmen.

Es wurden Prüfungen und Kontrollen definiert, die folgendes sicherstellen:

- Wurde das richtige/geforderte Material mit den geforderten Eigenschaften geliefert? Nachweise mittels Kennzeichnung, Attesten usw.
- Ist das Produkt visuell in Ordnung, so dass es eingebaut werden kann (Kriterien zur Fehlerfreiheit der einzubauenden Absorberleitungen, z.B. Kratzer bis zu welcher Tiefe oder Knicke/Dellen sind zulässig? Ab wann darf das Absorbermodul nicht mehr eingebaut werden?)
- Erfolgt der Einbau der Absorbermodule korrekt? Was ist beim Einbau zu beachten? Wie erfolgt die Überwachung?

Auch aus thermischer Sicht sind Prüfungen erforderlich, um die Effizienz der Anlage sicherzustellen. Ausfälle einzelner Absorbermodule sind möglich, müssen aber auf ein kalkulierbares Mass eingegrenzt werden, um Mindestleistungen der Anlage dem Eigentümer und den Abnehmern zuzusichern.

Der Kontroll- und Prüfplan für den Versuch beinhaltet neben den Prüfungen und Kontrollen für die endgültigen Bauwerksteile ausserdem Vorgaben für die Prüfungen zur Überwachung des Versuches, wie z.B. für die messtechnischen Einrichtungen. Ausserdem dienen die durchgeführten Profilaufnahmen auf der Felsoberfläche, auf der Spritzbetonoberfläche und auf der Innenschalenoberfläche dazu, die real ausgeführten Dicken von Spritzbetonsicherung und Innenschale zu dokumentieren um diese als Grundlage für allfällige Extrapolationen der thermischen Berechnungen heranzuziehen.

Der Einbau der Absorbermodule wird durch das Baustellenpersonal des Abdichtungsunternehmers ausgeführt. Die Fragestellung, wann und durch wen die Dichtigkeitsprüfungen an den Absorbern ausgeführt werden und wer letztlich die Verantwortung für die einwandfreie Qualität trägt und allfällige Risiken übernimmt, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht. Folgendes mehrstufiges Modell wäre ein gangbarer Weg:

1. Bis zur Lieferung auf die Baustelle trägt der Produzent/Lieferant der Absorbermodule die Verantwortung für die einwandfreie Qualität der Module und ist verantwortlich für die Nachweise der Qualitätsprüfungen im Werk. Der Bauunternehmer ist verantwortlich für die Prüfungen auf der Baustelle, vom Zeitpunkt der Lieferung bis zum Einbau der Module.
2. Der Abdichtungsunternehmer übernimmt die Aufgabe der Dichtigkeitsprüfung an den Modulen und führt diese im Rahmen der Dichtigkeitsprüfungen der verlegten Abdichtungsbahnen durch. Der Abdichtungsunternehmer führt einen Drucktest mit Pressluft zur Prüfung der Dichtigkeit der Module durch. Luftverluste sind durch Pfeifen hörbar. Er trägt die Verantwortung für die Dichtigkeit der Absorbermodule vom Einbau der Module bis zum Stellen der Schalung für das Innengewölbe.
3. Vor dem Betonieren sind die Absorberleitungen mit Flüssigkeit zu füllen. Nach dem Betonieren des Innengewölbes führt der Bauunternehmer einen Drucktest an den flüssigkeitsgefüllten Absorberleitungen durch. Er trägt die Verantwortung für die einwandfreie Qualität der Absorbermodule bis zur Inbetriebnahme der Anlage.

Die nachfolgende Abbildung zeigt dieses Modell.

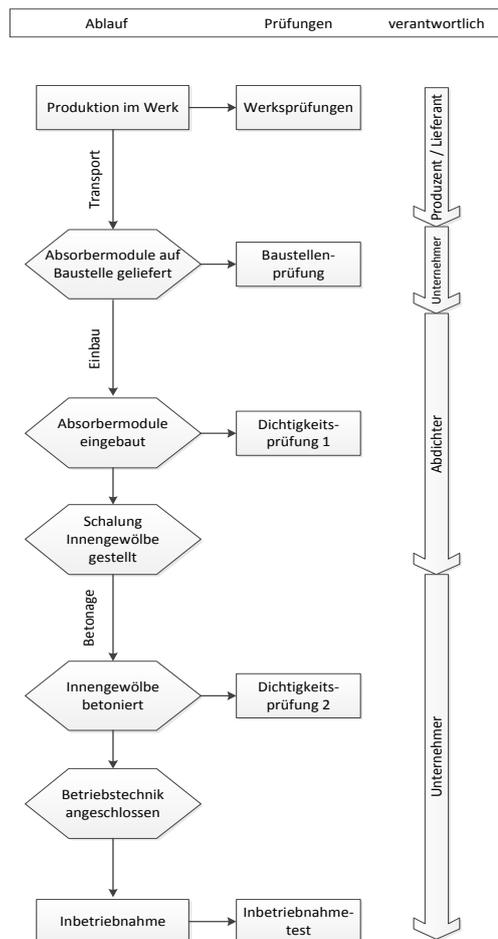


Abb. 30 Schema Verantwortlichkeiten Prüfungen

2.5 Installierte Messtechnik

Um die beiden Versuchsfelder auf ihre thermische Leistungsfähigkeit testen zu können, wurde eine Wärmepumpenanlage installiert, die es erlaubt, den Absorbermodulen von einem der beiden Versuchsfelder kontrolliert Wärme zu entziehen. Die Abwärme wird über einen Luftwärmetauscher abgegeben. Da dessen Leistung nur gering ist, ändert sich dadurch die Tunnellufttemperatur praktisch nicht; sie kann als konstant angesehen werden. Die installierte Regelung ist so aufgebaut, dass entweder eine konstante Leistung oder eine konstante Eintrittstemperatur gefahren werden kann. Mit der Anlage kann auch anstelle eines Wärmeentzugs ein Wärmeeintrag in die Absorbermodule gefahren werden. Die Regelung sowie die Datenerfassung sind über einen PC gesteuert, der über GSM mit dem Internet verbunden ist.

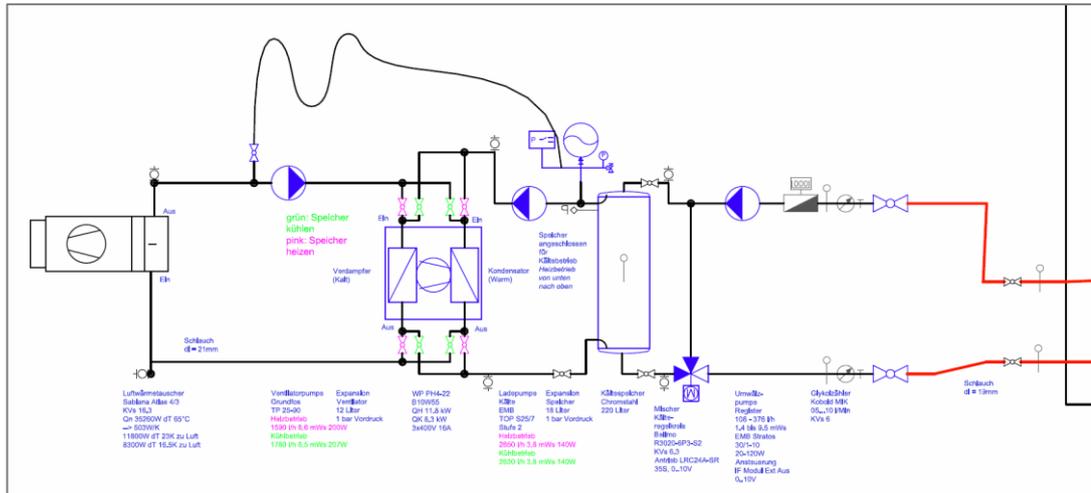


Abb. 31 Hydraulikschema der Testanlage mit Wärmepumpe und Luftwärmetauscher. Rechts (rot) der Anschluss an das Versuchsfeld 1 oder Versuchsfeld 2

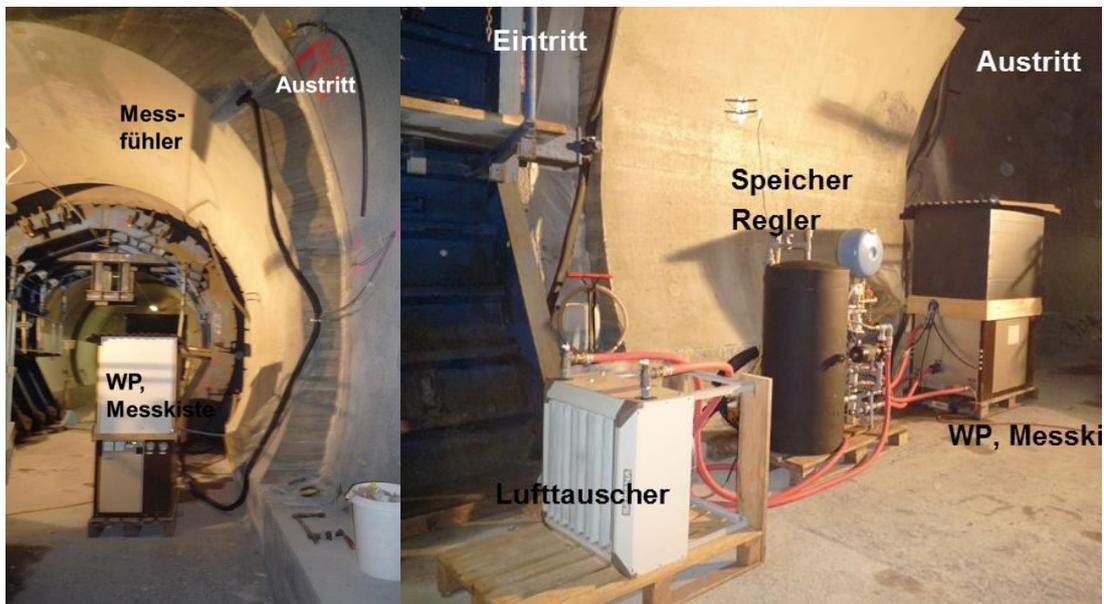


Abb. 32 Testanlage mit Wärmepumpe und Luftwärmetauscher

Die Absorbermodule A und B jedes der beiden Versuchsfelder wurden mit insgesamt 37 Temperaturmesssensoren ausgerüstet. Dabei wurden die Module A mit je 22 Sensoren und die Module B mit je 15 Sensoren bestückt (vgl. **Abb. 33** und **Abb. 34**). Ausserhalb der Absorberschicht sind die Temperaturmessfühler in vier Bohrlöcher pro Modul eingebracht. Dadurch lassen sich in jedem Modul zwei zur Tunnelwand vertikale Temperaturprofile kontinuierlich messen. Die Bohrlöcher reichen bis einen Meter tief in die Tunnelwand hinein. Die Temperaturmessfühler wurden auf Lanzen in regelmässigen Abständen befestigt, in die Bohrlöcher eingeschoben und mit Thermocem ($\lambda = 2 \text{ W/m/K}$) hinterfüllt.

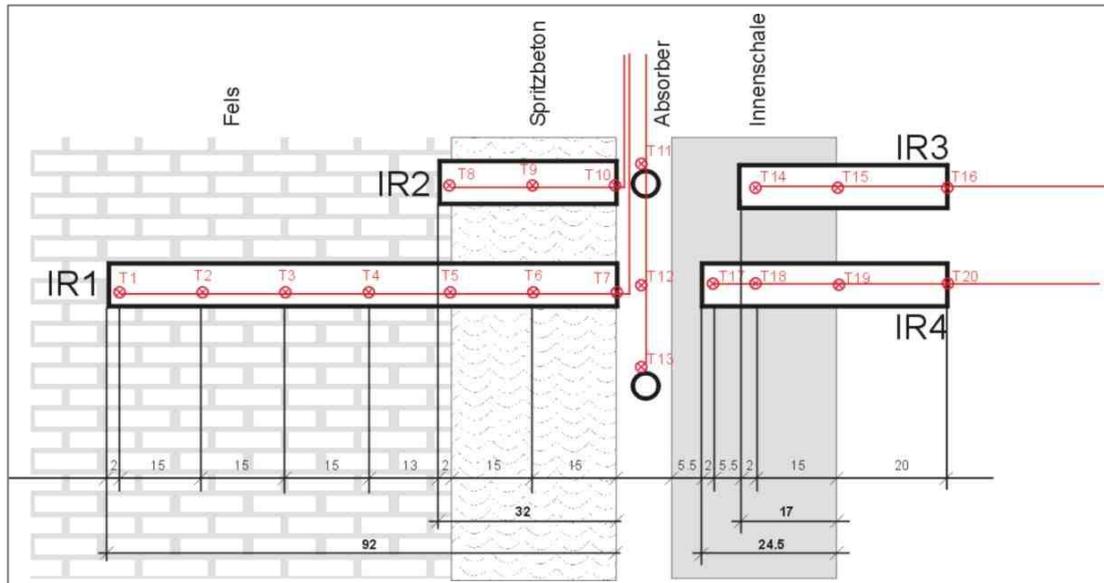


Abb. 33 Lage der 22 Temperaturmessfühler in Modul A, Rohre IR2 und IR3 liegen in der Ebene der Absorberleitung, IR1 und IR4 liegen in der Ebene zwischen zwei Absorberleitungen (nicht massstäblich, Abmessungen in cm)

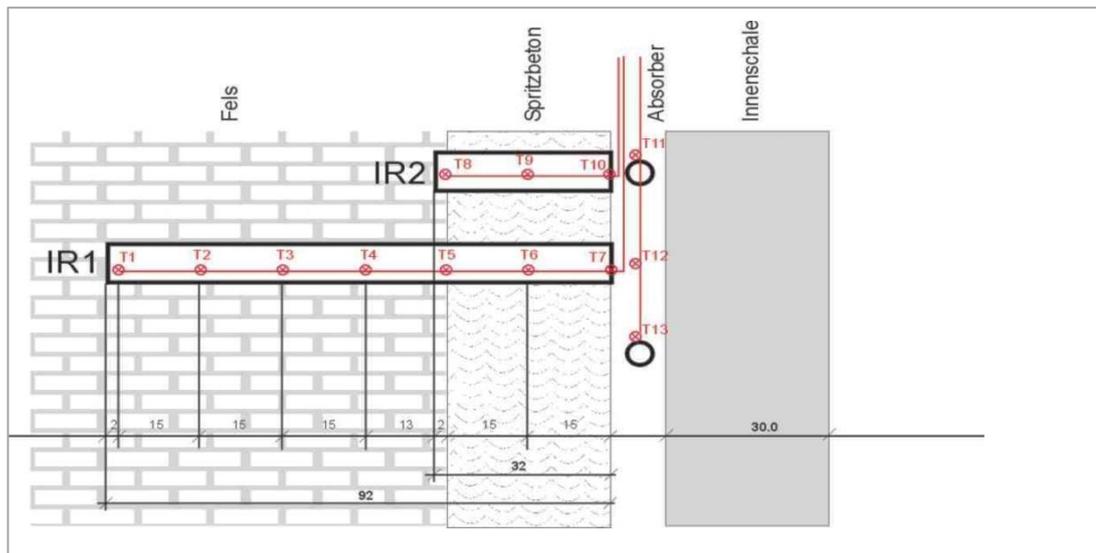


Abb. 34 Lage der 15 Temperaturmessfühler in Modul B, Messrohr IR2 liegt in der Ebene der Absorberleitung, IR1 liegt in der Ebene zwischen zwei Absorberleitungen (nicht massstäblich, Abmessungen in cm)

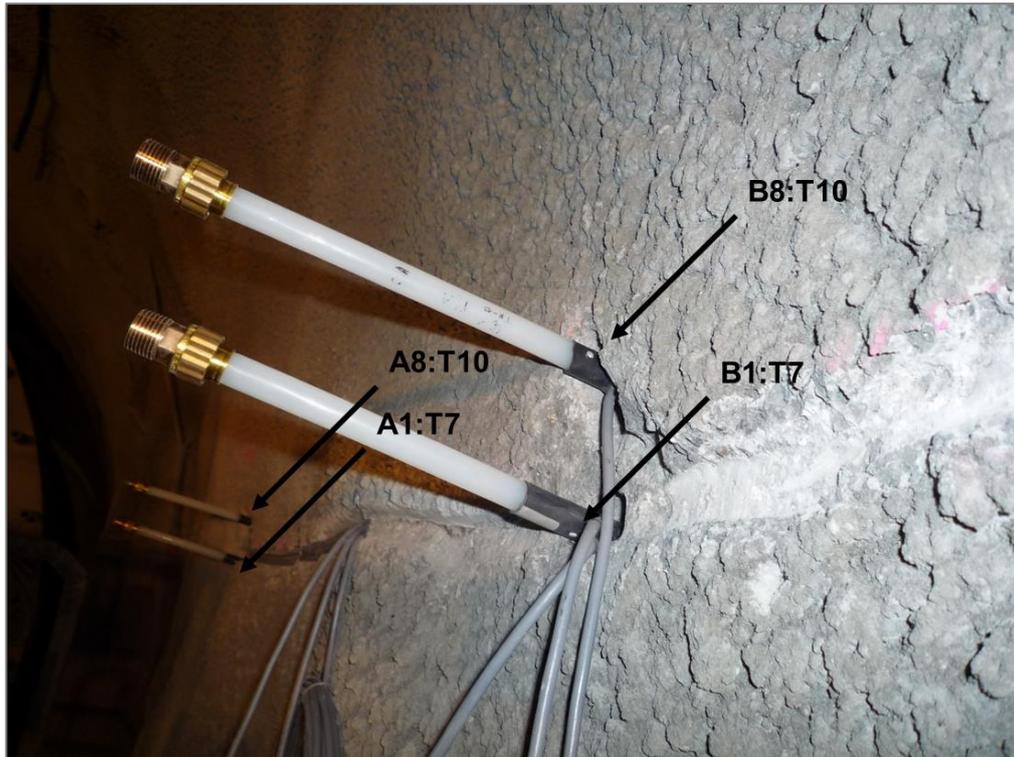


Abb. 35 Platzierung der vier Messlanzen mit den Temperatursensoren T1-T7 und T8-T10 bei den beiden Feldern A und B, bevor die Absorberschicht und die Innenschale aufgebracht wurden.

2.6 Versuchsbetrieb

Die drei Versuche wurden zwischen Juli 2014 und Juni 2015 durchgeführt. Die Testanlage erwies sich dabei als robust und verlässlich. Mit Ausnahme eines kurzen Stromunterbruchs während des Versuchs III (vgl. **Abb. 42**) nach ca. 830 Stunden) gab es nur geringe Störungen. Schwierigkeiten ergaben sich bei Versuch III in Bezug auf die Dichtheit des Bewässerungssystems. Nach der Durchführung von erweiterten Abdichtungsmassnahmen nach der ersten Bewässerung des Systems, konnte das Bewässerungssystem etwa zur Hälfte bleibend mit Wasser gefüllt werden. Damit lag nur etwa die Hälfte des Absorbersystems im Wasser, wodurch der Effekt eines grundwassergesättigten Untergrunds auf die Absorberleistung nur etwa zur Hälfte nachgebildet werden konnte. Nachstehende Tabelle gibt einen Überblick auf den zeitlichen Ablauf der Versuche. Bei allen Versuchen betrug die Dauer des Wärmeentzugs durch die Wärmepumpenanlage etwa 35 Tage.

Tab. 3 Zeitlicher Ablauf der Versuche

Versuch	Feld	von	bis	Dauer
Auskühlen des Betons	1 und 2	27.03.2014	24.04.2014	28 Tage
Versuch I: Versuchsfeld 2 (Absorbermodul Typ 2), Betriebszustand trocken	2	02.07.2014	16.09.2014	76 Tage
Versuch II: Versuchsfeld 1 (Absorbermodul Typ 1), Betriebszustand trocken	1	12.11.2014	21.01.2015	64 Tage
Versuch III: Versuchsfeld 2 (Absorbermodul Typ 2), Betriebszustand bewässert	2	08.05.2015	16.06.2015	39 Tage

3 Ergebnisse aus den Versuchen

3.1 Messresultate

3.1.1 Versuch I (Versuchsfeld 2, trocken)

Wie die nachstehende **Abb. 36** zeigt, wurde die Wärmepumpe auf eine konstante Soleeintrittstemperatur geregelt. Es zeigt sich dabei eine anfänglich abnehmende Kälteleistung des Absorbers, die aber nach ca. 300 Stunden praktisch in einen konstanten Wert übergeht. Etwa nach fünfeinhalb Wochen (ca. Stunde 930) wurde der Wärmeentzug abgestellt und das Absorbersystem konnte sich thermisch wieder erholen.

Wie die **Abb. 37** zeigt, ist die Reaktionszeit der Temperatur umso länger, je weiter der Messfühler von den Absorberleitungen entfernt ist.

Was in der zweiten Figur ebenfalls auffällt, ist der sehr grosse Temperatursprung zwischen Sole und Umgebung. Bereits gegenüber der Oberfläche der Absorberleitungen beträgt der Temperaturunterschied gegenüber der mittleren Soletemperatur 5 K. Dies weist unmittelbar darauf hin, dass Möglichkeiten zur thermischen Effizienzverbesserung von Absorbersystemen bei der thermischen Ankopplung der Sole an die Umgebung zu suchen sind. Mit einer Reynoldszahl von > 2800 herrscht in den Rohren ein für den Wärmeaustausch günstiges, turbulentes Strömungsregime.

In **Abb. 38** sind die Temperaturprofile in den Messrohren zu unterschiedlichen Zeiten dargestellt. Es zeigt sich, dass die thermischen Prozesse massgeblich im unmittelbaren Nahbereich des Absorbersystems stattfinden. Ebenfalls hier ersichtlich ist der sehr grosse Temperatursprung von 5 K zwischen der Sole (Messpunkt bei 0 m) und bereits den am nächsten gelegenen Messfühlern (Absorberleitungsoberfläche).

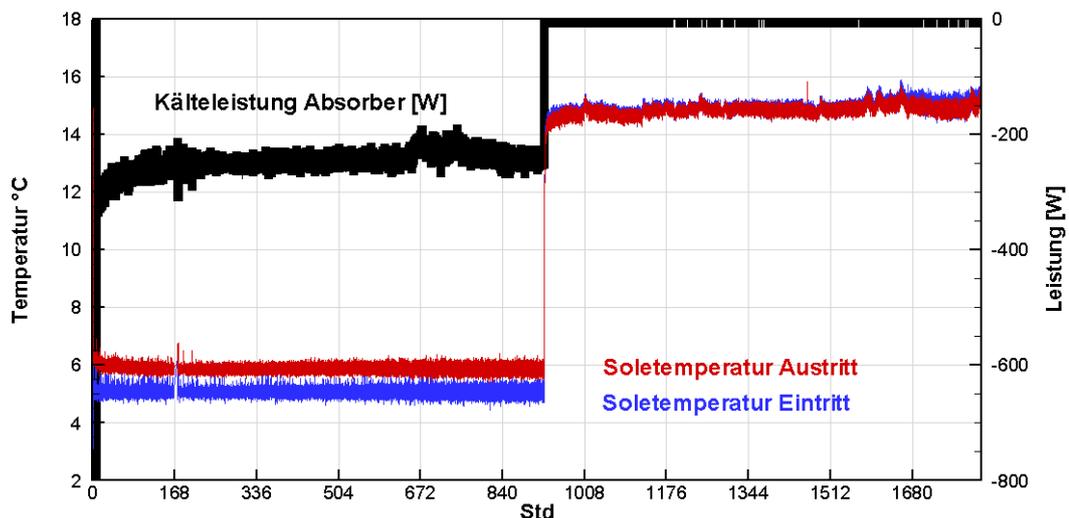


Abb. 36 Gemessener Temperaturverlauf und Kälteleistung der Sole am Absorbereintritt und -austritt

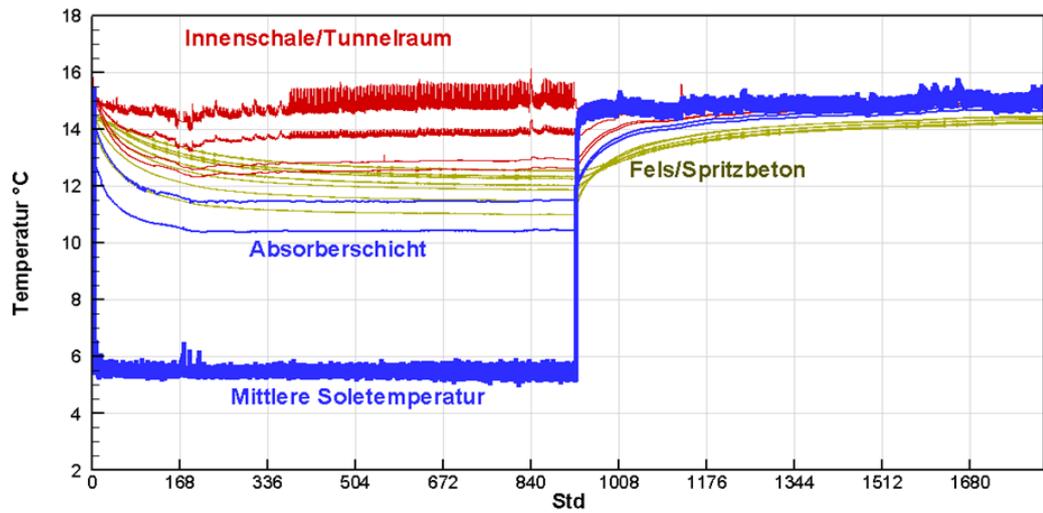


Abb. 37 Gemessener Temperaturverlauf der Messfühler in den Messrohren, sowie der Sole (Mittelwert)

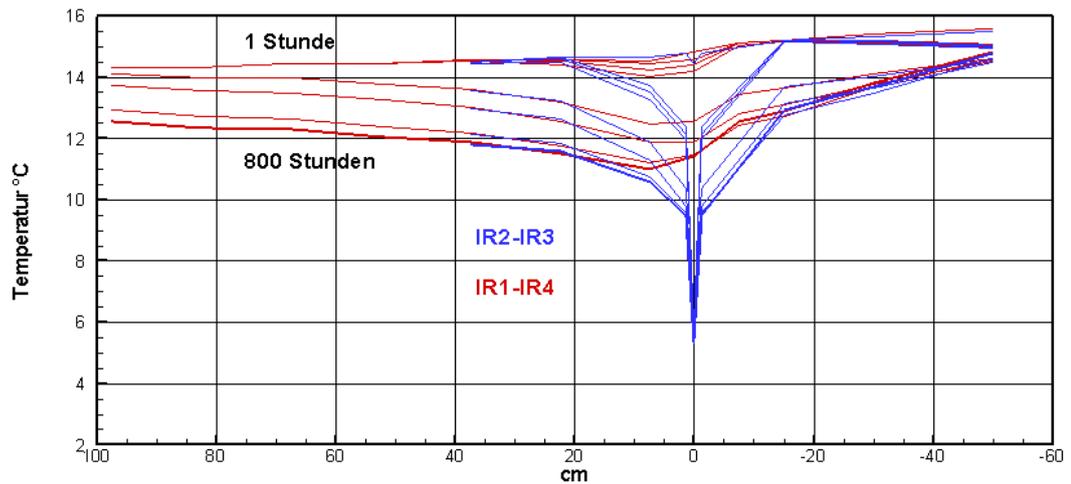


Abb. 38 Gemessene Temperaturprofile in den Messrohren der Ebenen IR2-IR3 (blau) und IR1-IR4 (rot), nach 1, 2, 3, 5, 100, 300 und 800 Stunden Wärmeentzug

3.1.2 Versuch II (Versuchsfeld 1)

Für den Versuch II wurde die Wärmepumpenanlage an das Versuchsfeld 1 (Absorbersystem innenliegend auf Abdichtungsfolie) angeschlossen. Ziel war es, ebenfalls die Soletemperatur durch die Regelung der Entzugsleistung konstant zu halten. Wie die nachstehende **Abb. 39** zeigt, sank die Soletemperatur etwa ab der Stunde 1100 auf ein etwas tieferes Niveau ab. Dieses Verhalten ist auf einen beginnenden Defekt an einem Temperaturmessfühler für das Regelungssystem zurückzuführen. Der Defekt vergrößerte sich dann bei Versuch III signifikant. Durch die angewandte Auswertemethodik (vgl. Kapitel 3.2.1.) mit der Absorberfunktion sind allerdings auch unregelmässige Messreihen in Bezug auf die thermische Charakteristik eines Absorbermoduls auswertbar und vergleichbar.

Mit einer Reynoldszahl von > 2800 herrscht in den Rohren ein für den Wärmeaustausch günstiges, turbulentes Strömungsregime.

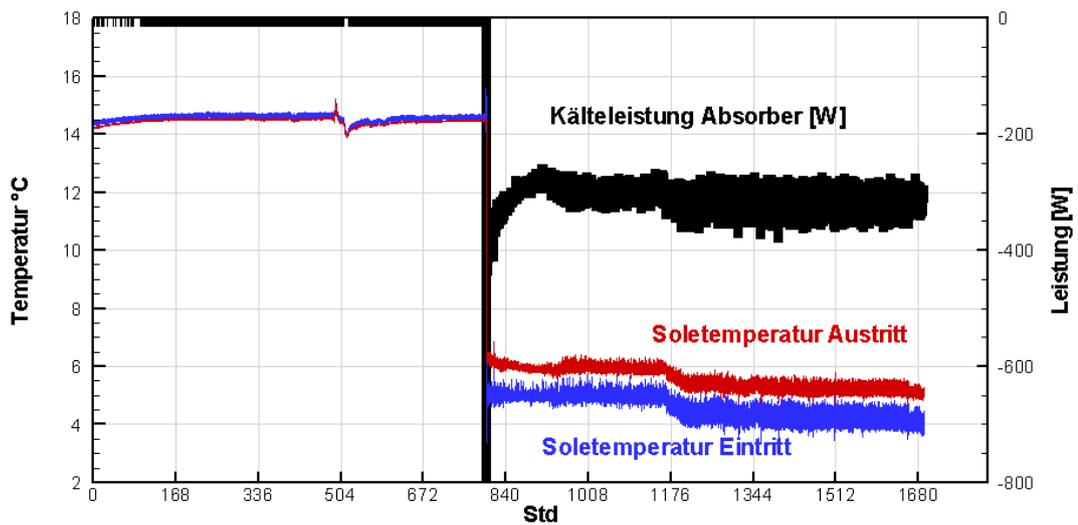


Abb. 39 Gemessener Temperaturverlauf und Kälteleistung der Sole am Absorbereintritt und -austritt

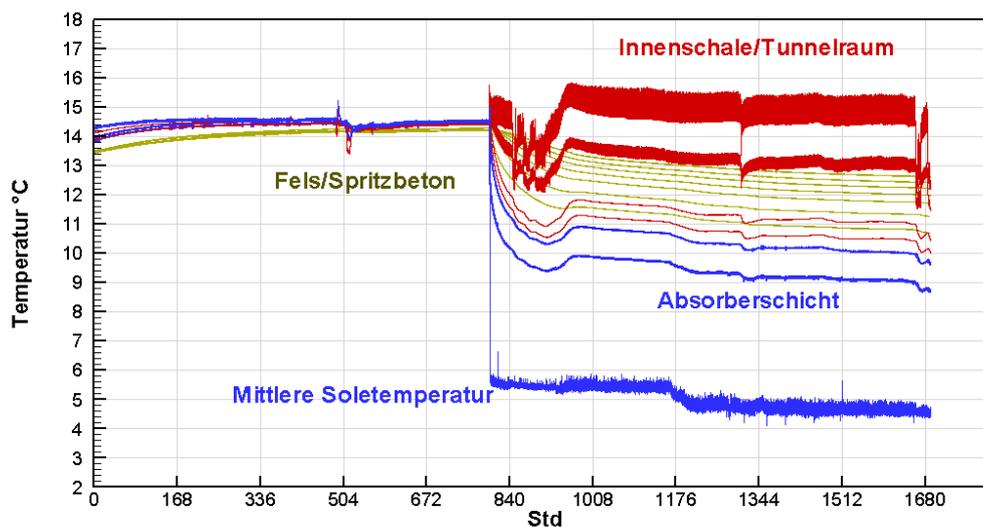


Abb. 40 Gemessener Temperaturverlauf der Messfühler in den Messrohren sowie der Sole (Mittelwert)

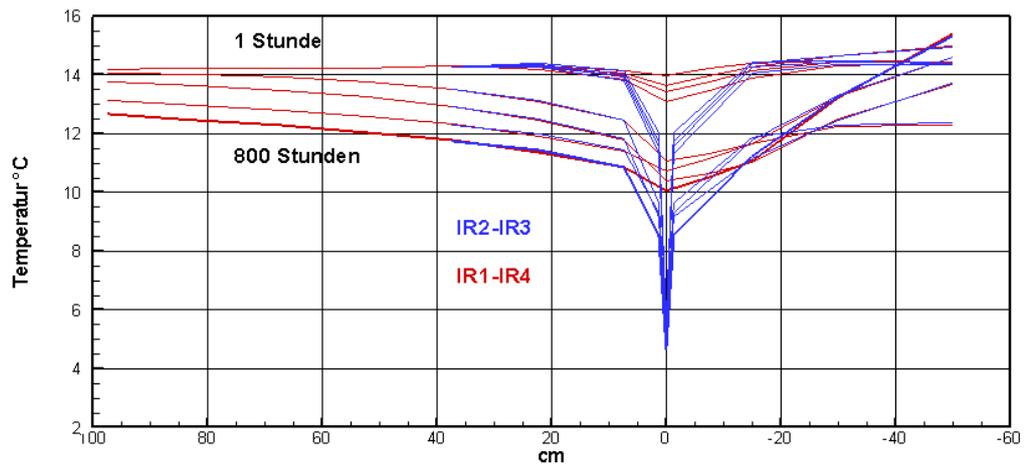


Abb. 41 Gemessene Temperaturprofile in den Messrohren der Ebenen IR2-IR3 (blau) und IR1-IR4 (rot), nach 1, 2, 3, 5, 50, 100, 300 und 800 Stunden Wärmeentzug

Ein Vergleich zwischen den gemessenen Temperaturprofilen von Versuch I (**Abb. 38**) und Versuch II (**Abb. 41**) zeigt, dass die Abdichtungsfolie im Versuchsfeld 2 eine Isolationswirkung in Richtung Tunnelinnenraum aufweist. Dies zeigt sich durch einen leichten Temperaturknick bei -5 cm in **Abb. 41**.

3.1.3 Versuch III (Versuchsfeld 2, bewässert)

Als Versuch III wurde das Feld 2 aus Versuch I bewässert. Nach einer ersten vollständigen Bewässerung zeigten sich allerdings grosse Dichtheitsprobleme. Nach der Durchführung von verschiedenen Abdichtungsmassnahmen konnten die Absorbermodule von Feld 2 bis etwa zur Hälfte bewässert werden, so dass die untere Hälfte der Absorbermodule im Wasser standen, während die obere Hälfte wie bei Versuch I von Luft umgeben war. Der Effekt von stehendem Grundwasser in der Umgebung von Absorberleitungen kann gleichwohl erfasst werden. In einer groben Annäherung gehen wir davon aus, dass der Effekt bei einem vollständig umspülten Absorbersystem etwa doppelt so gross ist, wie beim Versuch gemessen.

Mit einer Reynoldszahl von > 2800 herrscht in den Rohren ein für den Wärmeaustausch günstiges, turbulentes Strömungsregime.

Durch den Defekt der Temperaturmessfühler des Regelsystems wurde nach etwa 170 Stunden die Entzugsleistung nicht mehr auf konstante Soletemperatur geregelt. Durch die angewandte Auswertemethodik (vgl. Kapitel 3.2.1.) mit der Absorberfunktion kann auch aus der vorliegenden unregelmässigen Messreihe die thermische Charakteristik des zur Hälfte hinterpülten Absorbermoduls bestimmt werden.

Aus den gemessenen Temperaturprofilen (vgl. **Abb. 44**) ist ersichtlich, dass auch beim bewässerten Fall die Abdichtungsfolie einen Isolationseffekt verursacht (Temperaturknick bei -5 cm).

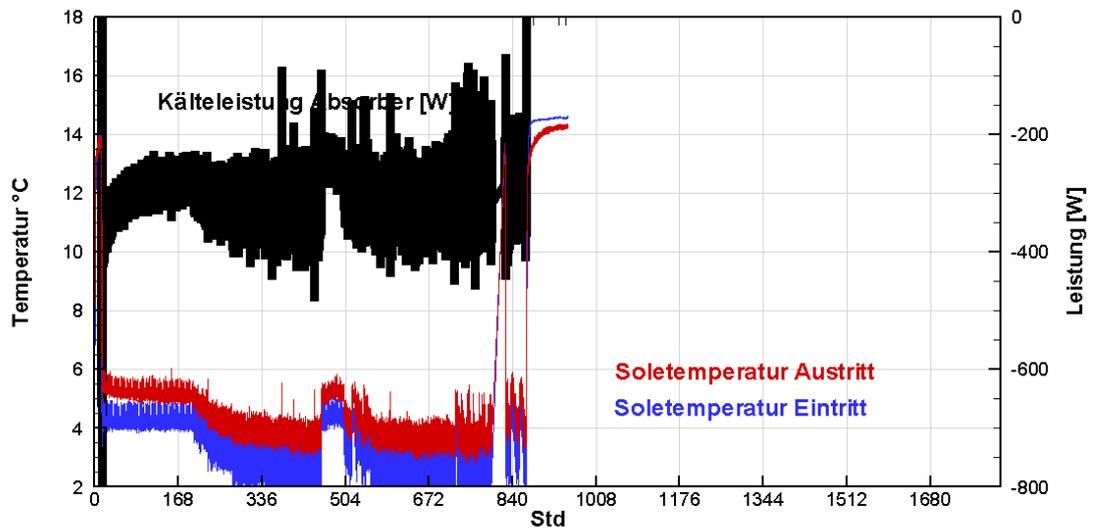


Abb. 42 Gemessener Temperaturverlauf der Sole am Absorbereintritt und -austritt. Am 10.6.2015 gab es ca. einen Tag Stromausfall (ca. bei Stunde 830).

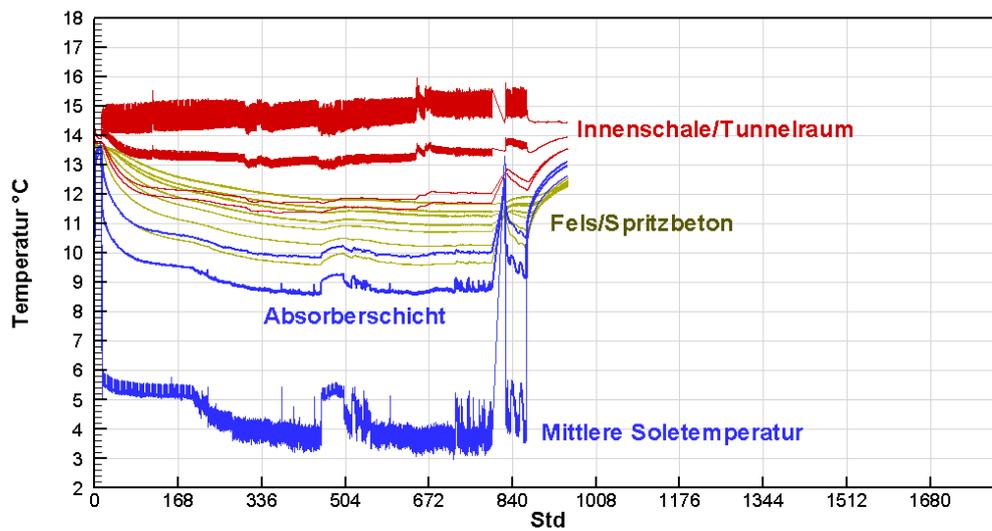


Abb. 43 Gemessener Temperaturverlauf der Messfühler in den Messrohren, sowie der Sole (Mittelwert von Eintritt und Austritt).

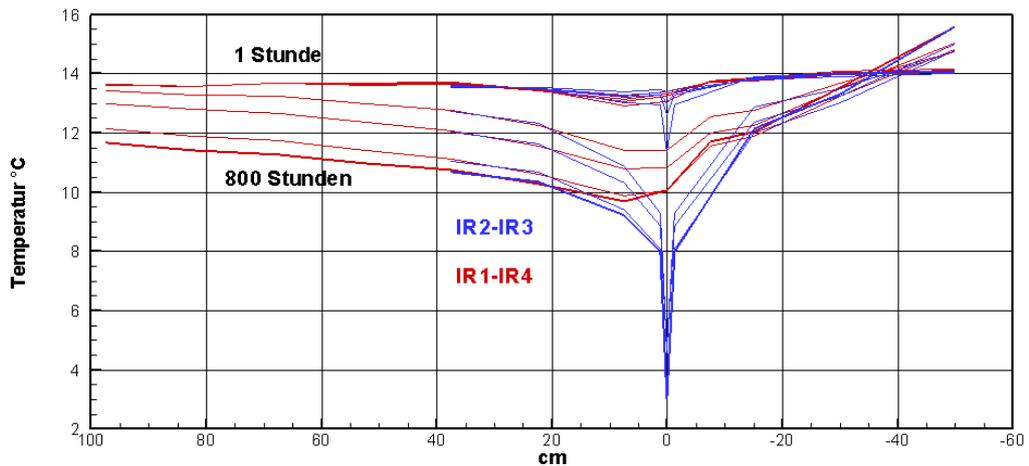


Abb. 44 Gemessene Temperaturprofile in den Messrohren der Ebenen IR2-IR3 (blau) und IR1-IR4 (rot), nach 1, 2, 3, 5, 50, 100, 300 und 800 Stunden Wärmeentzug.

3.2 Thermische Leistung der Absorbersysteme

3.2.1 Methodik

Für die Berechnung der thermischen Effizienz der Tunnelabsorbersysteme unter einem realistischen, langzeitigen Wärmeentzugsszenario wird eine Systemfunktion benötigt, die den zeitlichen Zusammenhang zwischen Wärmeentzug und der Temperaturentwicklung des Absorberfluids abbildet. In Anlehnung an die Berechnungsmethodik für die Auslegung von Erdwärmesondenanlagen wird daher die Absorberfunktion $Afkt$ eingeführt. Für jedes der Versuchsfelder wird diese aus den Messwerten ermittelt. Die Absorberfunktion $Afkt$ soll die folgende Eigenschaft aufweisen:

$$Tflm_{std} = T_0 - \sum_{i=2}^{std} \frac{(P_i - P_{i-1})}{F} \times Afkt_{std-i-1}$$

wobei

- $Tflm_{std}$ = Mittelwert von Absorbereintritts- und -austrittstemperatur zur Stunde Std .
- T_0 = Anfangstemperatur, entspricht der ungestörten Felstemperatur
- P_i = Entzugsleistung zur Stunde i
- F = Fläche des Absorbersystems
- $Afkt_i$ = Stundenwert der Absorberfunktion, definiert pro m^2

Ist die Absorberfunktion $Afkt$ für ein bestimmtes Absorbersystem bekannt, so lässt sich damit der Temperaturverlauf $Tflm_i$ der Wärmeträgerflüssigkeit aufgrund eines beliebigen Nutzungsprofils P_i für den Wärme- oder Kälteentzug bestimmen, und so die Absorberfläche und deren Nutzung aufeinander abstimmen. Grundannahme dabei ist, dass alle Wärmetransportprozesse, die die Temperatur im Absorbersystem bestimmen, konduktiver Natur sind. Sofern kein Grundwasser im Gebirge fließt, ist dies gegeben.

Die Absorberfunktion A_{fkt} ist für einen bestimmten Einbautyp eines Absorbers bei einer konstanten Tunnellufttemperatur T_0 definiert. In Portalbereichen kann die Tunnellufttemperatur saisonal schwanken. Dies muss bei der Berechnung der Soletemperatur berücksichtigt werden. Da in den drei vorliegenden Versuchen die Tunnellufttemperatur konstant war, zeigt der Vergleich der Absorberfunktionen direkt die thermische Effizienz eines bestimmten Einbautyps. Durch die Anwendung der Absorberfunktion auf ein Wärmeentzugsszenario ergibt sich die spezifische Entzugsleistung eines Absorbertyps.

3.2.2 Definition eines typischen Wärmeentzugsprofils

Wie viel Wärme aus einem Tunnelabsorbersystem nachhaltig bezogen werden kann, hängt massgeblich vom jährlichen Lastprofil ab. Ein typischer monatlicher und stündlicher Heizbedarf im Schweizerischen Mittelland mit ca. 1'880 Volllaststunden ist in **Abb. 45** dargestellt. Da die Wärmenutzung aus einem Tunnelabsorbersystem – gleich wie bei einer Erdwärmesonde – über eine Wärmepumpe erfolgt, ist dieses Profil auch zugleich das typische Wärmeentzugsprofil P_i einer Wärmepumpe.

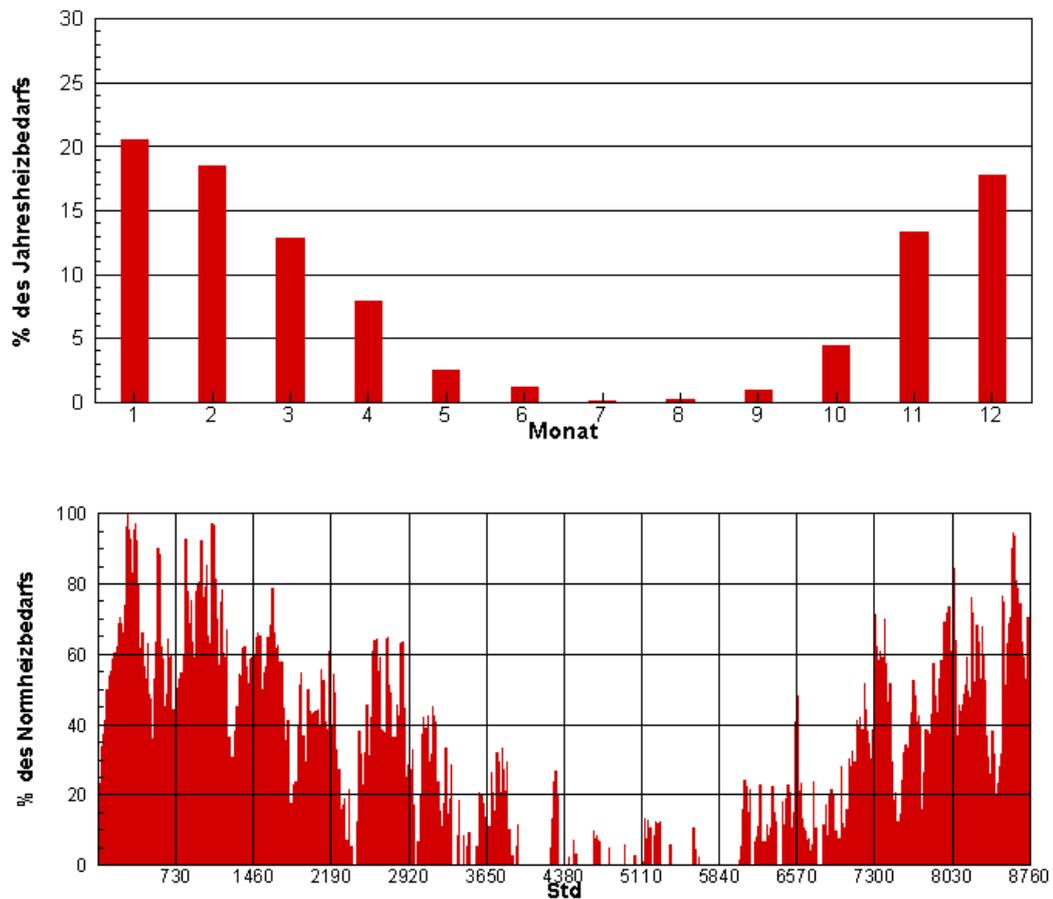


Abb. 45 Oben: Auf den Jahresheizbedarf normierte Werte für den monatlichen Heizbedarf
Unten: auf die Normheizleistung normierte Stundenwerte des Heizleistungsbedarfs

3.2.3 Versuch I: Absorberfunktion und spezifische Entzugsleistung, Versuchsfeld 2, trocken

Aus den Messwerten für die Temperatur und die Entzugsleistung der Wärmepumpe im Versuchsfeld 2 wurde die Absorberfunktion A_{fkt} in **Abb. 46** ermittelt. Der Absorber liegt in trockener Umgebung und ist daher mehrheitlich von Luft umgeben.

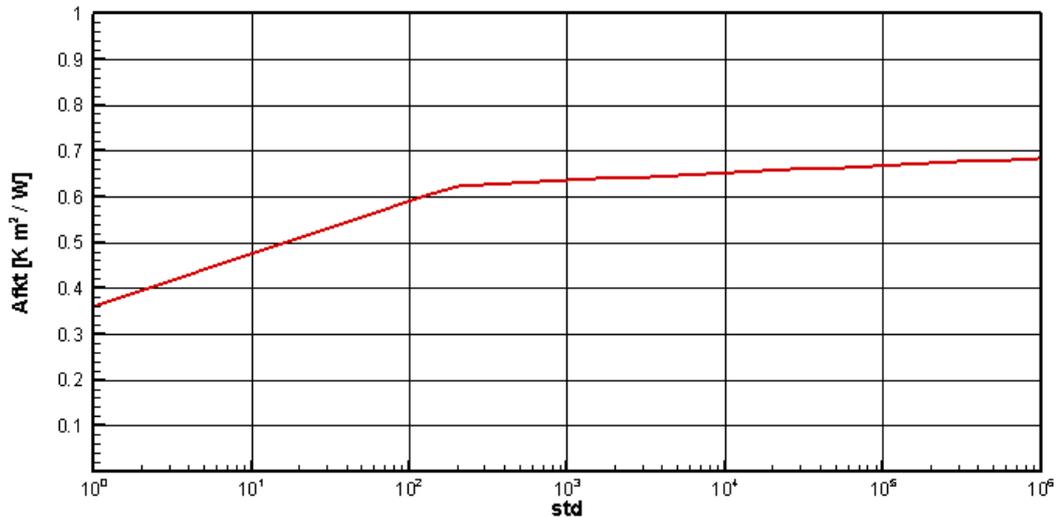


Abb. 46 Aus den Messwerten des Versuchsfelds 2 ermittelte Absorberfunktion A_{fkt} , logarithmisch dargestellt. Es zeigt sich, dass nach ca. 200 Stunden die Soletemperatur bei gleichbleibender Entzugsleistung einen quasistationären Zustand erreicht.

Wird diese Absorberfunktion auf das typische Entzugsprofil einer Wärmepumpe für ein Wohnhaus angewendet, und dabei das Entzugsprofil so skaliert, dass bei einer Absorberfläche von 100 m^2 die mittlere Soletemperatur im Winter 2.5°C nicht unterschreitet, so ergibt sich eine maximale Normentzugsleistung bei einer initialen Tunneltemperatur von $14\text{--}15^\circ\text{C}$ von 2.2 kW , oder entsprechend **22 W/m^2 Absorberfläche dieses Einbautyps**. Aus der berechneten mittleren Soletemperatur in **Abb. 47** über 10 Nutzungsjahre ist auch ersichtlich, dass sich jedes Jahr praktisch derselbe Temperaturverlauf einstellt. Dies weist auf einen dominierenden Wärmeaustausch mit der Tunnellufttemperatur hin.

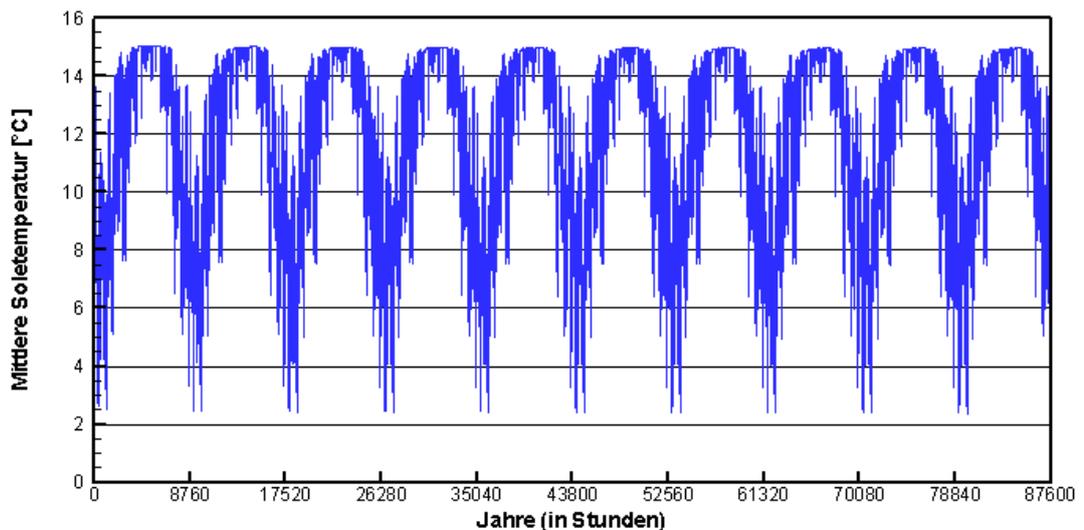


Abb. 47 Berechnete mittlere Soletemperatur (Mittelwert aus Eintritt und Austritt) für ein typisches Heizprofil. Bei einer Absorberfläche von 100 m^2 wurde die Normentzugsleistung auf 2.2 kW und der Jahreswärmeeentzug auf $4'140 \text{ kWh/Jahr}$ skaliert um die Minimaltemperatur von 2.5°C nicht zu unterschreiten.

3.2.4 Versuch II: Absorberfunktion und spezifische Entzugsleistung, Versuchsfeld 1

Aus den Messwerten für die Temperatur und die Entzugsleistung der Wärmepumpe in Versuchsfeld 1 wurde die Absorberfunktion A_{fkt} in (**Abb. 48**) ermittelt. Der Absorber ist tunnelseitig der Abdichtungsfolie angebracht.

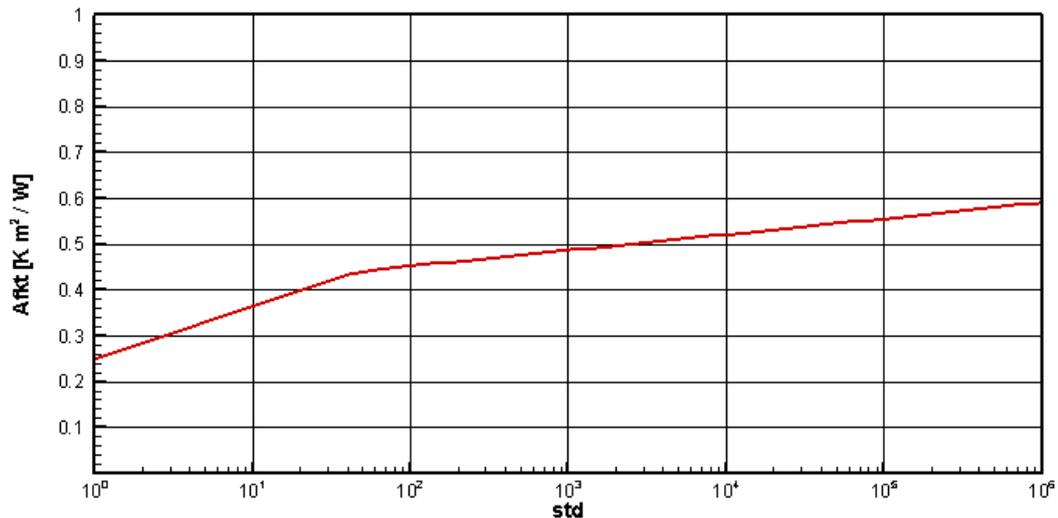


Abb. 48 Aus den Messwerten des Versuchsfeldes 1 ermittelte Absorberfunktion A_{fkt} , logarithmisch dargestellt. Es zeigt sich, dass nach bereits ca. 40 Stunden die Soletemperatur bei gleichbleibender Entzugsleistung einen quasistationären Zustand erreicht.

Wird diese Absorberfunktion auf das typische Entzugsprofil angewendet, und dabei das Entzugsprofil so skaliert, dass bei einer Absorberfläche von 100 m^2 die mittlere Soletemperatur im Winter 2.5°C nicht unterschreitet, so ergibt sich eine maximale Normentzugsleistung bei einer initialen Tunneltemperatur von $14\text{-}15^\circ\text{C}$ von 2.77 kW , oder entsprechend **27.7 W/m^2** **Absorberfläche dieses Einbautyps**. Aus der berechneten mittleren Soletemperatur in **Abb. 49** über 10 Nutzungsjahre ist auch ersichtlich, dass sich jedes Jahr praktisch derselbe Temperaturverlauf einstellt. Dies weist auf einen dominierenden Wärmeaustausch mit der Tunnellufttemperatur hin. Dass die Abflachung der Absorberfunktion bei diesem Einbautyp bereits bei 40 Betriebsstunden auftritt, im Gegensatz zu den 200 Betriebsstunden bei Versuchsfeld 2, weist auf eine stärkere thermische Anbindung an die Tunnellufttemperatur hin.

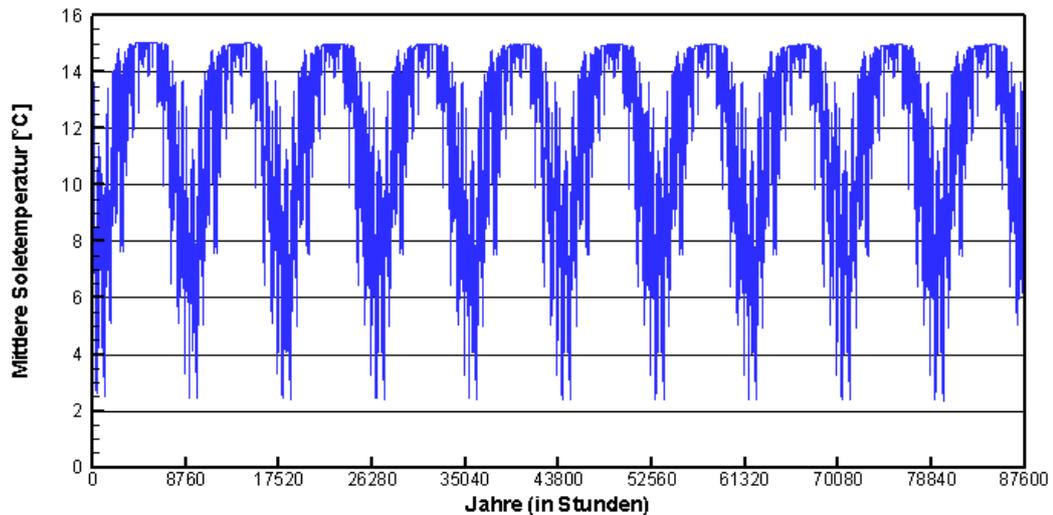


Abb. 49 Berechnete mittlere Soletemperatur (Mittelwert aus Eintritt und Austritt) für ein typisches Heizprofil. Bei einer Absorberfläche von 100 m^2 wurde die Normentzugsleistung auf 2.77 kW und der Jahreswärmeentzug auf $5'220 \text{ kWh/Jahr}$ skaliert um die Minimaltemperatur von 2.5°C nicht zu unterschreiten.

3.2.5 Versuch III: Absorberfunktion und spezifische Entzugsleistung, Versuchsfeld 2, mit Bewässerung

Aus den Messwerten für die Temperatur und die Entzugsleistung der Wärmepumpe in Versuchsfeld 2 wurde die Absorberfunktion A_{fkt} in **Abb. 50** ermittelt. Die untere Hälfte des Absorbers des Versuchsfeldes 2 liegt nun im Gegensatz zu Versuch I in bewässerter Umgebung. Der Vergleich von Versuch I mit diesem Versuch III ergibt damit direkt den Einfluss von stehendem Grundwasser auf die spezifische Absorberleistung.

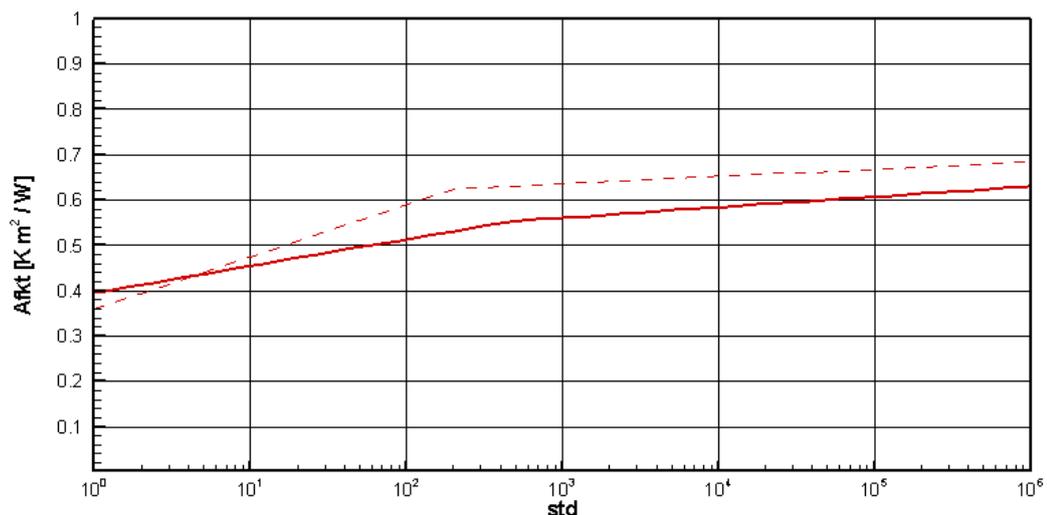


Abb. 50 Aus den Messwerten des Versuchs III ermittelte Absorberfunktion A_{fkt} , logarithmisch dargestellt (gestrichelt die Absorberfunktion aus Versuch I). Es zeigt sich, dass nach ca. 300 Stunden die Soletemperatur bei gleichbleibender Entzugsleistung einen quasistationären Zustand erreicht. Der Effekt des Wassers liegt bei einer ca. 10% geringeren Reaktion der Soletemperatur auf einen Wärmeentzug.

Wird diese Absorberfunktion auf das typische Entzugsprofil angewendet, und dabei das Entzugsprofil so skaliert, dass bei einer Absorberfläche von 100 m^2 die mittlere Soletemperatur im Winter 2.5°C nicht unterschreitet, so ergibt sich eine maximale Normentzugsleistung bei einer initialen Tunneltemperatur von $14\text{-}15^\circ\text{C}$ von 2.4 kW , oder entsprechend **24 W/m^2 einer Absorberfläche dieses Einbautyps**. Aus der berechneten mittleren Soletemperatur in **Abb. 51** über 10 Nutzungsjahre ist auch ersichtlich, dass sich jedes Jahr praktisch derselbe Temperaturverlauf einstellt. Dies weist auf einen dominierenden Wärmeaustausch mit der Tunnellufttemperatur hin.

Wird berücksichtigt, dass während des Versuchs nur etwa die Hälfte der Bewässerungsanlage mit Wasser gefüllt werden konnte, so gehen wir in einer groben Näherung davon aus, dass der Effekt des Wassers etwa doppelt so gross ist. Verdoppelt man also den Effekt zwischen Versuch I und Versuch III, so erhält man eine spezifische Absorberleistung, die im selben Bereich liegt wie bei Versuch II (also ohne Abdichtungsfolie) von ca. **26 W/m^2** . Die Isolationswirkung der Abdichtungsfolie wird also durch das von ihr aufgehaltene Wasser wieder kompensiert.

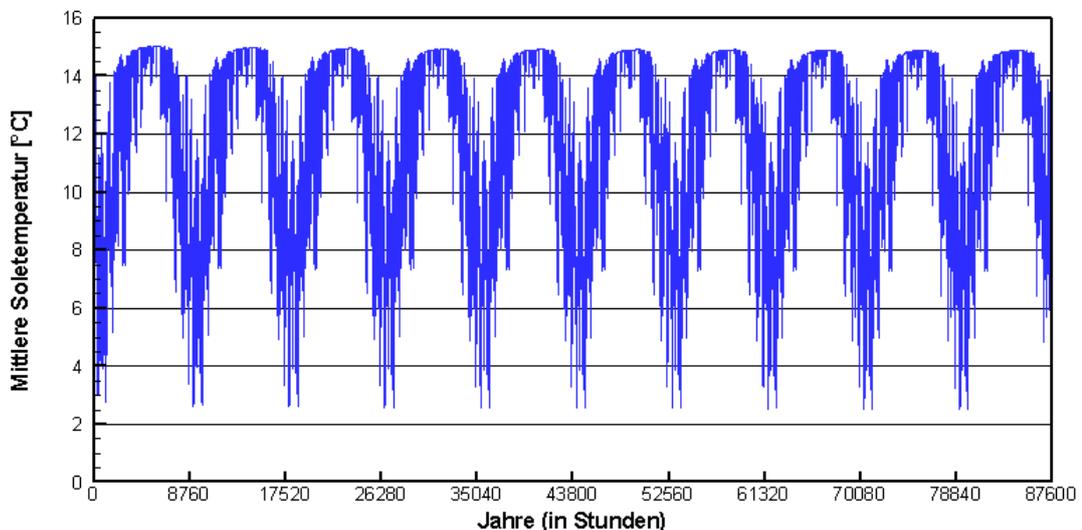


Abb. 51 Berechnete mittlere Soletemperatur (Mittelwert aus Eintritt und Austritt) für ein typisches Heizprofil. Bei einer Absorberfläche von 100 m^2 wurde die Normentzugsleistung auf 2.4 kW und der Jahreswärmeentzug auf $4'557 \text{ kWh/Jahr}$ skaliert um die Minimaltemperatur von 2.5°C nicht zu unterschreiten.

3.2.6 Leistungsparameter, Einflussradius und Nachhaltigkeit

Wie die Temperaturmessungen in den Versuchsfeldern gezeigt haben, findet der grösste Temperatursprung zwischen dem unmittelbaren Bereich des Absorbers und der zirkulierenden Sole statt. Im Vergleich dazu ist die Temperaturabnahme im Fels relativ gering. Damit ist auch der Effekt der Wärmeleitfähigkeit des Felses auf die Wärmeleistung eines Absorbers relativ gering. Im Gegensatz dazu liegt das massgebliche Verbesserungspotenzial beim Absorbersystem selbst, im Bereich der Materialwahl und der thermischen Ankopplung.

Wie die Berechnungen im Rahmen des Vorläuferprojekts gezeigt haben, liegt der maximale thermische Einflussradius nach 50 Jahren Nutzung (Temperaturänderung $< 1\text{K}$) bei einem reinen Wärmeentzug bei ca. 30 m . Wird das Tunnelabsorbersystem sowohl zur Wärmenutzung als auch Kältenutzung verwendet, so verringert sich dieser thermische Einflussradius auf ca. 10 m .

Wie die drei Versuche gezeigt haben, stellt sich jeweils nach etwa 300 Stunden eine praktisch konstante Soletemperatur ein. Das heisst, dass ab diesem Zeitpunkt der Wärmestrom aus der Tunnelluft und aus dem Berg im Gleichgewicht ist mit dem Wärmeentzug aus dem

Absorbersystem. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das System nachhaltig ist.

3.2.7 Zusammenfassung

Aus den Messreihen konnten spezifische Leistungszahlen in W/m^2 bestimmt werden, die für eine Standardheiznutzung mit 1'880 Volllaststunden pro Jahr und einer initialen Tunneltemperatur von 14-15°C gelten. Für die drei Versuche sind dies die folgenden Werte:

Tab. 4 Spezifische Leistungszahlen in W/m^2

Versuch	Feld	W/m^2
Versuch I: Absorbermodul Typ 2, ohne Bewässerung	2	22
Versuch II: Absorbermodul Typ 1	1	27.7
Versuch III: Absorbermodul Typ 2, mit Bewässerung (50% Wasserfüllung)	2	24
Extrapolation Versuch III: Absorbermodul Typ 2, mit Bewässerung (100%ige Wasserfüllung)	2	ca. 26

Es hat sich gezeigt, dass die spezifische Normwärmeleistung relativ unabhängig vom Vorhandensein einer Abdichtungsfolie ist. Ebenso ist der Effekt einer Bewässerung der Absorberschicht (stehendes Wasser) nur geringfügig. Dieser geringe Effekt in Bezug auf die Einbauart der Absorbermodule sowie die Beobachtung, dass die Fluidtemperatur nach ca. 100 - 300 Stunden jeweils einen relativ konstanten Wert erreichte, deutet auf einen signifikanten bis dominierenden Einfluss der konstanten Tunnellufttemperatur hin. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei allen drei Versuchsfeldern ca. 60 % der Absorberwärme ab der ca. 300. Betriebsstunde aus der Tunnelluft stammt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Leistung des Absorbers verhältnismässig wenig empfindlich auf eine Erhöhung der Volllaststunden der Nutzung reagiert. Damit eignet sich der Absorber im Vergleich zu einer Erdwärmesonde besser für eine Bandlastnutzung.

Aufgrund der hohen Zahl an Temperaturmessfühlern konnte ermittelt werden, dass die markanteste Leistungssteigerung durch eine Reduktion des thermischen Widerstands der Rohrleitungen erreicht werden könnte. Eine materialtechnische Verbesserung des Absorbersystems bis zu einem Wert von $50 W/m^2$ scheint möglich, was einer Verdoppelung gegenüber dem im Pilotversuch angewendeten System entspricht. Wird die Anlage nicht mit einem typischen saisonalen Heizlastprofil genutzt sondern mit einer Bandlast, so ist eine spezifische Leistungssteigerung um ca. Faktor 1.5 – 2.0 denkbar.

3.3 Ergebnisse aus dem Bau der Anlage

In der beigelegten Liste (siehe Anhang A3) ist eine Zusammenfassung der Erfahrungen aus dem Bau der Versuchsfelder enthalten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Bau der Versuchsfelder erfolgreich verlaufen ist. Es hat sich gezeigt, dass der Einbau der vorgefertigten Absorbermodule ohne grössere Störungen oder Verzögerungen in den regulären Bauablauf des Tunnelrohbaus bei zweischaligem Ausbau integriert werden kann. Alle vorab bekannten technischen Details wurden in der vorausgegangenen Planungsphase detailliert geplant, so dass nur wenige Ausführungsdetails vor Ort auf der Einbaustelle festgelegt oder angepasst werden mussten.

Folgende Erfahrungen und Erkenntnisse wurden aus dem Bau der Anlage dokumentiert:

- Um den Einbau auf der Baustelle zu vereinfachen und zu beschleunigen, sind die Module im Werk eindeutig mit oben/unten, rechts/links, innen/aussen zu kennzeichnen. Eben-

so sind die Anschlussleitungen eindeutig zu markieren: Verbindungsleitung zwischen Modulen, Anschlussleitung an Versorgungsleitung. Dies kann allenfalls über farbige Klebebander sichergestellt werden. Ausserdem ist auf den Modulen jeweils ein Überlappungsbereich klar zu kennzeichnen.

- Um Beschädigungen der Absorberleitungen beim oder nach dem Einbau der Module zu vermeiden, sind im Werk Bereiche/Punkte auf den Modulen zu markieren, wo keine Leitungen verlaufen und somit eine durchgehende Befestigung mit Bolzen/Nägeln möglich ist. Leitungsenden müssen z.B. durch ein Klebeband (wieder lösbar) bis zum Anschluss an die Versorgungsleitung verschlossen werden.
- Die im Versuch angewendete Lösung für die Leitungsdurchführung in Aussparungen in der Innenschale ist eine taugliche Lösung, die einfach in die Schalung integriert werden kann, und ausreichend genau und robust ist.
- Die Grösse der Aussparungen ist ausreichend, um ungehindert die Leitungsverbindungen händisch herzustellen.
- In einer Aussparung war die Anschlussleitung des Absorbermoduls zu kurz und die Aussparung musste nachträglich grösser gespitzt werden, um die Verbindung zwischen den Modulen bzw. vom Modul zu den Versorgungsleitungen herstellen zu können. Die Anschlussleitungen müssen so lang sein, dass auch Unregelmässigkeiten in der Innenschalendicke usw. aufgefangen werden können. Die Leitungen können einfach vor Ort auf die erforderliche Länge gekürzt werden.
- Bei ausreichender Länge der Anschlussleitungen in den Aussparungen ist die Grösse der Aussparungen ausreichend, um die Verbindungsstücke (auch von vorne) anzuschliessen. (Im Versuch konnte von der Seite gearbeitet werden, da die Versuchsfelder „freistehend“ waren (links und rechts keine weiteren Betonblöcke)).
- Während des Betoniervorgangs waren die Absorberleitungen nicht mit Flüssigkeit gefüllt. Mit Inbetriebnahme der Wärmepumpenanlage wurde nachgewiesen, dass die Absorber den Druck halten. Um das Risiko von Beschädigungen der Absorberleitungen durch den Betoniervorgang jedoch gänzlich auszuschliessen, wird für den Betriebsfall empfohlen, die Leitungen bereits vor Betonage zu befüllen und entsprechende Druckprüfungen durchzuführen.
- Das Absorbermodul Typ 1 mit beidseitigem Vlies muss zusätzlich gegen Aufschwimmen beim Betonieren gesichert werden. Die Klettbefestigung an der Abdichtung allein ist nicht ausreichend. Seitlich und unten sind zusätzliche Vliesstreifen aufzukleben.
- Bei guter Vorbereitung des Untergrundes und des Haltesystems an den Modulen wird für den Einbau im Rahmen der Abdichtungsarbeiten nur ca. 10 - 20 % mehr Zeit benötigt.

4 Schlussfolgerungen für die Umsetzung in die Praxis

Auf Grundlage der Erfahrungen aus der Planung und Durchführung des Pilotversuches können Schlussfolgerungen für die Realisierung einer Absorberanlage, im Rahmen eines realen Tunnelbauprojektes, gezogen werden.

Im Sinne eines Ausblicks werden weitere Anwendungsmöglichkeiten für die flächenhaften Absorbermodule im Verkehrsinfrastrukturbau (neben den Anwendungen im Tunnelbau) in Kap. 5.2 qualitativ erläutert.

4.1 Anforderungen an die thermische Auslegung / Berechnung

Die thermische Leistungsfähigkeit eines Tunnelabsorbersystems verhält sich vergleichbar zu einer Erdwärmesondenanlage. Der Nachfluss von Wärme (oder Kälte) ist begrenzt und abhängig vom Nutzungsprofil. Für eine reine Wärmenutzung entsprechend einem Heizlastprofil mit 1'880 Volllaststunden (vgl. **Abb. 47**, **Abb. 49**, **Abb. 51**) können bei einer initialen Tunneltemperatur von 14-15°C direkt die spezifischen Leistungswerte der **Tab. 4** verwendet werden. Daraus lässt sich direkt ablesen wie viele Quadratmeter Absorberfläche für eine vorgegebene Wärmenutzung benötigt werden, resp. welcher Wärmebedarf bei einer vorgegebenen Absorberanlage gedeckt werden kann.

Soll ein Wärmebedarf gedeckt werden, der vom hier angenommenen Heizlastprofil deutlich abweicht (bspw. Bandlast, hoher Brauchwarmwasseranteil, nur kurze Spitzenlasten, etc.), oder sollen Kühllasten versorgt werden, so kann die Auslegung des Tunnelabsorbers unter Anwendung der Formel:

$$T_{flm_{std}} = T_0 - \sum_{i=2}^{std} \frac{(P_i - P_{i-1})}{F} \times Afkt_{std-i-1}$$

durchgeführt werden. Gebraucht wird dabei das Wärme-/Kältebedarfsprofil P_i am Absorber, die initiale Tunneltemperatur T_0 sowie die zum vorgesehenen Absorbersystem zugehörige Absorberfunktion $Afkt$. Für die hier getesteten Absorbervarianten können direkt die $Afkt$ -Werte aus den Abbildungen **Abb. 46**, **Abb. 48** und **Abb. 50** verwendet werden. Daraus ergibt sich dann die stündliche Soletemperatur (Mittelwert zwischen Absorbereintritt und -austritt), so dass die Absorberfläche an die Vorgaben bezüglich zulässiger Minimaltemperatur (oder Maximaltemperatur bei einem Kühlfall) schrittweise angepasst werden kann. Der Vorteil dieser allgemeinen Methode mit Verwendung einer Absorberfunktion liegt darin, dass die Auslegung des Absorbersystems mit beliebigen Bedarfsprofilen eines Wärme- oder Kälteentzugs korrekt durchgeführt werden kann.

4.2 Anforderungen an die Baupraxis

In Abhängigkeit vom gewählten Bauteil, in welches das Absorbermodul integriert werden soll, ergeben sich verschiedene Randbedingungen für den Einsatz des Absorbersystems. Nachfolgend werden unabhängig von der Energieeffizienz die verschiedenen möglichen Einbauorte beschrieben und die Vorgaben für die an der Planung und Ausführung Beteiligten formuliert.

4.2.1 Einbau in der Tunnelschale

Der Versuch hat gezeigt, dass der Einbau in die Tunnelschale bei zweischaligem Ausbau mit Abdichtung ohne grössere Störungen oder Verzögerungen im laufenden Baubetrieb erfolgen kann. Da das Absorbersystem in die Abdichtungsebene integriert ist und die verwendeten Trägermaterialien (Noppenbahn, Trennvliese) Standardmaterialien für die Abdich-

tungsarbeiten im zweischaligen Tunnelbau sind, sind für den Bauunternehmer keine grossen Anpassungen im einzusetzenden Personal und im Bauablauf notwendig. Für die Untergundvorbereitung gelten die üblichen Anforderungen, die für den Abdichtungseinbau definiert sind. Des Weiteren sind keine besonderen Anforderungen an die Herstellungsgenauigkeiten erforderlich. Es gelten die Vorgaben der einschlägigen Tunnelbaunormen des SIA (z.B. SIA 197, 198 etc.).

Nachfolgend sind die Vorgaben, Randbedingungen und Abläufe für die Planung und Ausführung, welche aufgrund der Absorbermodule zusätzlich zu den regulären Angaben beim zweischaligen Tunnelbau notwendig sind, zusammengestellt.

Planung (Aufgabe Planer Bau)

- Wahl des Absorbertyps (Typ 1 oder 2) in Abhängigkeit von thermischen und konstruktiven / bautechnischen Randbedingungen (Abstimmung mit Geothermieplaner)
- Platz im Tunnelquerschnitt für Platzierung Versorgungsleitungen und Gewölbeaussparungen in Abhängigkeit von örtlichen Gegebenheiten definieren
- Planung der Konstruktionsvariante für die Versorgungsleitungen
- Planung des Systems der Abdichtungsdurchdringungen für die Anschlussleitungen der Absorbermodule
- Definieren der erforderlichen Prüfungen und Kontrollen im Kontroll- und Prüfplan

Bei einem Tunnelneubau oder einem Sanierungsprojekt mit mindestens teilweise Gewölbeersatz können sowohl die Absorbermodule vom Typ 1 als auch vom Typ 2 zur Anwendung kommen. Die Wahl ist unter Berücksichtigung von thermischen sowie konstruktiven und bautechnischen Randbedingungen zu treffen. Hier ist eine Abstimmung zwischen allen Planungsbeteiligten (Projektverfasser Bau, Planer Geothermieanlage etc.) erforderlich.

Bei druckhaltenden Abdichtungssystemen sollte im Hinblick auf das Risiko von Leckagen gänzlich auf Durchführungen in der Abdichtung verzichtet werden. Daher ist hier aus bautechnischer Sicht dem Absorbermodul Typ 1 der Vorzug zu geben, bei dem die Absorberleitungen innen auf der Abdichtung verlegt werden.

Beim einschaligen Ausbau mit Spritzbeton können Module vorgefertigt werden, bei denen die Absorberleitungen zwischen zwei Bewehrungsnetzen verlegt sind (siehe **Abb. 52**). Das für die Absorberleitungen verwendete Material REHAU Rautherm aus vernetztem Polyethylen (PE-Xa) hält auch dem beim Auftrag des Spritzbetons anstehenden Druck stand.



Abb. 52 Foto Absorbermodul Typ Bewehrungsnetz

Ausführung (Aufgabe Bauunternehmer)

- Untergrundvorbereitung entsprechend Vorgaben für Abdichtungseinbau
- Fachgerechte Lagerung der Absorbermodule auf der Baustelle sicherstellen und Module vor Beschädigungen schützen
- Arbeitsanweisungen für Baustellenpersonal für Lagerung und Handling Absorbermodule erstellen und Mitarbeiter entsprechend instruieren
- Zusätzliche Arbeiten für Absorbermodule in Ressourcenplanung und Bauablaufplanung berücksichtigen
- Beim Einbau sind die Herstellervorgaben, zu finden in der aktuellen Technischen Information, zu beachten. Grundsätzlich gelten für den Abdichter die Regeln wie sie heute beim Einbau von normalen Schutz- und Drainagesystemen bestehen. Beim Einbau ist die Ausrichtung der Absorbermodule (Vorderseite, Hinterseite, rechts, links) zu beachten sowie die markierten Montagepunkte.
- Vorsicht bei der Befestigung der Absorbermodule an der Tunnelwand mit Nägeln etc., nur an gekennzeichneten Stellen

- Absorbermodule Typ 1 zusätzlich gegen Aufschwimmen beim Betonieren des Innengewölbes sichern (Befestigung an Abdichtung)
- Vor dem Betonieren der Innenschale die Module mit Flüssigkeit befüllen
- Durchführen der gemäss Kontroll- und Prüfplan definierten Prüfungen an den Absorbermodulen
- Installation der Versorgungsleitungen an der Tunnelwand
- Anschluss der Betriebstechnik für die Absorberanlage (Wärmepumpe etc.)
- Inbetriebnahme der Absorberanlage inkl. Inbetriebnahmetest durchführen

4.2.2 Einbau in der Fahrbahnplatte

Eine aufgeständerte Fahrbahnplatte ist gemäss SIA 197/2 wie das Tragwerk einer Brücke zu projektieren. Dementsprechend werden Fahrbahnplatten bewehrt ausgeführt. Infolge der Korrosionsproblematik und der aufgetretenen Schäden werden solche aufgeständerten Betonplatten heute grösstenteils vermieden. Dennoch ist ein Einsatz von Flächenkollektoren auch hier möglich. Hier könnten die Absorbermodule vom Typ Bewehrungsnetz (siehe **Abb. 52**) zum Einsatz kommen.

Die Belastungen und Schwingungen der Fahrbahnplatte werden auf die Absorberleitungen übertragen. Es ist vom Planer Bau zu prüfen, ob die erwarteten Lasten von den Absorberleitungen REHAU Rautherm PE-Xa schadlos aufgenommen werden können. Allenfalls ist eine Anpassung des Rohrmaterials erforderlich.

Des Weiteren ist zu prüfen, ob eine statische Schwächung der Fahrbahnplatte durch die Absorberleitungen vorliegt und die Fahrbahnplatte daher selbst mit erhöhter Dicke ausgebildet werden muss.

4.2.3 Einbau im Werkleitungskanal

Bei Vorhandensein eines Werkleitungskanals (WELK) im Tunnelquerschnitt können die Absorberleitungen in Decken und Wänden des Kanals eingebaut werden.

Bei der fabrikmässigen Vorfertigung der WELK-Elemente können die Absorberleitungen an der Bewehrung befestigt werden. Auf der Baustelle ist somit kein zusätzlicher Arbeitsschritt erforderlich.

Wird der WELK in Ortbeton hergestellt, können die Absorbermodule vom Typ Bewehrungsnetz im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle eingebaut werden. Eine Schwächung des Querschnitts des WELK durch die eingelegten Absorberleitungen kann z.B. durch eine Verstärkung der Decken und Wände ausgeglichen werden.

Um die Energieeffizienz zu steigern, können die WELK-Elemente flüssigkeitsdruckhaltend (ist in statischer Berechnung zu berücksichtigen!) miteinander verbunden werden. Hierbei sind ähnliche Steckverbindungen denkbar, wie sie bei Energietübbingen Verwendung finden. Zu berücksichtigen sind jedoch die Beanspruchungen während des Bauzustandes. Auf ein gleichmässiges Hinterfüllen mit regelmässigem Verdichten ist zu achten, um die Lagesicherheit der WELK-Elemente sicherzustellen und somit ein Abscheren der Verbindungen der Absorberleitungen zu verhindern. Werden die WELK-Elemente nicht miteinander verbunden, sind mehr Versorgungsleitungen (Zu- und Rücklaufleitungen) erforderlich, da jedes Element separat an die Hauptleitung angeschlossen werden muss. Die Versorgungsleitungen können im Innern des WELK geführt werden. Ausserdem ist ein Wasseraufstau in der WELK-Hinterfüllung durch eine funktionsfähige Drainage zu vermeiden, um die Stabilität des Fahrbahnaufbaus nicht zu gefährden.

Alternativ können die Absorbermodule vom Typ 1 in der Überschüttung des WELK verlegt werden.

4.2.4 Einbau in Zwischendecke

Befindet sich über der Zwischendecke ein Abluftkanal, kann die warme Abluft thermisch genutzt werden.

Bei einer Herstellung der Decke in Ortbeton können die Absorbermodule vom Typ Bewehrungsnetz im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle eingebaut werden. Bei vorfabrizierten Zwischendecken erfolgt der Einbau der Absorberleitungen ohnehin vorab und beeinflusst somit nicht den zeitlichen Ablauf auf der Baustelle.

Eine Schwächung der Zwischendecke durch die Absorberleitungen kann z.B. durch eine Verstärkung der Deckenplatte ausgeglichen werden.

Die Versorgungsleitungen können in diesem Fall im Abluftkanal oder hängend an der Zwischendecke geführt werden.

4.2.5 Einbau in bestehende Tunnel

Ein Nachrüsten im Sinne von Anbringen der Absorbermodule im Fahrraum von Nationalstrassentunneln ohne schützende Verkleidung ist sowohl hinsichtlich baulicher und sicherheitstechnischer wie auch thermischer Aspekte und unter Berücksichtigung der geltenden ASTRA Richtlinien nicht ausführbar. Im Rahmen von Tunnelsanierungen mit mindestens teilweisem Gewölbeersatz ist jedoch ein nachträgliches Installieren von Absorbermodulen innerhalb der Betonschale möglich. Dieser Fall ist insbesondere mit Versuchsfeld 1 (Absorbermodul Typ 1) abgedeckt.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen schematisch einige Konstruktionsvarianten für die Integration von Absorbersystemen in bestehende Tunnelbauwerke, die im Rahmen des Forschungsprojektes untersucht wurden.

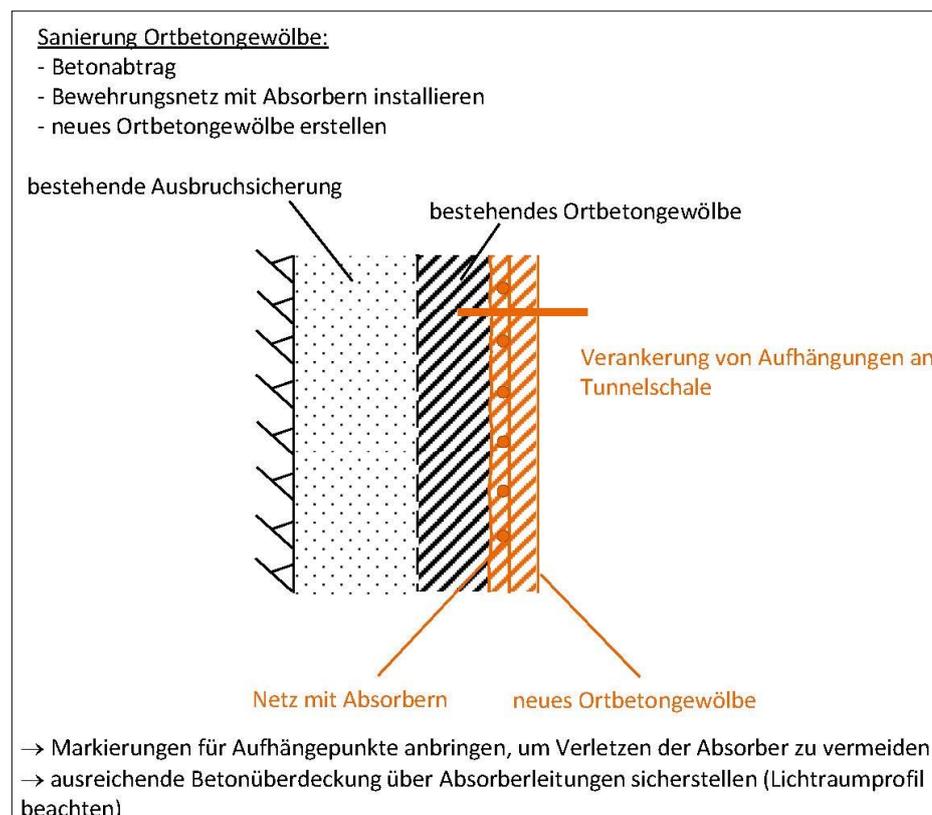


Abb. 53 Prinzipschema Sanierung Ortbetongewölbe

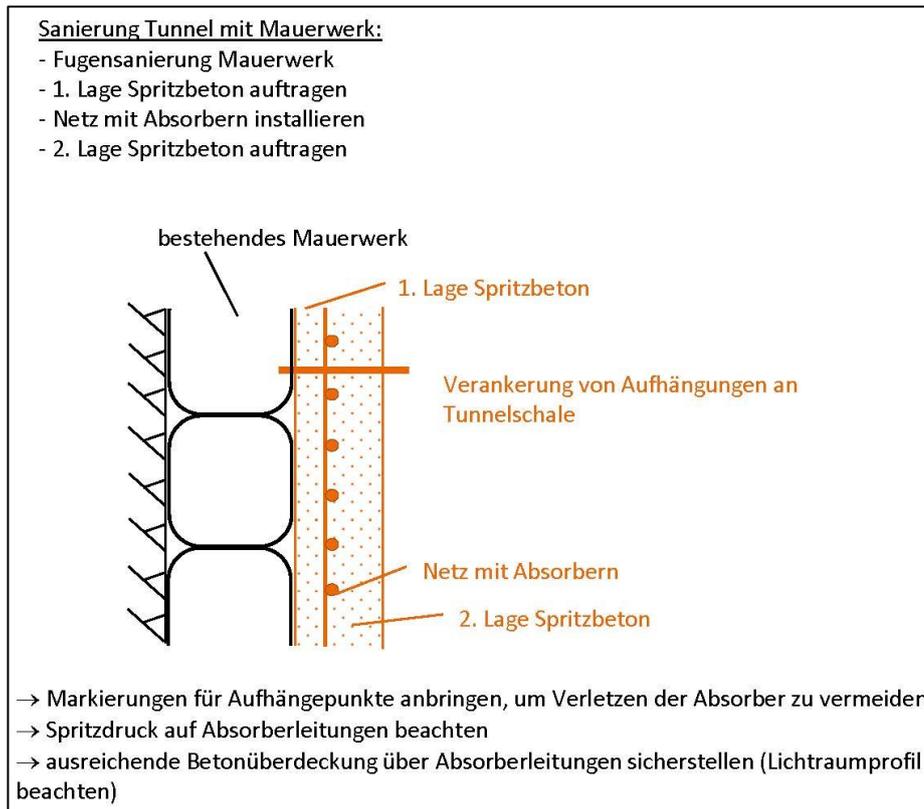


Abb. 54 Prinzipschema Sanierung Mauerwerk

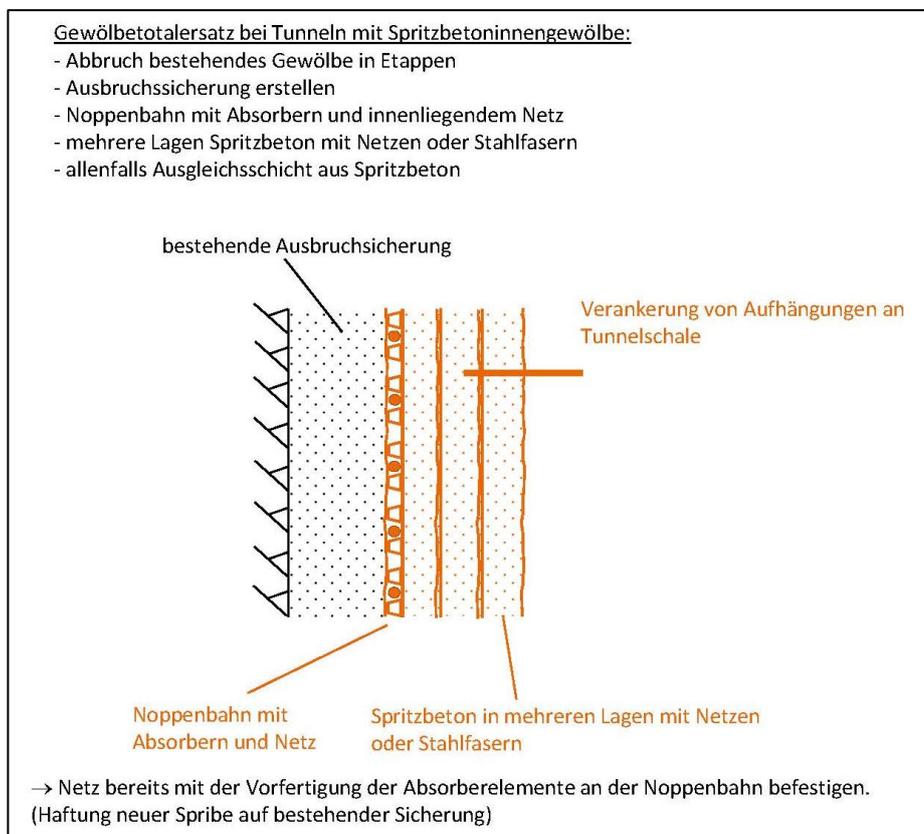


Abb. 55 Prinzipschema Sanierung Spritzbetoninnenschale

4.3 Anforderungen an den Betrieb

Der Praxisbetrieb ist auf den jeweiligen Anwendungsfall zuzuschneiden. Abhängig von den Betriebsbedingungen muss eine konstruktive Umsetzung erfolgen, an welche diverse Anforderungen zu stellen sind.

4.3.1 Konstruktive Anforderungen

Je nachdem wieviel Wärme in der städtischen Umgebung benötigt wird und welche Umgebungsbedingungen (Tunneltemperatur, Wärmeeintrag in den Tunnel, Art des umgebenden Erdreichs) vorherrschen, muss das System entsprechend ausgelegt werden.

In der Auslegung werden unter anderem die folgenden Punkte festgelegt:

- Länge aktivierter Tunnelabschnitt
- Verlegeabstand Absorberleitungen
- Dimension Absorberleitungen (17 x 2.0; 20 x 2.0 und 25 x 2.3 mm)
- Länge der Heizkreise
- Strömungsbedingungen
- Lage der Absorberleitungen
- Verteiler (absperbar)
- Messtechnik

Sind Lage und Anzahl der Heizkreise bekannt, müssen diese an eine Versorgungsleitung angeschlossen werden. Die Versorgungsleitung besteht aus einem Vorlauf und einem Rücklauf und transportiert das Wärmeträgermedium von der Wärmeübergabestation zu den Heizkreisen und wieder zurück. Bei der Wärmeübergabestation handelt es sich meist um einen Wärmetauscher, der die Wärme aus dem Tunnelkreislauf an einen Sekundärkreislauf übergibt. Die Versorgungsleitungen können abhängig von der Tunnelart, in der Tunnelsohle, geschlossen in der Betonkonstruktion oder offen an der Tunnelwand angeordnet werden. In jedem Fall sind dabei sicherheitstechnische Aspekte – besonders der Brandschutz – zu beachten. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden die Versorgungsleitungen deshalb im Tunnelquerschnitt oben an der Wand in ca. 4 m Höhe installiert. In dieser Höhe ist das Risiko eines Fahrzeuganpralls sehr gering. Im Hinblick auf den Brandschutz kann ein Rohraussenmantel aus Metall verwendet werden. Alternativ empfiehlt sich die Führung in einem brandsicheren Kanal (vgl. Kapitel 2.2.3). Es ist zu prüfen, ob zusätzlich eine thermische Dämmung der Rohre (Frostsicherung) erforderlich ist.

Für den späteren Betrieb ist ferner eine Fläche für die Wärmeübergabestation und die Umwälzpumpe zu bestimmen.

Sind alle Längen und dementsprechend auch die späteren Druckverluste bekannt, können Pumpe und Wärmetauscher für die Betriebspunkte ausgelegt werden.

Besonderes Augenmerk gilt bei der konstruktiven Umsetzung ausserdem den folgenden Punkten:

Material der Absorberleitungen

Da die Absorberleitungen in das Tunnelbauwerk integriert sind, müssen diese wie auch das Bauwerk selbst eine hohe Lebensdauer (teilweise bis 100 Jahre) aufweisen. Das REHAU Rautherm aus vernetztem Polyethylen (PE-Xa) erfüllt diese Anforderung, ermöglicht ausserdem enge Biegeradien und weist geeignete Leistungswerte (zum Beispiel Full Notch Creep Test) auf, welche herkömmliche Rohre aus PE-HD übertreffen.

Art des Wärmeträgermediums

Nicht immer sind alle Komponenten der energetischen Aktivierung im frostfreien Bereich ausgeführt. Da die Anlage nicht das gesamte Jahr in Betrieb ist und um auch im Havariefall,

z.B. durch einen Stromausfall, das Risiko des Einfrierens des Wärmeträgermediums zu vermeiden, empfiehlt es sich dem Fluid Frostschutzmittel zuzusetzen.

4.3.2 Anforderungen an den Betrieb

Vor der Inbetriebnahme der Anlage steht wie bei allen geothermischen Anlagen ein Druck- und Dichtheitstest an. Richtwerte und Hinweise zur Durchführung finden sich in einschlägigen Normen/Leitfäden. Eine Dokumentation und Protokollierung der Prüfung ist unabdingbar.

Während des Betriebs muss eine messtechnische Überwachung der Anlage über eine geeignete Sensorik möglich sein. Nur dann ist es möglich Änderungen frühzeitig zu erkennen. Über aufgezeichnete Messdaten aus den Vorjahren können auch Trends abgeleitet werden. Fallen diese nicht wie gewünscht aus, sind geeignete Massnahmen abzuleiten.

Neben der Messtechnischen Überwachung ist auch eine Regelung und Steuerung für die Anlage vorzusehen. Bei grossen Anlagen erfolgt die Kontrolle und gegebenenfalls eine Anpassung online.

Auch im Hinblick auf eine Erdwärmenutzung gibt es nationale und oftmals auch regionale Regelungen, die es zu beachten gilt. Einblicke in die rechtlichen Aspekte enthält bspw. der Leitfaden D190 des SIA „Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdbeberührten Betonbauteilen“. Da es kantonsabhängig spezifische Regelungen zur Nutzung der Erdwärme gibt, sind die jeweiligen kantonalen Stellen, welche für die Bewilligung von Bauten zur Nutzung von Erdwärme zuständig sind, zu konsultieren.

Eine Nutzung der Erdwärme kann auch an eine maximal mögliche Temperaturänderung des Erdreichs, resultierend aus dem Wärmeentzug/-eintrag, gekoppelt sein. Sowohl bei einseitigem Wärmeentzug als auch bei einseitigem Wärmeeintrag können die Temperaturen im umgebenden Erdreich über die Jahre gesehen fallen oder steigen. Wird bei der messtechnischen Überwachung ein solcher Temperaturfall oder Temperaturanstieg detektiert und überschreiten die Änderungen die zulässigen Werte, ist eine Regenerierung des umgebenden Erdreichs nötig. Um eine Auskühlung oder Aufheizung des Bodens zu vermeiden, empfiehlt sich die Wärme im Winterbetrieb aus dem Boden zu entziehen und die Anlage im Sommer zu betreiben um überschüssige Wärme aus den umgebenden Gebäuden in das Erdreich zu überführen. Somit sollte sich eine in etwa ausgeglichene jährliche Energiebilanz ergeben.

Der Betrieb und Unterhalt der Primärinfrastruktur eines Strassentunnels wird durch den Betrieb einer Tunnelabsorberanlage kaum beeinflusst.

Im Hinblick auf maschinelle Tunnelreinigungen der Tunnelwände ist darauf Rücksicht zu nehmen, dass die Versorgungsleitungen überwachbar ausgebildet werden (z.B. Führung in Metallkanal) oder ausserhalb der zu reinigenden Wandflächen angeordnet werden (z.B. oben an der Wand, knapp unterhalb der Decke).

Hinsichtlich Wartungsaufwand sind die Absorbermodule wie alle im Beton integrierten Bauteile (Noppenbahn, Abdichtungsfolie etc.) zu betrachten: Eine Wartung ist nicht möglich. Bei Defekten der Module während des Betriebs ist eine Instandsetzung nicht möglich, so dass die defekten Module lediglich aus dem Betriebskreislauf entbunden werden können und die Anlage mit entsprechend weniger Modulen weiter betrieben werden kann. Die Wahrscheinlichkeit für solche Defekte ist jedoch gering, da die Module im Beton vor Umwelteinflüssen geschützt sind. Um zu vermeiden, dass bereits defekte Module einbetoniert werden, sind Prüfungen und Kontrollen gemäss Kontrollplan in der Bauphase unerlässlich.

5 Wirtschaftliche Folgerungen

5.1 Investitionskosten

Tunnelabsorbersysteme werden fest in die Tunnelwand eingebaut und haben daher eine vergleichbare Lebensdauer wie Erdwärmesondenanlagen. Die Jahreskosten einer solchen Anlage werden daher massgeblich durch die Amortisation der Investitionskosten bestimmt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass Tunnelabsorbersysteme immer entweder im Rahmen einer Tunnelsanierung oder eines Tunnelneubaus eingebaut werden. Daher können die Zusatzkosten eines Einbaus eines Tunnelabsorbersystems im Rahmen umfassender Tunnelbaumassnahmen als die Investitionskosten des Systems angesehen werden, die den Erstellungskosten von Erdwärmesondenanlagen gegenüber gestellt werden können.

Für die Zusatzkostenrechnung wird davon ausgegangen, dass beidseitig des Tunnels jeweils 4 Absorbermodule zu je 8 m² in Serie eingebaut werden, die an eine Sammelleitung angeschlossen sind. Die ohnehin auszuführenden Arbeitsschritte bei einer Tunnelsanierung oder einem Tunnelneubau (Abdichtung, Betonarbeiten Innenschale, Montagearbeiten BSA) werden nicht in die Absorberkosten eingerechnet. Die Sammelleitung wird eingerechnet. Es zeigt sich, dass die Bauart der Sammelleitung einen grossen Einfluss auf die spezifischen Systemkosten hat.

Es wurden folgende Zusatzkosten für die Absorbersysteme ermittelt:

Tab. 5 Zusatzkosten Absorbersysteme (Preisbasis Okt. 2015)

Absorbersystem mit Variante Versorgungsleitungen	Zusatzkosten für Erstellung Absorbersystem und Versorgungsleitungen
Variante „PE-Rohre in Kanal“	ca. 250.- CHF/m ²
Variante „RAUFRIGO verzinkt“	ca. 300.- CHF/m ²
Variante „RAUFRIGO V2A“	ca. 410.- CHF/m ²

Bei der Kostenermittlung wurden die höheren Materialkosten der RAUFRIGO-Rohre sowie die reduzierten Einbauzeiten gegenüber der Variante „PE-Rohre in Kanal“ berücksichtigt.

Die spezifischen Mehrkosten eines Absorbers, eingebaut und an eine Sammelleitung angeschlossen, inklusive sein Anteil an der Erstellung der Sammelleitung selber, kann mit ca. CHF 250.-/m² in seiner günstigsten Variante angegeben werden. Je nach Variante der Verkleidung der Sammelleitungen können die spezifischen Mehrkosten bis auf ca. CHF 410.-/m² ansteigen. Bei einer durchschnittlichen Entzugsleistung von 25 W/m² ergeben sich spezifische Investitionskosten für ein Tunnelabsorbersystem, von

ca. CHF 10.-/Watt bzw. CHF 16.-/Watt, resp. zwischen CHF 5.-/(kWh Jahr) und CHF 8.-/(kWh Jahr) bei einem typischen saisonalen Heizlastprofil.

Dies entspricht etwa dem 2- bis 3-fachen der Investitionskosten einer Erdwärmesondenanlage im Schweizerischen Mittelland. Ist hingegen ein Wärmeabnehmer mit einem Bandlastbedarf vorhanden und kann der thermische Widerstand der Rohrleitungen signifikant verkleinert werden, so nähern sich die Investitionen pro kWh derjenigen einer Erdwärmesondenanlage an. Generell aber sind Tunnelabsorbersysteme deutlich teurer als Erdwärmesondensysteme, können hingegen – vergleichbar mit anderen energetisch genutzten Baustrukturen wie Energiepfähle – in Gebieten sinnvoll sein, wo Erdwärmesonden nicht zulässig sind.

Für die Berechnung der Amortisationskosten kann davon ausgegangen werden, dass die Tunnelabsorberanlage eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahren aufweist. Da eine Instandsetzung des Systems faktisch nicht möglich ist, fallen kaum Unterhaltskosten an. Für eine Berechnung der Energiegestehungskosten eines Tunnelabsorbersystems sind daher die Amortisationskosten, sowie die Betriebskosten (faktisch nur Pumpenbetrieb) massgebend. Für die Amortisation der Investitionen einer Tunnelabsorberanlage, gemäss Pilotprojekt bis Portalbereich, kann von CHF 0.10/kWh bis CHF 0.25/kWh (Verzinsung 0% bis 3.5%) für eine saisonale Heizlastnutzung ausgegangen werden. Bei einer Bandlastnutzung verringern sich diese Kosten um bis zu einem Faktor 2. Würde thermisch verbessertes Rohrmaterial eingesetzt, könnten die Amortisationskosten nochmals um einen Faktor 2 geringer ausfallen.

5.2 Potenzial in der Schweiz

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde abgeschätzt wie viele städtische Tunnel in der Schweiz über wie viele Tunnelmeter maximal und realistischer Weise bis zum Jahr 2050 mit einem Tunnelabsorbersystem ausgerüstet werden könnten.

Zur Bestimmung der Anzahl der Tunnel in der Schweiz wurde die FGU Tunneldatenbank als Quelle herangezogen.

In der Schweiz können im urbanen Raum etwa 40 Strassentunnel sowie 62 Eisenbahntunnel identifiziert werden, bei denen ein Einbau von Tunnelabsorbern denkbar wäre. Die technische Machbarkeit wurde nicht untersucht.

Aus wirtschaftlichen Gründen ist die geothermisch nutzbare Tunnellänge begrenzt. Der für den Betrieb der Umwälzpumpe notwendige Energieaufwand steigt mit zunehmender Tunnellänge an. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass eine wirtschaftliche Grenze bei 300 m liegt.

Wenn davon ausgegangen wird, dass ein beidseitiger Absorbereinbau jeweils über eine Tunnellänge von maximal 300 m im Portalbereich sinnvoll wäre, dann ergibt sich für die Schweiz folgendes energetisches Potenzial aus Tunnelabsorbern:

Tab. 6 Jährliches Wärmepotenzial Schweizer Tunnel

	Installationslänge	Jährliches Wärmepotenzial (bei ca. 4 m Höhe, durchschnittlich 25 W/m ² und 1'880 Vollbetriebsstunden pro Jahr)
Strassentunnel	ca. 18'000 m	6.8 GWh/Jahr
Eisenbahntunnel	ca. 23'000 m	8.6 GWh/Jahr

Die totale geothermische Energienutzung in der Schweiz lag 2014 gemäss Energiestatistik des Bundesamtes für Energie bei 2'277 GWh/Jahr, wobei 86 % davon auf Erdwärmesondenanlagen entfielen. Die hier ermittelten 6.8 bzw. 8.6 GWh/Jahr, die durch Tunnelabsorbersysteme im urbanen Raum zusätzlich bereitgestellt werden könnten, würden also einer Steigerung der geothermischen Energienutzung in der Schweiz um Total ca. 0.7 % entsprechen.

Weiteres Potenzial liegt in der Erweiterung der Einsatzgebiete von flächenhaften Absorbermodulen, z.B.:

- Einbau in Tunnelsohlen und Tunnelzwischendecken,
- Einbau in Fahrbahnen,
- zur Eisfreihaltung von Brücken,
- als Weichenheizungen auf Bahnstrecken

- für die Kühlung von Metrotunnel/-stationen,
- usw..

5.3 Vor- und Nachteile von Tunnelabsorbersystemen

Tunnelabsorbersysteme dienen in erster Linie als Wärme- und Kältequellen für Wärmepumpen, resp. Kältemaschinen. Sie haben gegenüber anderen Quellen die folgenden Vorteile:

- Sie erreichen aufgrund des starken Einflusses der Tunnellufttemperatur rascher eine konstante Entzugstemperatur und sind daher gegenüber bspw. Erdwärmesonden unempfindlicher gegenüber einer Änderung der Volllaststunden.
- Die Installation von Absorbermodulen in der Tunnelwand erzeugt praktisch keine Bauverzögerung. Im Gegensatz dazu bedeuten Energiepfähle und Erdwärmesonden in der Regel eine zeitlich starke Beeinträchtigung des Bauablaufs.
- Tunnelabsorbersysteme sind Alternativen in Gebieten, wo Erdwärmesonden aus Wasserschutzgründen nicht gebohrt werden dürfen.
- Tunnelabsorbersysteme sind Alternativen zu Luftwärmetauschern in lärmsensiblen Gebieten.
- Tunnelabsorbersysteme sind quasi ein positives Nebenprodukt des Bauwerks „Tunnel“, was gerade im urbanen Raum zu einer Erhöhung der Akzeptanz beitragen kann.

Nachteilig sind die relativ hohen Investitionskosten von Tunnelabsorbersystemen, sowie der relativ kleine Beitrag an die Energieversorgung in der Schweiz.

6 Weiterer Forschungsbedarf

Wie die drei Versuche gezeigt haben, lassen sich mit diesen Flächenabsorbersystemen bei einem durchschnittlichen Heizlastprofil ca. 25 W/m^2 , resp. $47 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ Jahr})$ entziehen. Wie die Abbildungen **Abb. 37**, **Abb. 40** und **Abb. 43** zeigen, gibt es zwischen der Sole und der unmittelbaren Umgebung des Absorbers grosse Temperatursprünge, resp. thermische Widerstände. Es lässt sich daraus abschätzen, dass durch eine materialtechnisch bedingte Reduktion der thermischen Widerstände in der Konstruktion ein maximales Verbesserungspotenzial von ca. einem Faktor 2 erreichbar ist. Damit ergibt sich ein oberer, technisch erreichbarer Grenzwert für ein Tunnelabsorbersystem, das hinter der Tunnelinnenschale eingebaut wird, von ca. 50 W/m^2 , resp. ca. $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ Jahr})$ für normale Heizzwecke. Zur Annäherung der Entzugsleistung eines Absorbersystems an diesen Grenzwert sind Forschungsarbeiten im Bereich der Material- und Konstruktionstechnik nötig. Damit würden die Investitionskosten für ein Tunnelabsorbersystem in den Bereich einer Erdwärmesondenanlage gelangen.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde der Effekt von stehendem Wasser in der Absorberschicht auf die Entzugsleistung untersucht. Es hat sich gezeigt, dass der Unterschied zwischen einem trocken liegenden und einem gewässerten Absorbersystem nur gering ist. Eine wesentlich höhere Entzugsleistung kann aber vermutet werden, wenn das umgebende Wasser fließt. Diese Leistungssteigerung ist sehr schwer abzuschätzen und sollte vor einer konkreten Anwendung im Rahmen einer Forschungsinstallation messtechnisch bestimmt werden.

Anhänge

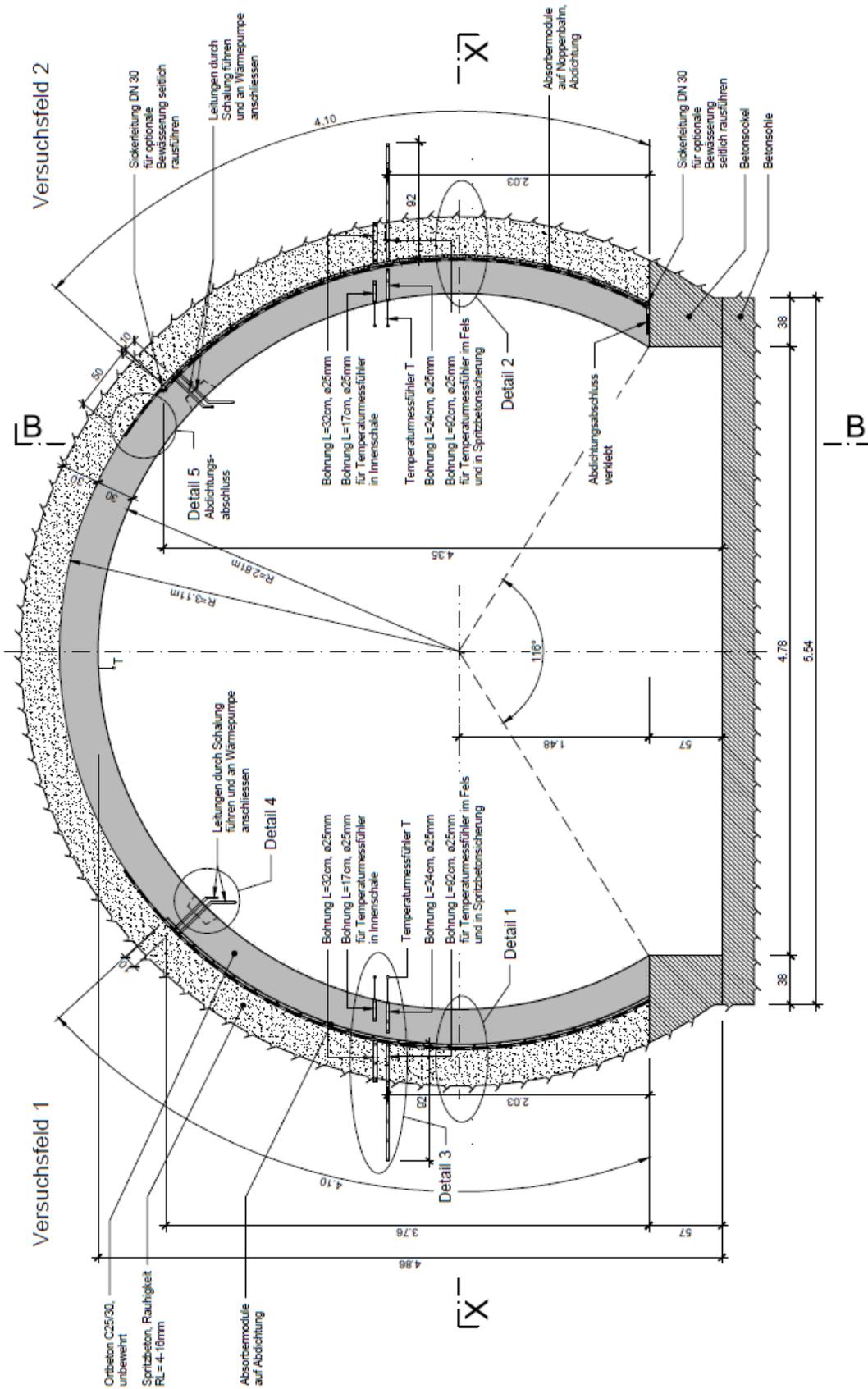
I	A1 Pläne Versuchsfelder	73
II	A2 Kontrollplan	85
III	A3 Liste Erfahrungen aus dem Bau	97
IV	A4 Fotodokumentation	101

I A1 Pläne Versuchsfelder

	GEWATT AG ENGINEERING Heizen und Kühlen mit Erdwärme						
<h2 style="margin: 0;">FGU 2012/005_ENG</h2> <h3 style="margin: 0;">Energiegewinnung aus städtischen Tunneln</h3> <h3 style="margin: 0;">Pilotversuch</h3> <h3 style="margin: 0;">Aufbau Versuchsfelder</h3> <h3 style="margin: 0;">Grundriss, Querschnitte und Ansicht</h3> <h2 style="margin: 0;">1:50</h2>							
		Amberg Engineering AG Trockenloostrasse 21 CH-8105 Regensdorf	Tel.: 044 870 91 11 Fax: 044 870 06 20	Büointerne Plan-Nr. N149-D-001	A		
Rev.	-	A	B	C	D	Format	60/105
Datum	25.03.2014	23.02.2016				Plot-Datum	x
Gez.	CKum	CKum				Auftrags-Nr.	10N00149.0001
Gepr.	WZIn	WZIn					
Freig.							

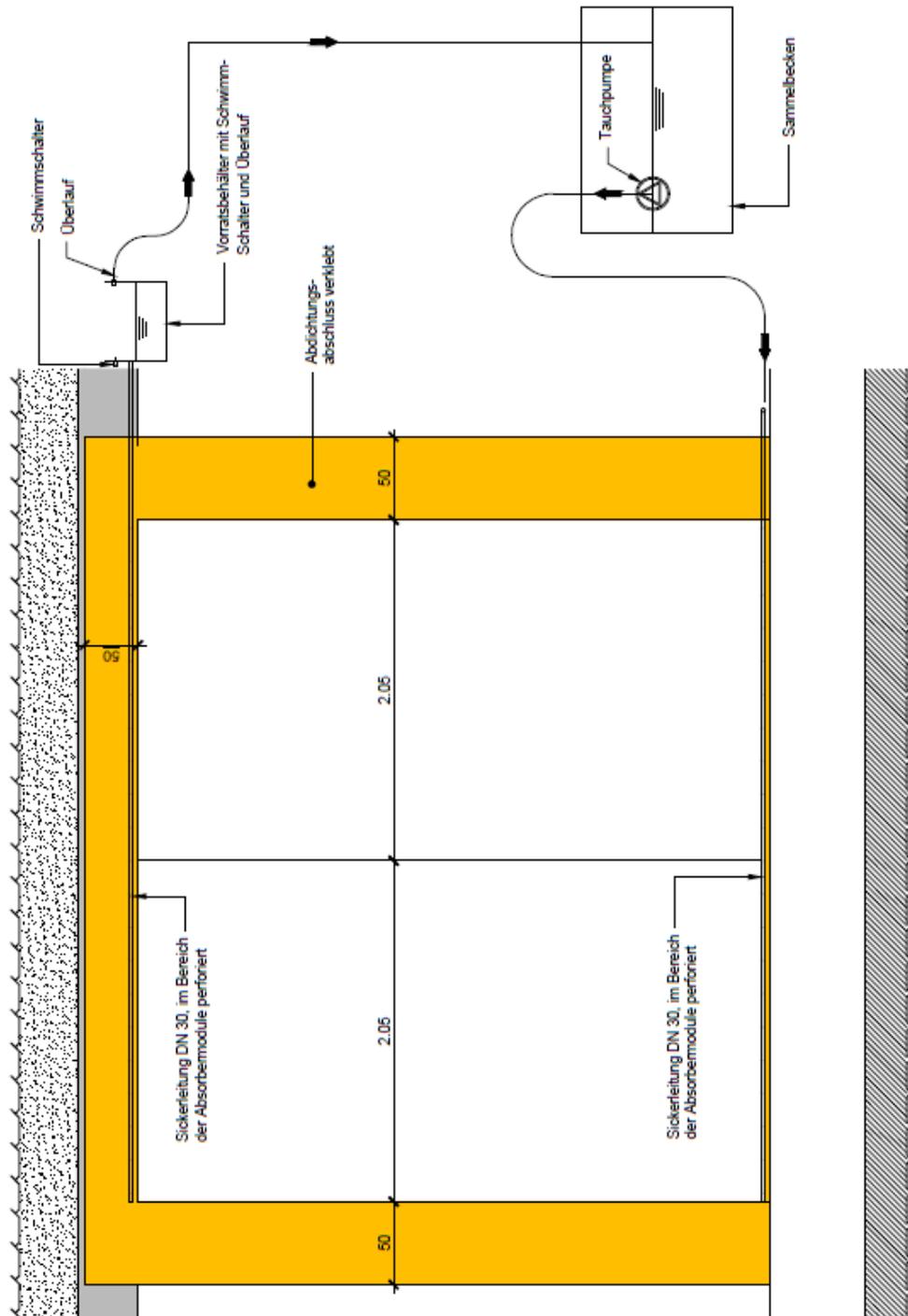
NICHT MASSSTAEBLICH!

Querschnitt A-A, 1:50

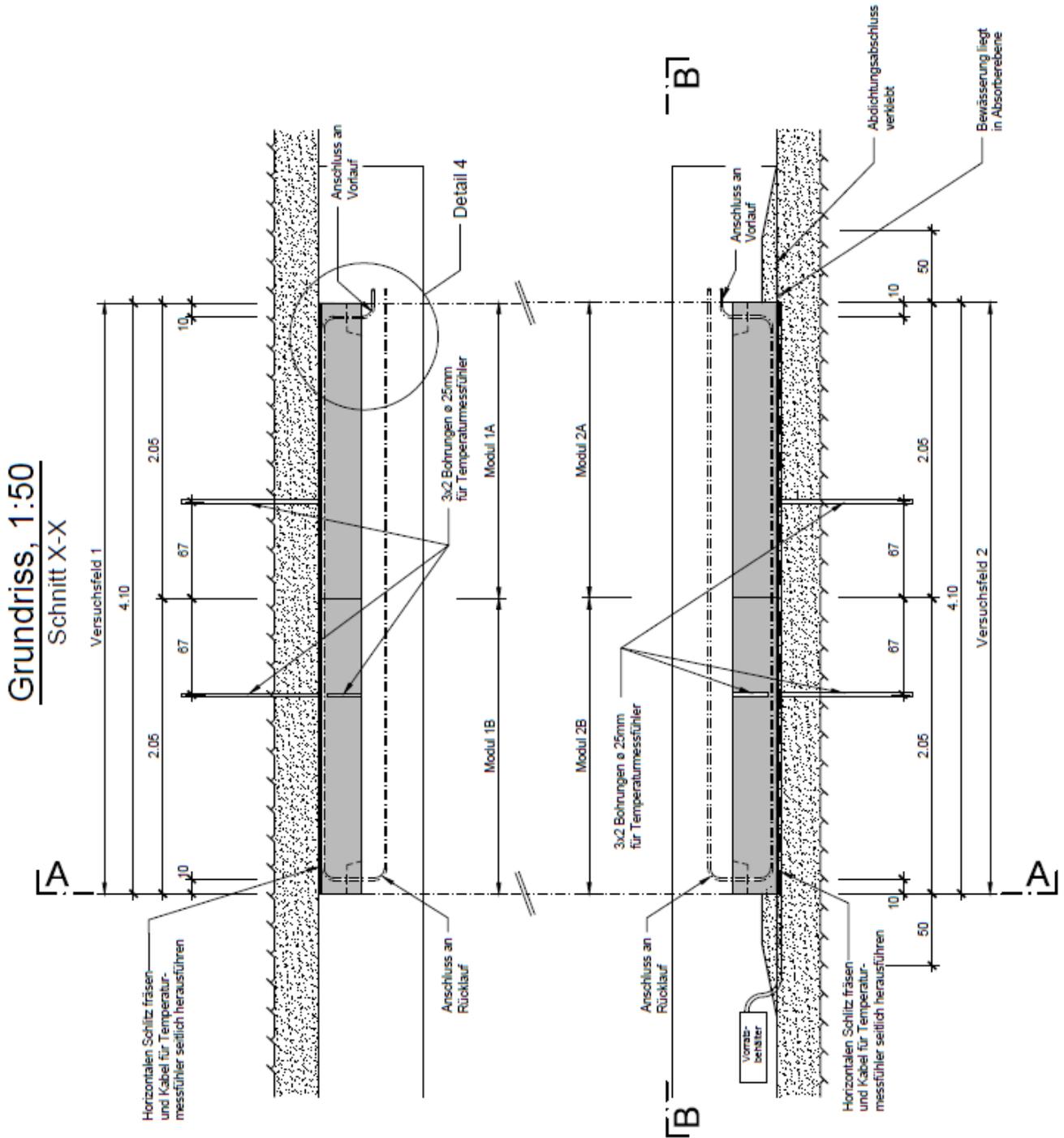


NICHT MASSSTÄBLICH!

Schnitt B-B, 1:50 Bewässerungssystem



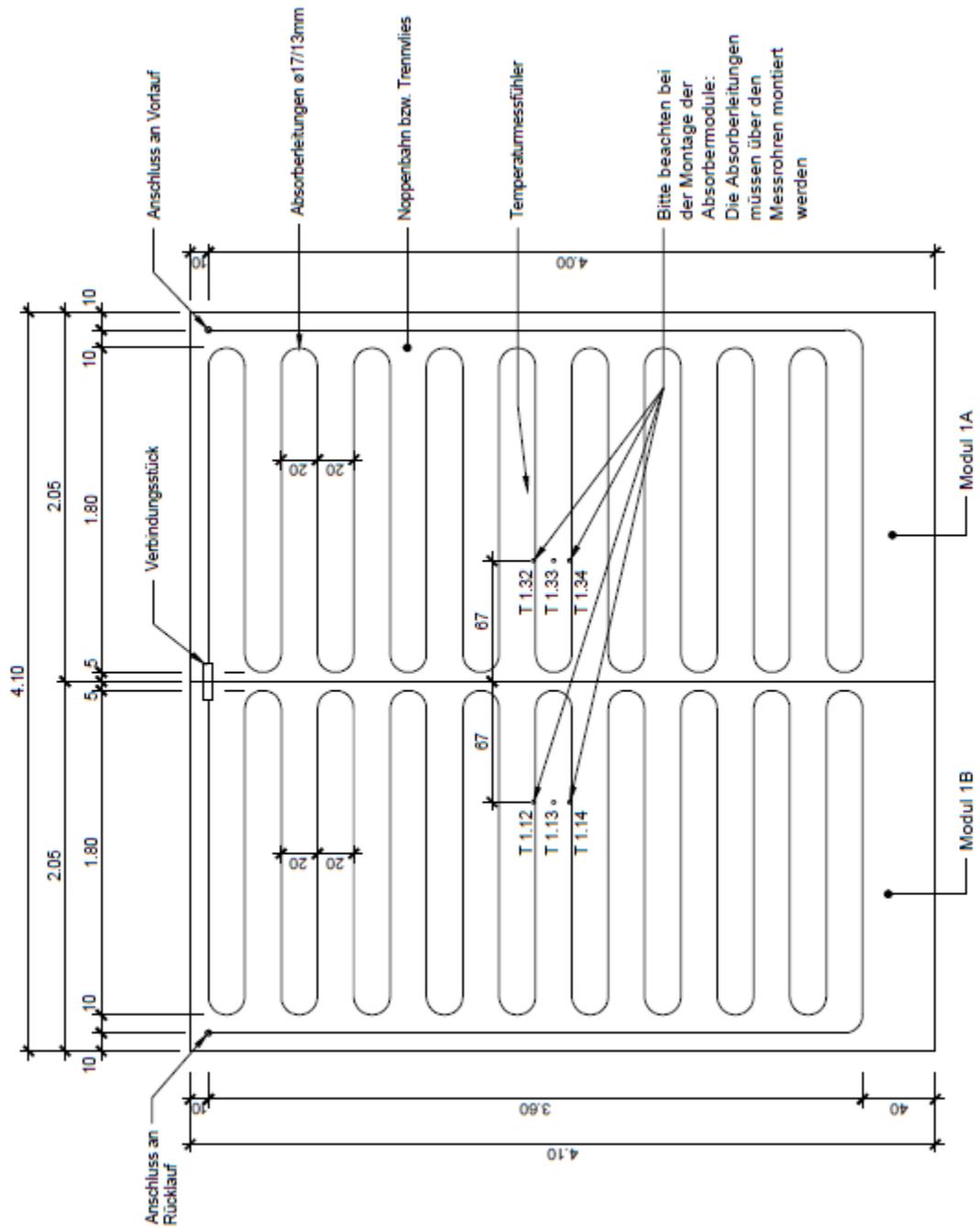
NICHT MASSSTÄBLICH!



NICHT MASSSTÄEBLICH!

Abwicklung Absorbermodule, 1:50

Ansicht von innen nach aussen





GEOWATT AG ENGINEERING
 Heizen und Kühlen
 mit Erdwärme



FGU 2012/005_ENG

Energiegewinnung aus städtischen Tunneln Pilotversuch

Aufbau Versuchsfelder
 Details 1-6, Schnitte C-C und D-D
 1:5, 1:10



Amberg Engineering AG
 Trockenloosstrasse 21
 CH-8105 Regensdorf

Tel.: 044 870 91 11
 Fax: 044 870 06 20

Bürointerne Plan-Nr.

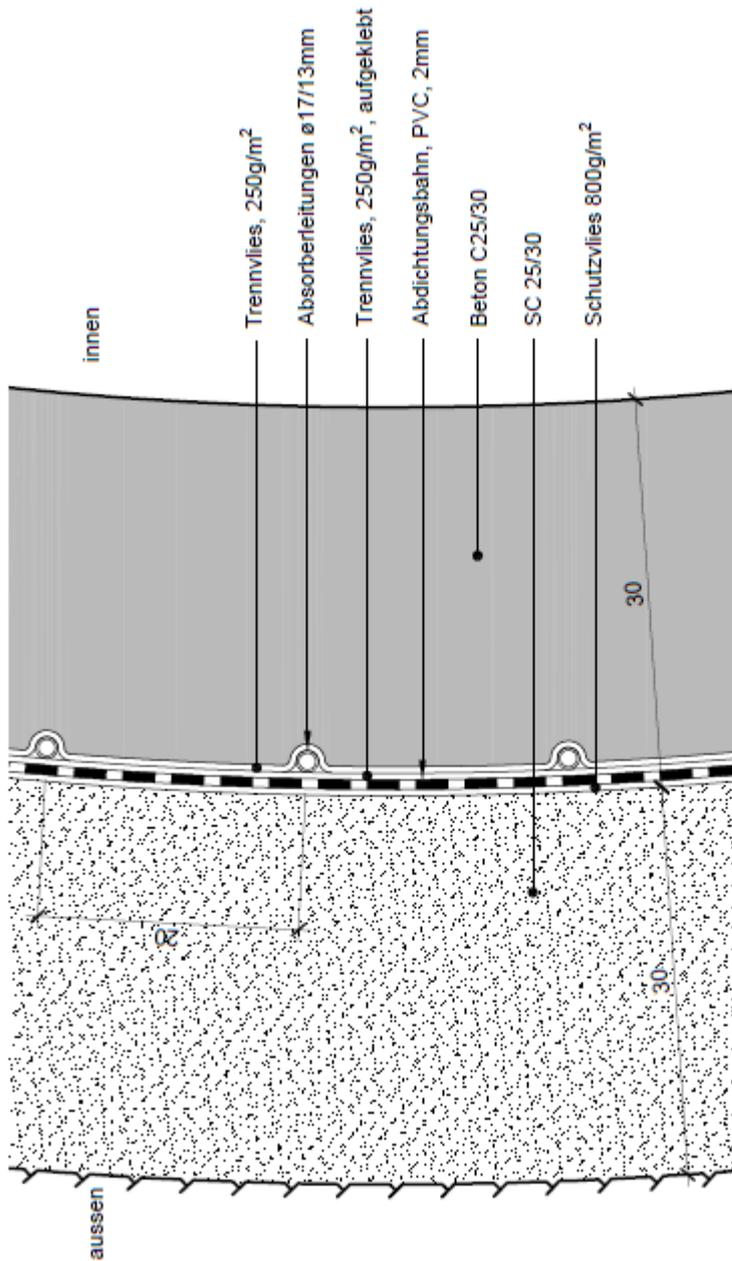
N149-D-002

A

Rev.	-	A	B	C	D	Format	60/84
Datum	27.03.2014	23.02.2016				Plot-Datum	x
Gez.	CKum	CKum				Auftrags-Nr.	10N00149.0001
Gepr.	WZin	WZin					
Freig.							

NICHT MASSSTÄBLICH!

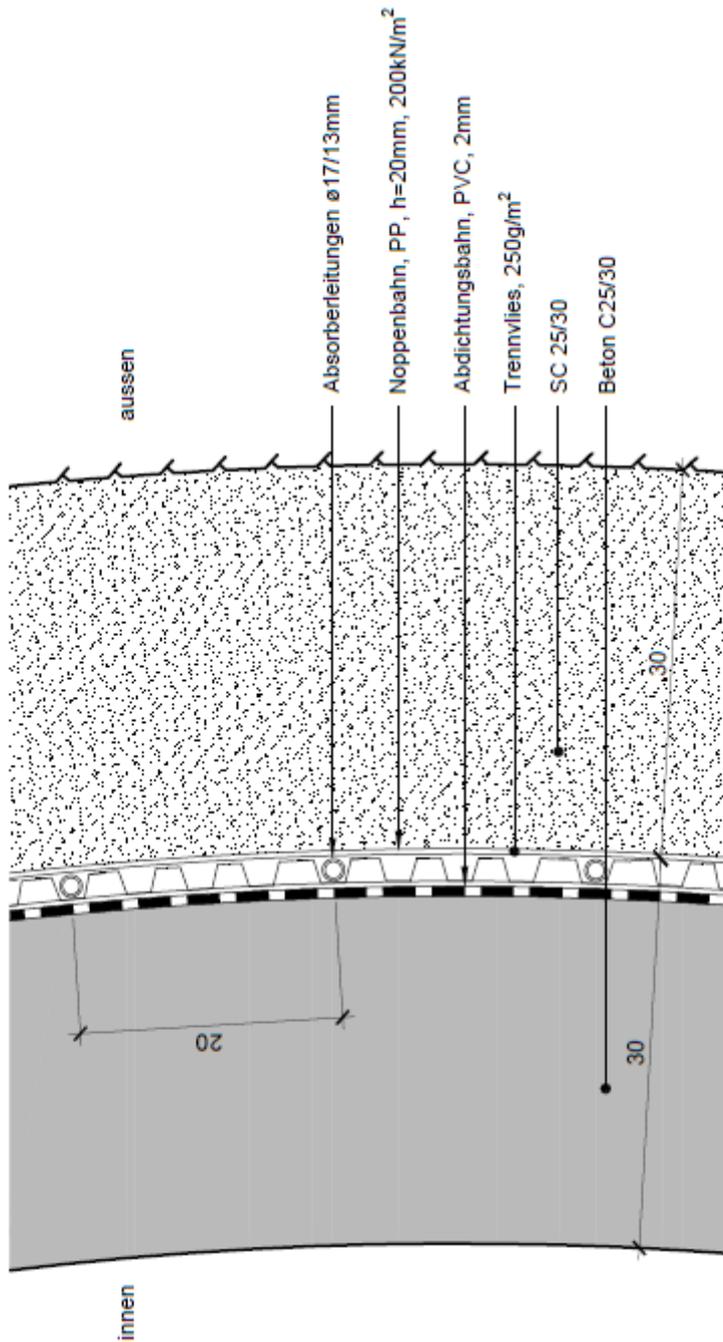
Detail 1, 1:5 Versuchsfeld 1



Bauteil	Eigenschaften
Trennvlies TC Polyfelt TS 60	PP, Dicke ca. 2mm, 250g/m ² Brandkennziffer 4.2
Schutzvlies	800g/m ² , Brandkennziffer 4.2
Abdichtungs- bahn	PVC, 2mm Brandkennziffer 4.2

NICHT MASSSTAEBLICH!

Detail 2, 1:5 Versuchsfeld 2

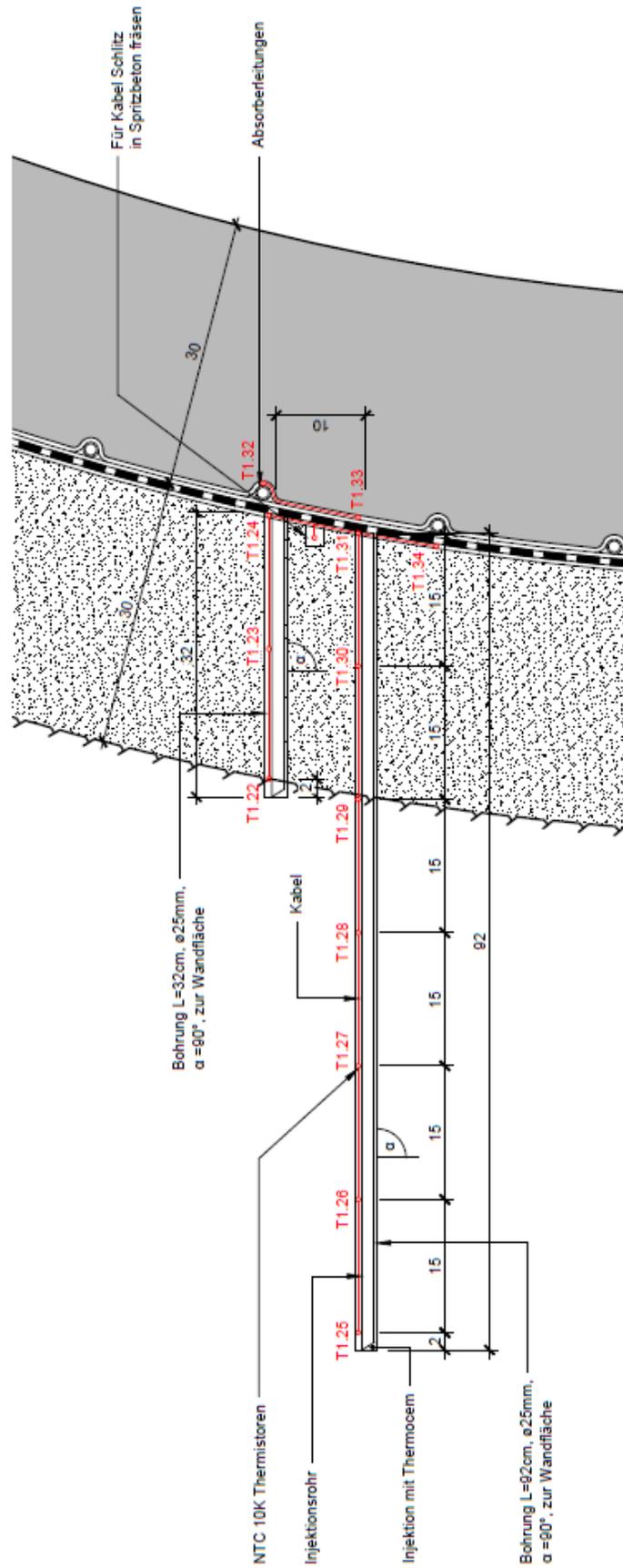


Bauteil	Eigenschaften
Trennvlies TC Polyfelt TS 60	PP, Dicke ca. 2mm, 250g/m ² Brandkennziffer 4.2
Noppenbahn ISO-Drain 20	PP, Noppenhöhe h=20mm Druckfestigkeit 200kN/m ² Brandkennziffer 4.2, 1000g/m ²
Abdichtungsbahn	PVC, 2mm Brandkennziffer 4.2

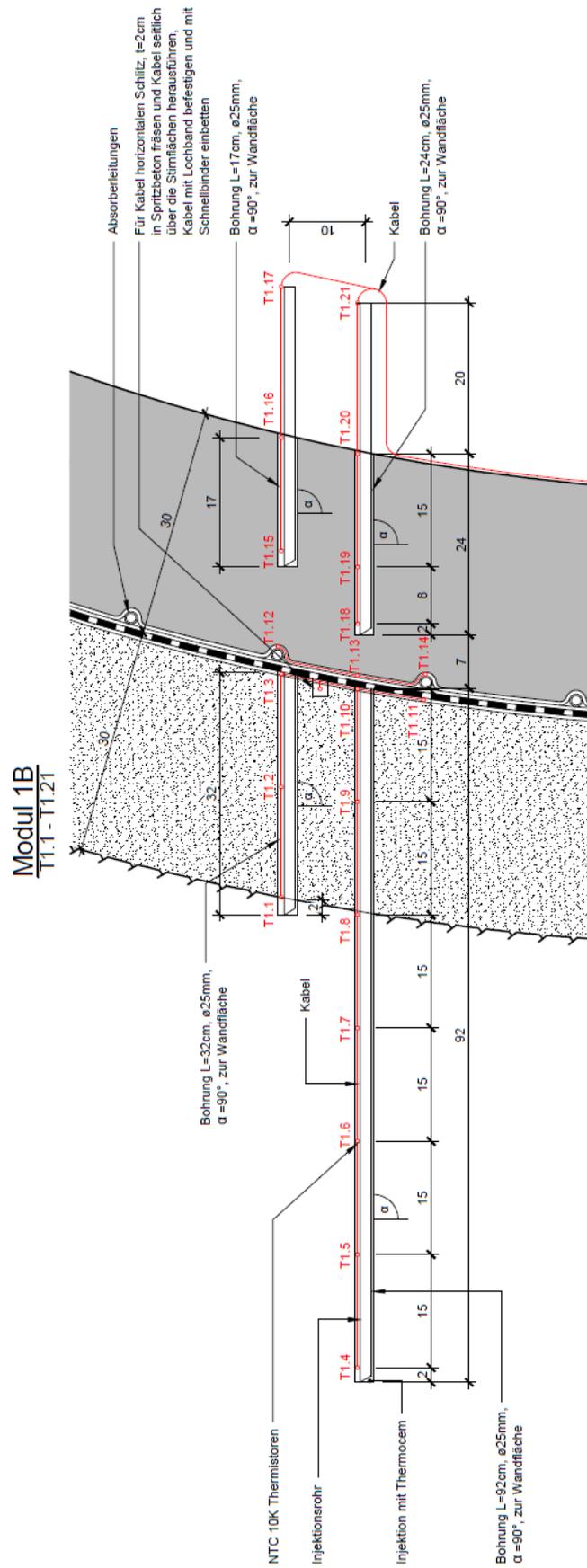
NICHT MASSSTÄBLICH!

Detail 3, 1:10 Anordnung Temperaturmessfühler

Modul 1A
T1.22 - T1.33



NICHT MASSSTÄBLICH!



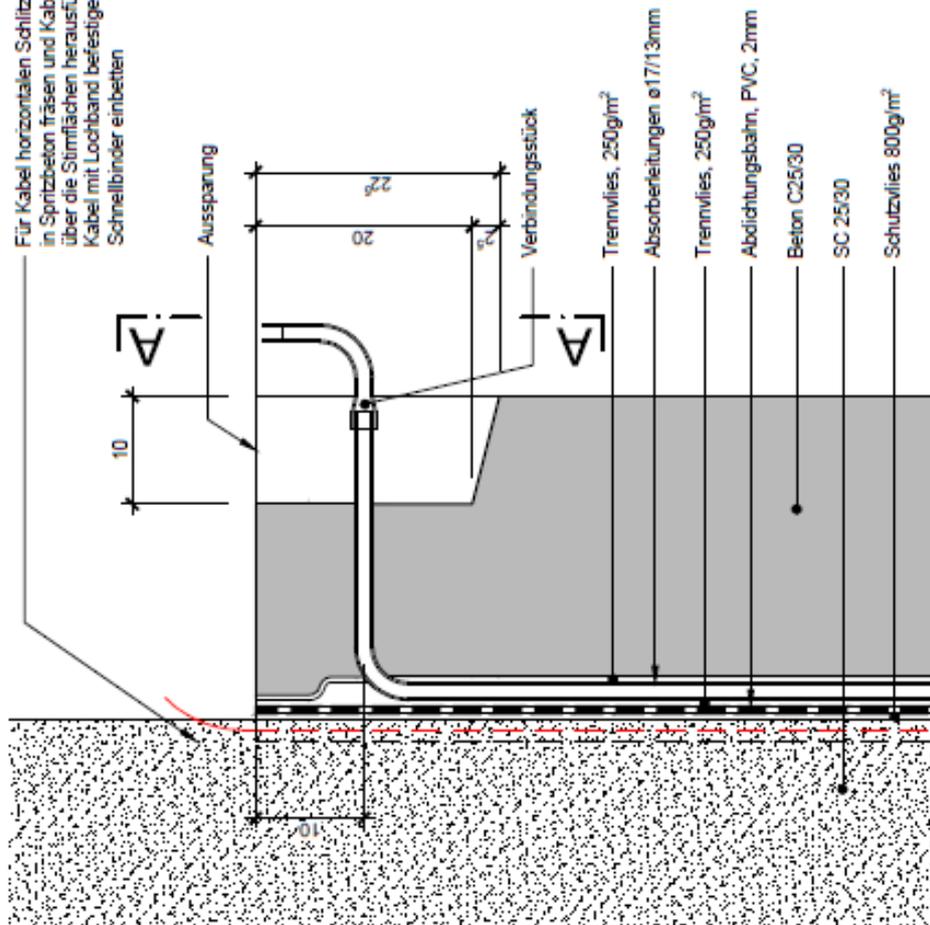
NICHT MASSSTÄEBLICH!

Detail 4, 1:10

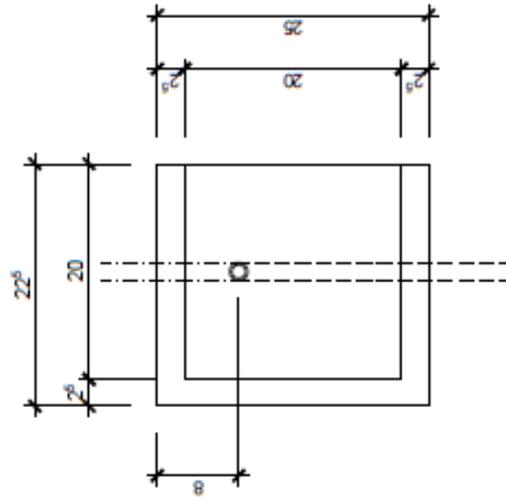
Versuchsfeld 1

Leitungsdurchführung

Grundriss

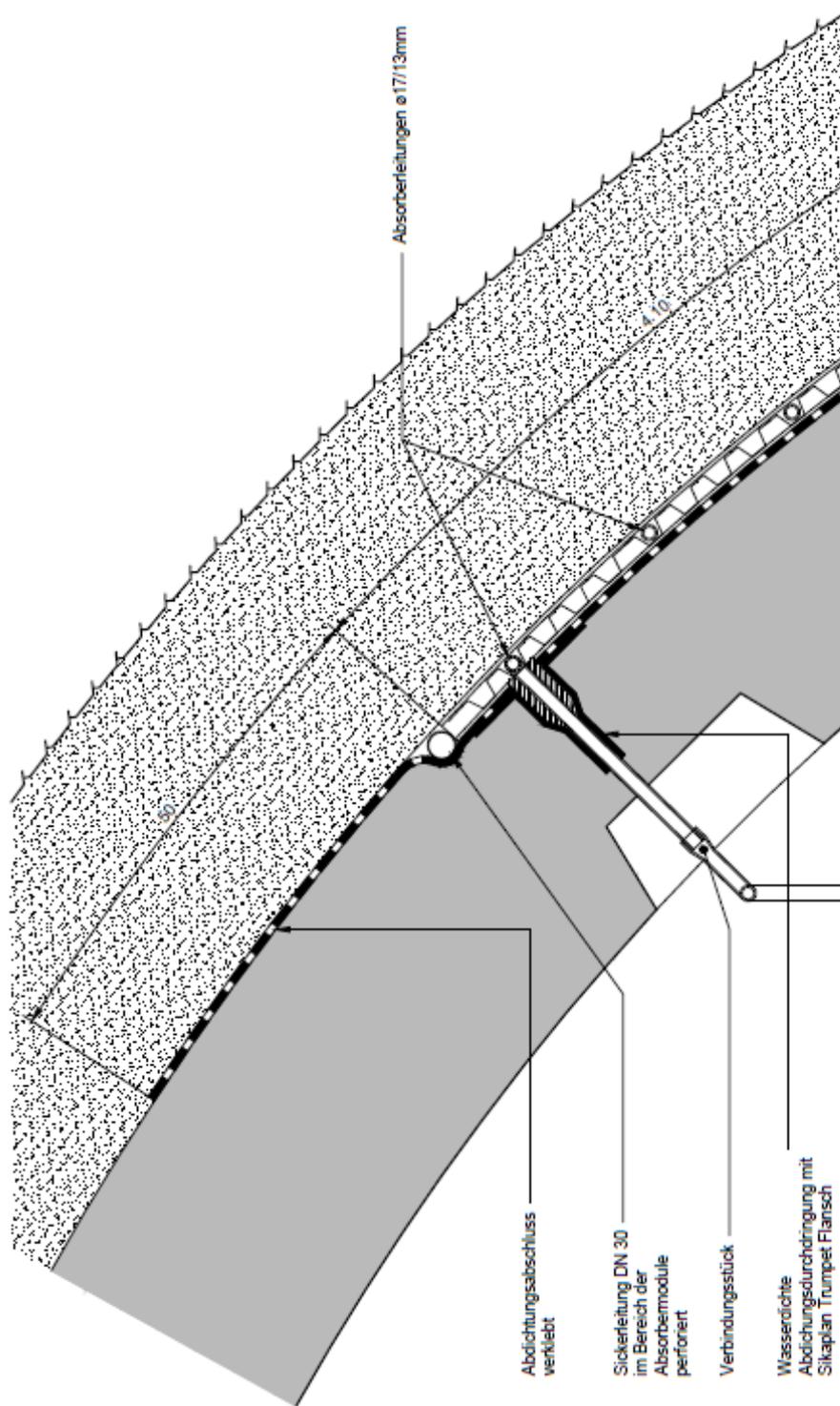


Ansicht A-A



NICHT MASSSTÄBLICH!

Detail 5, 1:10
Versuchsfeld 2
Abdichtungsabschluss



II A2 Kontrollplan



FGU 2012/005_ENG
Energiegewinnung aus städtischen Tunneln – Pilotversuch

Bau Versuchsfelder Kontroll- und Prüfplan





GEOWATT AG ENGINEERING
Heizen und Kühlen
mit Erdwärme



Seite 2 von 12
24.10.2014

Inhaltsverzeichnis		Seite
1.	Allgemeines	3
2.	Absorbermodule	3
3.	Abdichtungsarbeiten	6
4.	Ausbruchsicherung	8
5.	Innengewölbe	9
6.	Messtechnik	12



1. Allgemeines

Legende:

- VSH: VersuchsStollen Hagerbach
- AE: Amberg Engineering AG
- GW: Geowatt Engineering AG
- Walo: Walo Bertschinger AG
- Sika: SikaBau AG
- Schoell: Schoellkopf AG
- Rehau: Rehau AG

Die Absorberleitungen werden in die Abdichtungs- bzw. Drainageschicht integriert. Nachfolgend wird das Gesamtsystem „Absorbermodul“ als System aus Absorberleitungen, Drainageschicht und Schutzschichten verstanden.

2. Absorbermodule

Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen Zeitpunkt / Intensität	Kontrolle		Massnahmen bei unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
				Verantwortlich	Verantwortlich		
Untergrund							
Oberflächenfestigkeit	visuell, Abklopfen	keine losen Bestandteile	jede Etappe	VSH	Stichproben	Nacharbeiten	Tagesrapport, Baujournal
Rauigkeit	visuell	Rautiefe ≤ 8 mm	jede Etappe	VSH	Stichproben	Nacharbeiten	Tagesrapport, Baujournal
Ebenheit	visuell, Latte	keine Stahlfasern an der Oberfläche, Mindestabstand zu Bossenabstand zu Bossenabstand ≥ 10:1	jede Etappe	VSH	Stichproben	Korrektur	Tagesrapport, Baujournal



Seite 4 von 12
24.10.2014



Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen Zeitpunkt / Intensität	Kontrolle		Massnahmen bei unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
				Verantwortlich	Verantwortlich		
Sauberkeit	visuell	kein Staub, Sand, Zementschlamm	Jede Etappe	VSH	Stichproben	Sika/Schoell	Tagesreport, Baujournal
Trockenheit	visuell	kein fließendes Wasser	Jede Etappe und Arbeitsschicht	VSH	Stichproben	Sika/Schoell	Tagesreport, Baujournal
Drainageschicht							
Eignungsnachweis	Werkprüfungen gem. Norm SIA 272	gemäss Norm SIA 272	Vor Ausführungsbeginn	Schoell	Vor Ausführungsbeginn	AE	Prüfprotokoll, Materialattest
Material / Bezeichnung	visuell	gemäss Projektplänen	Jedes Modul	VSH	Stichproben	Sika/Schoell	Tagesreport / Baujournal
Korrektes Verlegen	visuell	vollflächige Verlegung	nach dem Einbau jedes Moduls	VSH	Stichproben	Sika/Schoell	Tagesreport, Baujournal
Schutzschichten							
Eignungsnachweis	Werkprüfungen gem. Norm SIA 272	gemäss Norm SIA 272	Vor Ausführungsbeginn	Schoell	Vor Ausführungsbeginn	AE	Prüfprotokoll, Materialattest
Material / Bezeichnung	visuell	gemäss Projektplänen	Jedes Modul	VSH	Stichproben	Sika/Schoell	Tagesreport, Baujournal
Korrektes Verlegen	visuell	vollflächige Verlegung	nach dem Einbau jedes Moduls	VSH	Stichproben	Sika/Schoell	Tagesreport, Baujournal
Überlappungen	visuell	gemäss Hersteller	nach dem Einbau jedes Moduls	VSH	Stichproben	Sika/Schoell	Tagesreport, Baujournal

Überwachungs- und Kontrollplan

FGU 2012/005_ENG – Energiegewinnung aus städtischen Tunneln – Pilotversuch



Seite 5 von 12
24.10.2014



Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen		Kontrolle		Massnahmen bei unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
			Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich	Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich		
Absorberleitungen								
Qualitätsnachweise	Signierung auf Rohrleitung	Gemäss Norm DIN 16892, DIN 15875-1 bis 5 und DIN 4726	Vor Ausführungsbeginn	REHAU	Stichproben	AE	Rückweisung und Ersatz	Tagesreport, Baujournal
Material / Bezeichnung	Visuell (Signierung auf Rohrleitung)	gemäss Projektplänen/Lieferschein	Jedes Modul	VSH	Stichproben	REHAU	Rückweisung und Ersatz	Tagesreport, Baujournal
Abmessung des Moduls	Messung der Modulgröße und Rohrabschnitte mit Meterstab	gemäss Projektplänen	stichprobenartig	VSH	Stichproben	REHAU	Rückweisung und Ersatz	Tagesreport, Baujournal
Abmessung der Rohrdurchmesser	Messung mit Schiebellehre	gemäss Projektplänen	stichprobenartig	VSH	Stichproben	REHAU	Rückweisung und Ersatz	Tagesreport, Baujournal
Schäden durch Kratzer	Visuell	Kratzer dürfen nicht tiefer als 20% der Rohrwanddicke d sein (bei d=2mm, t ≤ 0.4mm)	Jedes Modul vor und nach Einbau	VSH	Stichproben	REHAU	Reparieren (betreffenden Abschnitt austauschen) bzw. Rückweisung und Ersatz	Tagesreport, Baujournal
Schäden durch abgeknicke Rohre	Visuell	Keine Knicke zulässig	Jedes Modul vor und nach Einbau	VSH	Stichproben	REHAU	Reparieren (betreffenden Abschnitt austauschen) bzw. Rückweisung und Ersatz	Tagesreport, Baujournal
Schiebehülsenverbindungen	visuell	Verarbeitung gem. Technischer Information	Jede Verbindung	VSH	Stichproben	REHAU	Austausch	Tagesreport, Baujournal

FGU 2012/005_ENG – Energiegewinnung aus städtischen Tunneln – Pilotversuch

Überwachungs- und Kontrollplan



Seite 6 von 12
24.10.2014



Heizen und Kühlen
mit Erdwärme



Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich	Kontrolle Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich	Massnahmen bei unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
Drucktest	Messung	Jeder Modulverbund sollte während des gesamten Bauvorgangs Druck halten (Delta gleich 0).	Jeder Modulverbund wird während des gesamten Betonvorgangs unter Druck gesetzt.	REHAU	Stichproben	AE	Leckageortung und -behebung	Tagesrapport, Baujournal

3. Abdichtungsarbeiten

Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich	Kontrolle Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich	Massnahmen bei unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
Kunststoff-Abdichtung								
Eignungsnachweis	Werkprüfungen Gemäss SIA 272	gemäss Norm SIA 272, resp. SIA 281	Vor Ausführungsbeginn	Sika	Vor Ausführungsbeginn	AE	Wahl eines anderen Systems	Prüfprotokoll, Materialtest
Material / Bezeichnung	Lieferscheinkontrolle	gem. Plänen	jede Lieferung	Sika	Stichproben	AE	Rückweisung und Neulieferung	Tagesrapport / Baujournal
Ausbildung der Stösse	visuell	Überlappung gemäss Hersteller, dicht verklebt / verschweisst	jede Etappe, nach dem Verlegen der Abdichtung	Sika	Stichproben	AE	Korrektur	Tagesrapport, Baujournal

FGU 2012/005_ENG – Energiegewinnung aus städtischen Tunneln – Pilotversuch

Überwachungs- und Kontrollplan



Seite 7 von 12
24.10.2014

Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen		Kontrolle		Massnahmen unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
			Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich	Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich		
Korrektes Verlegen	visuell	Abdichtungsfösse nicht bei Betonierfugen, faltenfreies Verlegen (keine Sackbildung)	laufend	Sika	Stichproben	AE	Korrektur	Tagesrapport, Baujournal
Einbauvorschriften (insbesondere Temperatur, Lichteinstrahlung, Witterung etc.)	Überwachung der Rahmenbedingungen	gemäss Hersteller	laufend	Sika	Stichproben	AE	Einbau nur bei Einhaltung der Rahmenbedingungen	Tagesrapport, Baujournal
Beschädigung	visuell	keine Beschädigungen	laufend	Sika	Stichproben	AE	Korrektur	Tagesrapport, Baujournal
Dichtigkeit der Stösse / Schweissnähte	Überlappnaht mit Prüfkanal: Druckluftprüfung	DVS 2225, Teil 2; Prüfdruck 2 bar, Druckabfall ≤ 10% innert 10 Minuten	Jede Schweissnaht	Sika	stichprobenartig	AE	Ersatz	Schriftliche separate Dokumentation
Abdichtungsbänder								
Produktblatt	visuell	gemäss Norm SIA 281	Vor Ausführungsbeginn	Sika	Vor Ausführungsbeginn	AE	Änderung Produkt	Produktblatt
Material / Bezeichnung	Lieferscheinkontrolle	gem. Plänen	jede Lieferung	Sika	Stichproben	AE	Rückweisung und Neulieferung	Tagesrapport / Baujournal
Feuchtigkeit der Untertiefe	Messung	Untergrund < 4 Masse-% respektive gemäss Hersteller/ Lieferant	Vor Applikation	Sika	Stichprobe	AE	Einstellen Arbeiten	Tagesrapport, Baujournal



Seite 8 von 12
24.10.2014



Heizen und Kühlen
mit Erdwärme



Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen		Kontrolle	Massnahmen unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
			Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich			
Sauberkeit	visuell	Untergrund: sauber, frei von: Schmutz, Staub, Fett	Vor Applikation	Sika	Stichprobe	Korrektur	Tagesreport, Baujournal
Einhaltung Ausführungsanweisung	Visuell	Gem. Hersteller	laufend	Sika	Stichprobe	Richtigstellen	Tagesreport, Baujournal
Blasen, Risse oder Ablösungen	Visuell	keine Blasen, Risse oder Ablösungen	laufend	Sika	Stichprobe	Nachbesserung/ Ersatz	Tagesreport, Baujournal

4. Ausbruchsicherung

Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen		Kontrolle	Massnahmen unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
			Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich			
Spritzbetonschale	Profilkontrolle	Lage innerhalb Toleranz		VSH	-	Nachbesserung	Profildarstellung
Mindestdicke Spritzbetonschale	Bohrungen	Mindestdicke gemäss Plan, Abweichungen innerhalb Toleranzen	stichprobenartig	VSH	-	Nachbesserung	Tagesreport / Baujournal
Bewehrung Spritzbetonschale	visuell	Gemäss Plan	stichprobenartig	VSH	-	Nachbesserung	Tagesreport / Baujournal
Bohrkerndruckfestigkeit	an BK Ø 50 mm	Druckfestigkeit gem. SN EN 206-1 SC 3 (C 25/30)	stichprobenartig	VSH	-	-	Laborprotokoll

FGU 2012/005_ENG – Energiegewinnung aus städtischen Tunneln – Pilotversuch

Überwachungs- und Kontrollplan

Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen Zeitpunkt / Intensität	Kontrolle		Massnahmen unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
				Verantwortlich	Zeitpunkt / Intensität		
WIZ-Wert	SIA 262/1, Anhang H	SN EN 206-1 $WIZ \leq WIZ_{\text{gestzt}} + 0.03 = 0.48$	stichprobenartig	VSH	-	-	Feldprotokoll
Ausbreitmass	nach EN 12350-5	Konsistenz gem. SN EN 206-1	stichprobenartig	VSH	-	-	Feldprotokoll

5. Innengewölbe

Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen Zeitpunkt / Intensität	Kontrolle		Massnahmen unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
				Verantwortlich	Zeitpunkt / Intensität		
Schalung							
Massgenauigkeit	Ausmessung der Schalung und Lage	Plankonformität, Toleranz +/- 3 cm	Jede Betonieretappe	VSH	Stichproben	Korrektur	Tagesrapport, Baujournal
Sauberkeit	Visuell	Kein Schmutz Keine Fremdkörper Kein stehendes Wasser	Jede Betonieretappe	VSH	Stichproben	Reinigung	Tagesrapport, Baujournal
Schalungsoberflächen vor betonieren	Visuell	Alle Flächen benetzt	Jede Betonieretappe	VSH	Stichproben	Korrektur	Tagesrapport, Baujournal



Seite 10 von 12
24.10.2014

Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen		Kontrolle	Massnahmen unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
			Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich			
Befestigung	Visuell	Korrekte Abstützung und Befestigung	Jede Betonier- etappe	VSH	Stichproben	Korrektur	Tagesrapport, Baujournal
Schalungseinlagen	Visuell	Plankonformität	Jede Betonier- etappe	VSH	Stichproben	Korrektur	Tagesrapport, Baujournal
Beton							
Betonsorte	Werkseigene Produktionskontrolle (WPK) für: - die Gesteinskörnung für Beton nach SN EN 12620:2002 - den Beton nach SN EN 206-1:2000	Konformitätserklärung des Betonherstellers sowie Zertifikat einer schweizerischen Konformitätsbewertungsstelle gemäss Norm SN EN 45011	Vor Ausführungsbeginn	VSH	-	-	Zertifikat
Betonausgangsstoffe	Zertifikate	Sämtliche Betonausgangsstoffe müssen den gültigen Normen entsprechen; keine recycelten Gesteinsmischungen; keine Zusatzmittel zur Einführung künstlicher Luftporen	Vor Ausführungsbeginn	VSH	-	-	Zertifikat
Betonsorte	Lieferscheinkontrolle visuelle Kontrolle	Sorte und Konsistenz gemäss Projektplänen	jede Lieferung	VSH	stichprobenartig	Rückweisung	Tagesrapport / Baujournal

FGU 2012/005_ENG – Energiegewinnung aus städtischen Tunneln – Pilotversuch

Überwachungs- und Kontrollplan

Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen		Kontrolle		Massnahmen bei unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
			Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich	Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich		
Umgebungstemperatur	Messung Lufttemperatur	5°C < T < 30°C	jede Betonier-etappe	VSH	-	-	Verschieben Betonieren	Tagesrapport
Frischbetontemperatur	Messung Betontemperatur	SIA 262, 6.4.5.5: 5°C < T < 30°C	jede 1. Lieferung pro Etappe	VSH	-	-	Rückweisung	Tagesrapport / Baujournal
Frischbetonkontrolle	Chargenprotokoll	Zementgehalt Z ≥ Z _{best} - 10 kg/m ³	jede Lieferung	VSH	-	-	Rückweisung	Laborbericht
		Zusatzstoffgehalt: Abweichung gegenüber Betonrezeptur ≤ 3 M%	jede Lieferung	VSH	-	-	Rückweisung	Laborbericht
Nachbehandlung								
Ausschulfristen	Betonfestigkeit mit Betonprüfhammer	Beim Erreichen der höchsten Temperatur des Abbindevorgangs / Min. Festigkeit 10 N/mm ²	Jede Betonier-etappe	VSH	Stichproben	Walo	Fristen ändern	Tagesrapport, Baujournal
Nachbehandlung	Visuelle Prüfung		Jede Betonier-etappe	VSH	Stichproben	Walo	Korrektur	Tagesrapport, Baujournal



6. Messtechnik

Gegenstand der Prüfung / Kontrolle	Art der Prüfung / Kontrolle	Anforderung	Prüfungen		Kontrolle		Massnahmen unzulässigen Abweichungen	Dokumentation
			Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich	Zeitpunkt / Intensität	Verantwortlich		
Messtechnik								
Position der Bohrungen der Messfühler	Einmessen der Lage zur „Nulllinie“, Messung der Neigung	So genau wie möglich nach Plan, effektive Masse werden für die FE Simulation verwendet.	beim Erstellen der Bohrungen	Geowatt				Wird in Plan eingezeichnet, resp. angegeben.
Fühlerkontrolle	Vergleich mit Eichfühler in Eisbad	+/- 0.03°C	Vor Einbau	Geowatt	Vor Einbau	Geowatt	Nur selektionierte Fühler verwenden	Interne Liste
Fühlerkontrolle montiert	Widerstandsprüfung nach Einbau	Plausibler Widerstand	Beim Einbau	Geowatt	Alle Fühler sind korrekt, kein Ausfall	Geowatt	Austausch der Fühler	Printscreens
Daten und Datenerfassung Messung	Funktionskontrolle Regelung, Messdatenerfassung.	Keine Unterbrüche durch Messausfall oder Stromunterbruch	Täglich	Geowatt		Geowatt	Je nach Dauer des Unterbruchs Wiederholung der Messesequenz	Printscreens, Daten

III A3 Liste Erfahrungen aus dem Bau



A3

FGU 2012/005_ENG
Energiegewinnung aus städtischen Tunneln – Pilotversuch

Bau Versuchsfelder

Liste Erfahrungen aus dem Aufbau der Versuchsfelder





Erfahrungen aus dem Aufbau der Versuchsfelder

Legende Beurteilung:



hat gut funktioniert im Versuch

hat sich im Versuch als Schwierigkeit gezeigt -> Verbesserungsvorschläge

hat nicht funktioniert und wird verworfen

Bauteil / Arbeitsschritt	Thema	Beurteilung und ggf. Verbesserungsvorschläge	Verantwortlich	Weiteres	Beurteilung
Fertigung Module	Länge Anschlussleitungen	Anschlussleitungen lang genug lassen, so dass Unregelmäßigkeiten in Innenschalendicke usw. aufgefangen werden können. Überstände auf Baustelle kürzen	Modullieferant	muss von Reha definiert werden	
Fertigung Module	Überlappung Module	Module a und b in Mitte überlappt -> Darf keine Rolle spielen, welches Modul welches überlappt, d.h. bei der Modulproduktion Überlappungsbereich klar definieren.	Modullieferant		
Fertigung Module	Überlappung Module	Noppenabsorber soll auch überlappt (2-3 Noppen) werden, deshalb soll die Bahn ohne Randstreifen produziert werden. Da die Noppenbahn eine Breite von 2 m hat, muss evtl. die Registerbreite von Reha kontrolliert werden.	Modullieferant		
Fertigung Module	Durchführung Leitungen durch Noppenbahn	Durchführung Absorberleitungen durch Noppen vorher vorbereiten -> Nein, macht keinen Sinn, da ja nur bei gewissen Elementen eine Durchführung notwendig ist und die Elemente ja möglichst baugleich sein sollen.	Modullieferant		
Fertigung Module	Kennzeichnung der Module	Eindeutige Kennzeichnung der Module: oben/unten, rechts/links/, a/b, innen/ausen	Modullieferant	aufnehmen in Kontroll- und Prüfplan	
Fertigung Module	Masse der Module	Module massengau herstellen, Leitungen müssen immer in der gleichen Lage sein -> insbesondere bei Vliesmodulen eher mehr Punkte (Klettbefestigungen) für die Befestigung der Leitungen am Vlies vorsehen	Modullieferant		
Fertigung Module	Befestigungspunkte	Bereiche/Punkte im Werk auf den Modulen markieren, bei denen eine durchgehende Befestigung mit Bolzen/Nägeln möglich ist (wo keine Leitungen verlaufen).	Modullieferant	Eigentlich klar. Bei der Noppenausführung immer in den Vertiefungen!	





Erfahrungen aus dem Aufbau der Versuchsfelder

Legende Beurteilung:



hat gut funktioniert im Versuch
 hat sich im Versuch als Schwierigkeit gezeigt -> Verbesserungsvorschläge
 hat nicht funktioniert und wird verworfen

Bauteil / Arbeitsschritt	Thema	Beurteilung und ggf. Verbesserungsvorschläge	Verantwortlich	Weiteres	Beurteilung
Fertigung Module	Kennzeichnung der Module	Eindeutige Kennzeichnung der Anschlussleitungen: Verbindungsleitung zwischen Modulen a/b, Anschlussleitung an Hauptleitung -> eventuell mit farbigen Klebebändern	Modullieferant	aufnehmen in Kontroll- und Prüfpfan	
Fertigung Module	Rohrenden müssen für Montage verschlossen werden	Rohrenden müssen z.B. durch ein Klebeband, wieder lösbar, bis zum Anschluss an die Sammelleitung verschlossen werden	Modullieferant	aufnehmen in Kontroll- und Prüfpfan	
Fertigung Module	Rohrabwinkelungen	Notwendige Abwicklungen vom Absorberrohr vorbereiten (Spezialwerkzeug)	Modullieferant		
Einbau Module / Abdichtung	Fixierung gegen Aufschwimmen	Modul mit beidseitigem Vlies muss zusätzlich gegen Aufschwimmen beim Betonieren gesichert werden -> Seitlich und unten zusätzlichen Vliesstreifen aufkleben, evtl. zusätzliche Befestigung mit Nägeln	Abdichter		
Einbau Module / Abdichtung	Befestigung Module auf Abdichtung (Feld 1)	Mittels dichten Aufhängepunkten oder an Rondellen befestigt - genügend Überstand vorsehen zum Befestigen	Abdichter		
Einbau Module / Abdichtung	Handling Module	Haltehaschen für Transport und schnellen Einbau anbringen - Gewicht i.O.	Abdichter		
Einbau Module / Abdichtung	Einbaudauer Module	Bei guter Vorbereitung Untergrund und Haltesystem an Modulen nur ca. 10 - 20 % langsamer	Abdichter		
Einbau Module / Abdichtung	Befestigung Abdichtung auf Modulen (Feld 2)	Aufpassen auf Materialverträglichkeit (Weichmacherwanderung) - normale Haltepunkte auf Folie vorsehen oder abgedichtete Durchdringungen	Abdichter		





Erfahrungen aus dem Aufbau der Versuchsfelder



Legende Beurteilung:



hat gut funktioniert im Versuch
 hat sich im Versuch als Schwierigkeit gezeigt -> Verbesserungsvorschläge
 hat nicht funktioniert und wird verworfen

Bauteil / Arbeitsschritt	Thema	Beurteilung und ggf. Verbesserungsvorschläge	Verantwortlich	Weiteres	Beurteilung
Innenschale	Aussparung für Leitungsdurchführung	Grösse 20/25 ausreichend, genügend früh zusammen mit dem Ablichter erstellen > Manschette oder Dichtflansch			
Innenschale	Aussparung für Leitungsdurchführung	Lage am Blockrand gut, Befestigung und Entfernung der Aussparungsschalung ist so einfach möglich, Zugänglichkeit für Dichtung zwischen Leitung und Durchführungslöcher in Aussparungsschalung gewährleistet	Unternehmer		
Innenschale	Aussparung für Leitungsdurchführung	Position und Ausrichtung Leistungsanschluss mittig in Aussparung gut	Unternehmer		
Betriebsinstallationen	Anschluss Leitungsverbindungen	i.O.	Unternehmer		
Betriebsinstallationen	Anschluss Wärmepumpenanlage	i.O.	Unternehmer		
Betriebsinstallationen	Druckprüfungen	Vor Inbetriebnahme sind zur Qualitätssicherung Druckprüfungen am System zu machen. Wer wann wie diese Prüfungen durchführt, ist vorab zu definieren und im Kontrollplan festzuhalten	Unternehmer	aufnehmen in Kontroll- und Prüfplan	



IV A4 Fotodokumentation



A4

FGU 2012/005_ENG
Energiegewinnung aus städtischen Tunneln – Pilotversuch

Bau Versuchsfelder Fotodokumentation



1. Versuchsfeld 2

Absorbermodul Typ 2: Absorberleitungen auf Noppenbahn



Abbildung 1 Versuchsfeld 2, vor Montage, mit eingebauten Temperaturmessfühlern

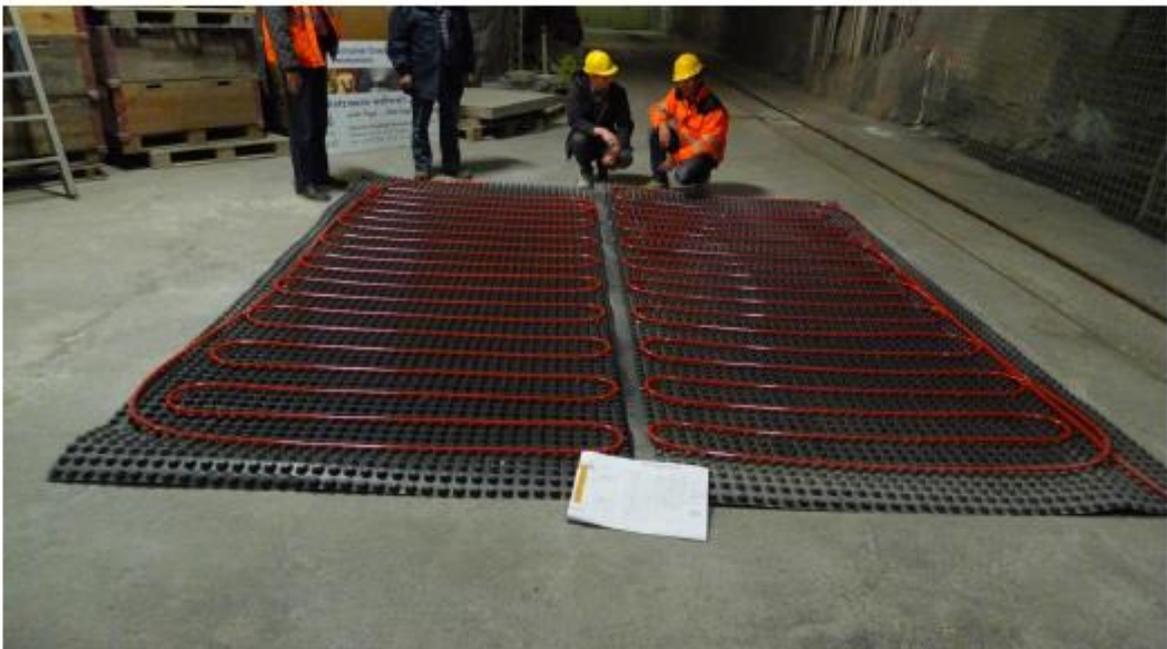


Abbildung 2 Absorbermodul Typ 2, wie geliefert

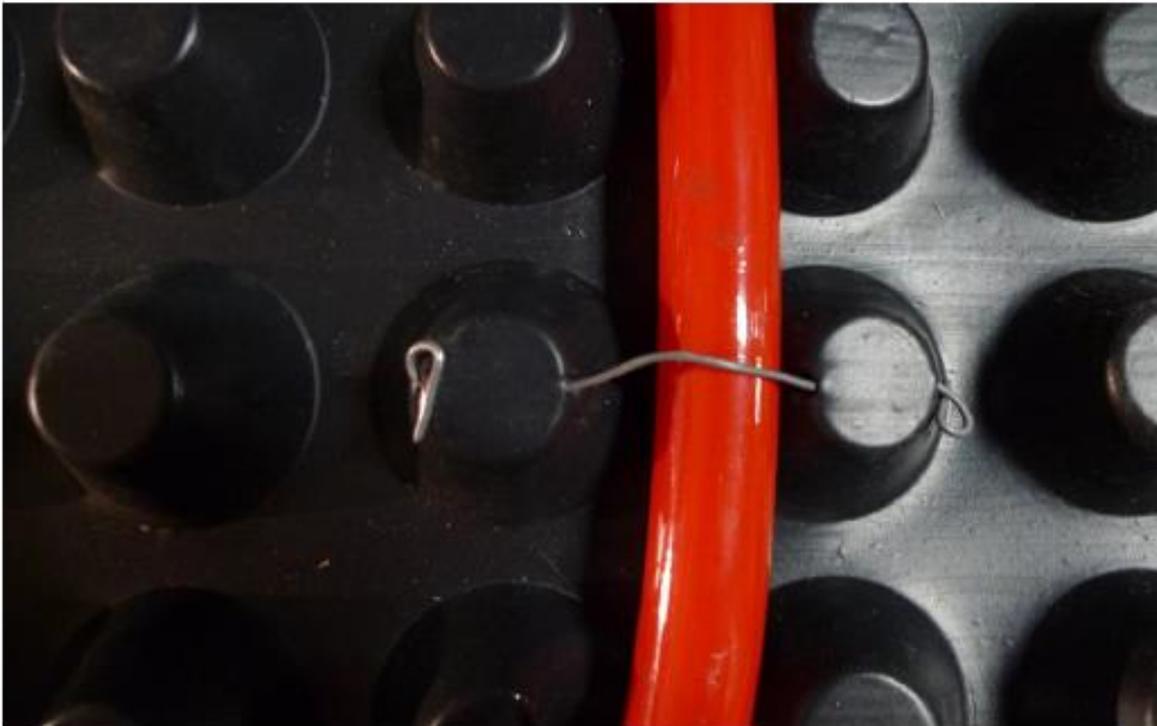


Abbildung 3 Absorbermodul Typ 2, Detail Befestigung Absorberleitung auf Noppenbahn

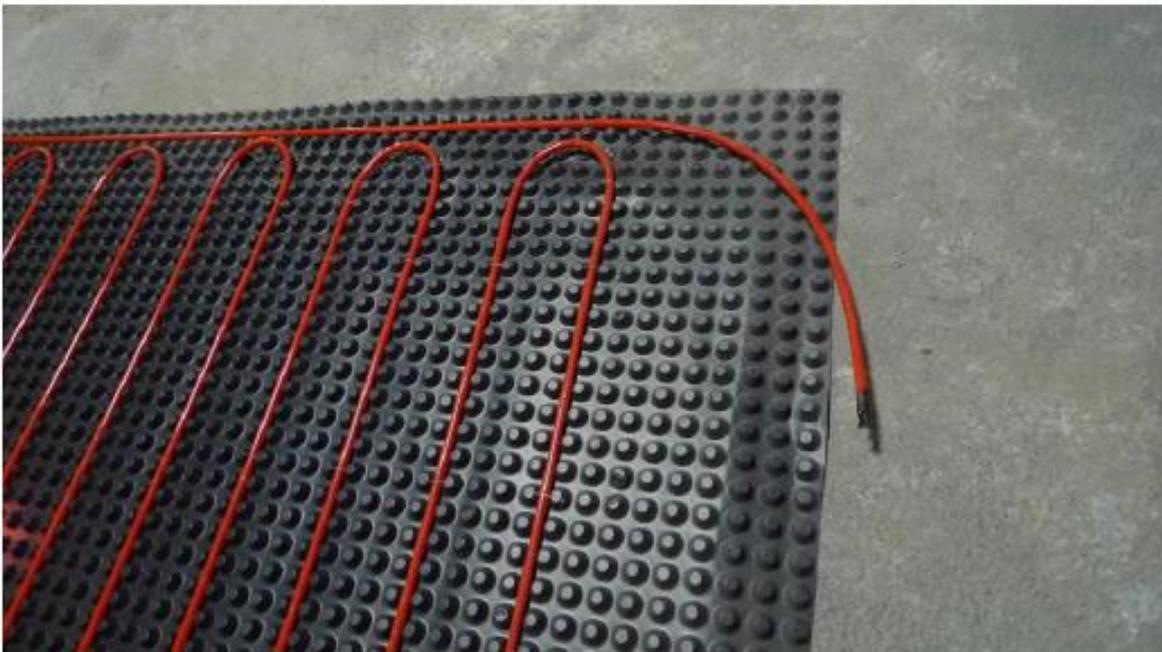


Abbildung 4 Absorbermodul Typ 2, Anschluss Hauptleitung



Abbildung 5 Versuchsfeld 2, Bewässerungsleitung



Abbildung 6 Versuchsfeld 2, während Montage



Abbildung 7 Versuchsfeld 2, Montage Absorbermodule

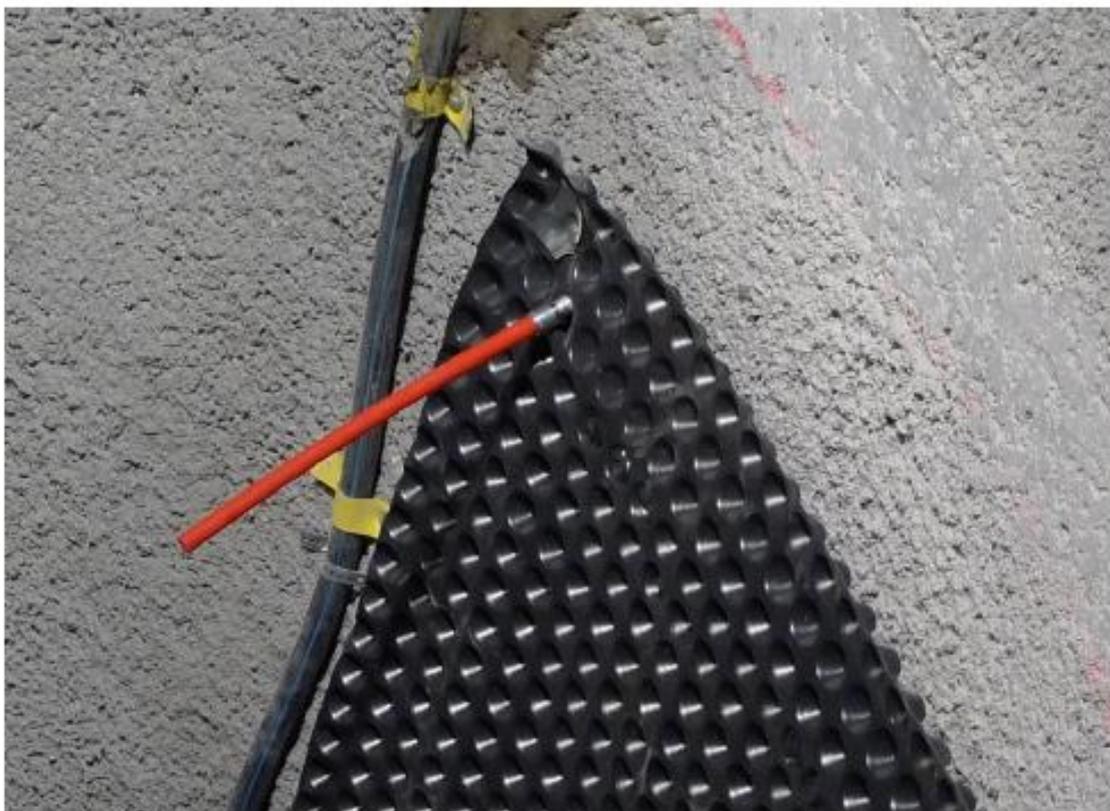


Abbildung 8 Versuchsfeld 2, Detail Durchdringung Noppenbahn mit Absorberleitung



Abbildung 9 Versuchsfeld 2, Module montiert



Abbildung 10 Versuchsfeld 2, Montage Abdichtungsfolie



Abbildung 11 Versuchsfeld 2, Montage Abdichtungsfolie



Abbildung 12 Versuchsfeld 2, mit Schutzvlies

2. Versuchsfeld 1

Absorbermodul Typ 1: Absorberleitungen zwischen zwei Trennvliesen



Abbildung 13 Versuchsfeld 1, vor Montage, mit Temperaturmessfühlern



Abbildung 14 Absorbermodul Typ 1, zwischen zwei Trennvliesen



Abbildung 15 Schutzvlies auf Untergrund



Abbildung 16 Montage Abdichtungsfolie



Abbildung 17 montiertes Absorbermodul, mit Temperaturmessfühlern



Abbildung 18 montiertes Absorbermodul, Abdichtung geschützt

3. Beide Versuchsfelder

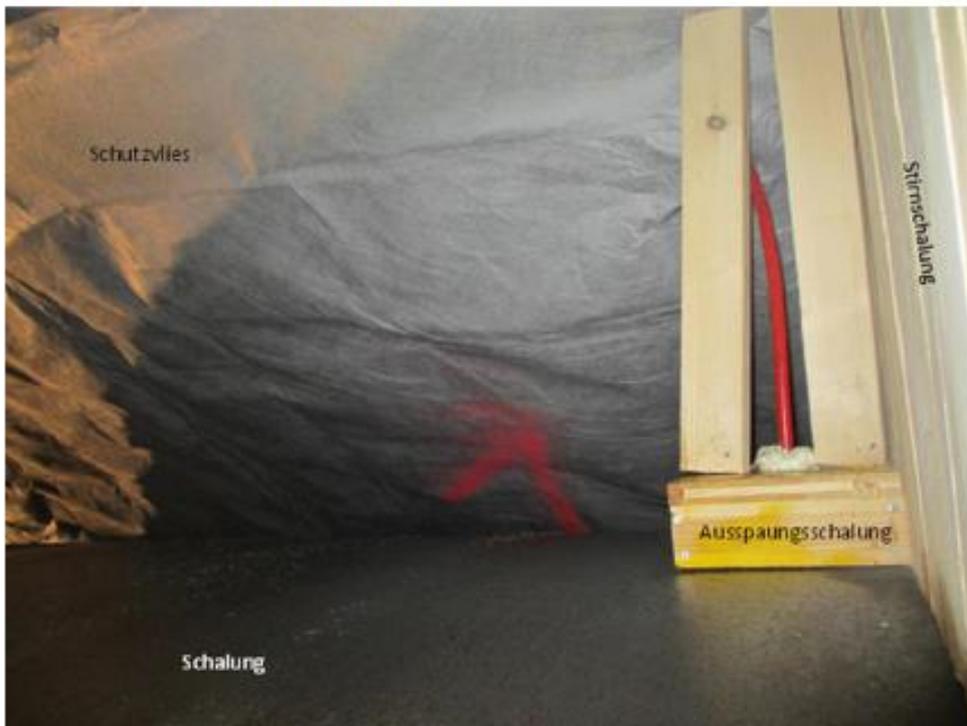


Abbildung 19 Aussparungsschalung



Abbildung 20 Schalung gestellt



Abbildung 21 Betoninnenschale erstellt

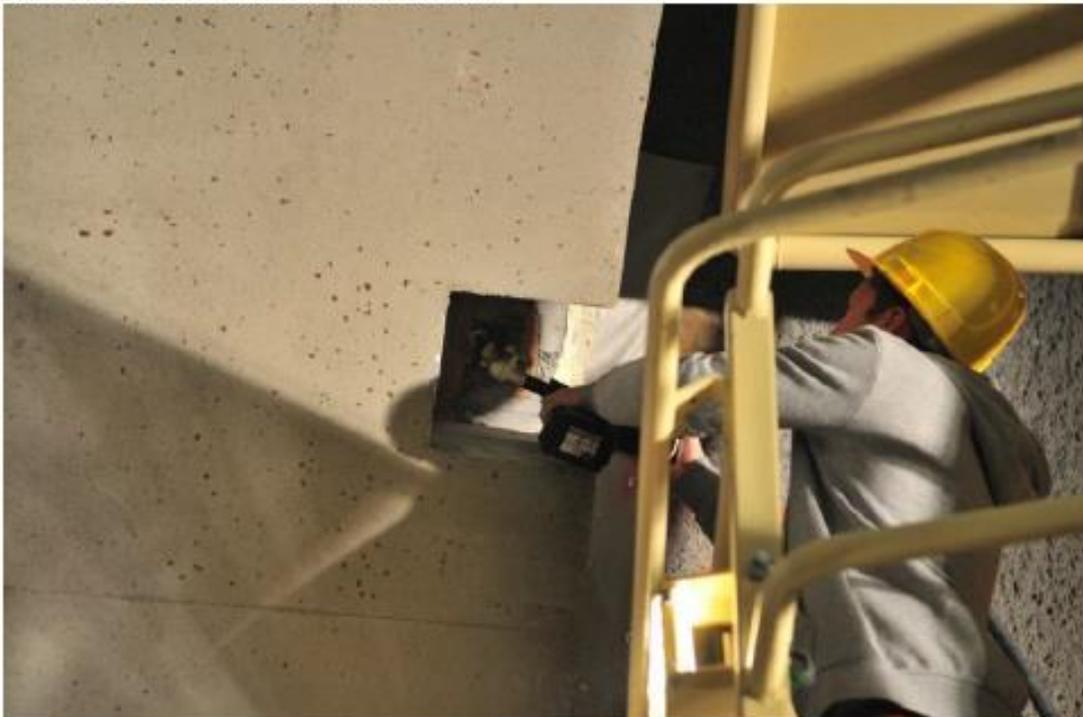


Abbildung 22 Anschluss Versorgungsleitungen



Abbildung 23 Wärmepumpe mit Messanlage

Glossar

Begriff	Bedeutung
<i>Afkt</i>	Absorberfunktion
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstung
EWS	Erdwärmesonde
FGU	Fachgruppe Untertagbau
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
VSH	Versuchsstollen Hagerbach
WELK	Werkleitungskanal

Literaturverzeichnis

Dokumentation

-
- [1] "Kosten und Nutzen der Geothermie für die Verkehrsinfrastruktur", Dietmar Adam, Andreas Oberhauser, EI-Eisenbahningenieur, März 2008
-
- [2] "Tunnelgeothermische Teststrecke Stuttgart-Fasanenhof", Marcus Schneider, Pieter A. Vermeer, 7. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, TAE, Ostfildern, 2010, S. 605-612
-
- [3] "Erdwärmenutzung im Eisenbahntunnelbau - Simulation und Wirtschaftlichkeitsberechnung", A. Oberhauser, D. Adam, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference 2005 Frankfurt
-
- [4] "Nutzung der Geothermie im Tunnelbau", W. Witke, D. Schmitt, Geotechnik 28 (2005) Nr.4
-
- [5] "Die weltweit erste Anwendung der Erdwärmenutzung im U-Bahnbau", M. Pöttinger, Schriftenreihe der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Heft 54, Oktober 2003
-
- [6] "Potenzial der Tunnelbaustrecke des Bahnprojektes Stuttgart 21 zur Wärme- und Kältenutzung", Schlussbericht Universität Stuttgart, T. Schlosser, M. Schmidt, M. Schneider, P. Vermeer, Juli 2007
-
- [7] "Geothermie im Tunnelbau - Stand der Technik und Entwicklungen", M. Schneider, P. Vermeer, Maschineller Tunnelbau - Möglichkeiten und Zukunftsperspektiven, Symposium HfT Stuttgart, 19.10.2007
-
- [8] Dissertation "Verfahrens- und Komponentenentwicklung zur Planung von Tunnelthermie®-Anlagen", A. Oberhauser, TU Wien, Juni 2006
-
- [9] Präsentation "Effizienzsteigerung durch Nutzung der Bodenspeicherung", D. Adam, Ringvorlesung Ökologie TU Wien, 03.05.2007
-
- [10] "Stand der Technik Absorberkonzepte", GEOWATT AG, 23.09.2009
-
- [11] Präsentation "Nutzung des geothermischen Potenzials im Eisenbahntunnel Jenbach", J. N. Franzius, N. Pralle, Zentrale Technik Züblin, 6.11.2009
-
- [12] "Energiegewinnung aus städtischen Tunneln", M. Rausch, IUT Fachveranstaltung Geothermische Bohrtechnik, 20.10.2009
-
- [13] "Innovative Systeme der Erdwärmenutzung - regenerative Energie aus dem Untergrund", R. Markiewicz, Veröffentlichung der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie
-
- [14] „Nachhaltige Nutzung von Erdwärme mittels innovativer Systeme im Ingenieurtiefbau und Tunnelbau“, D. Adam, R. Markiewicz, A. Oberhauser, Bautechnik und Naturgefahren
-
- [15] „Stadt-Bezirk - Mobilität und Energieversorgung - Neue Synergiepotenziale am Beispiel geothermisch nutzbarer urbaner Tunnel“, N. Pralle, J.N. Franzius, D. Gottschalk, VDI-Bautechnik, Jahresausgabe 2009/2010
-
- [16] Dissertation "Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau", R. Markiewicz, TU Wien, November 2004
-
- [17] Forschungsauftrag FGU 2008/006 auf Antrag der Fachgruppe Untertagbau (FGU) „Energiegewinnung aus städtischen Tunneln, Systemevaluation“, Oktober 2010

Normen

-
- [18] SIA 197 2004 - Projektierung Tunnel Grundlagen
-
- [19] SIA 197/2 2004 - Projektierung Tunnel Strassentunnel
-
- [20] SIA 198 2004 - Untertagbau Ausführung
-
- [21] SIA 384/6 2010 - Erdwärmesonden

Fachhandbuch des ASTRA

-
- [22] ASTRA 12001 „Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen“, Bundesamt für Strassen ASTRA, 2005.
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 05.07.2016

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU 2012/005_ENG
 Projekttitel: Energiegewinnung aus städtischen Tunneln - Pilotversuch
 Enddatum: 05.07.2016

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Forschungsprojekt FGU 2008/006 „Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation“ wurden die grundsätzliche Umsetzbarkeit, der Energieertrag und die Wirtschaftlichkeit von geothermischer Wärme-/Kältegewinnung aus innerstädtischen Strassentunneln in der Schweiz untersucht. Um die zentralen Fragestellungen zur Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit von innerstädtischen geothermischen Tunnelabsorbersystemen sowie zur Eignung der angewandten Planungsinstrumente zu beantworten, wurde im vorliegenden Forschungsprojekt FGU 2012/005_ENG ein Pilotversuch im Versuchsstollen Hagerbach durchgeführt.

Bei Versuchsfeld 1 wurde der Absorber vor der Tunnelabdichtung, resp. an der Innenseite, und bei Versuchsfeld 2 hinter der Abdichtung, resp. an der Aussenseite installiert. Versuchsfeld 2 wurde zudem mit einem Bewässerungssystem ausgestattet, das eine Bewässerung des Bereichs zwischen Tunnelwand und Abdichtung zulässt, so dass die Lage eines Tunnels in einem stehenden Grundwasserleiter simuliert werden konnte. An die beiden Absorbersysteme wurde eine Wärmepumpe angeschlossen um eine Nutzung durch einen Wärmeentzug simulieren zu können. Die Versuchsfelder wurden mit total 48 Temperaturmesssonden bestückt, die an ein Messdatenerfassungssystem angeschlossen wurden. Aus den drei Versuchen, die zwischen 39 und 76 Tage dauerten, ergaben sich folgende Resultate:

Die spezifische Normwärmeleistung der Tunnelabsorber dieses Einbautyps beträgt für ein typisches saisonales Heizlastprofil in der Schweiz bei einer initialen Fels-, resp. Tunneltemperatur von 14 – 15 °C durchschnittlich 25 W/m². Dies entspricht einem spezifischen Jahreswärmeentzug von ca. 47 kWh/(m² Jahr). Die spezifische Normwärmeleistung zeigte sich relativ unabhängig vom Vorhandensein einer Abdichtungsfolie. Ebenso war der Effekt einer Bewässerung der Absorberschicht (stehendes Wasser) nur geringfügig. Dieser geringe Effekt in Bezug auf die Einbautypen der Absorbermodule sowie die Beobachtung, dass die Fluidtemperatur nach ca. 100 - 300 Stunden jeweils einen relativ konstanten Wert erreichte, deutet auf einen signifikanten bis dominierenden Einfluss der konstanten Tunnellufttemperatur hin. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei allen drei Versuchsfeldern ca. 60 % der Absorberwärme ab der ca. 300. Betriebsstunde aus der Tunnelluft stammt. Durch den sehr hohen Einfluss der Tunneltemperatur kann davon ausgegangen werden, dass die Leistung des Absorbers verhältnismässig wenig empfindlich auf eine Erhöhung der Volllaststunden der Nutzung reagiert. Damit eignet sich der Absorber im Vergleich zu einer Erdwärmesonde besser für eine Bandlastnutzung. Durch die hohe Zahl an Temperaturmessfühlern zeigte sich, dass die markanteste Leistungssteigerung durch eine Reduktion des thermischen Widerstands der Rohrleitungen erreicht werden könnte. Eine materialtechnische Verbesserung des Absorbersystems bis zu einem Wert von 50 W/m² scheint möglich, was einer Verdoppelung gegenüber dem im Pilotversuch angewendeten System entspricht.

Die spezifischen Investitionskosten eines flächenhaften Tunnelabsorbersystems, wie es im Pilotversuch angewendet wurde, liegen zwischen ca. CHF 10.-/Watt und CHF 16.-/Watt, resp. zwischen CHF 5.-/(kWh Jahr) und CHF 8.-/(kWh Jahr) bei einem typischen saisonalen Heizlastprofil. Dieser Wert ist etwa 2- bis 3-mal so hoch wie bei einer Erdwärmesondenanlage. Ist hingegen ein Wärmeabnehmer mit einem Bandlastbedarf vorhanden und kann der thermische Widerstand der Rohrleitungen signifikant verkleinert werden, so nähern sich die Investitionen pro kWh derjenigen einer Erdwärmesondenanlage an. Für die Berechnung der Amortisationskosten kann davon ausgegangen werden, dass die Tunnelabsorberanlage eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahre aufweist. Unterhaltskosten sind vernachlässigbar. Tunnelabsorbersysteme sind teurer als Erdwärmesondenanlagen, und können daher – vergleichbar mit anderen energetisch genutzten Baustrukturen wie Energiepfähle – in Gebieten sinnvoll sein, wo Erdwärmesonden nicht zulässig sind.

Aus den Messwerten wurde die sogenannte Absorberfunktion für das verwendete Produkt der Tunnelabsorber ermittelt. Auf Grundlage dieser Absorberfunktion können zukünftig korrekte Berechnungen für beliebige Nutzungsszenarien eines Wärme- oder auch Kälteentzugs vorgenommen werden. Mit der Forschungsarbeit wurden demnach auf Messwerten abgestützte Berechnungsgrundlagen für die Auslegung von Tunnelabsorber geschaffen.

In bautechnischer Hinsicht hat sich das Produkt der Tunnelabsorber bewährt. Ein schneller, unkomplizierter Einbau der Elemente und eine gute Integration in den Bauablauf beim klassischen Tunnelbau ist möglich.

Maximal könnten in Schweizer Strassen- und Eisenbahntunneln Tunnelabsorbersysteme auf einer Länge von ca. 41'000 Tunnelmetern beidseitig eingebaut werden. Dies lässt eine Wärmeproduktion von ca. 15 GWh/Jahr zu. Das energetische Potenzial von Tunnelabsorbersystemen ist also begrenzt und kann die geothermische Energienutzung in der Schweiz schätzungsweise um 0.6 – 0.7 % steigern.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die definierten Ziele wurden erreicht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Mit dem Pilotversuch konnte gezeigt werden, dass die Planung, der Bau und Betrieb einer Tunnelabsorberanlage in einem zweischaligen Strassentunnel ohne grosse Schwierigkeiten umsetzbar ist. Mit Hilfe der Messanlage konnte die Entzugsleistung ermittelt und so die spezifische Absorberfunktion bestimmt werden. Die Grundlagen zur Projektierung von Absorbersystemen wurden geschaffen. Damit steht nun ein Planungsinstrument zur Verfügung, mit dem eine grössere Planungssicherheit und somit Kostengenauigkeit erzielt werden kann.

Tunnelabsorbersysteme sind teurer als Erdwärmesondensysteme, und können daher – vergleichbar mit anderen energetisch genutzten Baustrukturen wie Energiepfähle – in Gebieten sinnvoll sein, wo Erdwärmesonden nicht zulässig sind.

Verbesserungspotenzial besteht in der Material- und Konstruktionstechnik des Tunnelabsorbersystems, um die thermischen Widerstände zu minimieren und damit die Leistung der Anlage etwa zu verdoppeln. Hierzu sind Forschungsarbeiten im Bereich der Material- und Konstruktionstechnik nötig. Damit würden die Investitionskosten für ein Tunnelabsorbersystem in den Bereich einer Erdwärmesondenanlage gelangen.

Publikationen:

Schlussbericht

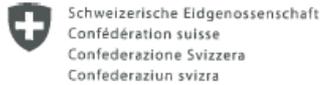
Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Zingsheim

Vorname: Wencke

Amt, Firma, Institut: Amberg Engineering AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Mit einem Pilotversuch konnte erfolgreich das Potenzial und die Grenzen der Energiegewinnung aus städtischen Tunneln aufgezeigt werden. Das entwickelte Produkt der Tunnelabsorber hat sich in bautechnischer Hinsicht bewährt und könnte grundsätzlich in Tunnels eingebaut werden. Der Grossversuch hat einen vertieften Einblick in das physikalische Verhalten der entwickelten geothermischen Tunnelabsorbersystemen gegeben und dies mit und ohne Vorhandensein von Bergwasser. Die spezifische Normwärmeleistung der Tunnelabsorber konnte mit dem Grossversuch ermittelt werden. Obwohl ein sorgfältig entworfenes und optimiertes Absorbersystem getestet wurde, sind die spezifischen Investitionskosten eines flächenhaften Tunnelabsorbersystems etwa 2- bis 3-mal so hoch wie bei einer Erdwärmesondenanlage. Die spezifische Normwärmeleistung von etwa 25 W/m² könnte durch Minimierung der thermischen Widerstände etwa verdoppelt werden. Dadurch kämen die spezifischen Investitionskosten des Tunnelabsorbersystems in die Nähe derjenigen von Erdwärmesonden. Der sehr gut formulierte Schlussbericht ist klar strukturiert und ausgezeichnet illustriert. Der Schlussbericht ist ein wertvolles Grundlagendokument für allfällige weitere Entwicklungen.

Umsetzung:

Da es sich um einen Pilotversuch handelt wurde die Umsetzung klar demonstriert.

weitergehender Forschungsbedarf:

Wegen den zurzeit ungünstigen Voraussetzungen im Strommarkt (resp. Wärmepreis) besteht vorerst kein weitergehender Forschungsbedarf.
Bei günstigeren Rahmenbedingungen wäre neben dem Forschungsbedarf zur Reduktion der Wärmegestehungskosten allenfalls auch weiterführende Anwendungen in Tunnelbauwerken (Sanierungsfall & Neubau eines Tunnels) bzgl. ihrer technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit als P+D-Projekt zu prüfen.

Einfluss auf Normenwerk:

NA

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Schleiss

Vorname: Anton

Amt, Firma, Institut: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL); Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH)

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (Dienstleistungen → Forschung im Strassenwesen → Downloads → Formulare) heruntergeladen werden.