



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation

**Energy extraction from urban tunnels,
evaluation of systems**

**Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains;
évaluation de systèmes**

Amberg Engineering AG
Werner Bruderer
Meike Rausch
Wencke Kühn

Geowatt AG
Thomas Mégel
Roland Wagner
Ernst Rohner

VersuchsStollen Hagerbach AG
Erik Iglesias
Volker Wetzig

**Forschungsauftrag FGU 2008/006 auf Antrag der
Fachgruppe Untertagebau (FGU)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten 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 l' (les) auteur(s) mandaté(s) par 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)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

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

The content of this report engages only the author(s) commissioned 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)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation

**Energy extraction from urban tunnels,
evaluation of systems**

**Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains;
évaluation de systèmes**

Amberg Engineering AG
Werner Bruderer
Meike Rausch
Wencke Kühn

Geowatt AG
Thomas Mégel
Roland Wagner
Ernst Rohner

VersuchsStollen Hagerbach AG
Erik Iglesias
Volker Wetzig

**Forschungsauftrag FGU 2008/006 auf Antrag der
Fachgruppe Untertagebau (FGU)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Meike Rausch

Mitglieder

Thomas Mégel

Erik Iglesias

Begleitkommission

Präsident

Prof. Dr. Georg Anagnostou

Mitglieder

Martin Bosshard

Walter Steiner

Dr. Rudolf Minder

Antragsteller

Fachgruppe für Untertagbau (FGU)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> herunter geladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Seite

	Impressum	4
	Zusammenfassung	6
	Résumé	7
	Summary	8
1	Einleitung	9
1.1	Ausgangslage.....	9
1.2	Ziel des Berichtes.....	10
1.3	Abgrenzung.....	10
2	Stand der Technik	11
2.1	Energiegewinnung aus Tunneln	11
2.1.1	Allgemeines.....	11
2.1.2	Betriebsarten	11
2.2	Testprojekte.....	13
2.2.1	Allgemeines.....	13
2.2.2	Tunnel Jenbach, Unterinntal, Österreich	13
2.2.3	U2/2-Taborstrasse, U-Bahnlinie U2, Wien, Österreich	14
2.2.4	Lainzer Tunnel, Wien, Österreich.....	14
2.2.5	U6 - Stadtbahnanschluss Fasanenhof, Stuttgart, Deutschland	15
2.3	Bestehende Absorbertechnologien	15
2.3.1	Allgemeines.....	15
2.3.2	Flächenkollektoren	16
2.3.3	Energieanker	23
2.3.4	Energietübbinge	26
2.3.5	Energiebodenplatten	29
2.4	Konzeptstudien	30
2.5	Leistungskennzahlen	31
3	Systemevaluation	33
3.1	Fragestellungen zur Systemevaluation	33
3.2	Absorberkonzepte	34
3.2.1	Darstellung typischer Tunnelquerschnitte	34
3.2.2	Einsatzorte	40
3.2.3	Konstruktive Details	42
3.2.4	Vor- und Nachteile der Absorbersysteme aus konstruktiver und baumethodischer Sicht	48
3.3	Thermische Anforderungen.....	49
3.3.1	Definition von möglichen Wärme-/Kälteentzugsprofilen	49
3.3.2	Beispiel Nutzungsart 1 (reiner Wärmeentzug)	51
3.3.3	Beispiel Nutzungsart 2 (Wärme- und Kälteentzug).....	53
3.3.4	Nachhaltigkeit und Einflussradius	53
3.3.5	Modelle der Kollektorsysteme	55
3.3.6	Hydraulik des Energieankersystems.....	58
3.3.7	Untergrundparameter, Wärmeträgerfluid	58
3.3.8	Thermische Leistung eines Energieankersystems	59
3.3.9	Thermische Leistung von Flächenkollektorsystemen	61
3.3.10	Zusammenfassung Absorberleistungen	63
3.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	64
3.5	Systemwahl zur Empfehlung für die Umsetzung	66
4	Pilotprojekt	67
4.1	Zielsetzungen	67
4.2	Konzeptdefinition.....	67
4.2.1	Versuchsdesign.....	67
4.2.2	Entwurf möglicher Standorte im VersuchsStollen Hagerbach	70
4.2.3	Entwurf der Mess- und Regeltechnik	73
4.2.4	Kostenschätzung.....	74
	Abkürzungen	77
	Literaturverzeichnis	78
	Projektabschluss	79
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	81

Zusammenfassung

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 Bereich der Gebäudeheizungen. Eine Alternative zum Wärmelieferanten Heizöl stellt die Nutzung von Erdwärme dar. Im städtischen Bereich, wo der notwendige Platz für die Bohrungen von Erdwärmesonden knapp ist, bieten sich städtische Tunnel für die Wärmegewinnung an. Ein Vorteil ist die Nähe zu den Energieverbrauchern.

In diesem Forschungsvorhaben werden insbesondere Strassentunnel und andere innerstädtische Tunnel auf die Anwendung von Absorbersystemen geprüft. Dabei werden der derzeitige Stand der Technik im Bereich der Nutzung von geothermischer Energie sowie die bisherigen Forschungs- und Testergebnisse von anderen Projekten, wie z.B. Lainzer Tunnel, Stadtbahn Stuttgart usw. beschrieben.

Im Rahmen der Systemevaluation wird anhand von typischen Tunnelquerschnitten die grundsätzliche Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Absorberelemente wie Energieanker oder Flächenkollektoren in den Tunnelwänden oder in vorgefertigten Betonbauteilen untersucht. Dabei werden sowohl geothermische, konstruktive, baumethodische als auch wirtschaftliche Abklärungen durchgeführt. Es werden zuerst mögliche Einbauarten und -orte untersucht und aufgelistet. Des Weiteren werden bereits vorhandene Forschungsergebnisse herangezogen und auf eine Übertragbarkeit auf innerstädtische Tunnel untersucht. Die Randbedingungen für Strassentunnel sowie ihre unterschiedliche Konstruktion (verschiedene Möglichkeiten des Einbaus von Elementen usw.) werden untersucht.

In Modellberechnungen werden für ein Energieankersystem und ein System aus Flächenkollektoren in den Tunnelwänden verschiedene Nutzungsarten (reiner Wärmeerzeugung, Wärme- und Kälteentzug) simuliert und die thermischen Leistungen der Systeme ermittelt. Verschiedene Einflussfaktoren wie z.B. Anzahl und Abstand der Anker sowie Grösse und Form des Tunnelprofils werden dabei variiert. Es wird gezeigt, dass der Einfluss einer isolierenden Schicht (z.B. Abdichtungsfolie) zwischen dem Absorbersystem und dem Tunnelinnenraum auf die Absorberleistungen bedeutend ist. Die ermittelten Absorberleistungen für die verschiedenen Systeme sind in einer Tabelle zusammengestellt.

Im Rahmen der Systemevaluation konnte gezeigt werden, dass eine Gewinnung von Wärme und/oder Kälte aus schweizerischen Tunnels gegenüber anderen geothermischen Systemen grundsätzlich umsetzbar und wirtschaftlich konkurrenzfähig ist.

Um die zentralen Fragestellungen an praxisnahen Tests evaluieren zu können, wird ein Pilotprojekt geplant. Im Fokus der Untersuchungen des Pilotsystems stehen Flächenkollektoren, da sich diese in bisherigen Untersuchungen bewährt haben und sie in die Praxis umsetzbar sind. Es sollen sowohl geothermische Einflussfaktoren (z.B. thermischer Widerstand des Hinterfüllmaterials und der Absorberleitungen, Isolierung durch Abdichtung etc.) als auch baupraktische Details (z.B. Befestigung der Absorberleitungen auf der Abdichtung) untersucht werden. Das Versuchskonzept sieht vor, drei Testfelder auszurüsten und über ein Jahr hinweg zu beobachten. In den Testfeldern 1 und 2 wird ein zweischaliger Ausbau mit Abdichtung hergestellt, wobei in einem Fall die Absorberleitungen vor der Abdichtung und im anderen Fall hinter der Abdichtung platziert werden. Für Testfeld 3 ist ein einschaliger Spritzbetonausbau geplant.

Abschliessend werden die Gesamtkosten für die Umsetzung des Pilotversuches abgeschätzt.

Résumé

La Suisse s'est fixée l'objectif de réduire son taux d'émission de CO₂ jusqu'en 2020 par 20% en comparaison de l'année 1990. À ce sujet, le secteur du chauffage d'immeubles, dans lequel l'exploitation d'énergie géothermique comme fournisseur de chaleur est une bonne alternative par rapport au mazout, présente un grand potentiel d'économies et d'amélioration. Dans la zone intra-urbaine, où l'espace nécessaire pour les sondes géothermiques est limité, les tunnels urbains s'imposent comme bonne source de chaleur, un avantage desquels est aussi leur proximité aux consommateurs d'énergie.

Dans le présent projet de recherche, notamment des tunnels routiers et autres tunnels intra-urbains seront examinés sur un emploi de systèmes absorbants. Dans ce contexte, l'état de l'art dans le secteur de l'exploitation d'énergie géothermique ainsi que les résultats des cas étudiés dans d'autres projets (p.ex. le Tunnel de Lainz, les Chemins de Fer Urbains de Stuttgart etc.) sont présentés.

Dans le cadre d'une évaluation de systèmes, la faisabilité générale et la rentabilité de différents éléments absorbeurs, comme des ancrs d'énergie ou des collecteurs horizontaux installés dans les parois de tunnel ou dans des éléments préfabriqués, sont analysées en se fondant sur des sections transversales typiques. À cette occasion, des analyses seront effectuées concernant non seulement la géothermie, la construction et les méthodes de construction mais aussi la rentabilité. Dans une première phase, des différents modes et lieux d'installation sont étudiés et résumés dans une liste. De plus, les résultats existants d'autres projets de recherche sont considérés et analysés pour déterminer leur applicabilité aux tunnels intra-urbains. De plus, les contraintes pour les tunnels routiers ainsi que leurs différents modes de construction (différentes possibilités d'installation des composantes etc.) sont examinés.

Dans des calculs modèles, les différents modes d'exploitation (extraction pure de chaleur, extraction de chaleur et froideur) sont simulés et les capacités thermiques des systèmes sont déterminées. Dans ce contexte, des différents paramètres, comme p.ex. le nombre et la distance des ancrs ainsi que la largeur et la forme des profils de tunnel sont variés. Il sera démontré que l'influence sur la capacité d'absorption de la couche isolante (p.ex. membrane d'étanchéité) entre le système absorbeur et l'intérieur du tunnel est considérable. Les capacités d'absorption calculées pour les différents systèmes sont résumées dans un tableau.

Dans le cadre de l'évaluation des systèmes, l'extraction de chaleur et/ou froideur issues des tunnels suisses s'est confirmée comme possibilité réalisable et économiquement compétitive à l'égard d'autres systèmes géothermiques.

Pour évaluer les questions centrales à ce sujet dans une investigation axée sur la pratique, un projet-pilote est prévu. Les collecteurs horizontaux seront au centre d'attention de l'investigation de ce système-pilote, comme ils se sont distingués dans les travaux effectués jusqu'à présent et comme ils sont bien utilisables en pratique. Des facteurs d'influence géothermiques (p.ex. la résistance thermique du matériau de remblai et des conduites d'absorption, l'isolation par étanchéification) ainsi que des détails de construction (p.ex. la fixation des conduites d'absorption au-dessus de la membrane d'étanchéité) sont à analyser. Le concept d'essais prévoit la préparation de trois champs d'essai ainsi qu'une observation desquels pendant la durée d'un an. Dans les champs d'essai 1 et 2, un soutènement à double coque avec membrane d'étanchéité sera installé, au cadre desquels les conduites d'absorption seront positionnées devant cette membrane dans un cas et derrière la même dans l'autre. Pour le champ d'essai 3, un soutènement monocoque avec du béton projeté est envisagé.

En conclusion, le coût total pour la réalisation de cette étude pilote sera estimé.

Summary

The Swiss have set themselves the goal for 2020 to reduce their CO₂-emission rate by 20% in comparison to 1990. As to this, a high saving and improvement potential is seen in the field of building heating, in which the use of geothermal energy is representing an eligible alternative to the heat supplier fuel oil. In urban areas, where the space needed for the drilling of geothermal probes is limited, urban tunnels do offer a great opportunity for heat recovery, not least due to the advantage of their close proximity to the energy user.

The present research project shall examine the employment of different absorber elements in predominantly road but also other intra-urban tunnels. In this context, the current state of the art in the area of geothermal energy exploitation as well as the existing research and test results of other projects (e.g. Lainzer Tunnel, Stuttgart Light Rail System etc.) will be summarized.

In line with a system evaluation, the general applicability and efficiency of different absorber elements, such as energy anchors or horizontal collectors inside the tunnel walls or in pre-fabricated concrete structures, are analyzed on the basis of typical tunnel cross-sections. In doing so, the important aspects, not only concerning geothermal energy, construction and construction method but also economic efficiency, are going to be assessed. In a first step, possible installation modes and places will be analyzed and summarized in a list. Furthermore, already existing research results are consulted and examined for their applicability on intra-urban tunnels, with regard to the boundary conditions for road tunnels as well as their varying construction methods (different installation possibilities for the components etc.).

By means of model calculations, different modes of use (pure heat extraction, extraction of heating and cooling energy) are simulated for the cases of an energy anchorage system and a system of horizontal collectors inside tunnel walls, whereby the thermal capacities of the systems are determined. Different parameters, such as e.g. number and distance of the anchors as well as size and form of the tunnel profile, are going to be varied in this process. It shall be shown that the insulating layer (e.g. waterproofing membrane) in-between the absorber system and the tunnel interior has a considerable influence upon the absorption rates. The absorption rates identified for the different systems are going to be listed in a table.

In relation to this system evaluation, it could be shown that the extraction of heating and/or cooling energy from Swiss tunnels is a principally viable solution, which is also economically competitive with other geothermal systems.

For a practical approach to the central issues of this study, a pilot project is planned to be executed. Horizontal collectors will be in the main focus of this pilot system investigation, as they have proven of value in previous research and are viable in practice. Both geothermal influence factors (e.g. thermal resistance of the backfill material and the absorber pipes, insulation by waterproofing etc.) and constructional details (e.g. fixation of the absorber pipes upon the waterproofing membrane) shall be examined. The experimental layout envisages the observation of three test areas over a period of one year. Test areas 1 and 2 are going to be equipped with a double-shell lining and a waterproofing membrane, while the absorber pipes will be placed in front of this membrane in one case and behind it in the other. For test area 3, a single-shell shotcrete lining is planned.

In conclusion, the total cost for the implementation of this pilot experiment will be estimated.

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 haben sich auch für Grossüberbauungen als Standardtechnik durchgesetzt. Neben Erdwärmesonden, die ausschliesslich für die Wärme- und Kältegewinnung aus Tiefen bis 400 m erstellt werden, kann auch eine zusätzlich energetische Nutzung von erdberührten, bautechnisch notwendigen Bauteilen wie Schlitzwände oder Bohrpfähle sinnvoll sein. So wurden in Schlitzwänden von U-Bahnstationen Absorberleitungen eingelegt und die Stationen damit gewärmt oder gekühlt (U-Bahnlinie Wien U2).

Im städtischen Bereich, vor allem bei energetischen Gebäudesanierungen, ist der notwendige Platz für die Bohrungen von Erdwärmesonden knapp. Als alternatives unterirdisches Wärmetauschersystem könnten sich auch städtische Tunnel und die damit aufgeschlossenen Felsquerschnitte für die Wärmeabgabe anbieten. Tunnel weisen eine grosse Oberfläche auf, die mit speziellen Absorbertechnologien zur Wärmeabgabe herangezogen werden könnten. Ein Vorteil von städtischen Tunneln ist die Nähe zu den Energieverbrauchern. Tiefliegende Tunnel wie zum Beispiel der Gotthard-Basistunnel haben zwar ein viel höheres geothermisches Potenzial (Festtemperatur rund 40°C), es sind aber selten geeignete Wärmeabnehmer in naher Umgebung der Portale vorhanden. Bisher werden sechs Tunnel in der Schweiz geothermisch genutzt. Von den Tunneln Gotthard-Strassentunnel, Furka, Mappo-Moretina, Hauenstein und Ricken wird das Tunnelwasser und am Grossen St. Bernhard die Tunnelabwärme genutzt.

Erste Pilotprojekte für einen Energieanker und ein Energievlies in Österreich haben ermutigende Resultate gezeigt. Anwendungen von Absorbertechnologien wie Energieanker oder Flächenkollektoren in der Innenschale wurden bisher noch nicht angewendet. Ein grosses Potenzial kann aber vermutet werden, wenn eine wirtschaftliche, konstruktive und baumethodisch anwendbare Lösung gefunden werden kann.

In der Schweiz werden in den nächsten Jahren viele städtische Tunnel, Umfahrungstunnel sowie Sicherheitsstollen für bestehende Tunnel geplant, gebaut oder saniert. Damit bietet sich ein grosses Energiepotenzial an, welches es zu nutzen gilt.

Die bisherigen Forschungsarbeiten beziehen sich auf Bahntunnel. Strassentunnel und andere innerstädtische Tunnel wurden auf die Anwendung von Absorbersystemen bisher nicht geprüft. Der Schluss dieser Lücke soll mit dem vorliegenden Projekt angegangen werden. Dabei werden die bisherigen Forschungsergebnisse auf eine Übertragbarkeit auf innerstädtische Tunnel untersucht sowie innovative Lösungen für diese evaluiert.

1.2 Ziel des Berichtes

Ziel des Forschungsprojektes ist es aufzuzeigen, ob die Gewinnung von Wärme und/oder Kälte aus schweizerischen, innerstädtischen Strassentunnels umsetzbar ist. Dafür sollen verschiedene Absorbersysteme wie Anker oder Flächenkollektoren in den Tunnelwänden oder in vorgefertigten Betonbauteilen auf ihre Anwendbarkeit im Tunnelbau geprüft werden. Es werden sowohl geothermische, konstruktive, baumethodische als auch wirtschaftliche Abklärungen durchgeführt.

Die Untersuchungen werden für Normalprofile von innerstädtischen, oberflächennahen Strassentunneln vorgenommen, da eine durchführbare, energetische Nutzung aufgrund der Nähe der Abnehmer wahrscheinlicher ist als bei tiefliegenden Tunnel.

Zeigt das Forschungsprojekt die grundsätzliche Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit von geothermischer Wärme-/Kältegewinnung aus Tunneln auf, wird auch ein Pilotversuch geplant, um die zentralen Fragestellungen an praxisnahen Tests evaluieren zu können.

1.3 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.

2 Stand der Technik

2.1 Energiegewinnung aus Tunneln

2.1.1 Allgemeines

Das Erdreich wird bei der oberflächennahen Geothermie grundsätzlich auf zweierlei Arten zur thermischen Bewirtschaftung genutzt. Bei einer Nutzung des Untergrundes als reine Wärme- oder auch Kältequelle zum Heizen oder Kühlen wird das unterirdische Absorbersystem so ausgelegt, dass sich der Untergrund selber ausreichend thermisch regenerieren kann. Bei einem saisonalen Thermospeicher wird das unterirdische Absorbersystem zusammen mit dessen Nutzung so dimensioniert, dass darin eine optimale saisonale Speicherung der Wärme und Kälte gewährleistet wird.

Insbesondere durchlässige und durchströmte Bodenschichten eignen sich für die Energieentnahme, während eher feinkörnige Böden mit geringer Wasserdurchlässigkeit und gleichzeitig hoher Wassersättigung eher für Speicherzwecke geeignet sind.

Die nachfolgenden Kapitel umfassen eine Zusammenstellung des derzeitigen Standes der Technik und zitieren in Teilen die Quellen [1] bis [7].

2.1.2 Betriebsarten

Bei der Nutzung einer geothermischen Anlage ist zu unterscheiden zwischen der Betriebsart „Heizen“, die dem Untergrund die gespeicherte Wärmeenergie entzieht und diese für eine Nutzung zur Verfügung stellt und der Betriebsart „Kühlen“, bei der die Wärme aus Bauwerken beziehungsweise Bauteilen abgeführt und in den Untergrund eingetragen wird. Dabei sind grundsätzlich folgende Versorgungskonzepte möglich:

- Heizen mit einer Wärmepumpe
- Heizen ohne Wärmepumpe
- Kühlen mit einer Kältemaschine
- Kühlen ohne Kältemaschine
- Kombinierte Heiz- und Kühlanwendungen mit oder ohne Wärmepumpe/Kältemaschine

In Tunnelbauwerken kann Erdwärme über die Tunnelschale, Tunnelsohle und Tunnelanker genutzt werden. 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 350 m liegt. Längere Tunnels können in geothermische Teilstrecken unterteilt werden. Über Schachtbauwerke, Flucht- oder Querstollen kann die gewonnene Wärmeenergie aus dem Tunnel über eine Wärmepumpe zum Verbraucher geleitet werden.

Die Absorberleitungen sind in den Betonbauteilen verlegte Schläuche, die von einem thermoaktiven Trägermittel (Absorberfluid) durchflossen werden. Es können zwei Arten des Absorberfluids zur Anwendung kommen:

- Wasser
- Wasser-Frostschutz-Gemisch

2.1.2.1 Heizen

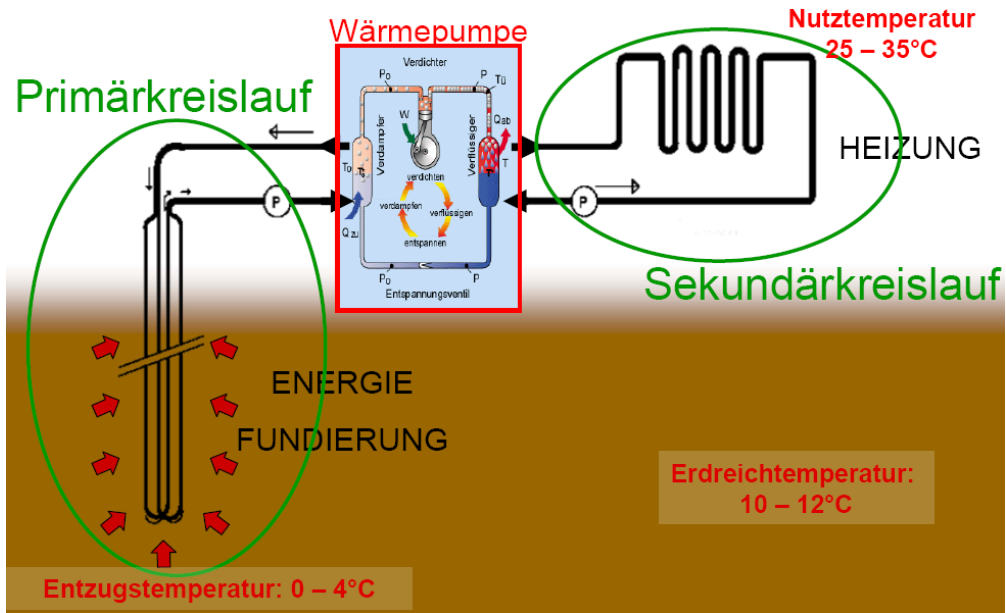


Abb. 2.1 Betriebskonzept Heizen [9]

Bei einer Anlage mit Wärmepumpe wird zunächst die Erdwärme dem Untergrund entzogen. Dies geschieht im Primärkreislauf, in dem ein Kältemittel (Absorberfluid) mit vergleichsweise geringer Vorlauftemperatur in Absorberleitungen durch den Untergrund gepumpt wird. Die Absorberleitungen ermöglichen die Erwärmung des Kältemittels bis auf die Temperatur des anstehenden Untergrundes. In der Wärmepumpe wird dem Kältemittel die aufgenommene Energie entzogen und das Kältemittel gelangt wieder mit der Vorlauftemperatur in den Primärkreislauf. Durch die Zugabe von Fremdenergie wird die gewonnene Erdwärme in der Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gehoben und gelangt mit einer Temperatur von etwa 35°C bis 45°C in den Sekundärkreislauf. Dort kann sie vom Verbraucher zum Heizen oder zur Warmwasserbereitung genutzt werden.

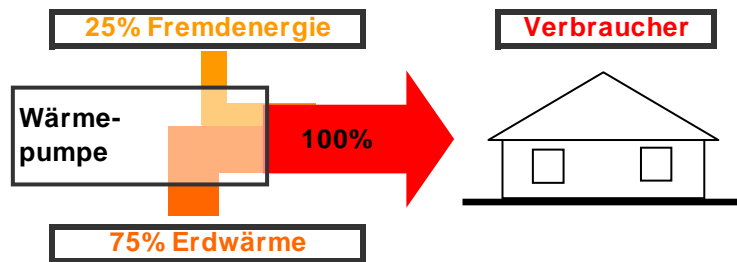


Abb. 2.2 Energiegewinnung durch Erdwärme, durchschnittlicher thermischer Wirkungsgrad

Bei Anlagen ohne Wärmepumpe wird die gewonnene Erdwärme direkt zum Verbraucher gefördert. Ausser der für die Umwälzpumpe benötigten Antriebsenergie ist in diesem Fall keine zusätzliche Fremdenergie aufzuwenden. Bedingt durch das vergleichsweise niedrige erzielbare Temperaturniveau ist der Einsatz der Erdwärme hier nur für niederthermale Zwecke, zum Beispiel für die Eisfreiheit von Bauteilen, Strassen und Plätzen möglich.

2.1.2.2 Kühlen

Bei einer Nutzung für das Kühlen wird - wie vorgängig bereits erwähnt - Wärme von Bauteilen oder Räumen in den Untergrund abgegeben. Dies erfolgt entweder direkt ohne Kältemaschine oder bei Zwischenschaltung einer Kältemaschine in verstärktem Mass. Das Prinzip entspricht dem Betriebskonzept „Heizen“, nur in umgekehrter Richtung; d.h., es wird ein Wärmemittel mit vergleichsweise hoher Temperatur durch den Untergrund gepumpt. In den Absorberleitungen kühlt das Wärmemittel bis minimal auf die anstehende Temperatur des Untergrundes ab. Vom Verbraucher kann die Energie zum Kühlen von Räumen und Bauteilen genutzt werden.

2.1.2.3 Saisonaler Thermospeicher

Es ist möglich, die vorstehend beschriebenen Betriebskonzepte „Heizen“ und „Kühlen“ in einer geothermischen Anlage, einem saisonalen Thermospeicher, zu kombinieren. In diesem Fall wird im Winter die Erdwärme für das Heizen genutzt. Im Sommer, wenn sich infolge der Sonneneinstrahlung Bauwerke und Bauteile stark aufheizen, können diese durch die Ableitung der Wärme in den Untergrund gekühlt werden. Dieses Betriebskonzept weist den Vorteil auf, dass der Temperaturhaushalt des Untergrundes im Jahresmittel nahezu ausgeglichen ist. Durch eine umschaltbare Kältemaschine/Wärmepumpe können die Investitionskosten gering gehalten werden.

2.2 Testprojekte

2.2.1 Allgemeines

Verschiedene Systeme zur Energiegewinnung aus Tunneln wurden oder werden derzeit an Pilotprojekten getestet.

Die Pilotprojekte wurden im Rahmen von realen Tunnelbauprojekten realisiert. Nachfolgend werden diese Tunnelbauprojekte hinsichtlich ihrer Lage, Geologie und anderer Randbedingungen beschrieben. In Kap. 2.3 werden die ausgeführten Pilotversuche inklusive der angewendeten Absorbertechnologien erläutert.

2.2.2 Tunnel Jenbach, Unterinntal, Österreich

Auf der Bahnstrecke München - Verona wird derzeit innerhalb des Ausschreibungsloses H8 „Hauptbaumassnahmen Jenbach“ ein zweigleisiger Eisenbahntunnel (Tunnelinnendurchmesser ca. 12 m) neu gebaut. Der Neubaustreckentunnel im Los H8 setzt im Wiesinger Tiergarten den von Osten kommenden Tunnel des angrenzenden Bauloses H3-6 nach Westen fort und verläuft entlang des Bahnhofs Jenbach in einer Tiefe von rund 15 m. Nach Unterquerung der Inntalautobahn befindet sich die Tunnelröhre zwischen der Autobahn A12 und dem Inn. Der Tunnel unterfährt schliesslich nochmals die Autobahn und taucht zur Verknüpfungsstelle Stans auf.

Der Tunnel liegt in Grundwasser führenden Sand- und Kieslagen.

Zur Herstellung des rund 3'470 m langen Tunnels Jenbach/Wiesing kam eine Tunnelvortriebsmaschine mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust mit einem Durchmesser von ca. 13 m zum Einsatz (Ausbruchquerschnitt Schildtunnel: ca. 133 m²). Der Lockermaterialvortrieb befindet sich durchgehend im Grundwasser. An der östlichen Baulosgrenze wurden „Mixed-Face-Conditions“ (Kombination aus Fels und Lockermaterial) angetroffen.

Mindestens 50 cm starke Tübbinge wurden für den Ausbau des Tunnels verwendet, ergänzend wurde eine rund 20 cm dicke Brandschutzschale aus Ortbeton aufgebracht. Die Tübbinge sind zur Nutzung der Geothermie als Energietübbinge ausgerüstet.

Die Bauarbeiten im Los H8 begannen im Sommer 2006 und enden im Dezember 2010. Derzeit laufen die Arbeiten zum Herstellen der Brandschutzschale.

2.2.3 U2/2-Taborstrasse, U-Bahnlinie U2, Wien, Österreich

Die Wiener U-Bahnlinie U2 ist um einen 9 km langen Neubau verlängert worden. Die neue U-Bahn-Trasse im Bereich der vier Stationen U211 bis U214 verläuft durchgehend unter dem Strassenniveau bis zu einer Tiefe von 21 m unter der Oberfläche. Die Station „U2/2-Taborstrasse“ besteht im Wesentlichen aus den zwei Schachtbauwerken Taborstrasse und Novaragasse sowie den beiden Stationsröhren, die durch einen Querschlag miteinander verbunden sind. An die beiden Stationsröhren schliessen jeweils die Streckenröhren zur nächsten Station an. Während die Strecken- und Stationsröhren in bergmännischer Bauweise hergestellt werden, kommt bei den Schachtbauwerken eine offene Schlitzwandbauweise zur Anwendung.

Die gesamte Linie und im Besonderen die Station Taborstrasse mit ihren Stationsröhren liegen zur Gänze im Grundwasserbegleitstrom der Donau im Quartär sowie in Grundwasser führenden Sanden des Tertiärs.

Die Bauarbeiten an der Station wurden Anfang 2008 beendet.

Im Schachtbauwerk wurden zur Energienutzung Energiebodenplatten und Energieschlitzwände eingesetzt. In Teilen der Stationsröhren wurden Energievliese getestet.

2.2.4 Lainzer Tunnel, Wien, Österreich

Der Lainzer Tunnel ist Bestandteil des europäischen Eisenbahn-Hochleistungsstreckennetzes, das die zukünftig zu erwartenden steigenden Verkehrsströme einer erweiterten Europäischen Union aufnehmen soll. Er dient der Verbindung zwischen der bestehenden Westbahn und dem Westbahnausbau (Neubaustrecke Wien - St. Pölten) mit der Südbahn, dem geplanten Zentralbahnhof Wien beim Südbahnhof und der nach Osten führenden Donauländebahn. Eine wesentliche Rolle des Lainzer Tunnels spielt vor allem die direkte Verknüpfung der Güterströme. Das Gesamtprojekt, dessen Auftraggeber die Eisenbahn-Hochleistungs-Aktiengesellschaft (HL-AG) bzw. die Schieneninfrastrukturgesellschaft (SCHIG) sind, teilt sich in mehrere Abschnitte, wobei vor allem die Baulose LT22 und LT24 für die gegenständliche Arbeit von Bedeutung sind.

Das Gesamtprojekt Lainzer Tunnel besteht im Wesentlichen aus folgenden vier Teilbereichen:

- Verbindungstunnel: Dieser ca. 6.6 km lange Teilbereich stellt die eigentliche Verbindung der Westbahn mit der Süd- bzw. Donauländebahn dar.
- Einbindung Südbahn: Dieser ca. 1.5 km lange Teilbereich beinhaltet die niveaufreie Einbindung der Gleise des Lainzer Tunnels in die Südbahnstrecke zwischen dem Bahnhof Meidling und der Haltestelle Hetzendorf. Damit verbunden ist die Verbesserung der Einfahrtsituation des von Süden kommenden Schnellbahnverkehrs nach Meidling.
- Anbindung Donauländebahn: Dieser ca. 2.2 km lange Teilbereich beinhaltet die Verbindung des Lainzer Tunnels mit der Donauländebahn und damit die Strecke zum Zentralverschiebebahnhof Kledering.
- Verknüpfung Westbahn: Dieser Teilbereich verknüpft die beiden bestehenden Fernverkehrsgleise der Westbahn mit der projektierten Hochleistungs-Neubaustrecke zwischen dem Bahnhof Meidling und dem Hauptbahnhof St. Pölten.

Die in diesem Bericht beschriebene geothermische Versuchsanlage ist im Baulos LT22 situiert, weshalb dieses im Folgenden kurz beschrieben wird:

Das Baulos „LT22 Bierhäuselberg“, das als Verzweigungsbauwerk zwischen Verbindungstunnel und der Stammstrecke der Westbahn dient, umfasst neben einer offenen Bauweise auch einen bergmännischen Vortrieb. In einem ausgewählten Abschnitt des bergmännischen Vortriebes ist eine Versuchsanlage zur Erprobung des so genannten „Energievlieses“ realisiert worden, das im Kapitel 2.3.2.1 ausführlicher dokumentiert ist.

Die Gesamtlänge der vorgetriebenen Streckenröhren umfasst beim Baulos LT22 insgesamt 1.7 km, wobei diese die Form eines stehenden Ovals mit einer Ausbruchfläche von etwa 77 m² haben. Die maximale Firstüberlagerung liegt zwischen 7 und 12 m, mit Ausnahme der Unterquerung des Bierhäuselberges. Für die Innenschalenherstellung ist der Querschnitt in Sohle und Gewölbe geteilt worden. Der im Zuge der Vortriebsarbeiten hergestellte Rohrschirm hat eine sägezahnartige Profilierung im Bereich der Firste hinterlassen. Aufgrund der hohen Ebenflächigkeitsanforderungen sind diese Zwickel mit einem eigenen Schalwagen (Zwickelschalwagen) aufgefüllt worden. Im Anschluss daran ist die wasserdichte Innenschale hergestellt worden. Als Trennlage zwischen der schalreinen Aussenschale und der Innenschale ist ein kaschiertes Vlies aufgebracht worden. Die Abdichtung erfolgt durch den zweilagig bewehrten, wasserdichten Innenschalenbeton.

Am 22. Mai 2009 wurde der Durchschlag gefeiert. Die Inbetriebnahme der Gesamtstrecke wird voraussichtlich 2012 erfolgen.

2.2.5 U6 - Stadtbahnanschluss Fasanenhof, Stuttgart, Deutschland

Im Rahmen des Bauprojektes der Stuttgarter Strassenbahnen AG wurde im Zuge des Baus des 26. Streckenabschnitts der Stadtbahn Stuttgart in einem bergmännisch erstellten Tunnel der Linie U6 eine Geothermie-Teststrecke eingerichtet. Die Neubaustrecke U6 verbindet den Stadtteil Möhringen mit dem Gewerbegebiet am Schelmenwasen. Der Tunnel hat eine Länge von ca. 380 m. Er wird durch die Haltestellen Europaplatz und Eichwiesenring begrenzt. Das Gesamtbauvorhaben ist rund 2.8 km lang, verfügt über vier Haltestellen sowie einen weiteren in offener Bauweise hergestellten Tunnel von 640 m Länge.

Ab der Haltestelle „Europaplatz“ (etwa 9 m unter der Geländeoberkante) beginnt der in bergmännischer Bauweise ausgeführte Tunnel, der unter dem Gebäude Fasanenhofstrasse 17 (etwa 8 m unter Gründungssohle), der Bundesstrasse B 27 und dem Gebäude Eichwiesenring 2 hindurch bis zur nächsten Haltestelle „Eichwiesenring“ führt. Die minimale Überdeckung von ca. 6 m ist bei der Unterfahrung des Gebäudes Eichwiesenring vorhanden.

Der Tunnel wurde in Spritzbetonbauweise hergestellt. Die anstehenden Sandsteine verschiedener Festigkeiten wurden im Baggervortrieb mit Lockerungssprengungen durchfahren. Zunächst wurde die Kalotte in einer Höhe von rund 5 m ausgehoben und jeweils nach 0.8 bis 1.4 m mit Spritzbeton gesichert. Unterhalb des Hochhauses erfolgte der Vortrieb mit Hilfe eines Rohrschirms. Der zweigleisige Tunnel besitzt einen Ausbruchquerschnitt von ca. 90 m².

Es wurden zwei 10 m lange Betonierabschnitte der Innenschale mit einem Absorbiersystem ausgestattet. Die in den beiden Energieblöcken gewonnene Energie wird verwendet um die Klimatisierung des Betriebsraumes in der Haltestelle Europaplatz zu unterstützen.

Die ersten vorbereitenden Baumassnahmen wurden 2007 durchgeführt; der Baubeginn für die Strecke erfolgte im Januar 2008. Die Inbetriebnahme ist für Dezember 2010 geplant.

2.3 Bestehende Absorbertechnologien

2.3.1 Allgemeines

Die bisher bestehenden Absorbertechnologien lassen sich nach der Art der Wärmeenergieaufnahme einteilen in:

- Flächenkollektoren: Energievlies, Energietübbing, Energiebodenplatte
- Nicht flächige Kollektoren: Energieanker

Nachfolgend werden flächige Absorberelemente allgemein Flächenkollektoren genannt. Der Begriff Energievlies wird dort verwendet, wo Absorberleitungen auf ein Trägervlies aufgebracht werden. Energietübbinge, die ebenfalls zur Gruppe der Flächenkollektoren zählen, werden explizit als Energietübbinge bezeichnet.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die verschiedenen Technologien dargestellt und ihre Anwendung in Pilotprojekten beschrieben.

2.3.2 Flächenkollektoren

Die ersten Überlegungen hinsichtlich einer Entwicklung von Flächenkollektoren erfolgten schon 2002. Es hat sich ein System durchgesetzt, bei welchem die Absorberleitungen in einem Schutz- und Drainagevlies integriert sind (Energievlies). Dies entspricht einem bereits in der Massivabsorbertechnik erprobten System, bei dem ein geschlossener Kreislauf zur Energieextraktion vorliegt.

Die im Vlies angeordneten Absorberleitungen können in Tunnelbauwerken in der Tunnelsohle sowie mit Montagehilfen um den gesamten Tunnelquerschnitt im Gewölbe verlegt werden.

In den Absorberleitungen befindet sich die Absorberflüssigkeit, welche aus dem umliegenden Erdreich Energie entzieht und diese anschliessend über eine Sammelleitung, z.B. im Paramentbereich, zur Wärmepumpe weiterleitet.

Werden die Absorberleitungen in Energievliesbahnen angeordnet, hat dies den Vorteil, dass einzelne, in sich abgeschlossene Energievliesbahnen im Schadensfall vom übrigen Kreislauf abgekoppelt und repariert werden können. Die Absorberleitungen können in Serien- oder Parallelschaltung verlegt werden. Rohrleitungen sollen möglichst kurz gehalten werden um Druckverluste zu minimieren. Die Strömungsgeschwindigkeit sowie Pumpleistung ist bei Serienschaltung höher als bei Parallelschaltung. Allerdings kann eine Parallelschaltung zu höheren Material- und Einbauaufwendungen führen.

Die vorgefertigten Vliese sollten eine Breite von ca. 2.50 m (übliche Vliesbahnbreite) aufweisen. Die Längsränder müssen ausreichend Platz zur Befestigung und für eine ausreichende Überlappung der benachbarten Vliesbahnen bieten.

Das Verlegen von Vliesen im Tunnelbau ist derzeit bereits Stand der Technik, so dass das Montieren des Energievlieses an der Tunnelaussenschale unproblematisch ist. Werden die Sammelleitungen im Tunnelinneren geführt, so ist jedoch besonderes Augenmerk auf die Durchführung der Leitungen (Anbindeleitung) vom Hauptsammler durch die Innenschale zu den Absorberleitungen des Energievlieses zu legen. Dieses Durchführungsdetail variiert je nach Aufbau des Tunnelbauwerks und richtet sich primär nach der Art der Wasserabdichtung.

Die Entlüftung von Rohranlagen sollte stets am Punkt des niedrigsten Drucks und der höchsten Temperatur (entspricht dem Hochpunkt herkömmlicher Heizungsanlagen) erfolgen, da an diesem Punkt das Wasser am wenigsten Luft in Lösung halten kann. Bei dem geschlossenen Rohrsystem des Energievlieses ist eine Entlüftung am Hochpunkt nicht möglich. Eine Möglichkeit zur Entlüftung des Rohrstranges ist das „Durchschliessen“ der Absorberflüssigkeit. Dabei wird die Flüssigkeit an einem Rohrleitungsende mit hohem Druck und mit hoher Geschwindigkeit eingebracht und fliesst am anderen Ende drucklos aus.

Der Einsatz von Energievliesen bei der zweischaligen Bauweise verursacht keinen erheblichen Mehraufwand, da eine Geotextilschicht zwischen beiden Schalenteilen zur statischen Trennung ohnehin erforderlich ist (gem. ZTV-ING).

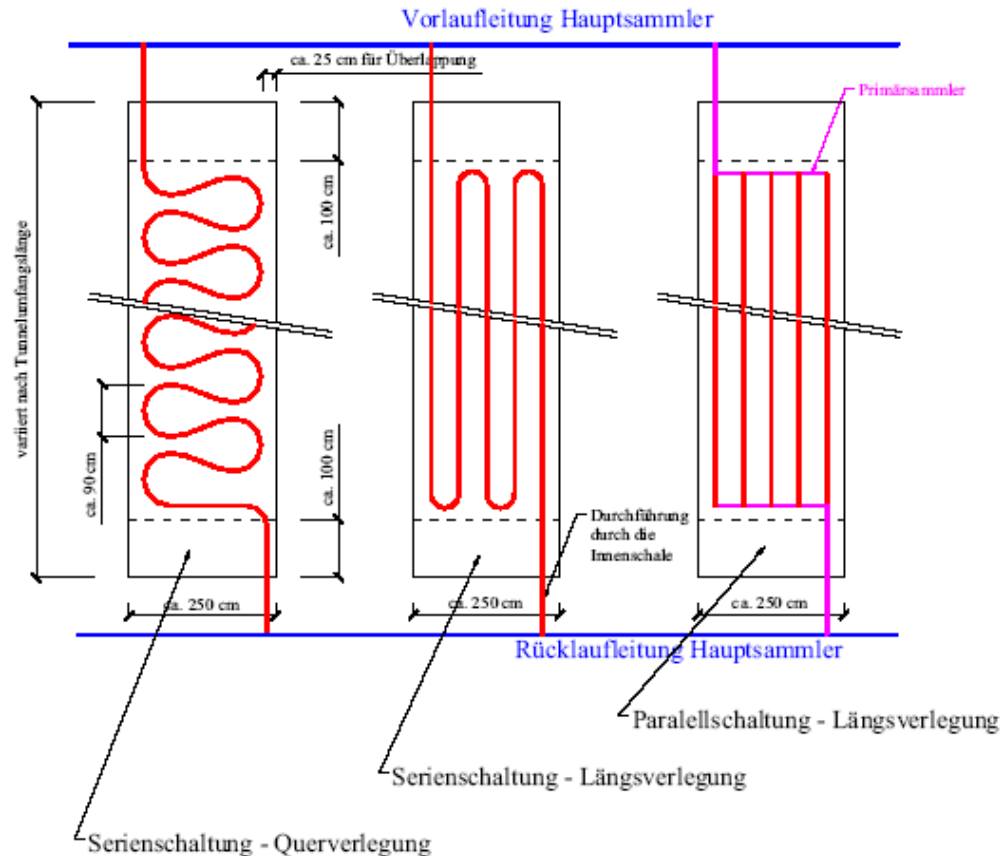


Abb. 2.3 Varianten für die Rohrverlegung am Energievlies [16]

2.3.2.1 Testanlage Lainzer Tunnel

Im Baulos LT22 Bierhäuselberg des Lainzer Tunnels ist eine Testanlage mit einem Prototypen eines Energievlieses ausgestattet worden. Das Energievlies wurde zwischen der Innen- und Aussenschale eingebaut. Dies ist die erste Anwendung in der Spritzbetonbauweise.

Für den Anschluss des Energievlieses müssen einzelne Rohrleitungen durch die Innenschale geführt werden. Dafür werden die Anschlussleitungen (Vor- und Rücklaufleitungen) aller Energievliesbahnen eines Abschnittes miteinander verbunden, so dass die Anzahl der benötigten Durchführungen durch die Innenschale minimiert wird. Bei der Versuchsanlage sind somit insgesamt vier Durchführungen notwendig: für beide Abschnitte jeweils eine Durchführung für die Vorlauf- und eine für die Rücklaufleitung.

Diese Leitungen (Sammelleitungen) sind an eine im Tunnelinneren situierte Wärmepumpe angeschlossen, womit der Kreislauf zwischen Energieentzug und Energieeintrag geschlossen wird. Dadurch sind bis auf eine Stromzuleitung zur Wärmepumpe keine weiteren Leitungsführungen zur bzw. von der Versuchsanlage erforderlich. Mittels Messinstrumenten wird eine ausführliche Datendokumentation während des Betriebes gewährleistet.

Zwischen zwei Lagen Vlies werden die Absorberleitungen schlängelförmig verlegt. Bei den verwendeten Vliesen handelt es sich um herkömmliche Schutz- u. Drainagevlies (Typ: Polyfelt TS65, mechanisch verfestigtes Endlosfaservlies; Flächengewicht: 285g/m²). Zur Fixierung der Absorberleitungen wird das „luftseitige“ Vlies als „Deckschicht“ über die Absorberleitungen gelegt und mit dem „bergseitigen“ Vlies verklebt. Dies bietet ausserdem den Vorteil, dass das Vlies die Rohrleitungen bei dem Betonvorgang der Innenschale vor Beschädigungen schützt.

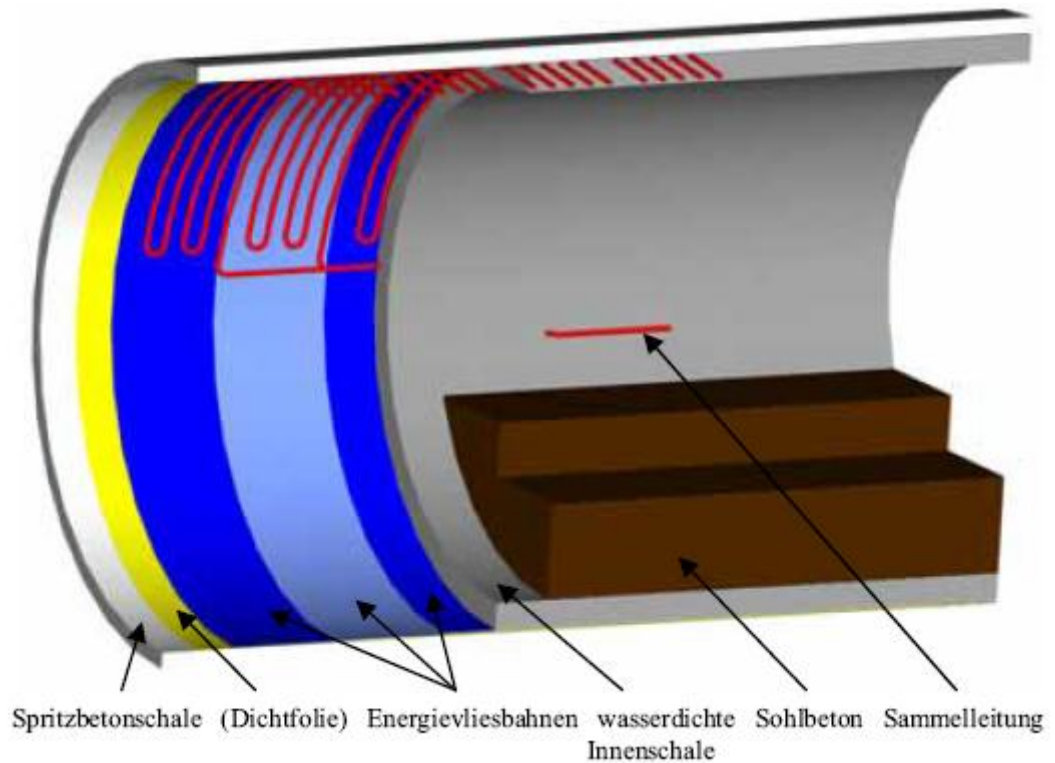


Abb. 2.4 Aufbau Innengewölbe mit Absorberleitungen, Lainzer Tunnel [16]

Die Testanlage besteht aus acht Energievliesbahnen, wobei vier Bahnen zum Energieentzug aus dem Erdreich und vier Bahnen zum Energieeintrag in das Erdreich herangezogen werden. Damit kann sowohl die Verwendung des Energievlieses für Heizzwecke als auch für Kühlzwecke untersucht werden. Die Versuchsanlage lässt sich somit in zwei Abschnitte teilen, wobei die Kopplung der beiden Abschnitte durch eine Wärmepumpe erfolgt. Damit sind zwei Blöcke mit Energievliesbahnen ausgerüstet, wobei zwischen Energieentzug und Energieeintrag ein Abstand von einer Blocklänge (10 m) gelassen wird, um einen thermischen Kurzschluss zu unterbinden.



Abb. 2.5 Energievlies im Tunnelgewölbe, Lainzer Tunnel [16]

Vor Inbetriebnahme wurden die Absorberleitungen auf Dichtigkeit bzw. Schäden an den Absorberkreisen mittels Druckprüfungen geprüft. Es wurde ein Prüfdruck von 7 bar über einen Zeitraum von einer Stunde gehalten. Anschliessend ist ein Prüfdruck von 2 bar im System aufrechterhalten worden. Nach erfolgreicher Druckprüfung wurden die Leitungen gespült und entlüftet und mit der Absorberflüssigkeit befüllt.

Mit Hilfe zugeführter Fremdenergie im Wärmepumpenprozess konnte je nach Leistungszahl der Wärmepumpe die je Bauteil entziehbare Wärmeleistung um 30 - 40% erhöht werden.

2.3.2.2 Teststrecke Stuttgart-Fasanenhof

Im Rahmen des Forschungsvorhabens GeoTU6 wurden zwei 10 m lange Betonierabschnitte der Innenschale im Bereich des 26. Streckenabschnitts der Stadtbahn Stuttgart mit einem Absorbersystem ausgestattet. Die in den beiden Energieblöcken gewonnene Energie wird verwendet um die Klimatisierung des Betriebsraumes in der Haltestelle Europaplatz zu unterstützen.

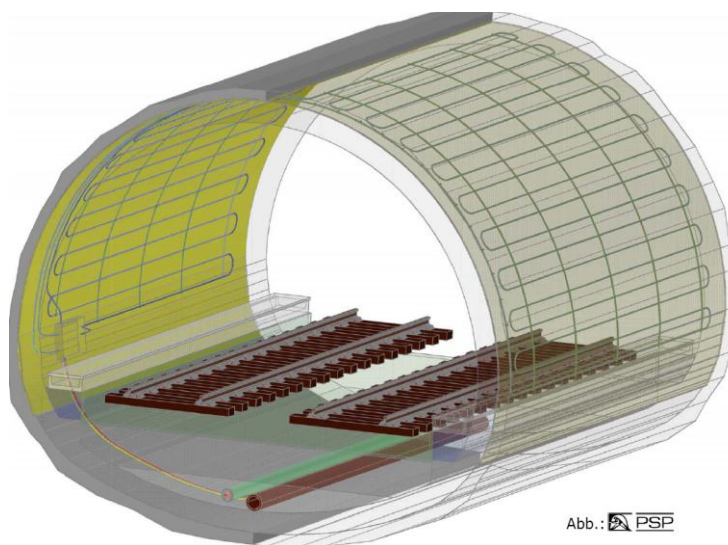


Abb.: PSP

Abb. 2.7 Energievlies im Tunnelgewölbe, Stadtbahn Stuttgart [2]

Bei den beiden 10 m langen Energieblöcken wurden ca. 440 m Absorberleitung, aufgetrennt in zwei Teilkreisläufe, im Gewölbereich zwischen Spritzbetonaussen- und Ortbetoninnenschale eingebaut. Pro Tunnelblock beträgt die mit Absorbern ausgestattete Fläche ca. 180 m².

Bei dieser Teststrecke erfolgte eine flexible Vormontage der Einzelbestandteile auf der Baustelle.

Die Absorberleitungen bestehen aus hochdruckvernetzten PE-Rohren PE-XA der Dimension 25 x 2.3 mm. Mit diesen Rohren sind Biegeradien von bis zu 20 cm möglich. Die Leitungen wurden mit Hilfe von Fixierschienen im Abstand von 1.5 m auf einer Trennlage (Geotextil) des Herstellers Polyfelt montiert.

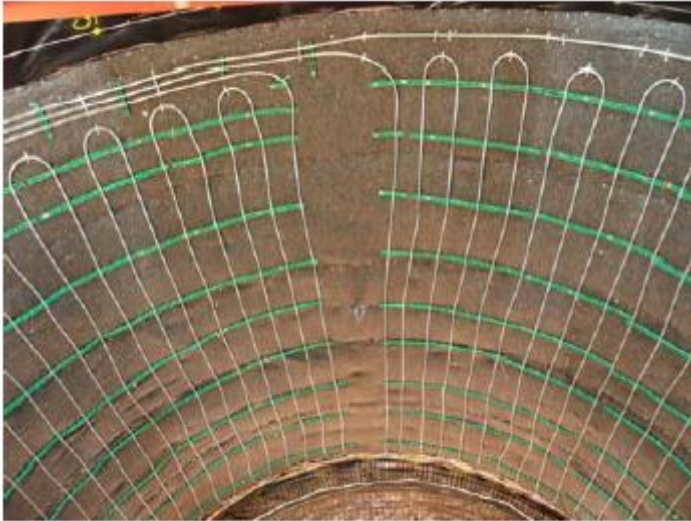


Abb. 2.8 In zwei Teilkreisläufen montierte Absorberleitungen, Ansicht First [2]

Gegenüber dem Lainzer Tunnel, bei dem eine Serienschaltung der Absorberleitungen gewählt wurde, konnte durch Wahl einer Parallelschaltung eine hydraulische Optimierung erzielt werden. Die Auftrennung in zwei Teilkreisläufe bewirkt einen geringeren Aufwand für die Umwälzpumpe und vereinfacht die Entlüftung des Absorbersystems infolge der Vermeidung zahlreicher Hochpunkte. Es konnte im Vergleich zum System Lainzer Tunnel auf die luftseitige Lage Vlies verzichtet werden. Dies ermöglicht einen direkten thermischen Kontakt der Absorberleitungen mit dem Beton.

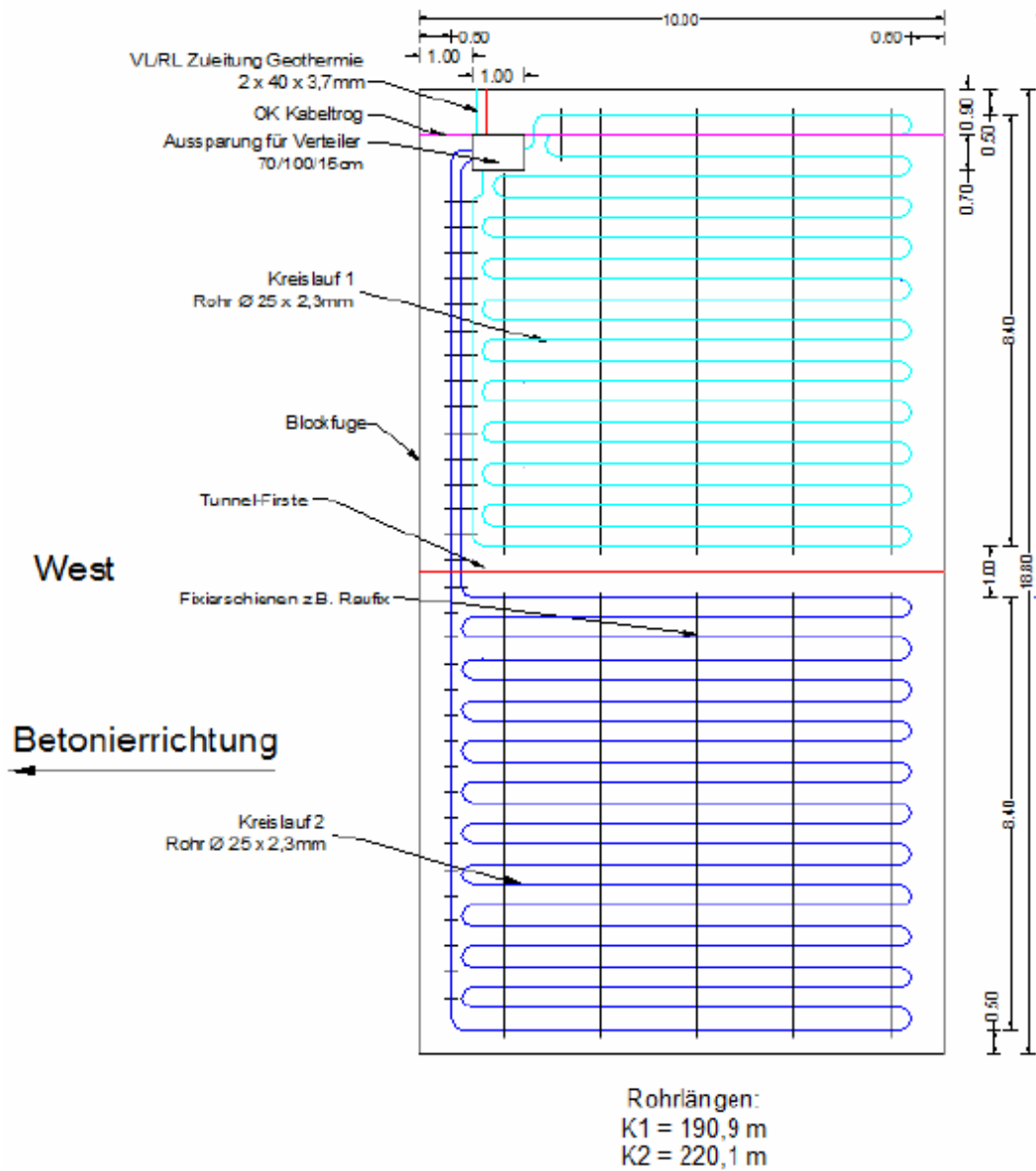


Abb. 2.9 Verlegeschema Teststrecke Stuttgart - Fasanenhof [2]

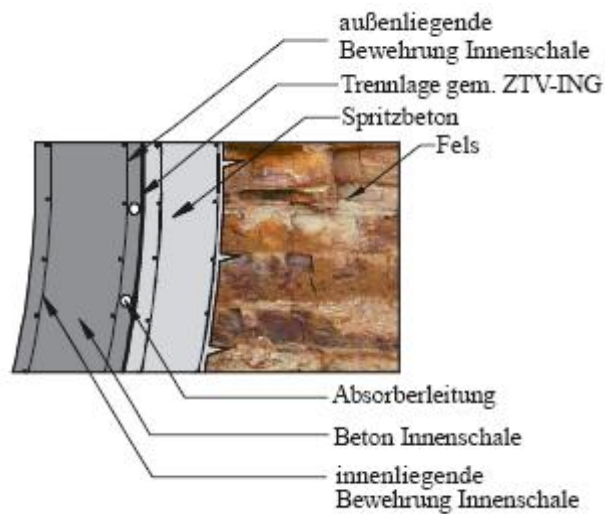


Abb. 2.10 Lage Energievlies beim zweischaligen Ausbau ohne Abdichtungsfolie [2]

Die Vor- und Rücklaufleitungen der beiden Teilkreisläufe sind in einer grossen Verteiler-aussparung (B x L x H = 70 x 100 x 15 cm) in der Gewölbeschale mit Hilfe der Schiebehülstechnik der Firma Rehau AG + Co zusammengeschlossen. Von hier erfolgt durch eine Zuleitung im Innenschalbeton der Anschluss an die auf der Tunnelsohle verlaufende Hauptleitung (DN 100). Die Hauptleitung bindet an die Wärmepumpe an, die sich in einem rund 30 m vor der Durchschlagswand liegenden Betriebsraum in der Haltestelle Europaplatz befindet. Der Abstand zwischen den beiden Energieblöcken beträgt 80 m und resultiert aus der Absicht, den Untersuchungen unterschiedliche geologische Verhältnisse zugrunde zu legen. Der Abstand der Energieblöcke zum Betriebsraum mit Wärmepumpe beträgt 90 bzw. 180 m.

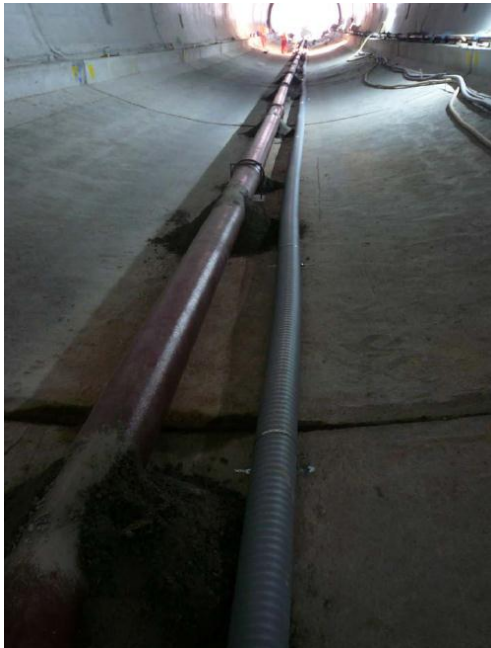


Abb. 2.11 Hauptleitung in der Tunnelsohle, Stadtbahn Stuttgart [2]

2.3.3 Energieanker

Der Einsatz von Energieankern bietet den Vorteil, dass ein grösseres Baugrundvolumen zum Wärmeaustausch herangezogen werden kann.

Für den prinzipiellen Aufbau eines Energieankers gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines einfachen HDPE-Rohres und der Ankerausenhülle als Rückleitung. Hierbei wird das Wärmeträgermedium durch das Kunststoffrohr eingepresst und fliesst danach im Anker selbst, unter Voraussetzung der Dichtigkeit des Ankers, zurück. Ein Problem stellt die geforderte Dichtigkeit des Ankers dar, welche bei diesem System erst nach Einbau des Ankers auf der Baustelle geprüft werden kann.

In Zusammenarbeit mit der Atlas Copco MAI GmbH wurde ein Energieanker auf Basis eines Selbstbohrankers entwickelt und im Rahmen des Projektes Lainzer Tunnel getestet.

Der Atlas Copco MAI SDA® (Self Drilling Hollow Core Anchor) weist ideale Eigenschaften für die Verwendung als Energieanker auf. Er besteht aus einem verlorenen Bohrkopf, miteinander verschraubbaren Ankerstangen und einer Ankerkupplung, in welche die Stangen eingeschraubt werden. Der Aussendurchmesser der Ankerstangen beträgt je nach Modell 25 - 76 mm, der Innendurchmesser 14 - 51 mm. Der Innendurchmesser bleibt auf der gesamten Ankerlänge derselbe, es kommt zu keiner Querschnittsverengung an den Kupplungsstellen. Ankerstangen gibt es in Längen von 2 bzw. 3 m, wodurch durch Verschrauben eine Gesamtlänge von bis zu 12 m wirtschaftlich erreicht werden kann. Grössere Abmessungen sind jedoch ebenfalls möglich.

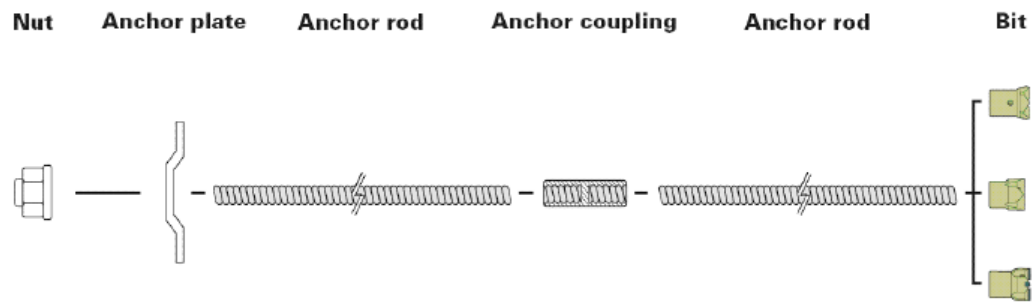


Abb. 2.12 Systematischer Aufbau des MAI-Ankers [8]

Die Dichtigkeit des Ankers kann, nach dessen Fertigstellung als Energieanker, durch Einpressen von Wasser oder Druckluft überprüft werden. Dabei darf über einen längeren Zeitraum hinweg (~ 24 h) kein Druckabfall entstehen. Hat der Anker sich als dicht erwiesen, kann ein offenes HDPE-Rohr eingeführt werden. Die Verwendung eines handelsüblichen Produktes hilft, die Kosten für die Konstruktion gering zu halten.

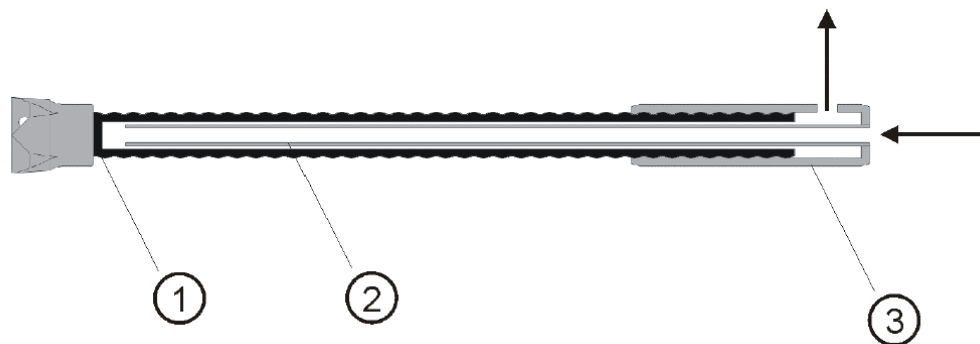


Abb. 2.13 Schematischer Aufbau eines Energieankers mit HDPE-Rohr [8]

Abb. 2.13 zeigt schematisch den Aufbau eines Energieankers am Beispiel des R32N (Patent Atlas Copco MAI GmbH, A2032/2005):

- (1) Ankerstab mit dauerhafter Abdichtung hinter der Bohrkronen.
- (2) Eingeführter, am bergseitigen Ende offener Kunststoffschlauch.
- (3) Anschlussstück zur Verbindung der Anker untereinander und zum Einleiten der Flüssigkeit. Die Pfeile signalisieren die Richtung der Durchströmung.



Abb. 2.14 Schematischer Aufbau eines Energieankers mit Koaxialsonde [8]

Abb. 2.14 zeigt schematisch den Aufbau einer alternativen Ausführungsform eines Energieankers am Beispiel des R51L (Patent Atlas Copco MAI GmbH, A2032/2005). Es wird eine geschlossene Koaxialsonde, die bereits vorher auf Dichtigkeit geprüft wurde, in den Anker eingeschoben. Die Pfeile signalisieren die Richtung der Durchströmung.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Innendurchmesser der Energieanker.

Ankertyp	R32N	R51L
Innendurchmesser [mm]	18.5	36

Abb. 2.15 Durchmesser Energieanker [8]

2.3.3.1 Lainzer Tunnel LT31 Klimtgasse, Wien, Österreich

Mit dem Einsatz von Energieankern wurden bisher kaum Praxiserfahrungen gemacht. Eine Testanlage mit Prototypen wurde im Baulos LT31 Klimtgasse des Lainzer Tunnels ausgeführt. Die Testanlage befindet sich allerdings in einer Böschung.

Für die Testanlage wurden zwei verschiedene Ankertypen ausgewählt, der R32N und der R51L. Es wurden 20 Stück eines jeden Ankertyps eingebaut. Auf diese Weise konnten die zwei verschiedenen Systeme (Koaxialsonde, HDPE-Rohr) getestet werden, welche beide bereits vor Beginn der Arbeiten durch Atlas Copco MAI GmbH zum Patent angemeldet wurden. Aufgrund des für die Baustelleneinrichtung benötigten Lagerplatzes für die Tunnelbaustelle mussten die bereits eingebauten und funktionsfähigen Energieanker vom Typ R32N jedoch wieder entfernt werden. Lediglich ein Anker dieses Typs konnte verbleiben und in den Testbetrieb gehen.

Die insgesamt 21 Anker wurden ähnlich einem „Igel“ aufgefächert eingebohrt, der unterste Anker senkrecht nach unten, die darauf folgenden mit einer Neigung von 60° bzw. 30° abwärts. Der oberste Anker wurde horizontal eingebohrt. Zwischen den Ankerreihen wurden Abstände von 2 m bzw. 4 m eingehalten um die gegenseitige Beeinflussung der Anker im Betrieb testen zu können. Zusätzlich wurden zwei Stück 12 m lange Anker in den Boden gebohrt und zwar in der Mitte beider Ankerfelder mit einer Neigung von 45° abwärts. In beide Bohrungen wurden in einer Tiefe von 6 bzw. 12 m Temperatursensoren versetzt, um die Bodentemperaturen als Referenzwert messen zu können bzw. die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kältefront im Boden erfassen zu können.



Abb. 2.16 Testanlage mit Energieankern in einer Böschungssicherung (Lainzerberg Tunnel, LT31 Klimtgasse, Wien) [9]

2.3.4 Energietübbinge

Beim maschinellen Tunnelvortrieb werden als Ausbruchsicherung Tübbinge eingebaut. Die Tübbinge können als Energietübbinge ausgebildet werden.

Der Energietübbing wurde in Kooperation der Firmen Ed. Züblin AG (Zentrale Technik) und Rehau AG + Co entwickelt.

Für die Herstellung der Energietübbinge werden die gleichen Bewehrungskörbe und Schalungssätze verwendet wie für gewöhnliche Tübbinge. Damit ist gewährleistet, dass sich die Herstellung in die Standardproduktion integrieren lässt.

Bei der fabrikmässigen Vorfertigung der Stahlbetontübbinge werden Absorberleitungen an der oberen (äusseren) oder unteren (inneren) Bewehrungslage befestigt. Die Befestigung an der äusseren, also bergseitigen Bewehrungslage bietet sich z.B. bei einer geothermischen Nutzung an, so wie die Befestigung an der inneren Bewehrung für die Extraktion tunnelthermischer Energie geeignet ist. Alternativ ist eine mittlere Lage denkbar. Die Absorberrohre werden in mäanderförmigen Schlaufen längs oder quer im Bewehrungskorb verlegt.

Die Absorberleitungen bestehen aus vernetztem Polyethylen (PE-X) mit einem Aussendurchmesser von 20 mm. Der mittlere Abstand zwischen den Absorbern liegt bei etwa 25 - 30 cm.

Die Enden der Absorberleitungen werden druckwasserdicht mit einer Aufnahmhülse verbunden, die im Bereich der beiden Ringfugen einbetoniert wird. Zwei benachbarte Ringe werden mit einem flüssigkeitsdruckhaltenden Verbindungselement miteinander verbunden. Über die Steckverbindung, die im Kern eine Rohrleitung hat, kann die Absorberflüssigkeit in den nächsten Ring gepumpt werden (siehe Abb. 2.17).

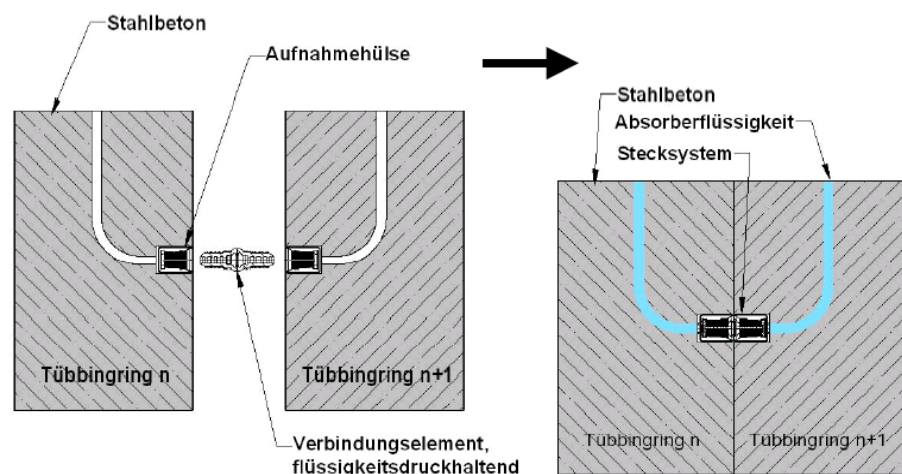


Abb. 2.17 Verbindung von zwei Energietübbingen [7]

Die Vor- und Rücklaufsammelleitungen können im Füllbeton unter dem Gleis, bzw. unter dem Strassenaufbau eingebaut werden.

Durch die statisch erforderliche Ringspaltverfüllung zwischen Tübbingring und dem als Energielieferant wirkenden Gebirge ist eine thermische Anbindung gewährleistet. Es ist eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit gefordert.

In Abhängigkeit der Ringgeometrie bzw. der Ringteilung und der Ringbaufolge werden mehrere Energietübbinge über Absorberleitungen miteinander verbunden (Absorberflüssigkeitszyklus). Zu Beginn der Absorberstrecke erfolgt eine Einspeisung des „Kalten“ Vorlaufmediums (Vorlauf). Am Ende der Absorberstrecke wird die in Abhängigkeit der Gebirgstemperatur um mehrere Kelvin erwärmte Absorberflüssigkeit herausgeführt und über

eine Sammelleitung (Rücklauf) einer Wärmepumpe zugeführt. Die Festlegung der Schlauchdurchmesser, der Biegeradien und des verwendeten Materials erfolgt in Abhängigkeit der energetischen Dimensionierung sowie der einzusetzenden Absorberflüssigkeit (siehe Abb. 2.18).

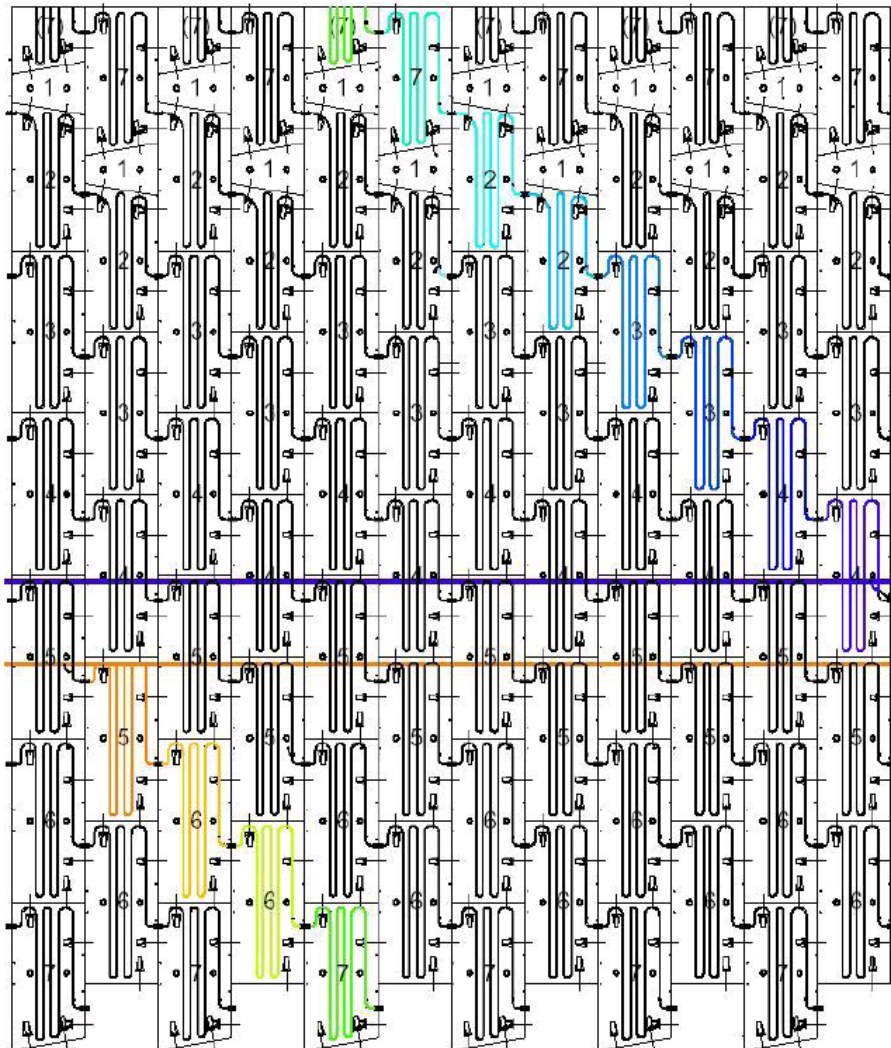


Abb. 2.18 Darstellung eines Absorberflüssigkeitszyklus Vorlauf-Rücklauf, im Bsp. ist eine Abwicklung über 11 Ringe dargestellt (konischer Uniring), Ringteilung 6+1. [7]

2.3.4.1 Beispiel Tunnel Jenbach (Unterinntal, Österreich)

Ein 54 m langer Teilabschnitt (27 Ringe) einer Tunnelröhre wurde mit von den Firmen Ed. Züblin AG und Rehau AG + Co entwickelten Energietübbingen ausgebaut. Die betreffende Strecke unterquert die Gemeinde Jenbach. Mehrere Energietübbinge sind zu einem Kreislauf verbunden. Die Absorberleitungen wurden über einen planmässigen Rettungsschacht an die Oberfläche geführt. Dort sind sie mit einer Wärmepumpe verbunden, die den Bauhof der Gemeinde Jenbach mit der gewonnenen Heizenergie versorgt. Die Geothermieanlage ist für die Grundlast der Heizanlage ausgelegt, Verbrauchsspitzen werden von einer gasbetriebenen Wärmepumpe geleistet.

Um einen möglichst effizienten Temperatureaustausch mit dem den Tunnel umgebenden Gebirge zu ermöglichen, wurden die Absorberrohre an der Aussenbewehrung des Tübbings befestigt. Um die Betondeckung nicht zu verringern, sind die Absorberrohre innen-seitig an der Bewehrung angebracht.

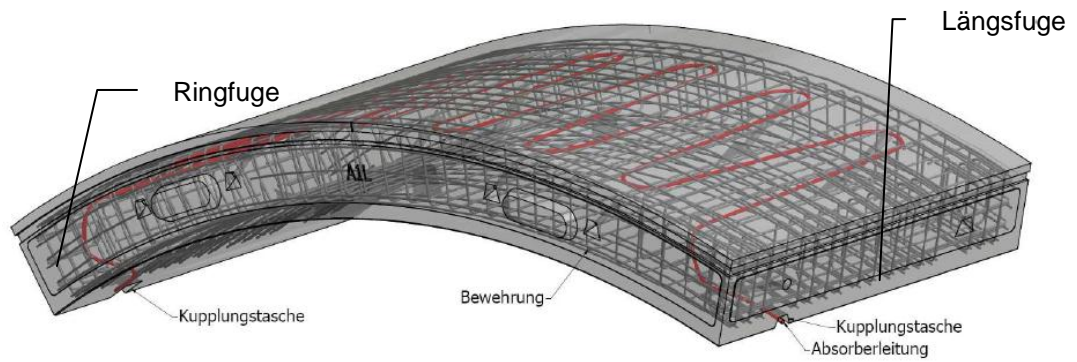


Abb. 2.19 Energietübbing mit Absorberleitung (rot) [11]

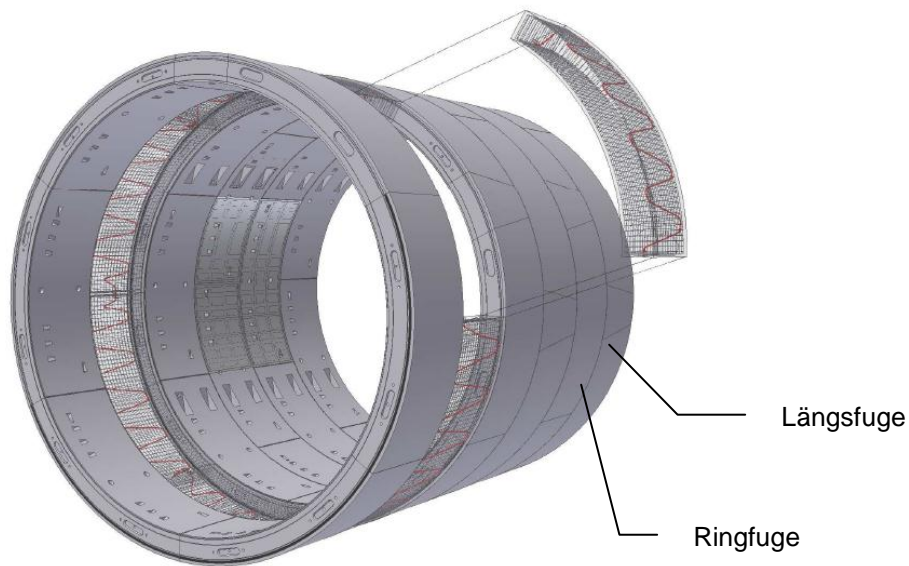


Abb. 2.20 Schema Einbau Energietübbing [11]

Die spätere Verbindung der Leitungen erfordert bei der Herstellung eine sehr hohe geometrische Genauigkeit, die allerdings generell für die Tübbingproduktion gilt. Der Energietübbing kann wie ein normaler Tübbing eingebaut werden.

Im Tunnel Jenbach wurden benachbarte Energietübbinge zu grösseren Kreisläufen zusammengeschlossen. Verbunden wurden die Absorberrohre benachbarter Tübbinge eines Ringes in Kopplungsnischen an den Längsfugen der Tübbinginnenseiten, welche die Dichtungsfuge nicht beeinträchtigen. Dies geschieht nach Errichtung der Tunnelschale vor Ort mit einem speziellen Kopplungssystem. Die Kopplungsnischen sind von der Innenseite her zugänglich.



Abb. 2.21 Kopplungsnische [11]

2.3.5 Energiebodenplatten

Die Belegung der Tunnelsohle mit Absorberleitungen erfolgt ähnlich einer Energiebodenplatte.



Abb. 2.22 Energiebodenplatte mit verlegten Absorberleitungen im Hochbau [13]

Vor dem Betoniervorgang werden Absorberleitungen (HDPE-Rohrleitungen) im Schutzbeton unterhalb der Bodenplatte oder in die Bewehrung der Bodenplatte selbst eingelegt. Die Absorberleitungen müssen vor und während des Betoniervorganges vor Beschädigungen geschützt werden.

2.3.5.1 Erdwärmeanlage „U2/2-Taborstrasse“, U-Bahnlinie U2, Wien, Österreich

Bei den Wiener U-Bahn-Stationen werden Räumlichkeiten wie die Stationsüberwachung, diverse Trafo- und Schalträume, Lagerräume, eventuell vorhandene Geschäftsräume etc. in den meisten Fällen klimatisiert. Zur Deckung des Energiebedarfs für die Klimatisierung der Betriebsräume wurden die Bodenplatten der Schachtbauwerke Taborstrasse und No-varagasse, die Schlitzwände und Bohrpfähle des Schachtbauwerkes Taborstrasse sowie der Sohlbereich beider Stationsröhren herangezogen.



Abb. 2.23 Energiebodenplatte im Tunnelquerschnitt (U-Bahnlinie U2, Wien) [13]

Die Anwendung erfolgt im Bereich der Stationsgebäude in folgenden Teilen:

- Heizung und Kühlung der Stationsräume
- Heizung und Kühlung von Geschäftsflächen im Stationsbereich
- Oberflächen und Treppenheizung zur Eisfreihaltung

Der Kühlbedarf der Station U212 ist so gross, dass mit der entstehenden Abwärme aus dem Kühlbetrieb der gesamte Heizbedarf gedeckt werden kann und somit die Absorberanlage das ganze Jahr über ausschliesslich zum Kühlen der Station verwendet wird.

Die Amortisationszeit der geothermischen Anlage für die Klimatisierung des Tunnels und der Station beträgt etwa 10 Jahre.

2.4 Konzeptstudien

Für verschiedene Tunnelprojekte wurden auch schon Konzeptstudien für eine geothermische Nutzung durchgeführt. In der Schweiz können dazu die folgenden Konzeptstudien angeführt werden:

- Für die untiefen Neubauten Allmendtunnel und Hubelmatttunnel wurde die Grössenordnung einer möglichen Nutzung für die nahe gelegene Messe Luzern abgeschätzt. Evaluiert wurde ein Flächenkollektorsystem. Aufgrund der spezifischen Anforderungen an den Bauablauf wurde eine Installation eines Kollektorsystems zurückgestellt.
- 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.

2.5 Leistungskennzahlen

Die mögliche Energieumsetzung und damit die Leistungsfähigkeit eines Erdwärmesystems hängt von mehreren Faktoren ab:

- Thermische Eigenschaften des Boden- oder Felsmaterials
- Grundwasserstand, Grundwasserströmung, Grundwassertemperatur
- Aussen- bzw. Tunnellufttemperatur, klimatische Bedingungen
- Abstand der Absorberelemente
- Länge der Absorberelemente
- Durchmesser und Material der Absorberelemente
- Temperatur der Absorberflüssigkeit
- Strömungsgeschwindigkeit und physikalische Eigenschaften der Absorberflüssigkeit
- Überdeckung

Erfahrungen haben gezeigt, dass die aktivierbare Wärmeleistung flächiger Absorber in Abhängigkeit von den Untergrundbedingungen zwischen 10 und 40 W/m² angenommen werden kann. Die Eindringtiefe vom Tunnel aus gesehen (Temperatursenkung auf Fels) beträgt bei saisonaler Wärme- und Kältenutzung ca. 10 - 15 m.

Einfluss auf die erzielbare Wärmeentzugsleistung hat auch die Tunnelluft. Dabei spielen die Aussenlufttemperatur, die Durchströmung des Tunnels, die Tunnellänge, die Wand- bzw. Gebirgstemperaturen, die Entfernung zum Portal und zu Wärmequellen wie z.B. Zügen, eine Rolle.

In Abb. 2.24 sind einige Leistungskennzahlen der verschiedenen Pilotprojekte zusammengestellt.

Zur Testanlage Energievlies im Lainzer Tunnel stehen folgende weiterführende Erläuterungen zu den Kennzahlen zur Verfügung:

Die Leistung beim Energieentzug beträgt ca. 2.9 kW. Bei Energieabgabe wird eine Leistung von ca. 3.6 kW erzielt, wobei der Anteil an Fremdenergie (Strom) bei 0.85 kW liegt. Die Fremdenergie wurde für den Betrieb der Wärmepumpe und zweier Umwälzpumpen benötigt. Pro Energievliesbahn ist eine Fläche von ca. 32.9 m² bedeckt, wodurch sich kurzfristig eine maximale Entzugsleistung von ca. 30 W/m² bei einer Vorlauftemperatur von 1°C ergibt (Heiz- und Kühlfall). Die Arbeitszahl der Anlage liegt bei ca. $\beta = 4.2$. Die Dauerleistung beträgt 14.2 W/m².

Projekt	Typ Absorber	Spez. Entzugsleistung [W/m ²] bzw. [W/lfm] Lang- bzw. kurzfristig	Wirkungsweise Bemerkungen	Installierte Gesamtenergiekapazität
U2/2 U-Bahn Wien	Energiebodenplatte Tunnel	15 – 30	500 m ² Flächig	10 kW
Lainzer Tunnel LT22 - Bierhäuselberg	8 Energievliesbahnen, 4 für Entzug, 4 für Eintrag	15 – 30	Flächig, 32.9 m ² / Energievliesbahn	
Lainzer Tunnel LT31 Klimtgasse	21 Energieanker, 2-4 m Abstände, 12 m Länge	8 – 12	Nadelstichtartig	5 kW
Stadtbahn Stuttgart - Fasanenhof	Energievlies, 2 x 10 m lange Gewölbe- blöcke, je 220 m Absorberleitung	3 – 8	Flächig, 180 m ² / Gewölbeblock	1.1 – 2.9 kW
Tunnel Jenbach	Energietübbinge	Kundenspezifisch	Flächig	
Stuttgart 21, Fildertunnel (Studie) [7]	Energietübbinge	10 – 30		65 kW für Vlies
Allmendtunnel, Luzern (Konzeptstudie Geowatt AG)	Wärmetauscherelemente hinter Tunnelinnenausbau	18 – 150 Saisonaler bis täglicher Heiz-/Kühlzyklus	Flächig, in Abhängigkeit von Heiz- u. Kühlzyklus	
CEVA, Genf (Studie Geowatt AG)	Flächenkollektor	30 W/m ²	Saisonale Heiz- und Kühlzyklen	

Abb. 2.24 Leistungswerte (Richtwerte) der einzelnen Absorberbauteile (vor Wärmepumpe)

3 Systemevaluation

3.1 Fragestellungen zur Systemevaluation

Um die technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit für die einzelnen Absorbersysteme zu untersuchen, wurde im Rahmen der Systemevaluation ein Fragenkatalog zusammengestellt, dessen Beantwortung die effizientesten Systeme aufzeigen soll.

Fragenkatalog	Geothermisch	Konstruktiv	Baumethodisch	Wirtschaftlich	Beantwortet in
Ist das System thermisch nachhaltig (Nutzungsszenario), d.h. fließt genug Wärme nach, um auch nach (10) 20 Jahren noch genügend Wärme entziehen zu können?	x				3.3.4
Wie gross ist die maximale Energieausbeute und durch welche Anforderungen wird sie begrenzt (keine Auswirkungen auf Dauerhaftigkeit des Tunnels)?	x	x	x		3.3.10
Wie flexibel ist ein Absorbersystem, kann es Spitzen abdecken?	x				3.3.4
Wie beeinflussen saisonale Schwankungen den Energiegewinn?	x				Pilotprojekt
Wie und wie gut ist die Temperatur des Baugrundes auf das Absorbererelement übertragbar?	x	x	x		Pilotprojekt
Wie hat ein Absorbererelement, -system auszusehen?	x	x	x	x	3.2.3
Wo kann es in den Tunnel integriert werden?		x	x		3.2.2
Möglichkeit eines zeitlich etappierten Ausbaus des Tunnels mit Absorbersystemen, modularer Aufbau des Absorbersystems.	x	x	x		3.3.9 3.2.3
Vergleich Absorbersysteme und weitere konkurrierende Systeme (Erdwärmesonde).	x			x	3.4
Wo können die Anschlüsse und Versorgerleitungen untergebracht werden?		x	x		Pilotprojekt
Wie müssen der Einbau und die Anordnung erfolgen, so dass es zu keiner Bauzeitverlängerung kommt?			x		3.2.3
Wie kann das System ausgelegt werden, so dass es den Baubedingungen im Tunnelbau gerecht wird?			x		3.2.3
Wie können bestehende Tunnel nachgerüstet werden?			x		3.2.3
Wie kann die Wartung und Instandsetzung erfolgen?		x			Pilotprojekt
Wie muss die Abnehmerstruktur beschaffen sein, um die Tunnelwärme möglichst ohne Verluste tatsächlich nutzen zu können?				x	3.2.1
Dauerhaftigkeit, hydraulische Nachhaltigkeit?		x			Pilotprojekt
Wie werden die Anschlussleitungen und die Hydraulik gesteuert und von wo aus?			x		Pilotprojekt
Mit welchen Investitionskosten muss für eine geothermische Anlage im Tunnelbau gerechnet werden?				x	3.4
Wie können der Einbau, die Wartung und der Betrieb des Absorbersystems möglichst störungsfrei für den eigentlichen Zweck des Tunnels erfolgen?			x		Pilotprojekt

Abb. 3.25 Fragenkatalog

3.2 Absorberkonzepte

Anhand von typischen Tunnelquerschnitten werden verschiedene Absorberelemente evaluiert. Dabei werden zuerst mögliche Einbauarten und -orte untersucht und aufgelistet. Des Weiteren werden bereits vorhandene Forschungsergebnisse von Lainzer Tunnel, Stadtbahn Stuttgart usw. herangezogen. Die Randbedingungen für Strassentunnel sowie ihre unterschiedliche Konstruktion (verschiedene Möglichkeiten des Einbaus von Elementen usw.) werden untersucht.

3.2.1 Darstellung typischer Tunnelquerschnitte

Das Forschungsprojekt beschränkt sich auf innerstädtische Tunnel sowie Tunnel von Umfahungsstrecken. Diese Tunnel eignen sich besonders für die Nutzung der Erdwärme, da in unmittelbarer Portalnähe oder in geringem Abstand über dem Tunnel Abnehmer für die Wärme vorhanden sind.

Tunnelbauwerke werden hinsichtlich nachfolgender Kriterien unterschieden.

Nach dem Bauverfahren

- Offene Bauweise (Tagbautunnel)
- Geschlossene Bauweise (bergmännische Tunnel)

Nach der Nutzung:

- Strassentunnel
- Sicherheitsstollen
- Infrastrukturstollen

Querschläge werden nicht untersucht, da aufgrund der grossen Anzahl von erforderlichen Sammelleitungen die Wirtschaftlichkeit dieser Lösung ausgeschlossen werden kann.

Bergmännische Tunnelbauwerke werden weiterhin unterschieden:

Nach dem Vortriebsverfahren gem. SIA 198 [19]:

- Sprengvortrieb im Fels (SPV)
- Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels (MUF)
- TBM-Vortrieb im Fels (TBM)
- Maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein (MUL)
- Schildmaschinenvortrieb im Lockergestein (SM)

Nach der Art des Ausbaus:

- Einschaliger Ausbau
- Zweischaliger Ausbau

Nach der Profilform:

- Kreisprofil
- Hufeisenprofil
- Maulprofil

In Abhängigkeit vorgenannter Kriterien variieren die Tunnelquerschnitte in ihrer Grösse, Profilform und ihren Bauteilen sowie im Aufbau des Querschnitts.

Nachfolgend werden einige typische Tunnelquerschnitte von in der Schweiz geplanten bzw. ausgeführten Tunnelbauwerken dargestellt.

Nutzungsart	Bauverfahren	Vortriebsverfahren	Ausbau	Beispiel
Strassentunnel	bergmännisch	SPV	Zweischalig mit Spritzbetonsicherung, Abdichtungsfolie und Ortbetoninnenschale	Umfahrung Wattwil, Umfahrung Saas
		TBM	Zweischalig mit Tübbingsicherung, Abdichtungsfolie und Ortbetoninnenschale	Gubristunnel
		SPV	Einschalig mit Ortbeton-Aussengewölbe (unbewehrt) und Wandverkleidungsplatten	Mositunnel
Sicherheitsstollen	bergmännisch	TBM	Einschalig mit Spritzbetonverkleidung	Umfahrung Saas
Infrastrukturstollen	bergmännisch	TBM	Zweischalig mit Spritzbetonsicherung, Abdichtungsfolie und Ortbetoninnenschale	Werkleitungstrasse Luzern
		SM	Einschalig mit abgedichtetem Tübbingausbau	Personentransportstollen (PTS) Flughafen Zürich

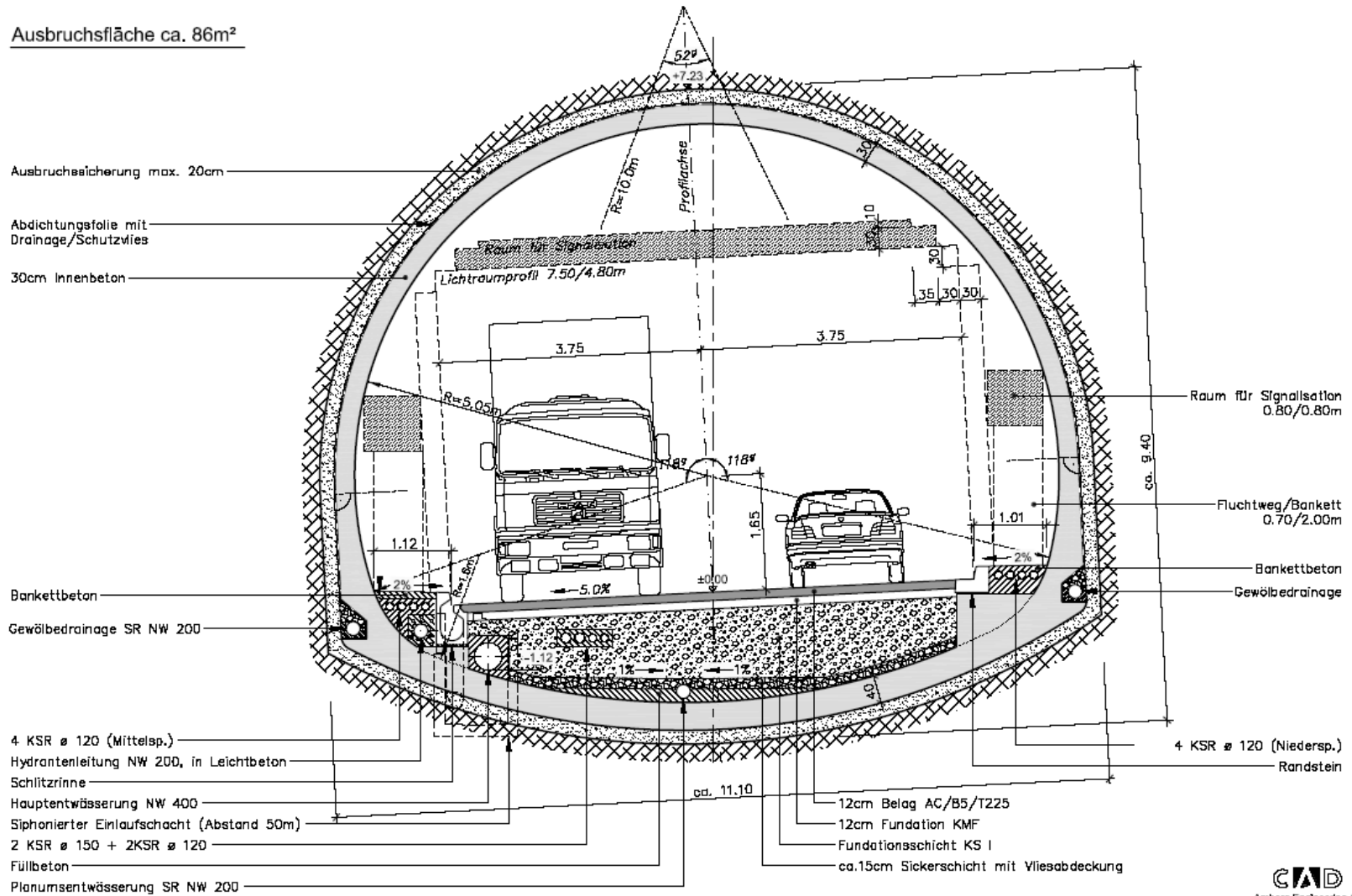
Abb. 3.26 Zusammenstellung typische Tunnelquerschnitte

In Abhängigkeit von der Art der Nutzung des Tunnels ergibt sich die Grösse des erforderlichen Lichtraums. Unter Berücksichtigung weiterer Räume für Ausbau und Ausrüstungen wird die Grösse des Normalprofils festgelegt. Bei Strassentunneln spielen insbesondere verkehrliche Anforderungen (Art, Zusammensetzung und Menge des Verkehrs) eine Rolle bei der Festlegung des Normalprofils. Strassentunnel lassen sich demnach weiter unterscheiden in:

Verkehrsregime	Fahrstreifen	Weiteres	Beispiel	Querschnittsgrösse
Gegenverkehr	1	Ausstellbuchten	Tunnel Muttner Tobel	$B = \text{ca. } 4 \text{ m}$ $F = 35 \text{ m}^2$
	2		Umfahrung Wattwil	$D_i = 10.1 \text{ m}$ $F = 86 \text{ m}^2$
	3		Milchbucktunnel	$D_i = 12.8 \text{ m}$ $F = 145 \text{ m}^2$
Richtungsverkehr	2		Seelisbergtunnel	$D_a = 11.8 \text{ m}$ $F = 90 \text{ m}^2$
	2	Standstreifen	Uetlibergtunnel	$D_i = 13 \text{ m}$ $F = 160 \text{ m}^2$

Abb. 3.27 Einteilung Strassentunnel in Abhängigkeit vom Verkehrsregime

3.2.1.1 Strassentunnel



W:\AIBSDATA\IN039\ACAD\Genehmigungsprojekt\Beilage_16_AE_NP_Tunnel.dwg

Abb. 3.28 Umfahrung Wattwil Normalprofil SPV

3.2.1.3 Infrastrukturstollen

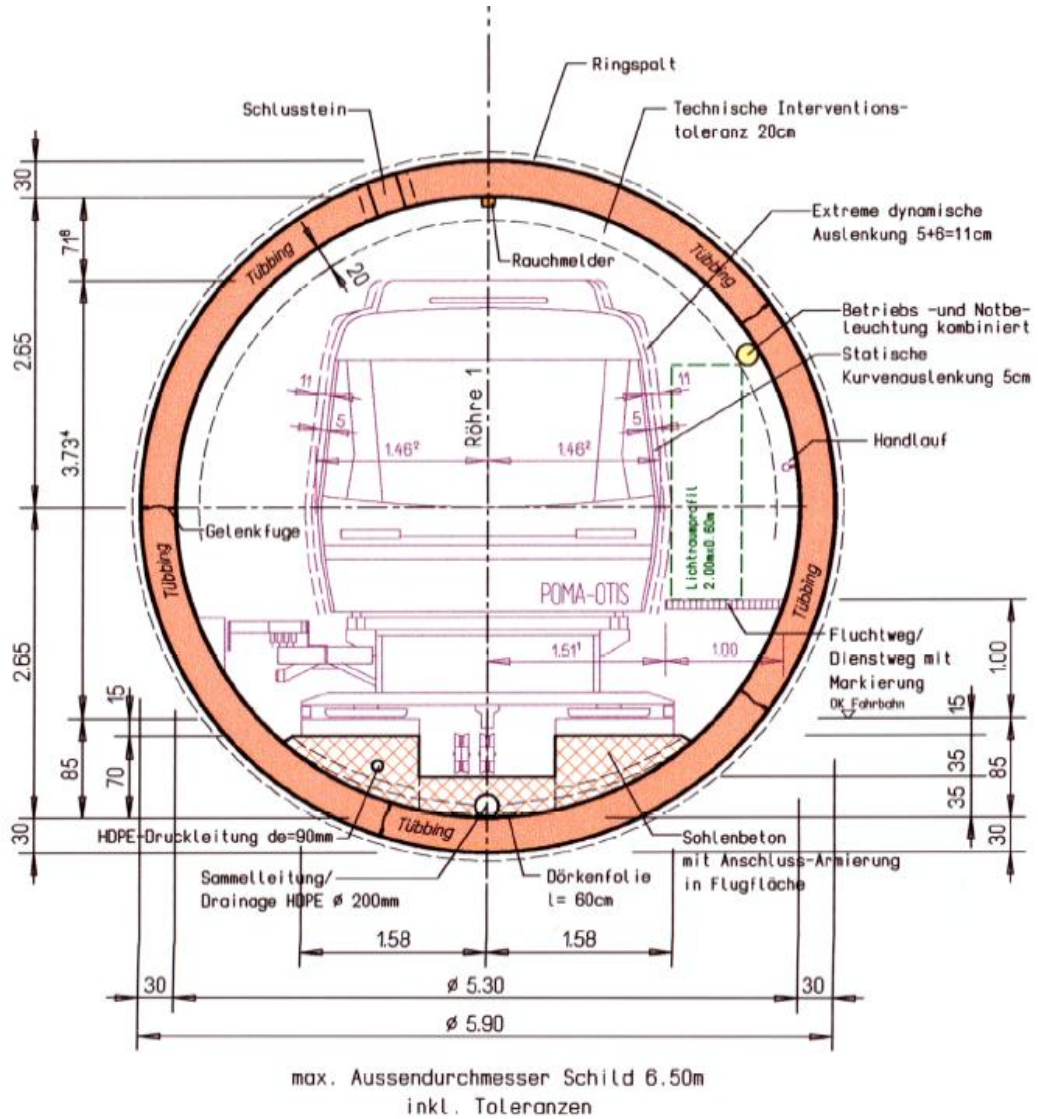


Abb. 3.31 Personentransportstollen (PTS) Flughafen Zürich Normalprofil SM-Vortrieb mit einschaligem Tübbingausbau

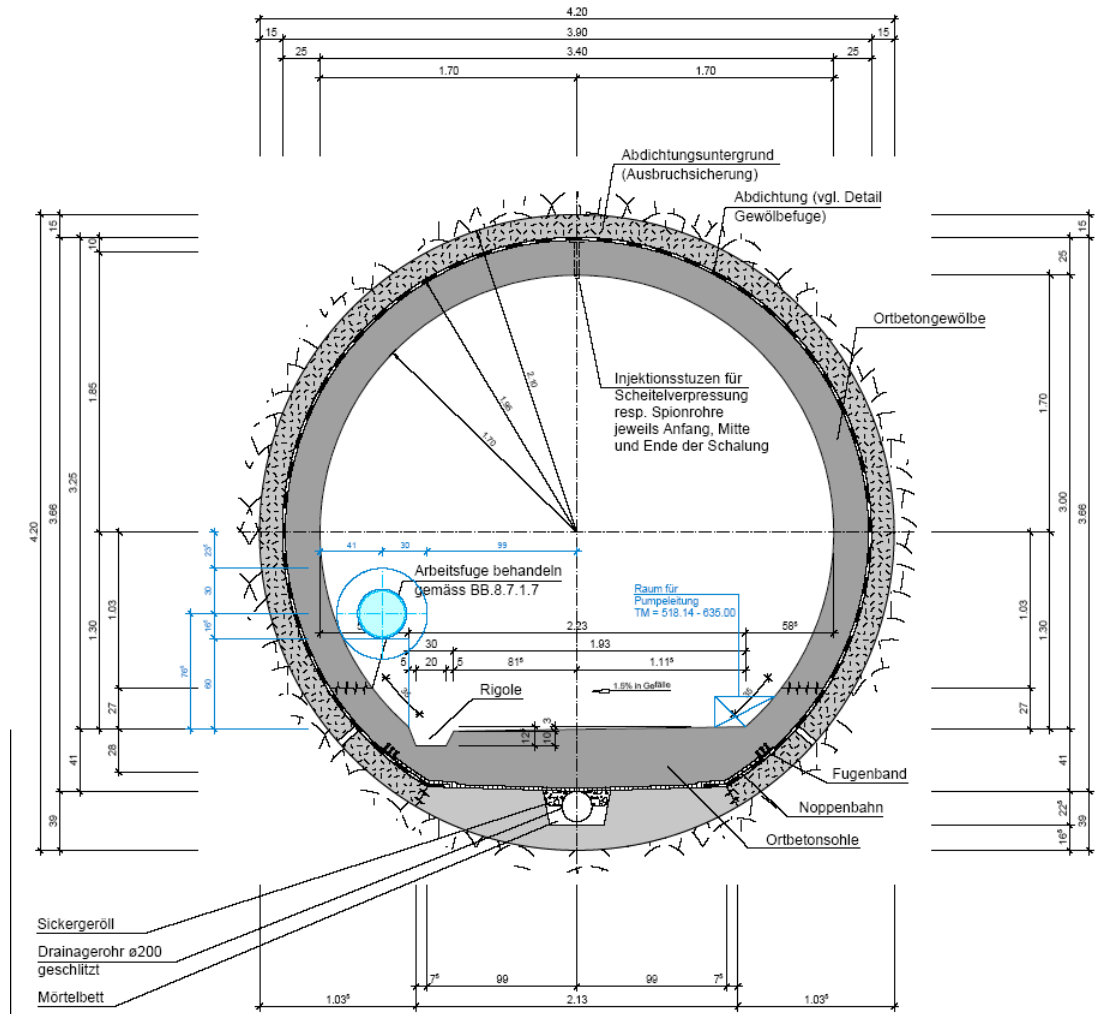


Abb. 3.32 Werkleitungsstollen (WLT) Luzern Normalprofil TBM-Vortrieb mit zweischaligem Ausbau

3.2.2 Einsatzorte

Die Einsatzmöglichkeiten von Flächenkollektoren wie Energievliese sind vielfältig. Sie können in der Tunnelnische sowie in der Zwischendecke, der Sohle oder der Fahrbahnplatte von Tunneln eingebaut werden. Auch ein vorhandener Werkleitungskanal unter der Fahrbahn kann zur Energienutzung herangezogen werden.

Der Einsatz von Energietübbingungen ist beschränkt auf den maschinellen Tunnelvortrieb bei dem ein Tübbingausbau vorgesehen ist.

Überall dort, wo Gebirgsanker zur Stabilisierung des Hohlraums eingesetzt werden, können Energieanker Verwendung finden.

Abb. 3.33 zeigt die Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Absorbersysteme.

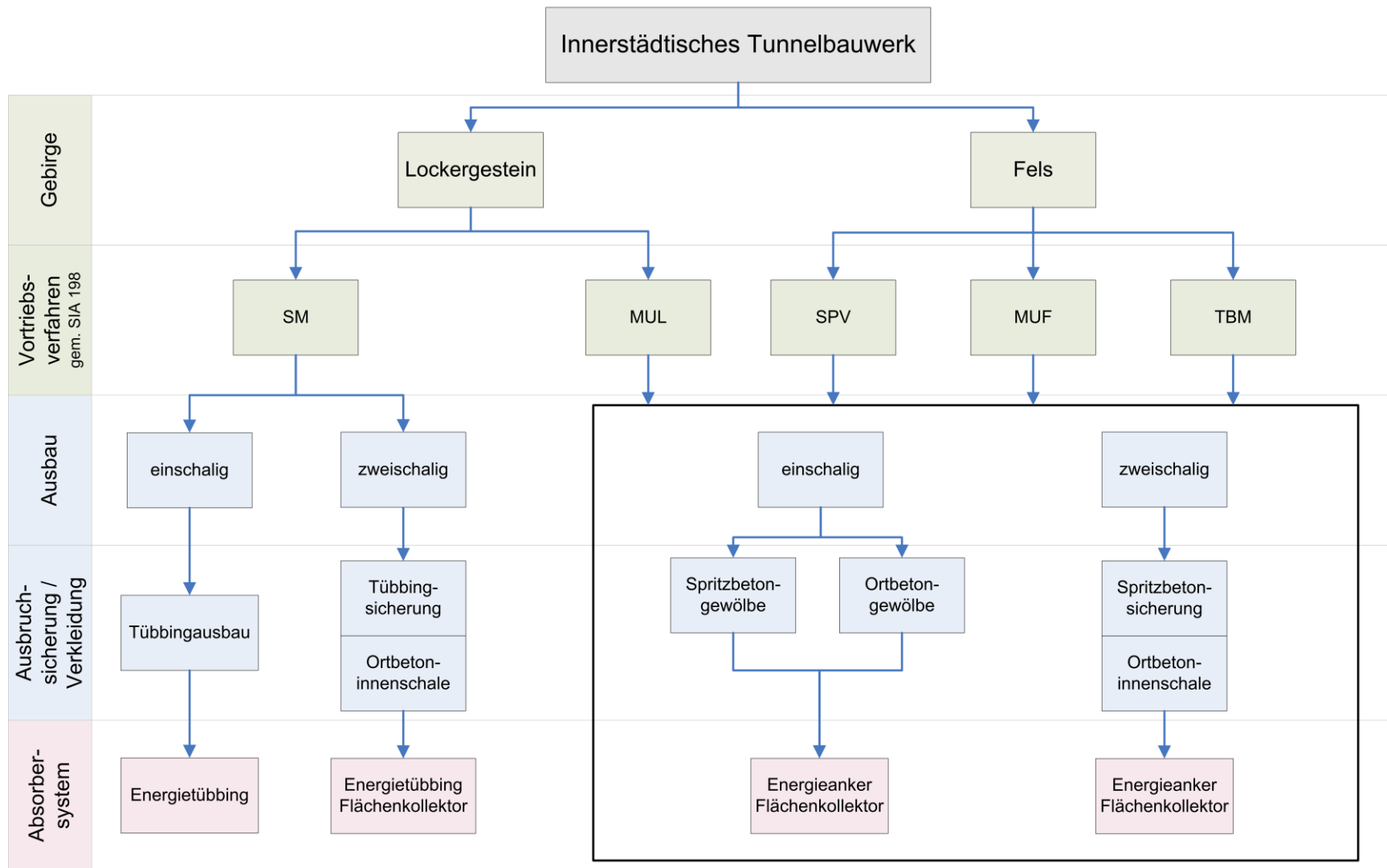


Abb. 3.33 Einsatzmöglichkeiten Absorbersysteme

3.2.3 Konstruktive Details

Nachfolgend werden konstruktive Details beim Einbau der Absorbersysteme in verschiedenen Tunnelquerschnitten untersucht.

Für die Absorberleitungen können verschiedene Materialien verwendet werden. Je nach Einsatzort sind spezielle Randbedingungen zu berücksichtigen. Für die Verwendung in einem Flächenkollektor beispielsweise sollten die Rohre eine hohe Flexibilität, d.h. kleine mögliche Biegeradien, aufweisen. Für Heizungsanlagen werden insbesondere PE-Rohre verwendet.

Material	Einsatzort	Dimensionen / Qualität	Min. Biegeradien	Eigenschaften
PE-XA Vernetztes Polyethylen	Absorberleitungen bei Energievlies Stadtbahn Stuttgart	25 mm x 2.3 mm	20 cm	Hohe Bruchdehnung, hohe Temperaturbeständigkeit, sehr geringe Wasseraufnahme, brennbar, hohe chem. Beständigkeit, schlecht schweißbar, hohe Kratz- und Abriebfestigkeit, Langlebigkeit, hohe Spannungsrissebeständigkeit, hohe Druckstabilität, max. Betriebstemperatur 90°C, max. Betriebsdruck 10 bar
PE mit copolymeren Octen „Waterflex“ (KEKELIT)	Absorberleitungen bei Energievlies Lainzer Tunnel	25 mm x 3.5 mm		Hohe Flexibilität
HDPE Polyethylen „High density“	Absorberleitungen bei Energieanker Lainzer Tunnel			Hohe Bruchdehnung, hohe Temperaturbeständigkeit, sehr geringe Wasseraufnahme, brennbar, hohe chem. Beständigkeit, gut schweißbar
PE-RT Unvernetztes Polyethylen „Resistant Temperature“ (Gabothersm GmbH)	Absorberleitungen	10-25 mm x 2.0 mm	6 x d = 6 - 15 cm	Gute Flexibilität, hohe Temperaturbeständigkeit, sauerstoffdicht, nicht für Hochdruck geeignet, max. Betriebstemperatur 80°C, max. Betriebsdruck 10 bar
PB Polybuten (Gabothersm GmbH)	Absorberleitungen	10 mm x 1.3 mm bis 20 mm x 2.0 mm	6 x d = 6 -12 cm	Sehr hohe Zeitstandsfestigkeit, hohe Flexibilität auch bei Temperaturen bis -5°C, geringe Wärmeausdehnung, ausgezeichnete chem. Beständigkeit, geringe Biegeradien und kleine Rohrdurchmesser, max. Betriebstemperatur 95°C, max. Betriebsdruck 10 bar
GFK Glasfaserverstärkter Kunststoff (z.B. GUP)	Absorberleitungen, Hüllrohr bei Energieanker	25 mm		Hohe Bruchdehnung, elastische Energieaufnahme, nicht korrodierend, gute elektrische Isolationswirkung, hohe chem. und thermische Beständigkeit
Stahl	Hüllrohr bei Energieanker Lainzer Tunnel	R32N, R51L, Stahlqualität Vergütungsstahl nach EN 10083-1	-	Hohe Zug- und Dauerfestigkeit

Abb. 3.34 Materialien für Absorbersysteme

3.2.3.1 Flächenkollektor

In Abhängigkeit vom gewählten Bauteil, in das der Flächenkollektor integriert werden soll, ergeben sich verschiedene Randbedingungen für den Einsatz des Absorbersystems. Nachfolgend werden unabhängig von der Energieeffizienz die verschiedenen möglichen Einbauorte untersucht.

Beim Verlegen der Absorberleitungen sind die Grenzwerte der Biegeradien für die Leitungen zu berücksichtigen.

Einbau in der Tunnelschale

Beim *zweischaligen* Ausbau mit Spritzbetonsicherung / Tübbingsicherung und Ortbetoninnenschale wird zwischen beiden Schalen eine Abdichtungs- oder, zur statischen Trennung, eine Trennfolie eingebaut. Die Flächenkollektoren werden in Bahnen vorgefertigt, indem die Absorberrohre in mäanderförmigen Schlaufen längs oder quer auf einer Folie verlegt und befestigt werden. Der Flächenkollektor kann dann vor Ort auf die äussere Tunnelschale aufgebracht und von einer etwaigen Abdichtungsfolie überdeckt werden. Gleichzeitig werden die Absorberrohre durch die Abdichtung vor Beschädigungen beim Einbau der Innenschale geschützt. Werden die Sammelleitungen im Tunnelinneren geführt, ist jedoch das Durchführen der Leitungen (Anbindeleitung) vom Hauptsammler durch die Innenschale zu den Absorberleitungen des Flächenkollektors zu berücksichtigen. Dieses Durchführungsdetail variiert je nach Aufbau des Tunnels und richtet sich in erster Linie nach der Art der Abdichtung (Vollabdichtung, Regenschirmabdichtung). Die Durchführung der Absorberrohre durch die Abdichtung bedeutet zwar einen Mehraufwand, ist aber technisch machbar.

Bei druckhaltenden Abdichtungssystemen sollte im Hinblick auf das Risiko von Leckagen gänzlich auf Durchführungen in der Abdichtung verzichtet werden. Hier sollte ein System gewählt werden, bei dem die Absorberleitungen innen auf der Abdichtung verlegt werden. Dabei ist zu beachten, dass eine Lagesicherung der Absorberleitungen gegen Verschieben während des Betonierens erfolgt. Folgende Möglichkeiten bestehen:

- Bei bewehrtem Innengewölbe Absorberleitungen an der Bewehrung befestigen.
- Absorberleitungen direkt über auf die Abdichtung aufgeschweisste Halterungen an der Abdichtung fixieren.
- Absorberleitungen, ähnlich wie Kabelrundschnitte, an der Schalung des Innengewölbes befestigen.

Beim *einschaligen* Ausbau können die Absorberleitungen an den Bewehrungsnetzen bzw. an den Bewehrungsstäben befestigt und ins Gewölbe einbetoniert werden. Bei unbewehrtem Gewölbe können die Absorberleitungen an der Schalung fixiert und anschliessend einbetoniert werden.

Bei bestehenden Tunneln können die Flächenkollektoren auf der Innenseite der Tunnelschale befestigt werden. Dies hat den Vorteil, dass die Absorberleitungen leicht zugänglich sind und ein Austausch einfach möglich ist. Die Flächenkollektoren müssen jedoch aktiv vor Verschmutzung und Beschädigungen geschützt werden.

Einbau in der Fahrbahnplatte

Eine aufgeständerte Fahrbahnplatte ist gemäss SIA 197/2 [18] 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.

Das Verlegen von Absorberleitungen in horizontaler Ebene wie in Fahrbahnplatten, Zwischendecken oder Werkleitungskanälen ist ein bekanntes und bewährtes System. Dabei werden die Absorberleitungen an der Bewehrung befestigt und einbetoniert.

Die Belastungen und Schwingungen der Fahrbahnplatte werden auf die Absorberleitungen übertragen. Die Absorberleitungen müssen so ausgebildet sein, dass sie diese Belastungen schadlos aufnehmen können.

Eine Schwächung der Fahrbahnplatte durch die Absorberleitungen kann durch eine Verstärkung der Fahrbahnplatte ausgeglichen werden.

Einbau in Sohle

Die Belastungen und Schwingungen der Fahrbahnplatte werden auf die Absorberleitungen in der Sohle übertragen. Die Absorberleitungen müssen so ausgebildet sein, dass sie diese Belastungen schadlos aufnehmen können.

Einbau im Werkleitungskanal

Bei Vorhandensein eines Werkleitungskanals (WELK) im Tunnelquerschnitt können die Absorberleitungen in Decken und Wände 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, müssen die Absorberleitungen in einem separaten Arbeitsschritt verlegt und befestigt werden. Dies führt zur Verlängerung der regulären Bauzeit. 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 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 Zu- und Rücklaufleitungen (Sammelleitungen) erforderlich, da jedes Element separat an die Hauptleitung angeschlossen werden muss. Die Sammelleitungen können im Innern des WELK geführt werden. Alternativ können die Flächenkollektoren in der Überschüttung des WELK verlegt werden.

Einbau in Zwischendecke

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

Bei einer Herstellung der Decke in Ortbeton werden die Absorberleitungen in einem separaten Arbeitsschritt auf der Baustelle verlegt und befestigt. Bei vorfabrizierten Zwischendecken erfolgt der Einbau der Absorberelemente 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 Sammelleitung kann in diesem Fall im Abluftkanal oder hängend an der Zwischendecke geführt werden.

3.2.3.2 Energieanker

Innerhalb dieses Forschungsprojektes werden Einsatzmöglichkeiten von Energieankern im Bereich der Systemankerungen (systematic anchoring) untersucht. Systemankerungen werden als Stützmittel zum Aufbau eines Gebirgstragringes verwendet. Die Systemankerung ist ein über längere Strecken gleich bleibendes Bohrschema, wobei Ankerlängen und deren Abstände zueinander an das vorgefundene Gebirge angepasst werden. Systemankerungen werden für den Einsatz von Energieankern als besonders geeignet erachtet, da die Anker nach Beendigung des Vortriebes im Fels bestehen bleiben und in grossen Stückzahlen eingebaut werden.

Andere Anwendungsgebiete für Gebirgsanker, wie z.B. als Ortsbrustanker oder für Spiess- und Rohrschirme, werden hier nicht näher untersucht.

Gebirgsanker werden unterschieden nach der Art des Verbundes in:

- Haftanker (z.B. Mörtelanker, Klebeanker, Injektionsanker)
- Spreizanker
- Reibrohranker (z.B. Swellex-Anker)

Beim Mörtelanker wird zuerst das Bohrloch gebohrt, danach wird, bei genügender Standfestigkeit des Bohrlochs, Zementmörtel eingefüllt und die Ankerstange eingebracht. Je nach Herstellungsart unterscheidet man:

- Füllmörtelanker (SN-Anker)
- Einschubmörtelanker (Perfo-Anker)
- Injektionsanker

Sie unterscheiden sich dadurch, dass beim SN-Anker sofort ein Stahlstab und beim Perfo-Anker zuerst zwei mit Mörtel befüllte, perforierte Blech-Halbschalen in das Bohrloch eingeschoben werden. In diese Blech-Halbschalen wird dann der Ankerstab eingeführt.

Beim Injektionsanker wird zuerst die Ankerstange versetzt und anschliessend der Ringraum verfüllt. Nach dem Aushärten des Zementmörtels kann der Anker vorgespannt werden.

Die Vorgangsweise bei der Herstellung eines Klebeankers ist dieselbe wie bei den Zementmörtelankern, es wird jedoch in das Bohrloch tiefste eine schnellhärtende Kunstharzpatrone eingebracht. Je nachdem wie viele Kunstharzpatronen eingeschoben werden, ist der Anker endverklebt oder voll verklebt. Der Vorteil dieses Typs ist seine sofortige Vorspannbarkeit, da das Kunstharz schnell aushärtet.

Beim Spreizanker erfolgt die Kraftübertragung über Reibung, da die Ankerspitze mit aufgesetzter Spreizhülse bzw. beim Split-Set Anker der gesamte Anker einen geringfügig grösseren Durchmesser hat als das Bohrloch und sich beim Einführen in diesem spreizt.

Reibrohranker übertragen Kräfte über Mantelreibung an das Gebirge. Swellex-Anker (Atlas Copco) bestehen aus einem zusammengefalteten Stahlrohr, das im Bohrloch durch Innendruck aufgeblasen wird und sich dabei an der Felswand verspannt. Der Vorteil des Swellex ist die sofortige Entwicklung seiner Tragfähigkeit.

Verpressanker (Injektionsanker) werden zuerst in das Bohrloch eingebracht und nachfolgend wird ein Injektionskörper hergestellt, welcher den Verbund zwischen Boden und Ankerstahl herstellt. Je nach Anzahl der verwendeten Stahlzugglieder können dies Einstabanker, Bündelanker oder Litzenanker sein.

Der selbstbohrende Anker ist vom Prinzip her auch ein Verpressanker, mit der Besonderheit, dass in einem Arbeitsschritt direkt gebohrt und vom Bohrloch tiefsten dynamisch verpresst wird. Es wird mit verloraener Bohrkronen gebohrt, der Ankerstab besteht aus einem Rohr mit Aussengewinde. Der Innenraum des Rohres wird als Spülkanal verwendet.

Wenn das Bohrloch standfest ist, wird beim Bohren mit Druckwasser durch das Rohr gespült. Anschliessend wird injiziert und verspannt. Wenn das Bohrloch nicht standfest ist, wird mit Zementspülung gearbeitet. Dieser Anker erreicht ebenfalls rasch seine Tragfähigkeit. Bekannte Anker dieses Typs sind der Atlas Copco MAI SDA oder der Ischebeck TITAN.

Die für eine Verwendung als Energieanker günstigsten Eigenschaften weisen Injektionsanker auf. Das Tragelement eines Injektionsankers, die Ankerstange, ist als Rohr ausgeführt und bietet somit Platz um Absorberflüssigkeit ein- und rückzuleiten.

Die nachfolgende Tabelle zeigt verschiedene Ankertypen des Ischebeck TITAN und ihre Durchmesser:

	Einheit	TITAN R32/22	TITAN R32/20	TITAN R32/15	TITAN R38/21	TITAN 30/16	TITAN 30/11	TITAN 40/20	TITAN 40/16	TITAN 52/26	TITAN 73/53	TITAN 103/78
Nenndurchmesser außen Ø	mm	32	32	32	38	30	30	40	40	52	73	103
Nenndurchmesser innen Ø	mm	22	20	15	21	16	11	20	16	26	53	78
effektiver Querschnitt	mm ²	362	389	418	666	340	415	730	900	1250	1615	3140
Bruchlast F _u	kN	221	291	363	500	220	320	539	660	929	1160	1950
Kraft der 0,2 % Dehngrenze	kN	182	244	323	400	180	260	430	525	730	970	1570
Gewicht	kg/m	2,8	3,2	3,4	5,4	2,7	3,3	5,6	7,2	9,9	13,2	25,3
Gewinde	ISO 10208/1720											
	links	links	links	links	links	links	links	links	links	links / rechts	rechts	rechts

Abb. 3.35 Technische Daten Gebirgsanker Ischebeck TITAN

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für den prinzipiellen Aufbau eines Energieankers:

- Verwendung einer geschlossenen Koaxialsonde aus Metall oder Kunststoff in einer Ankerbohrung
- Verwendung einer geschlossenen U-Rohr Sonde
- Verwendung eines einfachen, im Bohrloch tiefsten offenen HDPE-Rohres und der Stahlhülle des Ankers als Aussenrohr zur Rückleitung

U-Rohr Sonden werden für herkömmliche Geothermiebohrungen verwendet. Sie werden direkt in das Bohrloch eingesetzt. Das doppelte Rohrknien am Ende der U-Rohr Sonde weist bei handelsüblichen Sonden jedenfalls eine Breite von etwa 60 mm auf. Die Verwendung einer U-Rohr Sonde ist daher auf Grund der geringen Ankerinnendurchmesser nicht denkbar.

Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines einfachen HDPE-Rohres und der Ankerausenhülle als Rückleitung. Hierbei wird das Wärmeträgermedium durch das Kunststoffrohr eingepresst und fließt danach im Anker selbst, unter Voraussetzung der Dichtigkeit des Ankers, zurück. Dieses System erscheint aus der Sicht des Platzbedarfs das Sinnvollste. Ein Problem stellt die geforderte Dichtigkeit des Ankers dar, welche bei diesem System erst nach Einbau des Ankers auf der Baustelle geprüft werden kann.

Eine andere Möglichkeit ist die Herstellung von entsprechend dünnen Koaxialsonden, welche in den Anker eingeführt werden. Die Sonde kann im Werk hergestellt und bereits dort auf Dichtigkeit geprüft werden. Somit entfällt die Dichtigkeitsprüfung auf der Baustelle. Ein Nachteil der Koaxialsonden ist der grössere thermische Kurzschluss gegenüber herkömmlichen U-Rohr Sonden, der sich durch eine konzentrische Anordnung der Hin- und Rückleitung ergeben kann. Koaxialsonden wurden von der Fa. HAKA GERODUR AG entwickelt, konnten sich auf Grund des hohen Preises jedoch in der Praxis nicht durchsetzen (Ø 70 mm; Preis: 50 CHF/lm Koaxialsonde). Möglicherweise ist bei Entwicklung eines neuen Marktes auch ein Anreiz zu einer weiteren Preisbildung gegeben. [8]

Bei der Entwicklung eines Energieankers ist die Frage zu klären, ob der Anker lediglich zur Energienutzung oder gleichzeitig auch als Stützmittel verwendet werden soll.

Gebirgsanker werden früh eingebaut und in ihrer Funktion als Stützmittel lediglich bis zum Einbau des dauerhaften Tunnelgewölbes benötigt. Anschliessend könnte der Anker zu einem Energieanker umgebaut werden.

Beispielsweise könnte eine an der Spitze verschlossene Hohlankerstange (Injektionsanker) wie ein Mörtelanker eingebaut werden. Das heisst, es wird zuerst das Bohrloch gebohrt, danach wird, bei genügender Standfestigkeit des Bohrlochs, Zementmörtel eingefüllt und die Hohlankerstange eingebracht. Später kann in den Anker eine Koaxialsonde oder ein HDPE-Rohr eingeschoben und der Anker als Energieanker genutzt werden. Ebenso denkbar wäre die Verwendung eines Swellex-Ankers. Allerdings hat der Swellex im Gegensatz zum MAI SDA einen niedrigeren Widerstand gegenüber Scherverformung. Dies ist ungünstig, da ein Abscheren der HDPE-Leitung zum Ausfall des gesamten Energieankers führen würde.

Die Anker sind während des Vortriebs den Bedingungen der Baustelle ausgesetzt, es besteht das Risiko von Beschädigungen. Vor Einbau der HDPE-Rohre für die Absorberflüssigkeit sind die Anker auf ihre Dichtigkeit zu prüfen. Es besteht das Risiko, dass die Anker infolge von Gebirgsverformungen während des Vortriebs ebenfalls deformiert werden und ein Einbau von Absorberrohren in die Anker erschwert wird.

Anker, die als Stützmittel im Vortrieb eingebaut werden, sind prinzipiell Temporäranker und dementsprechend nicht speziell korrosionsgeschützt. Bei einem langfristigen Einsatz (>2 Jahre) der Anker als Hüllrohr für Absorberleitungen sind Korrosionserscheinungen zu erwarten. Die Dichtigkeit des Ankers ist nicht mehr gewährleistet. Bei Verwendung einer Koaxialsonde hat dies keinen Einfluss auf den Absorberkreislauf, da die Koaxialsonde in sich dicht ist und der Anker nur als Hüllrohr dient. Bei Verwendung von HDPE-Rohren besteht jedoch das Risiko von Flüssigkeitsverlusten beim Rücklauf der Absorberflüssigkeit durch die Ankerhülle. Alternativ ist der Einsatz von nicht korrodierenden GFK-Ankern denkbar. Die Materialkosten von GFK-Ankern sind im Vergleich zu Stahlankern jedoch nach wie vor deutlich höher.

Soll der Energieanker nicht gleichzeitig als Stützmittel verwendet werden, sind weniger Randbedingungen zu berücksichtigen. Es wäre sogar denkbar, im standfesten Fels auf die eigentliche Ankerstange zu verzichten und eine Koaxialsonde direkt in das Bohrloch einzubringen und zu vermörteln.

Bei zweischaligem Tunnelausbau ist zu berücksichtigen, dass die Zu- und Rücklaufleitungen durch die Abdichtung und die Innenschale geführt werden müssen. Die Möglichkeiten wurden bereits in Kap. 3.2.3.1 beschrieben.

Um die gewünschten Ankerlängen zu erreichen, können die Ankerstangen mittels Kupplungsstücken miteinander verschraubt werden. Je nach Ankertyp sind verschiedene Längen möglich. Es kommt zu keiner Querschnittsverengung an den Kupplungsstellen.

Die Anker werden untereinander über Sammelleitungen miteinander verbunden.

3.2.3.3 Energietübbing

Auf die baulich konstruktiven Details eines Energietübbings wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen, da die Entwicklung dieser Fertigteiltechnik bereits weit fortgeschritten ist (vgl. Kap. 2.3.4).

3.2.4 Vor- und Nachteile der Absorbersysteme aus konstruktiver und baumethodischer Sicht

Die nachfolgende Tabelle fasst die Vor- und Nachteile der verschiedenen Absorbersysteme im Hinblick auf konstruktive und baumethodische Belange zusammen.

Absorbersystem	Vorteile	Nachteile
Flächenkollektor	+ Bei zweischaligem Ausbau kein zusätzlicher Arbeitsgang erforderlich	– Durchdringungspunkte durch Innenschale und Abdichtung
	+ Modularität (Austausch einzelner Module möglich)	
Energieanker	+ Für Einbau keine zusätzlichen Installationen erforderlich	– Zusätzlicher Arbeitsschritt für das Einführen der Absorberleitungen in den Anker
		– Durchdringungspunkte durch Innenschale und Abdichtung
Energietübbing	+ Kein zusätzlicher Arbeitsschritt erforderlich, da Elemente vorgefertigt	

Abb. 3.36 Vor- und Nachteile der Absorbersysteme

3.3 Thermische Anforderungen

3.3.1 Definition von möglichen Wärme-/Kälteentzugsprofilen

Oberflächennahe Absorbersysteme werden üblicherweise zur Wärmeversorgung von Gebäuden oder zur kombinierten Versorgung mit Wärme und Kälte eingesetzt. Da die Wärme aus dem oberflächennahen Untergrund für eine direkte Raumheizung zu geringe Temperaturen aufweist (ca. 10-20°C, bei üblicherweise einer Vorlauftemperatur der Heizung von 35°C), bedingt diese Wärmenutzung immer den Einsatz von Wärmepumpen. Damit in der unmittelbaren Umgebung der Absorberelemente keine Frostschäden auftreten, darf die Temperatur des Wärmeträgermediums im Absorbersystem nicht unter -1.5°C absinken. Zu berücksichtigen ist dabei, dass der Wärmeträger dabei mit Frostschutz (häufig Wasser-Ethylenglykol-Mischung) versehen sein muss. Je nach Verhältnissen muss gar eine periodische Abkühlung des Absorbersystems unter 0°C vermieden werden. Die zulässige Minimaltemperatur ist jeweils projektspezifisch abzuklären. Am Ende der Heizperiode ist der Fels um das Tunnelabsorbersystem weitgehend abgekühlt und kann auch zur Kühlung während der Sommermonate eingesetzt werden. Da heute Raumkühlungssysteme bis auf etwa 18°C betrieben werden können, ist es möglich, Kälte direkt aus dem Tunnelabsorbersystem - ohne Einsatz einer Kältemaschine - zu beziehen (Freecooling). Werden tiefere Kühltemperaturen benötigt, so kann es unter Umständen sinnvoll sein, die Abwärme der Kältemaschine im Tunnelabsorbersystem zu speichern.

Wie viel Wärme und Kälte aus einem Tunnelabsorbersystem nachhaltig bezogen werden kann, hängt massgeblich von folgenden Faktoren ab:

	Üblicher Wertebereich
Jahreswärmeentzug und -eintrag grösserer Objekte	100 - 1'000 MWh
Entzugs-/Eintragsprofile während eines Jahres	vgl. Abb. 3.39
Vorlauftemperaturen des Heiz- und Kühlbedarfs	Heizen: 30°C - 50°C Kühlen: 14°C - 18°C
Initiale Bodentemperatur (städtische Tunnel)	6°C - 15°C
Tunnellufttemperatur	0°C - 25°C
Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes	1.5 - 3 W m ⁻¹ K ⁻¹
COP (besser: Kennlinien) der Wärmepumpen und Kältemaschinen	3 - 5
Art, Anordnung und Materialien der Tunnelabsorbersysteme	

Abb. 3.37 Einflussfaktoren

Es werden hier zwei grundsätzliche Arten von Wärme-/Kältenutzungen betrachtet, wie sie bei anderen untiefen Geothermienutzungen (v.a. Erdwärmesonden) weit verbreitet sind und daher auch als attraktiv gelten können.

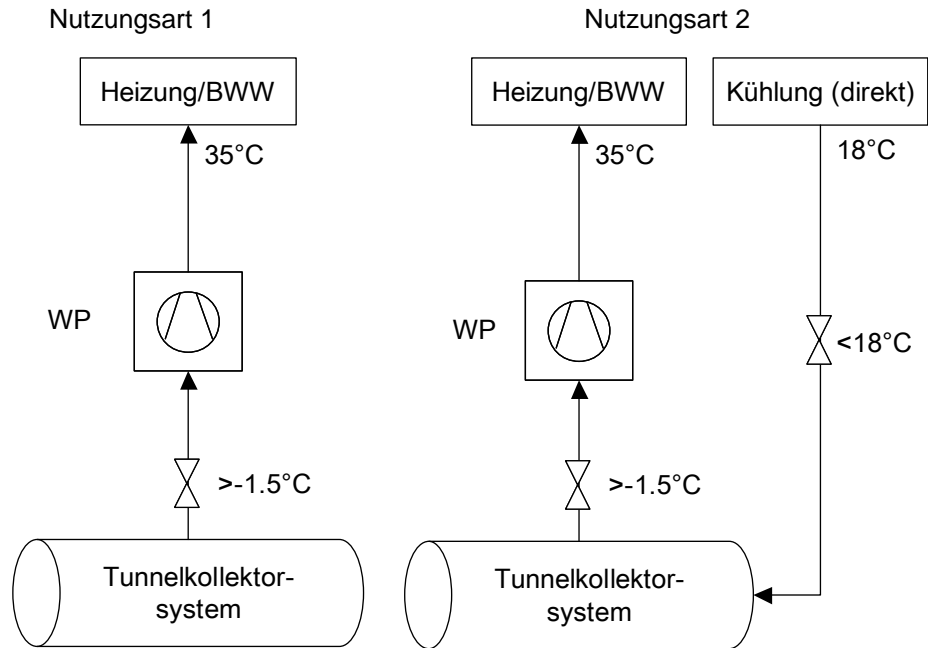


Abb. 3.38 Betrachtete Wärme-/Kältenutzungsarten für ein Tunnelkollektorsystem; links reine Wärmenutzung, rechts Wärme- und Kältenutzung

Bei einer monovalenten Anlage ist der Wärme- und Kältebedarf durch die zu versorgenden Gebäude vorgegeben. Bei unterirdischen Speichersystemen ist insbesondere die Verteilung der Lasten über das Jahr entscheidend, wie der Verlauf der Absorberrtemperatur über ein Jahr in Abb. 3.42 und Abb. 3.45 zeigt. In Abb. 3.39 sind zwei für das Schweizer Mittelland übliche monatliche Wärme- resp. Wärme-/Kälteentzugsprofile dargestellt, entsprechend den beiden Nutzungsarten in Abb. 3.38.

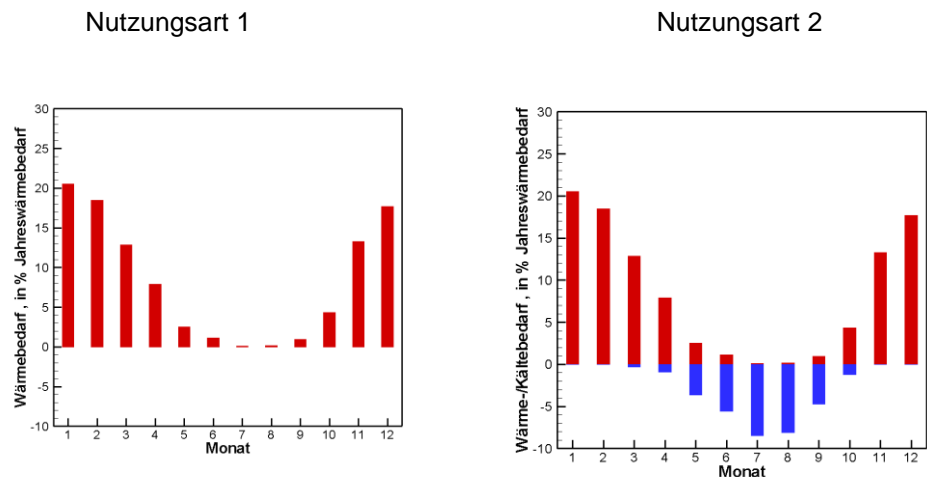


Abb. 3.39 Angenommene monatliche Entzugsprofile von Wärme allein (Nutzungsart 1) und Wärme und Kälte (Nutzungsart 2) über ein Jahr

Aus der Art der Wärme-/Kältenutzungen ergeben sich obere und untere Temperaturgrenzwerte für das Wärmetauscherfluid im Tunnelkollektorsystem. Das Tunnelkollektorsystem ist so zu dimensionieren, dass für ein vorgegebenes Bedarfsprofil an Wärme und Kälte die Fluidtemperaturen stets innerhalb dieser beiden Grenzwerte bleiben. Abb. 3.40 gibt die Temperaturgrenzwerte für einen Betrieb mit Frostschutz wieder. Wird anstelle eines Frostschutzgemischs reines Wasser verwendet, so liegt die untere Grenztemperatur bei ca. 4.5°C.

Nutzungsart	Untere Grenztemperatur	Obere Grenztemperatur
1. Reiner Wärmeentzug	- 1.5°C	keine
2. Wärmeentzug + Freecooling im Sommer	- 1.5°C	18°C

Abb. 3.40 Untere und obere Temperaturrandbedingung eines Absorbersystems für die beiden Nutzungsarten

Die Berechnungen werden in Stundenschritten durchgeführt. Dies ist vor allem beim Kühlbetrieb mit direkter Kühlung (Freecooling = Kühlung ohne Einsatz einer Kältemaschine) wichtig, da bei einer Temperaturübertretung im Tunnelkollektorsystem über 18°C die Kühlung abgeschaltet, resp. reduziert werden muss. Dadurch erholt sich die Temperatur des Tunnelkollektorsystems und die Kühlung kann wieder eingeschaltet werden.

3.3.2 Beispiel Nutzungsart 1 (reiner Wärmeentzug)

Ein Beispiel einer Berechnung eines reinen Wärmeentzugs mit einer Wärmepumpe (Nutzungsart 1) ist in Abb. 3.41, Abb. 3.42 und Abb. 3.43 dargestellt. Das Tunnelkollektorsystem besteht aus einem radialen Fächer von 16 Energieankern zu je 12 m Länge. Deutlich zu sehen ist der starke Temperatureffekt im Tunnelkollektorsystem während einzelnen Leistungsspitzen (Abb. 3.41) im Winter und im Sommer. Über mehrere Jahre gerechnet zeigt sich aber auch, dass (bei diesem Tunnelkollektorsystem) die Maximal- und Minimaltemperaturen nach wenigen Jahren einen praktisch konstanten Wert erreichen. Die Annahme dafür ist, dass der Wärme- und Kältebedarf jedes Jahr derselbe ist, was nur bedingt der Fall sein dürfte. Bei einer monovalenten Anlage wäre daher eine gewisse Überdimensionierung des Tunnelkollektorsystems zu empfehlen. Die Minimaltemperatur unterschreitet hier auch nach 20 Jahren gleich bleibender Nutzung 5.5°C nur unwesentlich. Für das Lastprofil aus Abb. 3.41 wäre das hier gewählte Tunnelkollektorsystem also eher überdimensioniert, da bei einem mit Ethylenglykol versetzten Wärmeträgerfluid bis auf - 1.5°C abgekühlt werden könnte. Für Wasserbetrieb wäre das Kollektorsystem richtig ausgelegt.

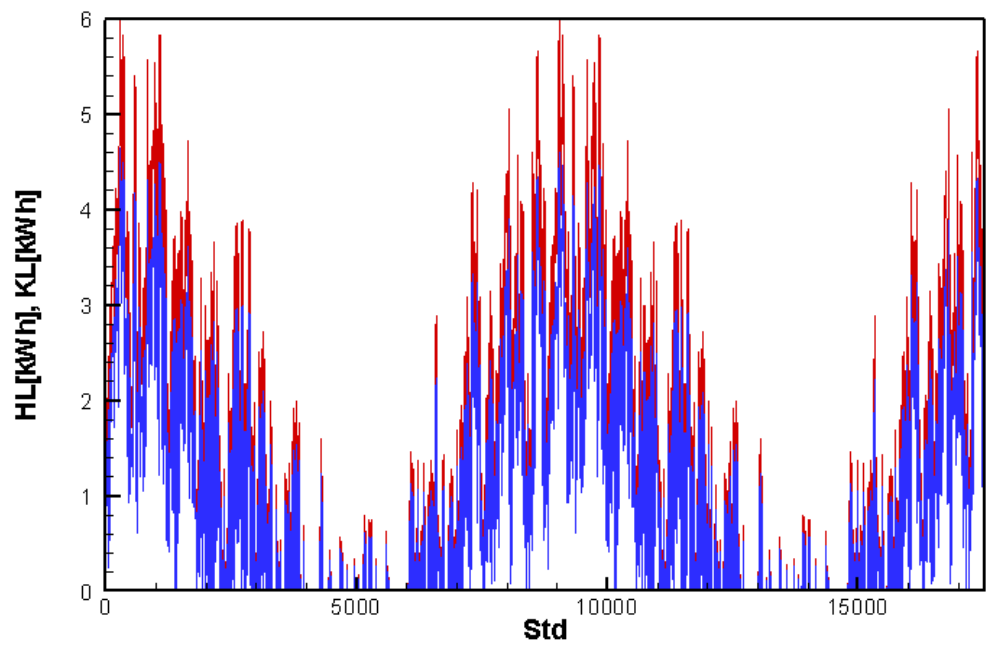


Abb. 3.41 Beispiel eines stündlichen Wärmebedarfs (rot) mit der entsprechenden WP-Entzugsleistung (blau) aus dem Tunnelkollektorsystem über die ersten 2 Jahre

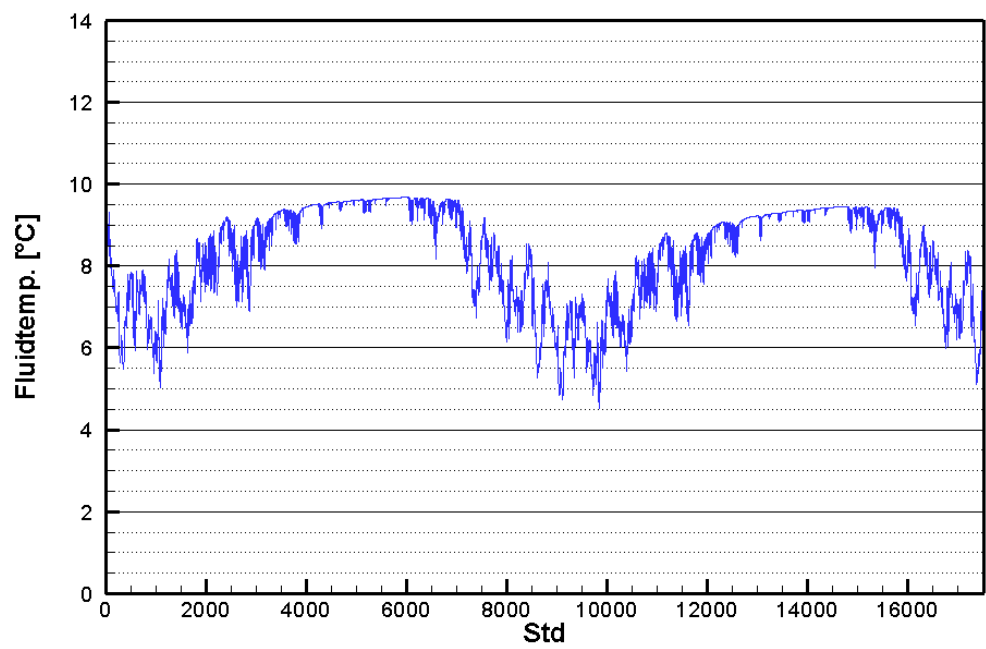


Abb. 3.42 Beispiel reines Heizen: Mittlere Fluidtemperatur über die ersten 2 Jahre

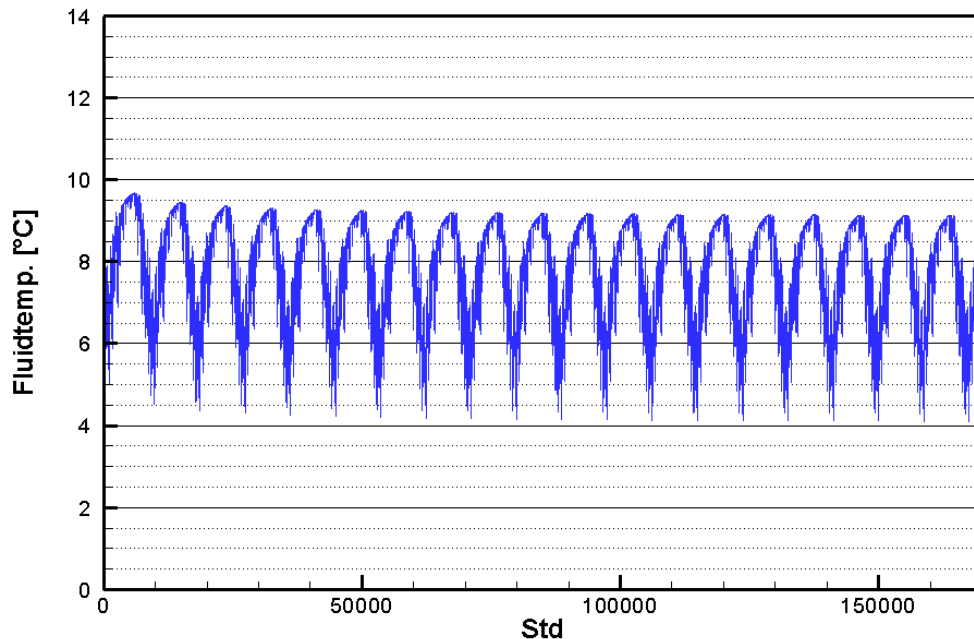


Abb. 3.43 Beispiel reines Heizen: Mittlere Fluidtemperatur über 20 Jahre

3.3.3 Beispiel Nutzungsart 2 (Wärme- und Kälteentzug)

Wird zum selben Wärmeentzug wie oben noch eine Direktkühlung während des Sommers hinzugefügt, so erwärmt sich die Fluidtemperatur im Tunnelkollektorsystem während des Sommers signifikant, während im Winter die Minimalwerte leicht weniger ausgeprägt werden. In Abb. 3.45 ist ersichtlich, dass im Sommer infolge des Kühlbetriebs die Temperaturen gegen 12°C erreichen, im Gegensatz zum reinen Heizbetrieb, wo die Temperaturen im Sommer 10°C nicht überschreiten (Abb. 3.42). Die Grafiken der Fluidtemperaturen im Sommer zeigen auch, dass mit der hier gewählten Kühllast von 33% der Wärmelast der für eine Raumkühlung zulässige obere Grenzwert der Vorlauftemperatur von 18°C nicht erreicht wird. Dieses Tunnelkollektorsystem könnte also bei diesem Wärmebedarf während der Heizphase noch mehr direkte Kühlung während des Sommers bereitstellen. Dies ist vor allem attraktiv für heutige Bürogebäude, die grössenordnungsmässig einen Kühlbedarf haben der mindestens gleich gross ist wie der Heizbedarf.

3.3.4 Nachhaltigkeit und Einflussradius

Bei beiden Nutzungsarten, reiner Wärmeentzug als auch kombinierter Wärme-/Kälteentzug, zeigen die Berechnungen, dass ein Tunnelkollektorsystem schon nach wenigen Jahren ein nachhaltiges Temperaturverhalten aufweist. Dies basiert auf der Nähe zur Tunnelwand, die als konstante Temperaturrandbedingung angenommen wurde. Das nachhaltige Verhalten ergäbe sich auch, wenn die Tunnellufttemperatur einen Jahresgang aufweist. Ein Jahresgang der Tunnellufttemperatur würde sich aber je nach Art des Absorbersystems in ausgeprägteren Temperaturmaxima und -minima zeigen.

Der thermische Einflussradius (Temperaturänderung < 1K) eines Tunnelkollektorsystems liegt bei reinem Wärmeentzug bei ca. 30 m, bei kombiniertem Wärme- und Kälteentzug bei ca. 10 m.

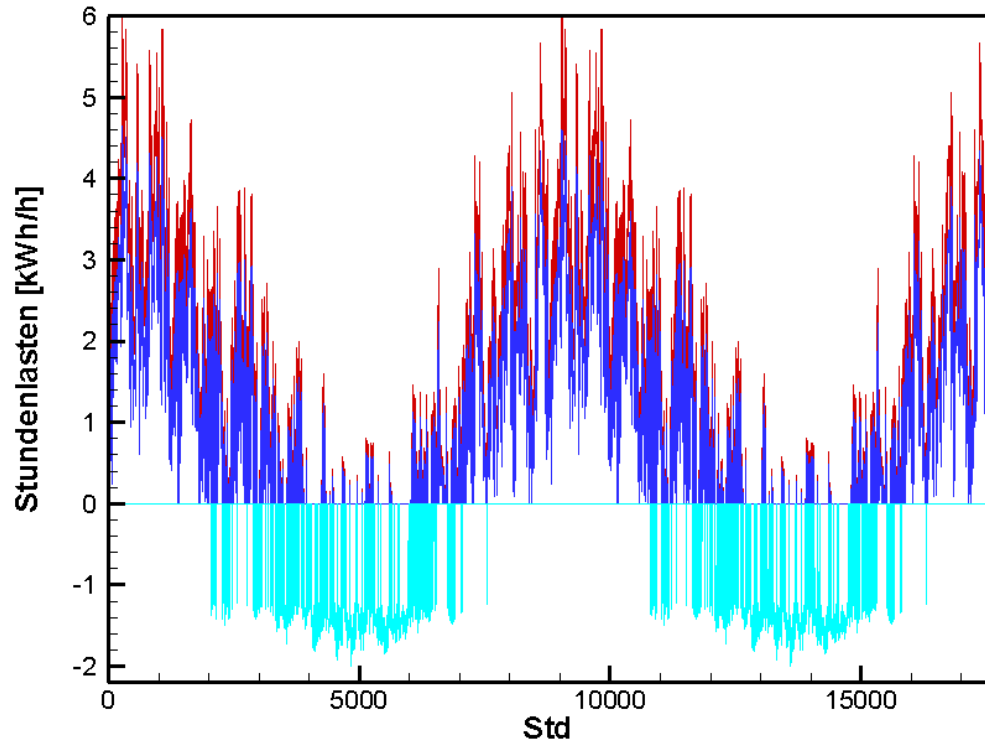


Abb. 3.44 Beispiel eines stündlichen Wärmebedarfs (rot) mit der entsprechenden WP-Entzugsleistung (blau) über die ersten 2 Jahre sowie des angenommenen stündlichen Kältebedarfs im Sommer (hellblau)

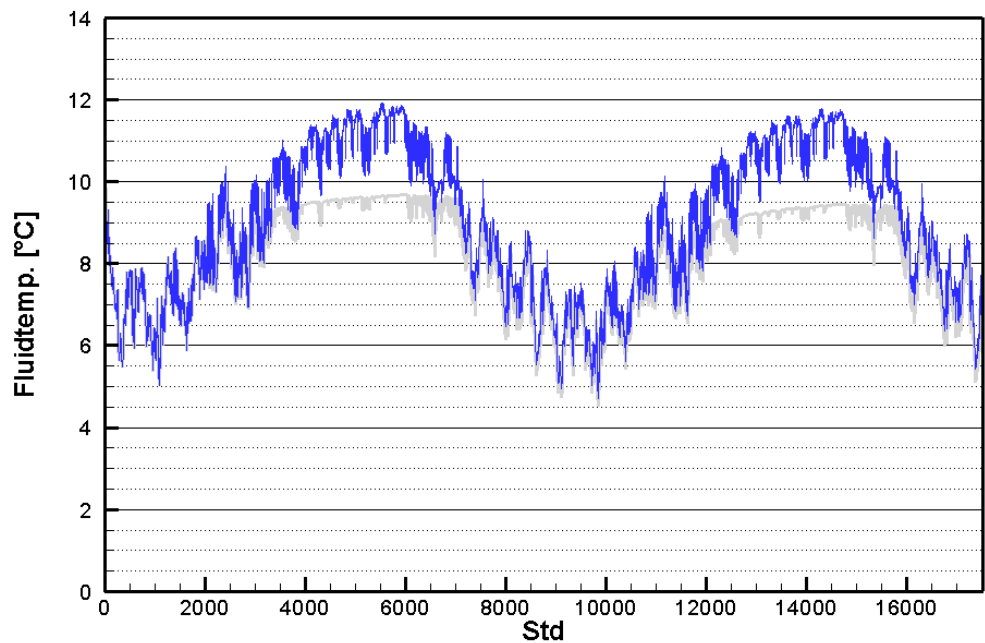


Abb. 3.45 Beispiel Heizen und Kühlen: Mittlere Fluidtemperatur über die ersten 2 Jahre, hellgrau die Temperatur aus Nutzungsart 1 (nur Heizen)

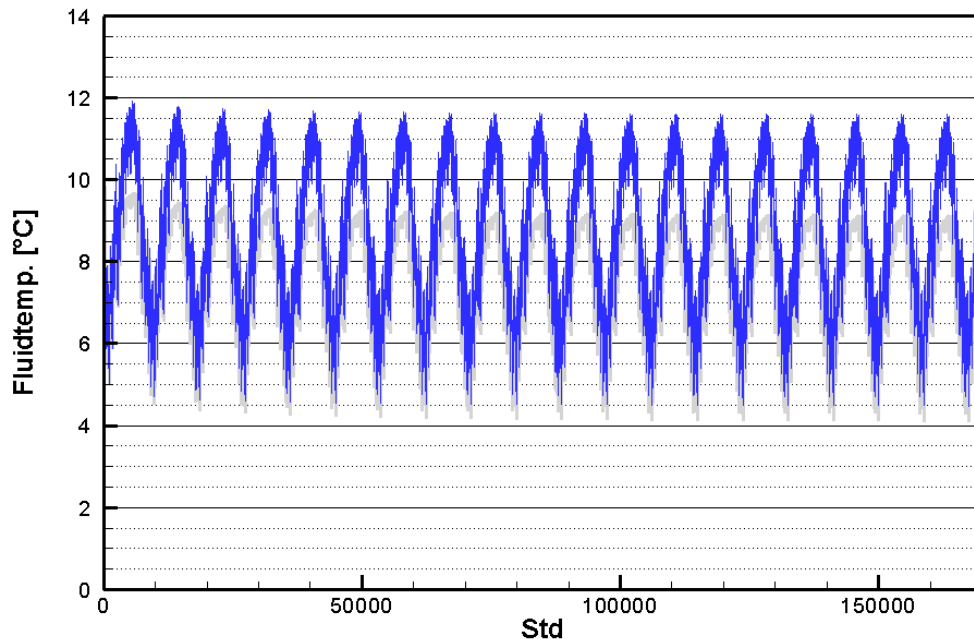


Abb. 3.46 Beispiel Heizen und Kühlen: Mittlere Fluidtemperatur über 20 Jahre, hellgrau die Temperatur aus Nutzungsart 1 (nur Heizen)

3.3.5 Modelle der Kollektorsysteme

Die Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Tunnelkollektorsystems wird anhand von zwei Grundtypen durchgeführt:

- Energieankersysteme
- Flächenkollektorsysteme

Die Tunnelwandtemperatur wird als über das Jahr konstant angenommen. Bei einer längerfristigen Nutzung hat dies einen bedeutenden Effekt auf die Entzugsleistung.

3.3.5.1 Energieankersysteme

Das hier betrachtete Energieankersystem besteht aus Ankern à 6 m oder 12 m Länge, die radial bzw. senkrecht von der Tunnelwand aus in Bohrungen von 51 mm Durchmesser installiert werden (Abb. 3.47). Der Energieanker ist als Koaxialsonde konstruiert. Das zentrale Steigrohr aus PE100 (Aussendurchmesser 20 mm, Innendurchmesser 16 mm) wird in den Stahlanker eingebracht. Der Stahlanker (Aussendurchmesser 32 mm, Innendurchmesser 24 mm) dient als Aussenringraum. Der Hohlraum zwischen Bohrung und Stahlanker wird z.B. mit einer Zement-Hinterfüllung abgedichtet. Die Leistungsfähigkeit von zwei Installationsvarianten in einem runden Tunnelprofil wird berechnet.

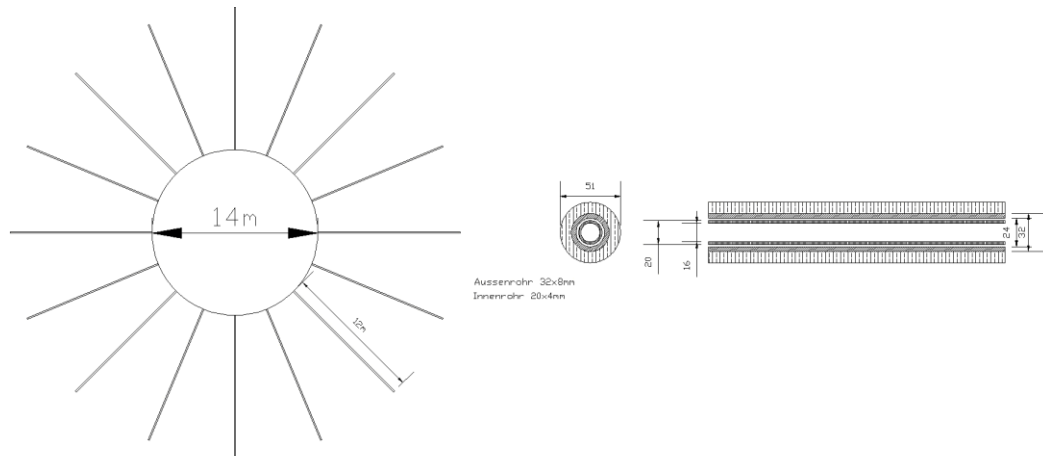


Abb. 3.47 Energieankersystem mit 16 Anker à 12 m Länge, links Querschnitt senkrecht zur Tunnelachse, rechts Längs- und Querschnitt Energieanker (Bemassung in mm)

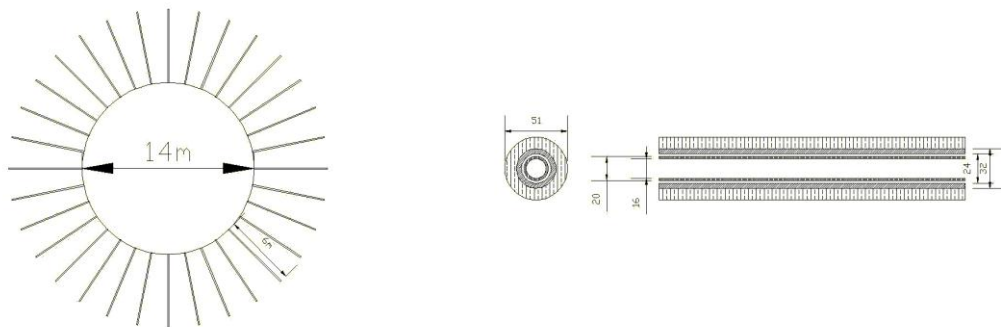


Abb. 3.48 Energieankersystem mit 32 Anker à 6 m Länge, links Querschnitt senkrecht zur Tunnelachse, rechts Längs- und Querschnitt Energieanker (Bemassung in mm)

3.3.5.2 Flächenkollektorsysteme

Beim Flächenkollektorsystem befindet sich der Wärmetauscher 30 cm hinter der Tunnelwandoberfläche. Das thermische Verhalten der Flächenkollektorsysteme wird für rechteckige (Abb. 3.49) und runde Tunnelprofile (Abb. 3.50) untersucht. Dabei werden Systeme mit und ohne Isolationsschicht (Dicke 10 cm, Wärmeleitfähigkeit 0.05 W/m/K) zwischen Tunnelwandoberfläche und Wärmetauscher berechnet. Eine Abschätzung des Effektes einer anderen Isolationsschichtstärke ist in der Zusammenfassung angegeben. Die Modelle mit Isolationsschicht dienen vor allem der Abschätzung des Einflusses der Tunnellufttemperatur auf die Absorberleistung. Dies soll qualitative Aussagen zu verschiedenen konstruktiven Varianten ermöglichen.

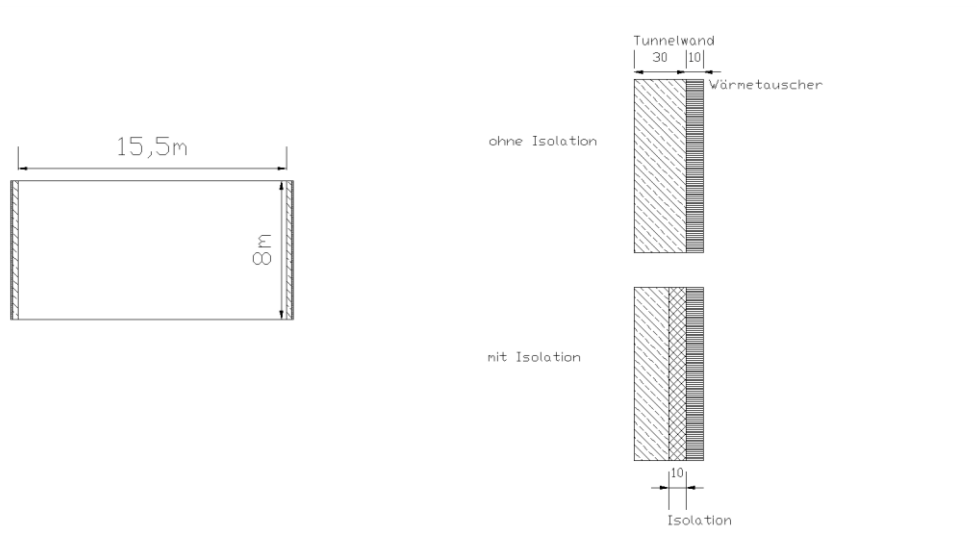


Abb. 3.49 Rechteckiges Tunnelprofil: Flächenkollektorsystem mit zwei Wärmetauschern in beiden Tunnelwänden, links Querschnitt senkrecht zur Tunnelachse, rechts Vergrößerung Querschnitt durch Flächenkollektorsystem (Bemassung in cm)

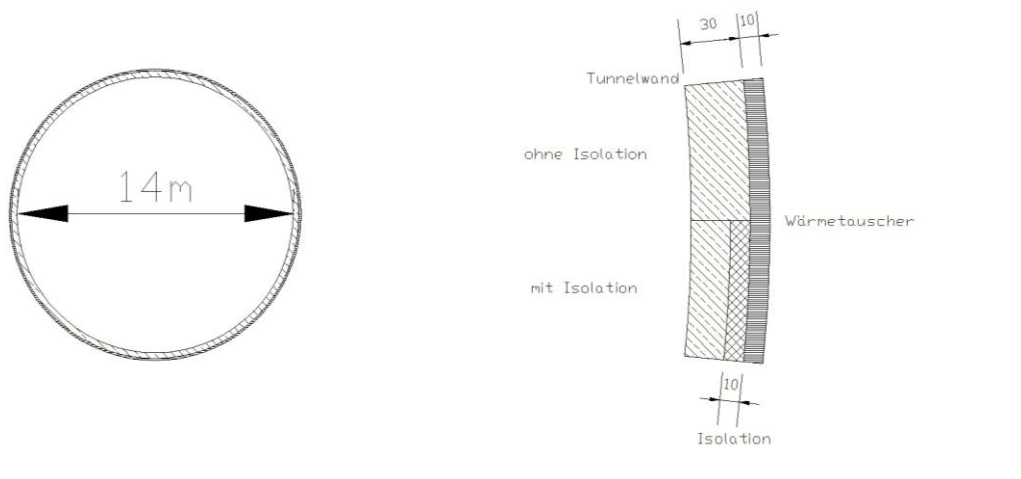


Abb. 3.50 Rundes Tunnelprofil: Flächenkollektorsystem mit Wärmetauscher rundum in der Tunnelwand, links Querschnitt senkrecht zur Tunnelachse, rechts Vergrößerung Querschnitt durch Flächenkollektorsystem (Bemassung in cm)

3.3.6 Hydraulik des Energieankersystems

Aufgrund des engen Ringraums zwischen Ankerrohr und Steigrohr beim Energieankersystem ist der hydraulische Druckverlust im Aussenrohr von entscheidender Bedeutung für die Wahl der hydraulischen Anbindung der Einzelsysteme. In Abb. 3.51 ist der hydraulische Druckverlust eines definierten Energieankers für verschiedene Volumenströme berechnet. Der hier dargestellte Druckverlust ist nur ein Beispiel, er kann bei einer konkreten Ausführungsplanung durch eine geeignete Wahl von Rohrdurchmessern optimiert werden.

Aussenrohr Innendurchmesser	24	mm	Stahl
Aussenrohr Wärmeleitfähigkeit	42	W/m/K	Stahl
Innenrohr Innendurchmesser	16	mm	PE
Innenrohr Wärmeleitfähigkeit	0.4	W/m/K	PE
Länge	12	m	
Wärmetauscherfluid	Ethylenglykol	20%	
Temperatur	0	°C	
Dichte Fluid	1036	kg/m ³	
Wärmekapazität Fluid	3.9046	kJ/kg/K	
Kinemat. Viskosität Fluid	3.49	mm ² /s	
Temperaturspreizung	3	K	
Rauhigkeit aller Rohre	0.03		

Volumenstrom [L/s]	Druckverlust [kPa] Innenrohr	Druckverlust [kPa] Ringraum	Druckverlust total [kPa]	Hydr. Leistung [W]	Rb,eff [K/m/W]	Therm. Leistung [W]
0.01	0.2	9.4	9.6	0.10	0.104	121.4
0.02	0.5	18.8	19.3	0.39	0.0432	242.7
0.03	0.8	28.2	29.0	0.87	0.0318	364.1
0.04	1.1	37.6	38.7	1.55	0.0278	485.4
0.05	1.3	47.0	48.3	2.42	0.026	606.8

Abb. 3.51 Hydraulik eines Energieankers 24 mm

Bei einer angenommenen Temperaturspreizung von 3K zwischen Ein- und Austritt des Energieankers entspricht ein Volumenstrom von beispielsweise 0.05 L/s (=180 L/h) einer thermischen Leistung von 607 W (= 51 W/m) pro Anker. Die hydraulische Leistung beträgt unter diesen Bedingungen 2.4 W. Die elektrische Aufnahmeleistung einer Umwälzpumpe (Annahme Wirkungsgrad z.B. 40%) beträgt für 2.4 W hydraulische Leistung somit 6 W, d.h. 1% der thermischen Leistung von 607 W.

3.3.7 Untergrundparameter, Wärmeträgerfluid

Die thermische Leistungsfähigkeit eines Tunnelkollektorsystems hängt nebst der Nutzungsart und den Bedarfsprofilen auch von Untergrundparametern und der Art des Wärmeträgerfluids ab. Dazu werden hier mittlere Werte für einen typischen städtischen Tunnel im Schweizer Mittelland angenommen; als Wärmeträgerfluid wird ein Wasser-Ethylenglykol-Gemisch vorausgesetzt.

Parameter	Wert	Einheit
Mittlere Tunneltemperatur	10	°C
Wärmeträgerfluid	Wasser mit 20% Ethylenglykol-Anteil	
Mittlere Bodentemperatur	10	°C
Wärmeleitfähigkeit Boden	2.0	W/m/K

Abb. 3.52 Angenommene Parameter

3.3.8 Thermische Leistung eines Energieankersystems

Energieankersysteme bestehen aus Fächern von beispielsweise 16 x 12 m langen Ankern, die in einem gewissen Abstand zueinander mit einer gewissen Anzahl entlang der Tunnelachse wiederholt installiert werden.

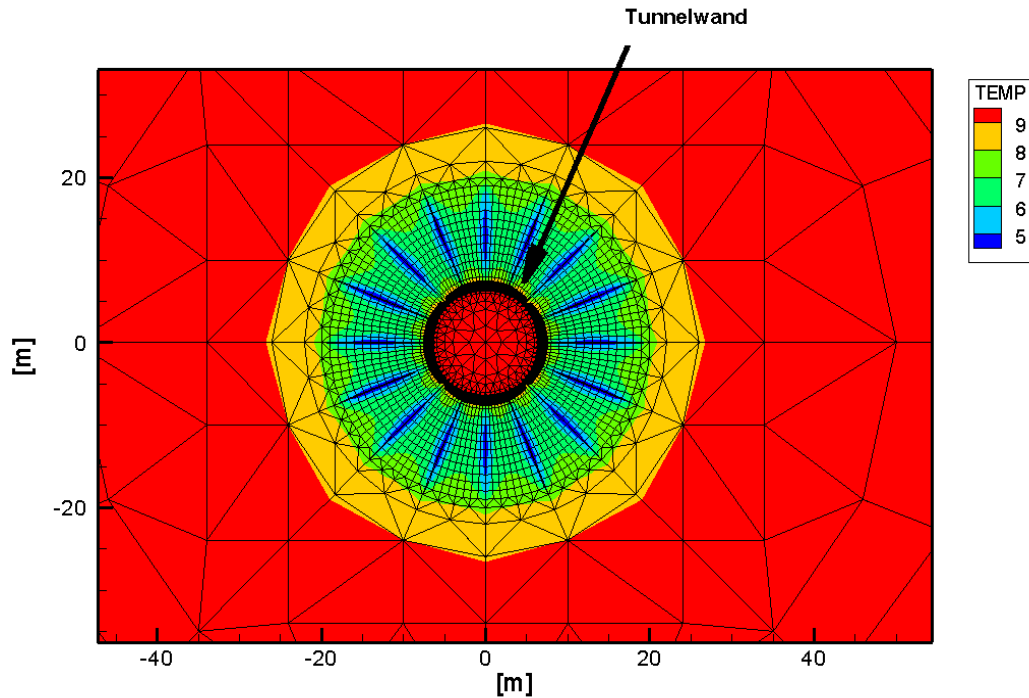


Abb. 3.53 Beispiel einer Temperaturverteilung im Fels infolge eines 16 x 12 m Energieankersystems bei Wärmeentzug, nach 50 Betriebsjahren

Die Resultate der Berechnungen zeigen, dass über 20 Jahre Nutzungsdauer ab einem Abstand von etwa 10 m zwischen den Fächern keine bedeutende Verbesserung der Entzugsleistung pro Ankermeter mehr erzielt werden kann. Unter 10 m Abstand sinkt die Entzugsleistung aufgrund der gegenseitigen thermischen Beeinflussung signifikant (Abb. 3.54).

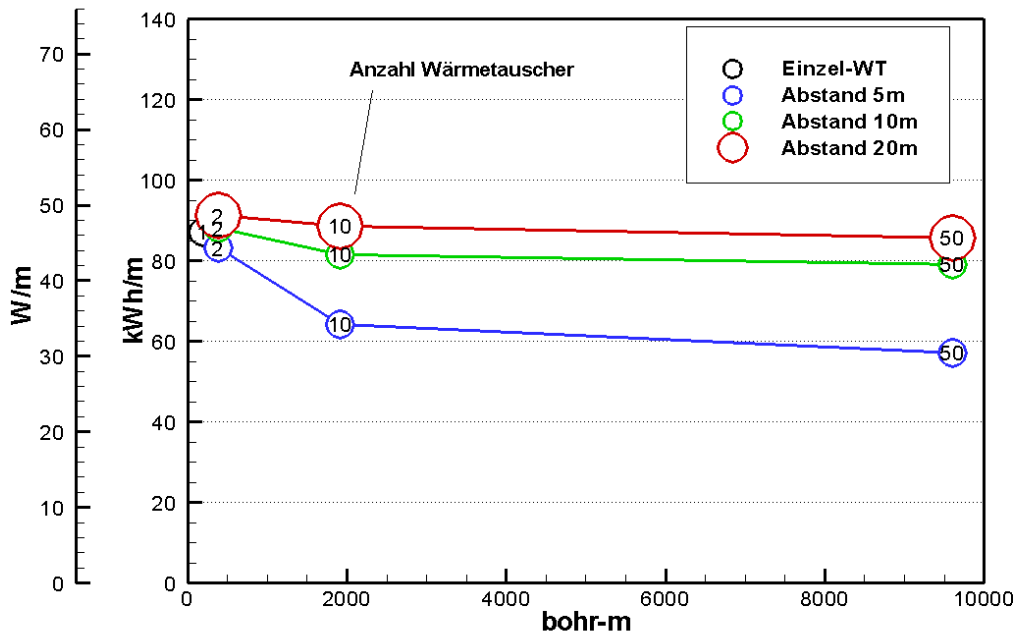


Abb. 3.54 Nutzungsart 1 (nur Wärmeentzug): Maximaler spezifischer Wärmeentzug/Leistung aus dem Energieankersystem $16 \times 12 \text{ m}$, betrieben mit einem Wasser-Ethylenglykol-Gemisch (20%), für eine reine Wärmenutzung als Funktion der Ankermeter, Anzahl Ankerfächer und Fächerabstand, nach 20 Jahren

Wird dem Energieankersystem während des Sommers zu einem Drittel auch Kälte entzogen, so verbessert sich einerseits die Entzugsleistung während des Winters, andererseits verringert sich auch der Abstandseffekt (Abb. 3.55). Die Berechnungen zeigen auch, dass für den angenommenen Kühlbedarf während des Sommers von einem Drittel des Heizbedarfs im Winter die kritische Direktkühltemperatur von 18°C im Absorbersystem nie erreicht wurde. Unter den hier angenommenen Randbedingungen ist es daher möglich, mehr Kühlung im Sommer direkt aus dem Absorbersystem bereitzustellen. Wäre es möglich, eine Nutzung mit einer ausgeglichenen Jahresbilanz des Wärme- und Kälteentzugs zu haben, so lässt sich einerseits die thermische Leistungsfähigkeit des Energieankersystems maximieren, andererseits ergäbe sich ein optimaler Abstand zwischen den einzelnen Fächern von Energieankern, der relativ kurz ist und damit installations-technisch und hydraulisch am attraktivsten.

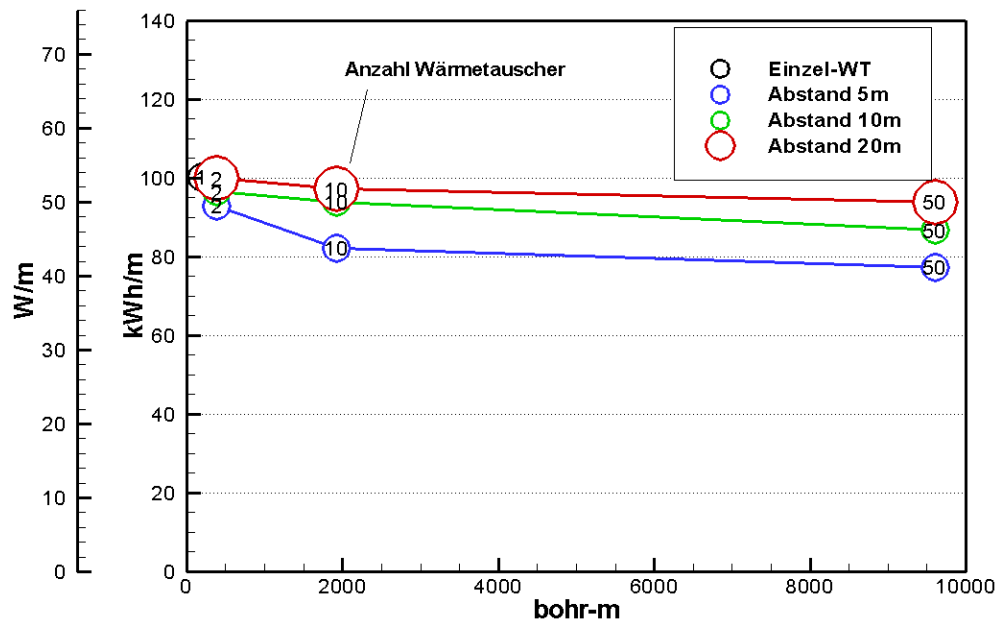


Abb. 3.55 Nutzungsart 2 (Wärme- und Kälteentzug): Maximaler spezifischer Wärmeentzug/Leistung aus dem Energieankersystem 16 x 12 m, betrieben mit einem Wasser-Ethylenglykol-Gemisch (20%), für eine Wärme- und Kältenutzung als Funktion der Ankermeter, Anzahl Ankerfächer und Fächerabstand, nach 20 Jahren

Die entsprechenden Berechnungen für ein Energieankersystem mit 32 x 6 m Ankern pro Fächer zeigen, dass der Unterschied zu einem 16 x 12 m System sehr geringfügig ist. Dies beruht insbesondere auch darauf, dass längerfristig die Entzugsleistung durch die hier als konstant angenommene Tunnelwandtemperatur bestimmt wird.

3.3.9 Thermische Leistung von Flächenkollektorsystemen

Im Gegensatz zu den Energieankern sind die thermischen Effekte bei einem Flächenkollektorsystem hauptsächlich nur zweidimensional.

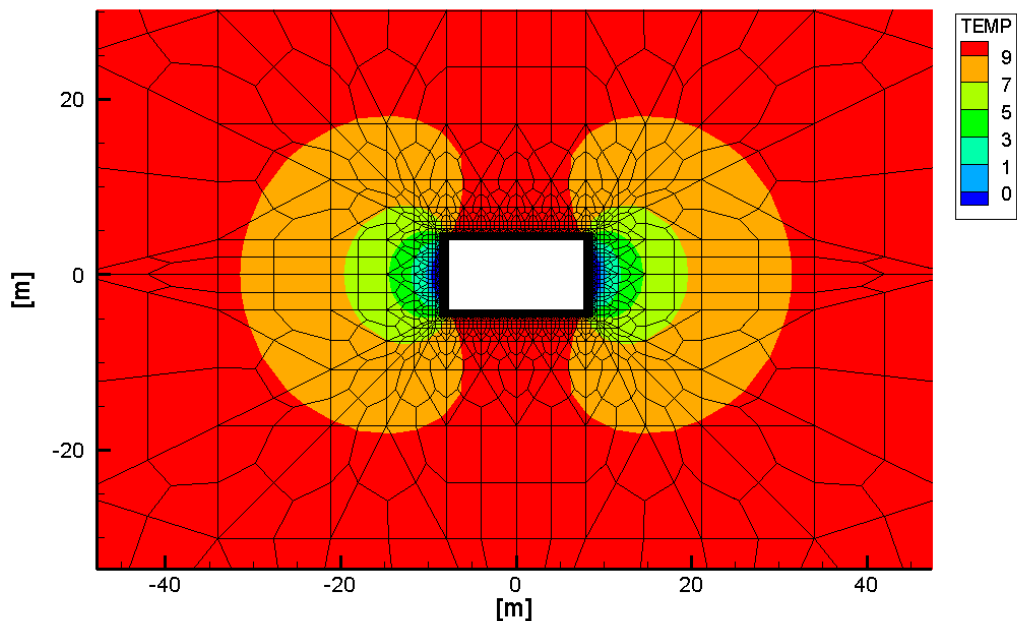


Abb. 3.56 Beispiel einer Temperaturverteilung im Fels infolge eines Flächenkollektorsystems bei Wärmeentzug, nach 50 Betriebsjahren

Daher ist die spezifische Entzugsleistung pro m^2 ab einer relativ kurzen Einbaustrecke bereits unabhängig von der Einbaulänge. Das rechteckige Tunnelprofil bringt eine etwas höhere Entzugsleistung als das runde. Der wesentlichste Unterschied rührt aber vom Bereich zwischen Wärmetauscher und Tunnelinnenraum her. Die Berechnungen wurden für einen Fall durchgeführt, bei dem dieser Bereich aus normalem Beton besteht (=unisoliert) und für einen Fall, wo dieser Bereich eine 10 cm Isolationschicht aufweist (vgl. Abb. 3.49 und Abb. 3.50). Die thermische Entzugsleistung liegt beim nach dem Tunnelinnenraum unisolierten Fall bei $57 - 67 \text{ W/m}^2$, im isolierten Fall bei $16 - 24 \text{ W/m}^2$. Dies deutet darauf hin, dass bei flächigen Absorbersystemen die Konstruktionsart des Bereiches zwischen Absorbersystem und Tunnelinnenraum bedeutend ist. Besteht ein guter thermischer Kontakt zwischen Tunnelinnenraum und Absorbersystem, so werden auch die Tunneltemperatur und deren Variation über das Jahr entscheidend.

Aussenliegende Absorbersysteme, also in Nähe zum Gebirge, bieten sich bei einer geothermischen Nutzung an. Die innen liegende Anordnung ist eher geeignet für die Extraktion tunnelthermischer Energie. Alternativ sind mittlere Lagen denkbar. Die Lage des Absorbersystems beeinflusst dementsprechend die Menge der aufnehmbaren Wärme.

3.3.10 Zusammenfassung Absorberleistungen

Absorbersystem	Tunnel	Nutzungsart H: Heizen K: Kühlen	Abstände zwischen Systemen m	Isolationsschicht gegen Tunnel -	Wärmeentzug pro Ankermeter / Absorberfläche kWh/m bzw. kWh/m ²	Maximale Leistung pro Ankermeter / Absorberfläche W/m bzw. W/m ²
Anker 16 x 12 m	rund, D=14 m	H	5	-	60	35
		H+K	5	-	80	45
		H	>10	-	85	45
		H+K	>10	-	90	50
Anker 32 x 6 m	rund, D=14 m	praktisch gleiche Resultate wie bei 16 x 12 m				
Flächenkollektor 2 x 8 m	rechteckig, H x B = 8 x 15.5 m	H		10 cm	41	22
		H		3 cm	*50	*25
		H		1 cm	*75	*40
		H		-	120	64
		H+K		10 cm	44	24
		H+K		3 cm	*50	*25
		H+K		1 cm	*80	*40
		H+K		-	126	67
Flächenkollektor rundum	rund, D=14 m	H		10 cm	30	16
		H		3 cm	*40	*23
		H		1 cm	*65	*36
		H		-	107	57
		H+K		10 cm	35	19
		H+K		3 cm	*45	*25
		H+K		1 cm	*70	*35
		H+K		-	112	60

Abb. 3.57 Zusammenfassung Absorberleistungen (*Schätzwerte)

3.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeit von Absorbersystemen kann anhand einer Kosten-Nutzen-Analyse beurteilt werden.

Der Nutzen der Anlage wird über die Menge der nutzbaren Wärme bestimmt (siehe Kapitel 3.3.10).

Kosten und Nutzen der verschiedenen Absorbersysteme werden jeweils für eine 100 m lange Tunnelstrecke abgeschätzt. Es werden die in Kap. 3.3.5 beschriebenen Absorbersysteme in die Betrachtung einbezogen.

- Energieanker 1: siehe Abb. 3.47, 16 Anker, Abstand zwischen den Fächern 5 m
- Energieanker 2: siehe Abb. 3.47, 16 Anker, Abstand zwischen den Fächern 10 m
- Energieanker 3: siehe Abb. 3.47, 16 Anker, Abstand zwischen den Fächern 5 m, Verwendung einer geschlossenen Koaxialsonde
- Flächenkollektor 1: siehe Abb. 3.49, Rechteckquerschnitt $B \times H = 15.5 \times 8$ m
- Flächenkollektor 2: siehe Abb. 3.50, Kreisquerschnitt $D = 14$ m
- Flächenkollektor 3: siehe Abb. 3.49, Rechteckquerschnitt, Verwendung einer geschlossenen Koaxialsonde

Für die Energieankersysteme 1 und 2 wird von der Verwendung eines einfachen, im Bohrloch tiefsten offenen HDPE-Rohres ausgegangen, wobei die Stahlhülle des Ankers als Aussenrohr zur Rückleitung der Absorberflüssigkeit dient. Im Energieankersystem 3 wird von einer geschlossenen Koaxialsonde in einer Ankerbohrung ausgegangen.

Anschliessend werden Kosten und Nutzen ins Verhältnis zueinander gesetzt und ein Quotient in CHF/kWh angegeben. Je niedriger der Quotient, umso effizienter ist das Absorbersystem.

In nachfolgender Tabelle sind die Kosten-Nutzen-Quotienten der verschiedenen Absorbersysteme unter Berücksichtigung unterschiedlicher Betriebsszenarien zusammengestellt.

Absorbersystem	Investitionskosten [CHF]	Heizen (isoliert)		Heizen		Heizen und Kühlen (isoliert)		Heizen und Kühlen	
		Nutzen [kWh]	q CHF/kWh	Nutzen [kWh]	q [CHF/kWh]	Nutzen [kWh]	q [CHF/kWh]	Nutzen [kWh]	q [CHF/kWh]
Energieanker 1	380'000			230'000	1.7			307'000	1.2
Energieanker 2	200'000			163'000	1.2			173'000	1.2
Energieanker 3	670'000			230'000	2.9			307'000	2.2
Flächenkollektor 1	190'000	66'000	2.9	192'000	1.0	70'000	2.7	202'000	0.9
Flächenkollektor 2	520'000	132'000	3.9	471'000	1.1	154'000	3.4	493'000	1.1
Flächenkollektor 3	490'000	66'000	7.4	192'000	2.6	70'000	7.0	202'000	2.4
Erdwärmesonde*			1.6*						

* Erdwärmesonde: Schätzung der Bohrpreise für eine EWS-Anlage von 350 kW Heizleistung: ca. CHF 1.60 Investitionen pro kWh gebaut bis Aussenwand Zentrale

Abb. 3.58 Zusammenfassung Kosten-Nutzen-Quotienten

Infolge der deutlich verminderten Wärmeleistungen von isolierten Systemen im Vergleich zu nicht isolierten Systemen sind die Kosten-Nutzen-Verhältnisse der isolierten Systeme schlechter. Generell ist festzustellen, dass die drei betrachteten Flächenabsorbersysteme grundsätzlich geringere Kosten-Nutzen-Verhältnisse aufweisen und damit effizienter sind als die untersuchten Energieankersysteme, unabhängig von der Betriebsart.

Wie der Vergleich zeigt, ist die Verwendung von Koaxialsonden aufgrund des hohen Einzelpreises der Sonden derzeit nicht effizient.

In Abhängigkeit vom Aufbau der Flächenkollektoranlage (Lage der Absorberleitungen und daraus folgender Isolationseffekt) und der Nutzungsart variieren die Kosten-Nutzen-Verhältnisse. Auch für Erdwärmesonden gibt es eine Spanne, in der die Verhältnisse aufgrund der Preise für das Bohren in Abhängigkeit vom Standort der Anlage und der Bodenbeschaffenheit variieren. Es kann jedoch gesagt werden, dass Flächenkollektoranlagen durchaus konkurrenzfähig gegenüber Erdwärmesonden sein können, wie Abb. 3.58 zeigt.

3.5 Systemwahl zur Empfehlung für die Umsetzung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kap. 3.4 zeigt, dass die drei betrachteten Flächenabsorbersysteme grundsätzlich effizienter sind als die untersuchten Energieankersysteme.

Aufgrund dieser Ergebnisse empfehlen wir die Umsetzung eines Flächenkollektorsystems im Pilotprojekt. Das Konzept und das Design des zu testenden Absorbersystems werden im nachfolgenden Kapitel 4, Pilotprojekt, beschrieben.

4 Pilotprojekt

4.1 Zielsetzungen

Das Pilotprojekt hat das Ziel, die hier untersuchten Absorbersysteme und die damit verbundenen Simulationen zu verifizieren.

Weiter soll mit einem Pilotprojekt die Praxistauglichkeit künftiger Absorbersysteme getestet werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden ausserdem wertvolle Hinweise für die Integration von Absorbersystemen in bestehende Tunnel bei der Bauwerkserhaltung liefern.

Der wichtigste Designparameter für ein Absorbersystem bezüglich Leistung und Nachhaltigkeit ist das Wärme- und Kältebedarfsprofil, das über das System gedeckt werden soll. Es ist vorgesehen, das Pilotsystem sowohl auf Wärme- als auch auf Kälteentzug zu testen.

Im Fokus der Untersuchungen des Pilotsystems stehen Flächenkollektoren, da sich diese in bisherigen Untersuchungen bewährt haben und in der Praxis einfacher umsetzbar sind. Da die Lage des Absorbersystems innerhalb des Tunnelausbaus einen wichtigen Einfluss auf den Wärme- und Kälteentzug hat, sollen verschiedene, bautechnisch mögliche Varianten untersucht werden.

Im Pilotprojekt sollen folgende, spezifische, systemabhängige Punkte evaluiert werden:

- Thermischer Widerstand zwischen Wärmeträgerfluid und Umgebung, Einfluss der Hinterfüllung und Lage im Tunnelinnenausbau, Überprüfung der Simulationstechnik durch Vergleich mit Messwerten.
- Einfluss der Materialwahl für den Bereich zwischen Absorberelement und Tunnelinnenraum, Überprüfung der Simulationstechnik durch Vergleich mit Messwerten
- Leitungsdichte in einem Wandelement.
- Effizienz der Installationstechnik.
- Wärmeleitfähigkeit von Firstspaltverpressung.
- Baupraktische Detailkonstruktionen wie beispielsweise Befestigung der Absorberleitungen auf der Abdichtung, Leitungsdurchführungen, -anschlüsse, Betoniertechnik etc.

Aufgrund der geologischen Verhältnisse des VersuchsStollens Hagerbach wird ein Pilot-system im Fels angestrebt.

In dieser Studie wurde aufgezeigt, dass ein Energietübbingsystem für die hiesigen Tunnel nicht zielführend ist. Dies gilt besonders im Hinblick auf eine Sanierung bestehender Tunnel.

Energieanker sind derzeit nicht standardmässig lieferbar. Das System Energieanker wird deshalb nicht im Pilotprojekt untersucht, da der Aufwand für die Entwicklung eines Energieankers derzeit zu hoch ist.

4.2 Konzeptdefinition

4.2.1 Versuchsdesign

Aus den Überlegungen aus Kapitel 3.2.3 ergibt sich für das Pilotsystem die Anforderung, sowohl einen einschaligen wie einen zweischaligen Tunnelausbau zu untersuchen. Die Versuchsstrecken für die verschiedenen Ausbaumethoden sollten im Hinblick auf die Bewertung der Ergebnisse möglichst in gleichen geologischen Verhältnissen liegen. Es wird eine Mindestversuchsdauer von einem Jahr als zielführend erachtet.

Um die Effizienz des Absorbersystems vergleichend zu untersuchen, wird auf eine Variation der Rohrverlegeart verzichtet.

Für die folgenden drei Ausbauarten wird jeweils ein Testfeld eingerichtet:

1. Zweischaliger Ausbau aus Spritzbetonsicherung (Schalendicke 0.15 m) und Ortbetoninnenschale (Schalendicke 0.30 m) mit Abdichtung, Absorberleitung auf Abdichtung.
2. Wie 1. - jedoch Absorberleitung auf Spritzbeton.
3. Einschalige Spritzbetonschale (Schalendicke 0.15 m), Absorberleitung im Spritzbeton.

Die Testfelder werden jeweils in einem Abstand von mind. 4 m zum nächsten Testfeld platziert.

Je Testfeld werden die spezifische Entzugsleistung sowie an verschiedenen Positionen die Temperatur gemessen.

In Abb. 4.59 ist der Aufbau der Testfelder dargestellt.

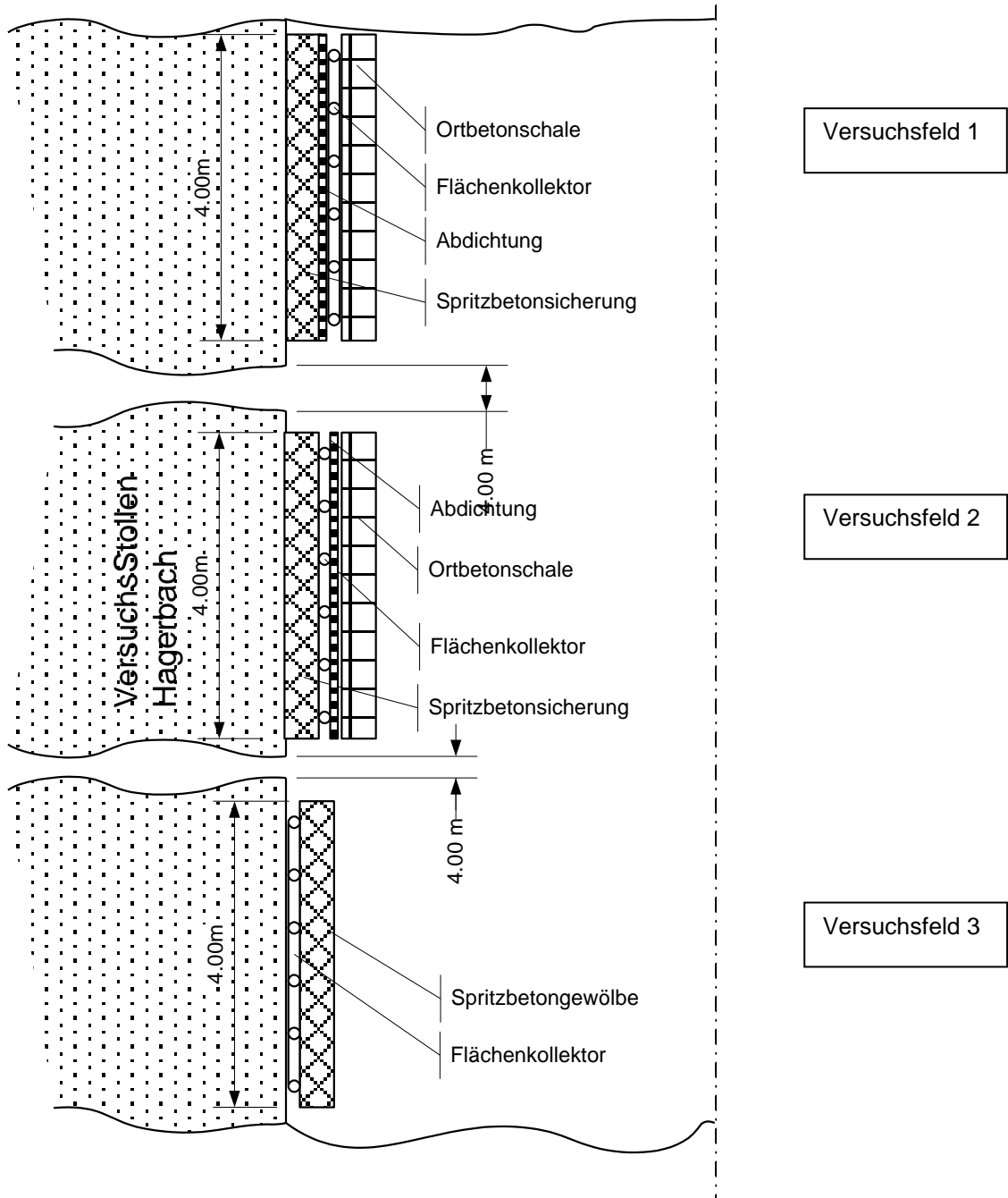


Abb. 4.59 Aufbau der Testfelder

Für das Pilotprojekt ist der folgende Ablauf vorgesehen:

- Aufbau der Testfelder
- Anschluss der Mess- und Regeltechnik
- Anschluss der Testfelder an die Infrastruktur des VersuchsStollens Hagerbach
- Betreiben und Überwachen der Testfelder
- Auswertung der Messdaten

Der Aufbau des Testfeldes 1 erfolgt beispielweise in folgenden Arbeitsschritten:

1. Vorbereiten des Untergrundes
2. Applikation der Spritzbetonsicherung
3. Aufbringen der Abdichtungsfolie
4. Installation des Flächenkollektors zwischen Abdichtung und Ortbetoninnenschale
5. Vorbereitung Schalung für Ortbetonschale bzw. -gewölbe
6. Betonieren Ortbetoninnenschale

Wie bereits in Kap.3.2.3.1 erwähnt, werden im Pilotprojekt verschiedene Möglichkeiten zur Befestigung der Absorberleitungen auf der Abdichtung untersucht.

4.2.2 Entwurf möglicher Standorte im VersuchsStollen Hagerbach

Nachfolgende Grafik zeigt eine Übersicht des Stollensystems des VersuchsStollens Hagerbach.

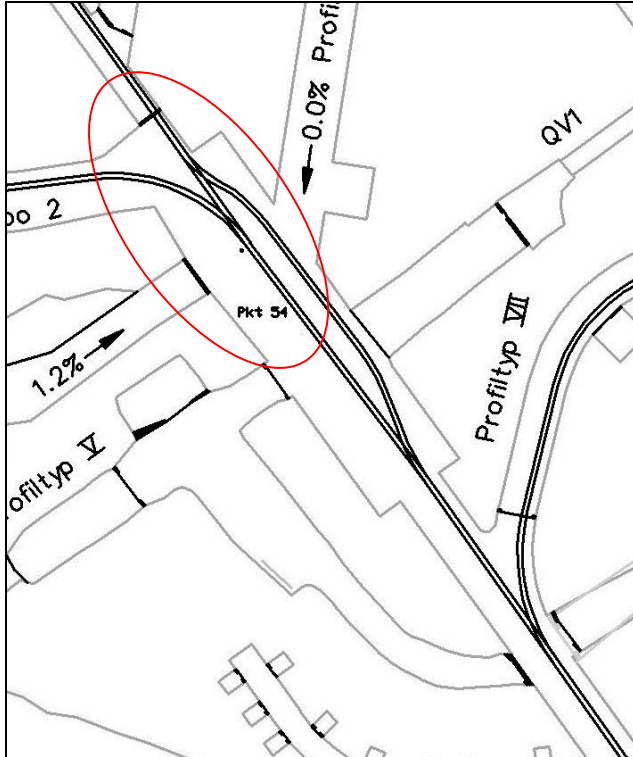


Abb. 4.61 Möglicher Standort Pilotstrecke

Im VersuchsStollen Hagerbach sind verschiedene Tunnelprofile realisiert. Da in diesem Forschungsprojekt der Fokus auf Strassentunneln liegt, bietet sich als Profil der Bereich des Autobahntunnels an. Dieser Standort bietet des Weiteren den Vorteil der Nähe zu einem Wärmeabnehmer im VersuchsStollen Hagerbach, weite Entfernung vom Portal und damit Ausschluss von Portaleffekten.

Ausbruchsfläche mit Rigole = 83.61 m²
 Abwicklung ohne Sohle = 23.54 m'

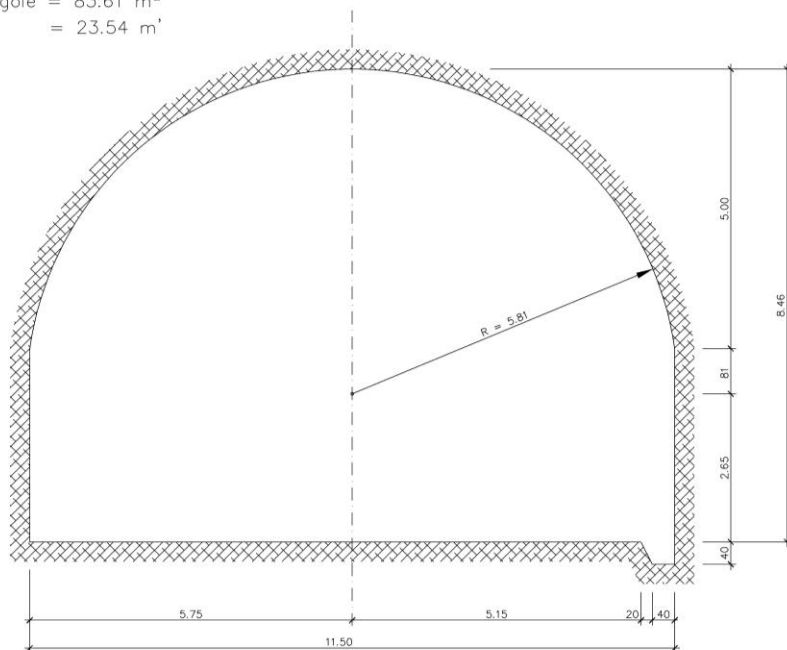


Abb. 4.62 Tunnelprofil Typ XII

4.2.3 Entwurf der Mess- und Regeltechnik

4.2.3.1 Zielsetzung

Die Leistungsfähigkeit jedes Absorbers ist über einen Zeitraum zu erfassen:

- Zum Heizen, d.h. der Absorber wird gekühlt.
- Zum Kühlen, d.h. der Absorber wird geheizt.

Für jeden Absorbertyp sollen folgende Tunnelwasserproblematiken in die Leistungserfassung miteinbezogen werden:

- Es tritt kein Gebirgswasser aus.
- Es tritt Gebirgswasser aus, das abgeleitet wird: D.h., eine gewisse Wasserzirkulation ist hinter dem Absorber vorhanden.

Die Daten sind mit einem FE-Modell auszuwerten. Folgende Parameter sollten voraussichtlich errechnet werden können:

- Widerstandsbeiwert des Absorbers (standortunabhängig):
 - Trocken
 - Hinterflossen
- Wärmeleitfähigkeit des Felsens (standortabhängig).
- Übertragungsfaktor (standortabhängig).

4.2.3.2 Messinfrastruktur

Für die Absorbermessung wird eine Wärmepumpe eingesetzt. Sie ist über die Regelbox so gesteuert, dass eine konstante und definierte Leistung den Absorbern zugeführt werden kann. Sie ist für die Messung bei Kühlbetrieb notwendig, kann aber im gleichen Aufbau auch zum Heizen eingesetzt werden. Die Abwärme, resp. Überschusskälte, wird über den Luftkühler in den Tunnel abgeführt.

Für die Leistungserfassung wird ein Datalogger mit Durchflussmesser und Temperatursensoren (einzeln pro Absorber) eingesetzt. Zusätzlich wird die Felstemperatur in drei Tiefen (z.B. 0,5, 1 und 3 m) in der Lotrechten zur Mitte des Absorbers und die Tunneltemperatur erfasst.

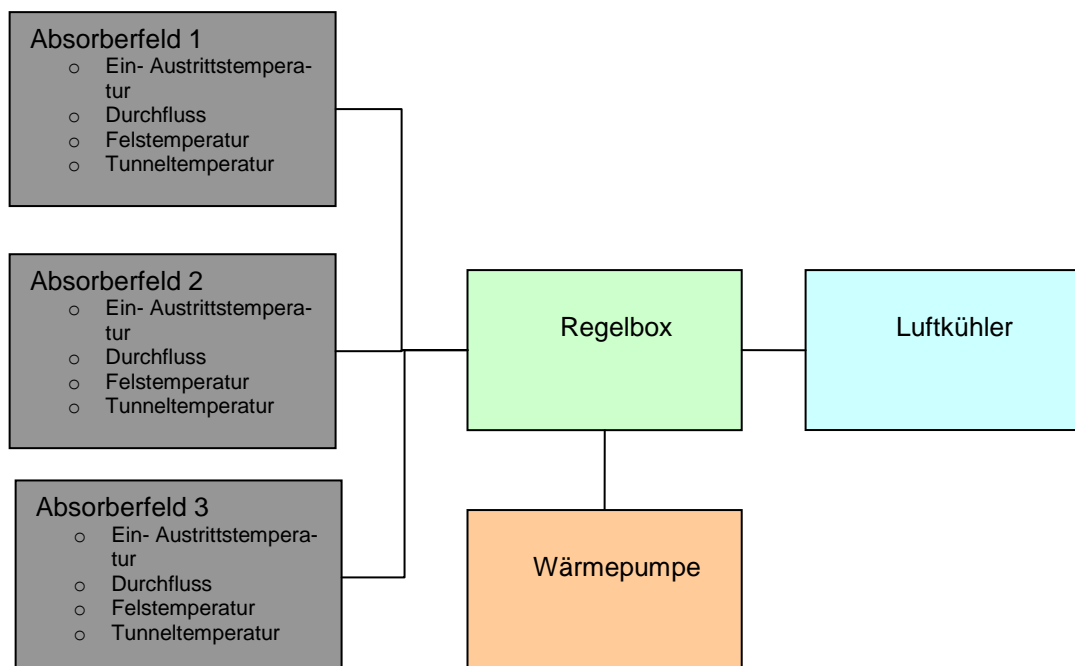


Abb. 4.63 Messaufbau

4.2.4 Kostenschätzung

Die Kosten für die Realisierung des Pilotprojektes wurden basierend auf Erfahrungswerten aus vorangegangenen Projekten im VersuchsStollen Hagerbach auf der Preisbasis 2010 abgeschätzt.

Folgende Aufwände wurden dabei zu Grunde gelegt:

- Absorbersystem, bestehend aus Absorberleitungen, Sammel- und Hauptleitungen, Anschlüssen, Fixierleisten und ggf. Schutzvliesen
- Zuschlag für Rückprall und Frischbetonprüfungen bei Spritzbetonapplikation von 20%.
- Zuschlag für Laborprüfungen bei Ortbeton von 5%
- Überwachung des Testfeldes 1 x wöchentlich
- Infrastruktur Wärmepumpe und Verrohrung
- Infrastruktur Sensoren
- Datenerfassung und Inbetriebsetzung
- Betreuung und Überwachung
- Datenauswertung, Simulation, Bericht

In der nachfolgenden Tabelle wird der potenzielle Aufwand für die Realisierung des Pilotprojektes zusammengefasst.

Pilotprojekt	Kosten in CHF
Bauliche Massnahmen	35'000
Aufwand Absorbersysteme	15'000
Mess- und Regeltechnik (Anschluss, Inbetriebnahme und Auswertung)	125'000
Stollen Flächenverbrauch	50'000
Überwachung Testfeld, inkl. möglicher Kleinreparaturen	10'000
Kosten Pilotstrecke	ca. 235'000

Abb. 4.64 Zusammenstellung Kostenschätzung

Anhänge
I Anhänge..... 76

I Anhänge

Keine.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
SPV	Sprengvortrieb
TBM	Tunnelbohrmaschine
SM	Schildmaschine
MUF	Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels
MUL	Maschinenunterstützter Vortrieb im Lockergestein
WELK	Werkleitungskanal
EWS	Erdwärmesonde
COP	Wirkungsgrad

Literaturverzeichnis

-
- [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, Maschinelles 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] SIA 197 2004 - Projektierung Tunnel Grundlagen
-
- [18] SIA 197/2 2004 - Projektierung Tunnel Strassentunnel
-
- [19] SIA 198 2004 - Untertagbau Ausführung
-
- [20] SIA384/6 2010 - Erdwärmesonden
-

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

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 15.10.2010

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA SBT / FGU 2008/006

Projektitel: Energiegewinnung aus städtischen Tunneln, Systemevaluation

Enddatum: 15.10.2010

Texte:

Zusammenfassung der
Projektresultate:

In diesem Forschungsvorhaben werden insbesondere Strassentunnel und andere innerstädtische Tunnel auf die Anwendung von geothermischen Absorbersystemen geprüft. Dabei werden der derzeitige Stand der Technik im Bereich der Nutzung von geothermischer Energie sowie die bisherigen Forschungs- und Testergebnisse von anderen Projekten wie z.B. Lainzer Tunnel usw. beschrieben.

Im Rahmen der Systemevaluation werden sowohl geothermische, konstruktive, baumethodische als auch wirtschaftliche Abklärungen durchgeführt, um anhand von typischen Tunnelquerschnitten die grundsätzliche Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Absorberelemente wie Energieanker oder Flächenkollektoren zu untersuchen.

In Modellberechnungen werden für Energieankersysteme und Flächenkollektoren verschiedene Nutzungsarten simuliert und die thermischen Leistungen der Systeme ermittelt. Es wird gezeigt, dass der Einfluss einer isolierenden Schicht (z.B. Abdichtungsfolie) zwischen dem Absorbersystem und dem Tunnelinnenraum auf die Absorberleistungen bedeutend ist.

Im Rahmen der Systemevaluation konnte gezeigt werden, dass eine Gewinnung von Wärme und/oder Kälte aus schweizerischen Tunnels gegenüber anderen geothermischen Systemen grundsätzlich umsetzbar und wirtschaftlich konkurrenzfähig ist.

Um die zentralen Fragestellungen an praxisnahen Tests evaluieren zu können, wird ein Pilotprojekt

geplant, in dessen Fokus Flächenkollektoren stehen. Es sollen sowohl geothermische Einflussfaktoren als auch baupraktische Details untersucht werden. Das Versuchskonzept sieht vor, drei verschiedene Testfelder auszurüsten und über ein Jahr hinweg zu beobachten. Abschliessend werden die Gesamtkosten für die Umsetzung des Pilotversuches abgeschätzt.

Zielerreichung:

Die definierten Ziele wurden erreicht.

Folgerungen und
Empfehlungen:

Im Rahmen der Systemevaluation konnte gezeigt werden, dass eine Gewinnung von Wärme und/oder Kälte aus schweizerischen Tunnels gegenüber anderen geothermischen Systemen grundsätzlich umsetzbar und wirtschaftlich konkurrenzfähig ist.

In einem nächsten Schritt sollte das geplante Pilotprojekt ausführungsfähig geplant und anschliessend realisiert werden, um wichtige Fragestellungen im Hinblick auf die Praxistauglichkeit beantworten zu können.

Publikationen:

Schlussbericht

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:	Die Projektziele wurden erreicht indem verschiedene Absorbersysteme unter Berücksichtigung der geometrischen Merkmalen von Tunnelanlagen, der installationslogistischen Praxistauglichkeit und der Wirtschaftlichkeit untersucht wurden. Die Ergebnisse der Systemevaluation und Machbarkeitsuntersuchung, sowie der thermischen Modellrechnungen sind plausibel.
Umsetzung:	Für die praktische Umsetzung sind weiterführende Untersuchungen erforderlich.
weitergehender Forschungsbedarf:	Im Rahmen eines Pilotprojektes sollen geothermische Einflussfaktoren und konstruktive Details näher untersucht werden.
Einfluss auf Normenwerk:	Die Projektergebnisse haben keinen Einfluss auf das Normenwerk.

Präsident Begleitkommission:

Name:	Anagnostou	Vorname:	Georgios
Amt, Firma, Institut:	ETH Zürich		
Strasse, Nr.:	IGT – PF 133		
PLZ:	8093	Email:	georg.anagnostou@igt.baug.ethz.ch
Ort:	Zürich	Telefon:	+41 44 633 3180
Kanton, Land:	Zürich	Fax:	+41 44 633 1097

Unterschrift Präsident Begleitkommission:


Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-	Projekt Nr.	Titel	Datum
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren <i>Procédure analytique d'estimation de la capacité et du niveau de service de carrefours sans feux complexes</i> <i>Analytic procedure to estimate capacity and level of service at complex uncontrolled intersections</i>	2009
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques <i>Initial Projekt - Asphalt-Mischgut mit geringer energetischer und ökologischer Belastung</i> <i>Initial Project - Bituminous mixture with low energy and ecological impacts</i>	2009
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrs- unfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen <i>Affinement des statistiques des accidents de la route par la prise en compte des données de la santé publique</i> <i>Optimization of road traffic accident statistics by consideration of public health care data</i>	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht <i>Rapport de synthèse</i> <i>Synthesis report</i>	2010
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos <i>Estimation du risque pour le réseau</i> <i>Estimation of the network risk</i>	2010
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten <i>Appréciation des risques pour les ouvrages d'art</i> <i>Risk assessment for highway structures</i>	2010
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten <i>Inhibiteurs de corrosion pour la remise en état des ouvrages en béton armé, contaminés par des chlorures</i> <i>Corrosion inhibitors for the rehabilitation of chloride contaminated reinforced concrete structures</i>	2010

632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht <i>Région test - Méthodes pour l'appréciation des risques</i> <i>Rapport final</i> <i>Test region - Methods of risk assessment</i> <i>Final report</i>	2010
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine <i>Neue Bemessungsmethode für Stahlbetonverbundbrücken mit Vollwandträger</i> <i>New method for design of steel-concrete composite plate girder bridges</i>	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat <i>Bases pour l'utilisation du béton de recyclage en granulats de béton</i> <i>Fundamentals for the use of recycled concrete comprised of concrete material</i>	2010
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen <i>Aménagement des feux de signalisation pour les personnes a mobilité réduite ou âgées</i> <i>Traffic control systems - Handicapped and older people at signalized intersections</i>	2010
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie <i>Niveaux de service multimodales de la circulation routière - études préliminaires</i> <i>Multimodal level of service of road traffic - preliminary study</i>	2010
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen <i>Coûts supplémentaires engendrés par l'exécution anticipée ou retardée des mesures d'entretien</i> <i>Additional costs caused by bringing forward or delaying of standard interventions for road maintenance</i>	2010
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés <i>Entwässerung über das Bankett</i> <i>Road runoff on road sides</i>	2010

1288	ASTRA 2006/020	Footprint II- Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1 <i>Footprint II- Langzeit Belag Performance und Umwelt Monitoring an der A1</i> <i>Footprint II- Long terme performance des chaussées et à la surveillance de l'environnement A1</i>	2010
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN <i>Affinité entre granulats et bitume, mise en application nationale de la EN</i> <i>Affinity between aggregate and bitumen, national implementation of the EN</i>	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen <i>Modèles de conduite sur autoroutes surchargées</i> <i>Speed patterns on congested highways</i>	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux <i>Bestimmung der Anwesenheit und Wirksamkeit von Haftmittel im Asphaltbeton</i> <i>Determination of the presence and efficiency of adhesion agent in asphalt concrete</i>	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk <i>Répétabilité et reproductibilité de la résistance à la compression des granulats en vrac</i> <i>Repeatability and Reproducibility of the compressive Strength on the Stack</i>	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden <i>Base de projet pour installations de feux de circulation et guide</i> <i>Design basics for traffic light systems and guidelines</i>	2010
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen <i>Adhérence sur les chaussées hivernales</i> <i>Skid resistance of winter road surfaces</i>	2010
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung <i>Speed on upgrades and downgrades; revision</i> <i>Les vitesses dans les rampes et les pentes; vérification</i>	2010