

Geothermische Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 96

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Geothermische Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken

Einsatzmöglichkeiten und wirtschaftlicher Nutzen

von

Roman Markiewicz
Dietmar Adam

Geotechnik Adam ZT GmbH
Brunn am Gebirge

Wolfgang Unterberger
Hans Hofinger

iC consulenten ZT GmbH
Salzburg

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 96

bast

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

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

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

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

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

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

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die Berichte der BAST zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de/>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt: FE 15.0485/2009/BRB
Einsatzmöglichkeiten und wirtschaftlicher Nutzen von geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken

Fachbetreuung:
Jürgen Blossfeld

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-054-0

Bergisch Gladbach, November 2013

Kurzfassung – Abstract

Geothermische Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken

Im vorliegenden Forschungsbericht werden zunächst die Grundlagen der geothermischen Energienutzung beschrieben. Dies beinhaltet Anforderungen an den Energienutzer, Einflüsse aus den vorhandenen Untergrund- und Grundwasserverhältnissen sowie dem Fundierungskonzept des Bauwerkes bzw. dessen Bauwerksstruktur. Des Weiteren werden die derzeit vorhandenen Absorbersysteme sowie deren Betriebsweisen beschrieben.

Für die Planung einer Tunnelthermie-Anlage wurde ein Planungsleitfaden erstellt, der zunächst die wesentlichen Einflussfaktoren für eine technisch-wirtschaftliche Planung einer Erdwärmeanlage sowie deren Betrieb, Ausfallrisiken und einen Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen enthält. Der Planungsleitfaden beinhaltet schließlich auch eine Beschreibung der einzelnen Projektstufen, die im Zuge der Planung und Umsetzung einer Tunnelthermie-Anlage zu absolvieren sind. Es wurde eine Planungssystematik erarbeitet, welche die Angabe wesentlicher Entwurfskriterien beinhaltet, die im Zuge der Planung einer Tunnelthermie-Anlage zu beachten sind.

Für die Dimensionierung einer Tunnelthermie-Anlage bedarf es diverser Parameter, die im Vorfeld zu erkunden sind. Diese werden diskutiert und es werden Empfehlungen zur thermischen Erkundung in Kombination mit üblichen geotechnischen Aufschlüssen angeführt.

Technische Detaillösungen wurden für beispielhafte Tunnelthermie-Anlagen entwickelt, beschrieben und dargestellt. Darauf aufbauend wurde der Einsatz der Massivabsorbertechnologie bei üblichen deutschen Straßentunneln untersucht.

Für die Gestaltung eines Bauvertrages im Zuge der Ausschreibung einer Tunnelthermie-Anlage wurden Empfehlungen erarbeitet. Des Weiteren wird die Schnittstelle zwischen der Erdwärmeanlage und der Haustechnik sowie zwischen dem geothermischen Fachplaner des Auftraggebers und jenem des Auftragnehmers definiert.

Abschließend wurden beispielhafte Leistungspositionen für Tunnelthermie-Anlagen erstellt.

Geothermal energy plants within foundation structures and tunnels

In this research report the basics of geothermal energy utilization are described in the beginning. This comprises requirements concerning the energy user, the influences regarding ground and groundwater conditions as well as the interaction between the heat exchanger system and the foundation concept resp. construction of the building. Furthermore, applicable absorber systems and their operating modes are discussed.

For the design of a tunnel energy plant a design guideline is provided. This guideline contains essential influencing factors both for a technical-economical design and operation of a geothermal energy plant. Moreover, failing risks of heat exchanging systems and an overview of the regulatory framework are given. In addition to that the design guideline defines specific stages that are recommended for the design and the construction of a tunnel energy plant. Finally, significant design criteria are specified that should be considered in the design progress of a tunnel energy plant.

For design and dimensioning of a heat exchanger system various parameters are required, which have to be determined in advance. These parameters are discussed and recommendations for the thermal exploration in conjunction with the usual geological-geotechnical exploration program are given.

Detailed technical solutions for exemplary tunnel energy plants have been developed, described and illustrated. Based on these studies the installation of a tunnel energy plant within typical German road tunnels has been investigated.

Regarding the tender design of a tunnel energy plant recommendations for the building contract are provided. Furthermore, the interfaces between the heat exchanger system and the HVAC technology as well as between the geothermal consultant of the client and the execution designer of the contractor are defined.

Finally, exemplary bills of quantities for tunnel energy plants have been prepared.

Inhalt

1	Einleitung	7	3.3.2 Lage der Erdwärmeabsorber	21
1.1	Allgemeines	7	3.3.3 Wärmeträger/Absorberflüssigkeit	21
1.2	Zielsetzung	7	3.3.4 Wärmepumpen und Kälte- maschinen	22
1.3	Vorgehen	8	3.4 Ausfallrisiken	22
2	Grundlagen der geothermischen Energienutzung	8	3.4.1 Allgemeines	22
2.1	Allgemeines	8	3.4.2 Schäden an Absorberleitungen	22
2.2	Anforderungen des Nutzers	9	3.4.3 Bodengefrieren	22
2.2.1	Implementierung ins Bauwerk	9	3.5 Rechtliche Rahmenbedingungen	22
2.2.2	Nutzungsarten	9	3.6 Projektstufen einer Tunnelthermie- Anlage	23
2.2.3	Verbrauchscharakteristik	10	3.6.1 Grundsatzstudie	23
2.3	Untergrund- und Grundwasser- verhältnisse	10	3.6.2 Erkundungsphase	24
2.4	Fundierungskonzept und Bauwerks- geometrie	11	3.6.3 Machbarkeitsstudie und Entwurfsplanung	24
2.5	Systeme von Absorberelementen	11	3.6.4 Behördenvorabstimmung	25
2.6	Technische und wirtschaftliche Anforderungen	12	3.6.5 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	25
3	Planungsleitfaden für Erdwärme- anlagen in Tunnelbauwerken	12	3.6.6 Genehmigungsplanung sowie Planfeststellung	25
3.1	Allgemeines	12	3.6.7 Ausschreibung	26
3.2	Einflussfaktoren Anlagenplanung	13	3.6.8 Bauphase	26
3.2.1	Nutzer der Erdwärmeanlage	14	3.6.9 Betriebsphase	26
3.2.2	Lage der Erdwärmeanlage	14	3.7 Planungssystematik und Angabe von Entwurfsparametern	26
3.2.3	Tunnelbauweise	15	4 Thermische Erkundung	30
3.2.4	Boden-/Grundwasserverhältnisse	15	4.1 Ziel	30
3.2.5	Boden-/Tunnellufttemperaturen	15	4.2 Untergrundparameter	31
3.2.6	Absorberelemente bei Tunnel- bauwerken	15	4.2.1 Oberflächentemperatur	31
3.2.7	Bauablauf	20	4.2.2 Geologischer Aufbau des Untergrundes	31
3.2.8	Betriebsweise	20	4.2.3 Thermisch relevante Material- kennwerte des Untergrundes	31
3.2.9	Art des Wärmeentzuges/ Wärmeträgers	20	4.2.4 Hydrogeologische Grundlagen	42
3.3	Einflussfaktoren Anlagenbetrieb	21	4.2.5 Ungestörte Bodentemperatur und terrestrischer Wärmestrom	42
3.3.1	Betriebsweise	21	4.3 Tunnellufttemperatur	43

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Nutzung von Erdwärme zu Heizzwecken wird bereits seit mehreren Jahrzehnten vor allem im Einfamilienhausbau mittels Wärmepumpen erfolgreich angewendet. Die Herstellung von Erdwärmeabsorbern wie Flachkollektoren oder Erdwärmesonden ist allerdings relativ kostenintensiv, da diese Bauteile nur zum Zweck der Energiegewinnung errichtet werden müssen. Bei der so genannten Massivabsorbertechnologie mittels erdberührter Bauteile kann dieser Kostennachteil erheblich verringert werden, da aus konstruktiven Gründen ohnehin zu errichtende Bauteile wie Bodenplatten, Schlitzwände oder Bohrpfähle erforderlich sind und diese zusätzlich als Absorberbauwerke genutzt werden können. So lassen sich relativ kostengünstig große Absorberflächen schaffen, welche für die Beheizung und Klimatisierung eines Gebäudes herangezogen werden können. Im Hochbau hat sich diese Technologie bereits bewährt und wurde bzw. wird bei zahlreichen Bauvorhaben realisiert.

Seit etwa 2004 wurde diese Massivabsorbertechnologie schließlich auch auf seicht liegende Verkehrstunnel übertragen, da diese durch die massiven Betonbauteile und die Einbettung in den Untergrund große thermische Energiespeicher aktivieren können. Ein diesbezügliches Pilotprojekt wurde in Wien (Hadersdorf-Weidlingau) am Baulos LT24 des Lainzer Tunnels errichtet, welches mittels der aus dem Untergrund gewonnenen Tunnelwärme eine in Tunnelnähe gelegenes Schulgebäude beheizt. Aufbauend auf den Erfolgen dieser Anlage wurden schließlich weitere Anwendungen realisiert. Dazu zählen Eisenbahn- und U-Bahntunnel, die primär in Österreich und in einigen Fällen auch in Deutschland ausgeführt worden sind.

Die Anwendung der Massivabsorbertechnologie kann bei entsprechender Eignung und Ausführung der Projekte auch Betreibern und Eigentümern deutscher Straßentunnel Vorteile bieten. Um Erfahrungen zu sammeln und diese bewerten zu können sowie technische Details und wirtschaftliche Fragen zu klären, ist die Ausführung von Pilotprojekten in Deutschland vorgesehen.

Im Rahmen des FE-Projektes „Anwendung der Geothermie in Straßentunneln“ wurden bereits u. a. Anwendungsmöglichkeiten der Geothermie bei Tunnelbauwerken untersucht und Projekterfahrungen

gen aus dem In- und Ausland zusammengestellt. Der diesbezügliche Schlussbericht [18] stellt damit eine wesentliche Basis für das vorliegende Forschungsprojekt dar.

1.2 Zielsetzung

Zur Vorbereitung dieser Pilotprojekte sollen Lösungsmöglichkeiten zu Fragen der geothermischen Erkundung, Ausführung technischer Details und der Gestaltung der Bauverträge gesammelt und bewertet werden. Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes ist es, für Straßentunnel in offener und in geschlossener Bauweise folgende Aspekte zu untersuchen:

- Thermische Erkundung

Erarbeitung von Empfehlungen für die thermische Erkundung des Untergrundes in Kombination mit herkömmlichen geotechnischen Untersuchungen zur Nutzung eines Höchstmaßes an Synergien.

- Technische Detaillösungen

Ausarbeitung von Detaillösungen, wobei auf bereits entwickelte Detaillösungen zurückgegriffen werden soll, die in ihrer Gesamtheit bereits in der Praxis umgesetzt bzw. erprobt worden sind. Dies betrifft einerseits geothermisch zu aktivierende Bauteile, wie Energiepfähle, -schlitzwände, -bodenplatten, -anker, -vliese, -tunnelschalen etc., andererseits die Leitungsführungen sowie die dafür erforderlichen Schutzmaßnahmen, Abdichtungen und Durchführungen.

- Bauvertrag

Im Zuge der Umsetzung der bisherigen Projekte hat sich die Bedeutung der Verankerung der Erdwärmenutzung bei Verkehrsinfrastrukturbauwerken in den Bauvertrag gezeigt. Bereits erstellte Musterverträge, die in der Praxis erprobt wurden, werden für die Zusammenstellung und Bewertung bauvertraglicher Lösungen herangezogen. Der Umgang mit Risiken, Behinderungen, Verzögerungen und Erschwernissen infolge der Errichtung einer Erdwärmeanlage soll dargestellt werden. Komplexe Planungsprozesse und Schnittstellen zwischen den Planern des Auftraggebers und des Auftragnehmers werden ebenso betrachtet wie die Prüfung und Überwachung der ordnungsgemäßen Ausführung.

- Ausschreibung

Ausschreibungstexte und Leistungsverzeichnisse sollen unter Berücksichtigung bereits ausgeschriebener und ausgeführter Projekte erstellt bzw. bestehende Ausschreibungen dahingehend modifiziert werden, damit ein höchstmögliches Maß an Planungs- und Ausführungssicherheit sowie Kosteneinhaltung ermöglicht wird.

1.3 Vorgehen

Es werden zunächst die Grundlagen einer geothermischen Energienutzung beschrieben, wobei hervorzuheben ist, dass die Erläuterungen auf dem bereits vorliegenden Forschungsbericht [18] der BAST aufbauen.

Wie bereits einleitend erwähnt, ist die Umsetzung eines Pilotprojektes im Rahmen eines deutschen Straßentunnelprojektes geplant. Aus diesem Grund wurde ein Planungsleitfaden für die Errichtung einer Erdwärmanlage in Tunnelbauwerken erstellt. Dazu werden zunächst die wesentlichen Einflussfaktoren zur Anlagenplanung sowie zum Anlagenbetrieb beschrieben und bestehende Ausfallrisiken und zu berücksichtigende rechtliche Rahmenbedingungen diskutiert. Es werden die einzelnen erforderlichen Projektstufen für die Planung und die Umsetzung einer Tunnelthermie-Anlage aufgezeigt und im Rahmen einer Planungssystematik wesentliche Entwurfsparameter zusammengefasst.

Anschließend wird auf die eigentlichen Schwerpunkte des gegenständlichen Forschungsprojektes eingegangen. Dazu zählt zunächst die thermische Erkundung zur Erfassung jener Parameter, die für die Planung und Dimensionierung einer Tunnelthermie-Anlage erforderlich sind.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden die technischen Detaillösungen. Es wird zunächst ein Überblick über derzeit vorhandene geothermisch aktivierbare Bauteile gegeben, wobei Vor- und Nachteile sowie deren Praxistauglichkeit beschrieben sind. Im Weiteren wird auf Leitungsmaterialien und Verbindungen üblicher Absorberleitungen näher eingegangen.

In Bezug auf die Themenbereiche „Konstruktiver Schutz der Leitungen vor Beschädigungen“, „Durchführung von Leitungen durch Bauteile und Abdichtungen“ sowie „Anordnung von Wärmepumpe und Verteilerkästen sowie ggf. weiterer erforderlicher Aggregate“ ist darauf hinzuweisen, dass ge-

nerelle Angaben dazu sehr schwierig sind und Detaillösungen projektspezifisch geplant und entwickelt werden müssen. Um dennoch unterschiedliche Möglichkeiten dafür aufzuzeigen, werden Erläuterungen zu Erdwärmanlagen in Tunnelbauwerken angegeben, wobei Tunnelbauwerke in geschlossener und offener Bauweise unterschieden werden. Anhand von typischen Tunnelquerschnitten wird der Aufbau einer Erdwärmanlage im Detail beschrieben und anschließend mittels eines virtuellen Beispielprojektes auch planerisch dargestellt. Dies kann folglich auch auf andere Tunnelquerschnitte bzw. andere Projekttrandbedingungen übertragen werden.

Darauf aufbauend wird in weiterer Folge auf in Deutschland übliche Tunnelbauwerke näher eingegangen und aufgezeigt, welche Möglichkeiten für die Integration einer Tunnelthermie-Anlage bestehen.

In Bezug auf die Erstellung des Bauvertrages für die Errichtung einer Tunnelthermie-Anlage werden Empfehlungen zur Eingliederung in die für Tunnelbauwerke übliche Ausschreibungssystematik gegeben. Im Folgenden werden die Schnittstellen zwischen Erdwärmanlage und Haustechnik sowie zwischen dem geothermischen Fachplaner des Auftraggebers und des Auftragnehmers erläutert und Empfehlungen zur Praxis angeführt. Zudem wird empfohlen, wie das Beschädigungsrisiko von Absorberleitungen im Zuge der Bauausführung sowie Behinderungen, Verzögerungen und Erschwernisse im Zusammenhang mit der Errichtung einer Erdwärmanlage im Bauvertrag berücksichtigt werden können. Zusätzlich sind Hinweise in Bezug auf die Bauüberwachung angeführt.

Für die Erstellung einer Ausschreibung einer Tunnelthermie-Anlage werden beispielhafte Leistungspositionen sowohl für Tunnel in geschlossener als auch in offener Bauweise angegeben.

2 Grundlagen der geothermischen Energienutzung

2.1 Allgemeines

Die Funktion von Geothermieanlagen basiert auf dem physikalischen Prinzip des Wärmetausches zwischen einem Energienutzungssystem (Gebäude, Anlagen) und einem Energiebereitstellungs-

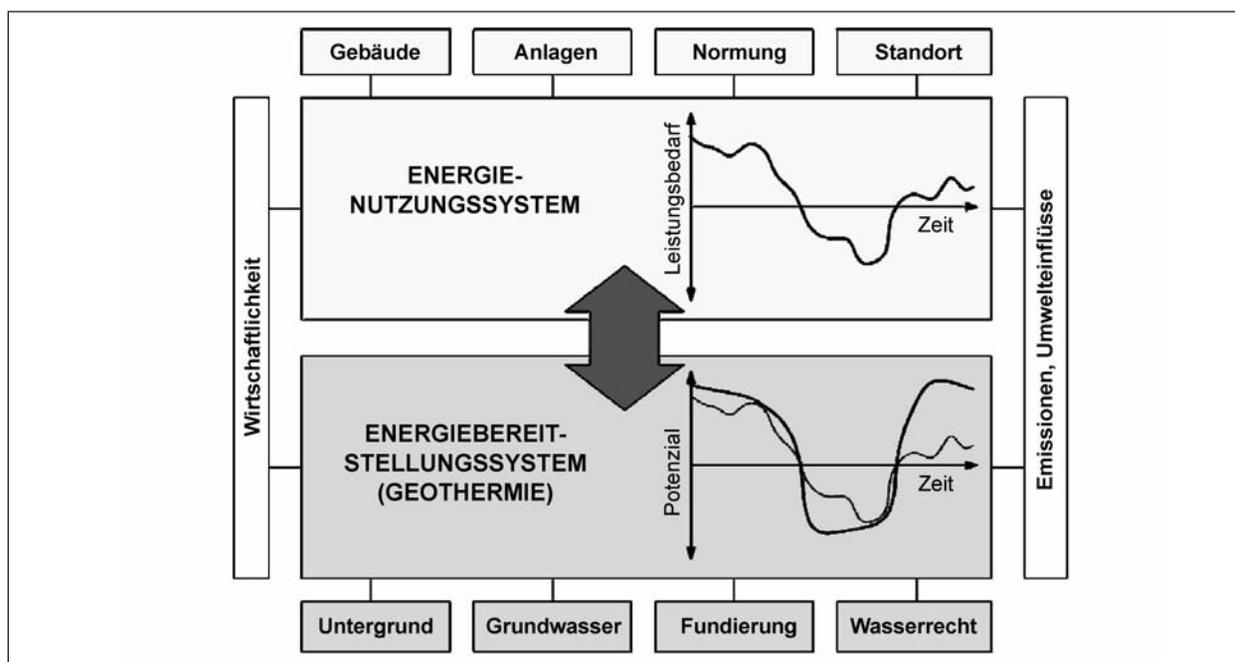


Bild 1: Übersicht der wichtigsten Einflussfaktoren für Energienutzungs- und -bereitstellungssysteme. Die Anforderungen des Energienutzungssystems sind stets zu erfüllen

system (Absorbersystem, Grundwasser, Untergrund). Das Energienutzungssystem wird in der Anlagenplanung an die Anforderungen des Nutzers angepasst und kann mit den Eingangsdaten wie Gebäudeart und -größe, Nutzungsart, Wärmeverteilungssystem, meteorologische und standortbezogene Gegebenheiten etc. nach der geltenden Normung festgelegt werden. Das Energiebereitstellungssystem soll die zeitlich und räumlich definierten Anforderungen des Energienutzungssystems erfüllen können (Bild 1).

Dabei muss der wesentliche Unterschied von Geothermieanlagen zu konventionellen Energieträgern wie fossilen Brennstoffen oder Biomasse berücksichtigt werden: Bei konventionellen Systemen hängt die gesamte bereitstellbare Energiemenge über eine Versorgungsperiode lediglich von der Menge der Brennstoffzufuhr ab (bei definierter und gleichbleibender Spitzenleistung). Geothermieanlagen haben dagegen ein mehr oder weniger dynamisches Systemverhalten, da sich die Wärmequellentemperatur im Boden und damit die Anlagenleistung in Abhängigkeit des bereits vorangegangenen Wärmetausches in der Regel verändern. Durch genaue Kenntnis der wesentlichen Parameter der Absorberauslegung können jedoch wie bei herkömmlichen Energieträgern verlässliche und wartungsarme Energiebereitstellungsanlagen errichtet werden, die sich aber durch die Vorteile der Emissionsfreiheit und günstiger Betriebskosten auszeichnen.

2.2 Anforderungen des Nutzers

2.2.1 Implementierung ins Bauwerk

Die Nutzung von Erdwärme sollte bereits bei der Bauwerksplanung in einem möglichst frühen Stadium untersucht bzw. berücksichtigt werden, da das Wärmeverteilungssystem für eine wirtschaftliche Anwendung dieser Energiequelle konsequent auf Niedertemperatur auszulegen ist. Dies ist erforderlich, damit die notwendigen Wärmepumpen und/oder Kältemaschinen in einem günstigen Effizienzbereich arbeiten können.

2.2.2 Nutzungsarten

Erdwärme kann sowohl für die Bereitstellung von Heiz- als auch Kühlenergie herangezogen werden. In der Regel ist für eine Heizanwendung die Installation einer Wärmepumpe erforderlich, welche die Temperatur der Primärenergie (Erdwärme) auf ein nutzbares Niveau für das Sekundärsystem (Heizmedium) anhebt. Im Falle von Kühlanwendungen wird oft auf das System des „Free-Cooling“ zurückgegriffen, da hier nur die Energie für die Umwälzung des erdkalten Wärmeträgers benötigt wird. Reicht diese Erdtemperatur nicht (mehr) aus, kann in weiterer Folge eine Kältemaschine zwischengeschaltet werden.

2.2.3 Verbrauchscharakteristik

Unterschiedliche Bauwerke und Nutzungsarten weisen auch unterschiedliche Verbrauchercharakteristika auf. So benötigen Wohngebäude wie Mehrfamilienhäuser in der Regel ausschließlich Heizenergie und keine Kühlenergie (Bild 2). Im Gegensatz dazu kann aber beispielsweise bei Bürogebäuden auch mehr Kühl- als Heizbedarf bestehen. Günstig für eine Erdwärmeanlage ist jedenfalls eine möglichst ausgeglichene Energiebilanz an Heiz- und Kühlenergie über das Jahr (Bild 3). Damit ergeben sich lange Laufzeiten der Anlage und somit eine verbesserte Wirtschaftlichkeit sowie weitgehend gleichbleibende Temperaturverhältnisse im Boden auch nach vielen Betriebsjahren (thermische Regeneration). Generell sind für eine verlässliche Aussage zum Systemverhalten auch möglichst exakte Angaben zum Energiebedarf des Nut-

zers erforderlich (zumindest Monatsmittelwerte des Energiebedarfs sowie Spitzenheiz- und Spitzenkühlleistungen).

Um die Wirtschaftlichkeit einer Erdwärmeanlage zu steigern, kann es sinnvoll sein, lediglich die Grundlasten des Energiebedarfes über Erdwärme zu decken und die Spitzenlasten – falls verfügbar – mit konventionellen Energieträgern vorzuhalten (bivalentes Anlagenkonzept). Somit ergeben sich noch höhere Nutzungsgrade der Erdwärmeanlage, da die Grundlasten über längere Zeiträume auftreten.

2.3 Untergrund- und Grundwasserverhältnisse

Die Untergrund- und Grundwasserverhältnisse haben einen entscheidenden Einfluss auf die Aus-

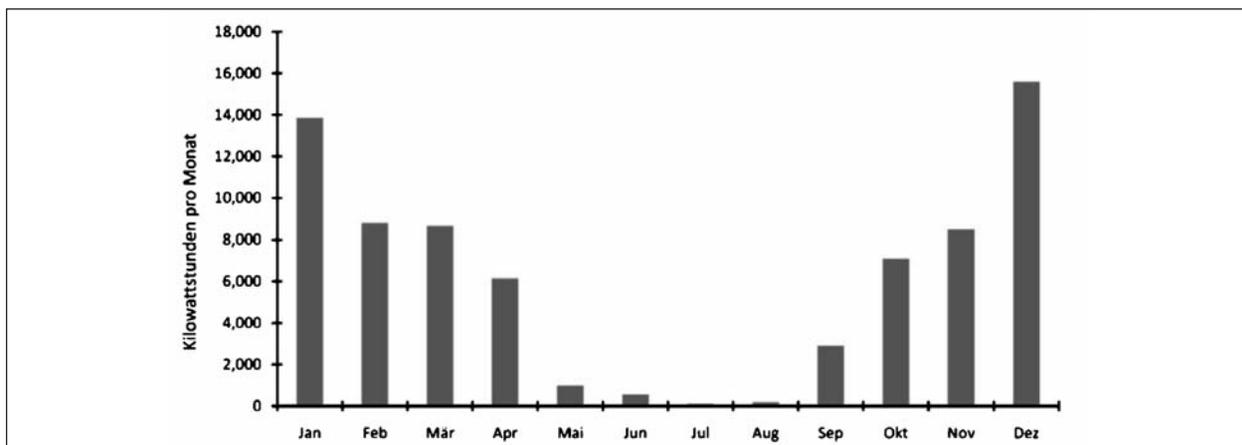


Bild 2: Beispiel des monatlichen Energiebedarfes bei reinem Heizbetrieb (unausgewogene Energiebilanz)

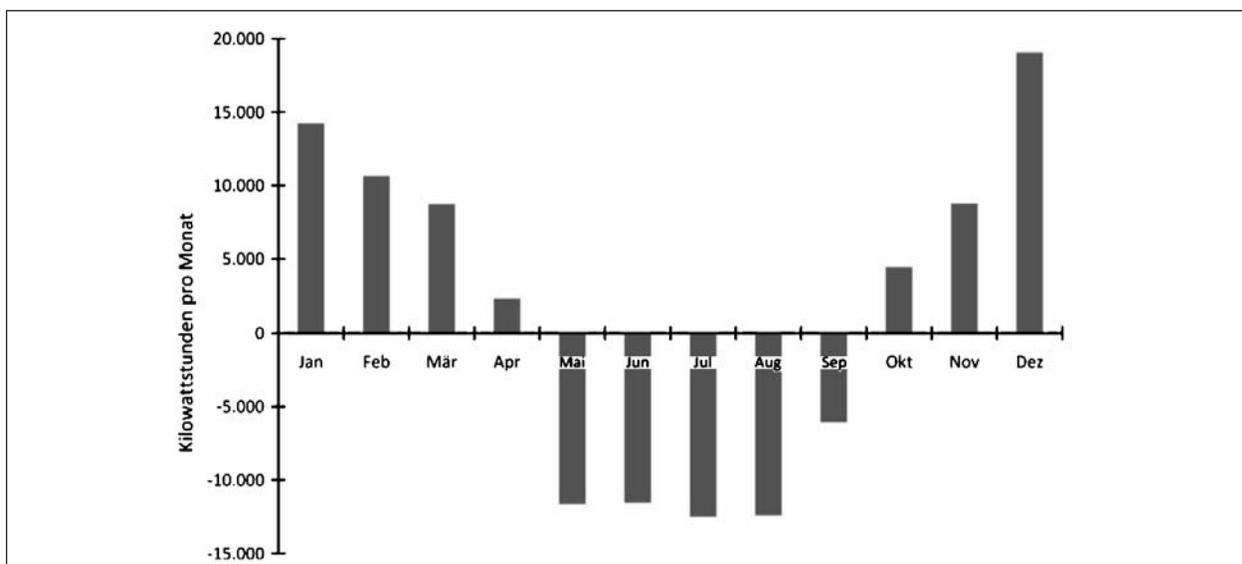


Bild 3: Beispiel des monatlichen Energiebedarfes bei Heiz- und Kühlbetrieb (ausgeglichene Energiebilanz)

wahl der Nutzungsmethode und die Leistungsfähigkeit einer Erdwärmeanlage.

Im Untergrund vorhandenes Grundwasser führt stets zu höheren spezifischen Anlagenleistungen im Vergleich zu relativ trockenen Verhältnissen. Ist im Anlagenbetrieb auch eine Wärmespeicherung im Untergrund erwünscht, kann ein Grundwasserstrom jedoch auch negative Auswirkungen zeigen, da die eingespeicherte Wärme vom Grundwasser wieder abtransportiert wird.

Zu den weiteren Untergrundeigenschaften, welche für die Anlagenauslegung benötigt werden, zählen insbesondere die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Bodens, seine Dichte und die spezifische Wärmekapazität. Diese Parameter werden bei kleineren Anlagen oftmals auf Basis der Bodenklassifizierungen am Standort aus Literaturdaten ermittelt (z. B. [5] und [8]). Bei größeren Anlagen ab etwa 50 kW hat sich die Ausführung von Thermal-Response-Tests als Standard etabliert. Bei diesen Tests werden an eigens hergestellten Erdwärmesonden – welche aber dann im Betrieb weiterverwendet werden können – die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Bodens sowie die mittlere Bodentemperatur am Standort ermittelt.

2.4 Fundierungskonzept und Bauwerksgeometrie

Bei der Anwendung der Massivabsorbertechnologie bestimmt in erster Linie die Fundierungsart die Auswahl des Absorbersystems. Bei einer Tieffundierung des Bauwerks steht möglicherweise die Anwendung von Energiepfählen oder Energieschlitzwänden zur Verfügung, wohingegen bei einer Flachfundierung eine Energiebodenplatte ausgeführt werden kann. Dies trifft auf Hochbauten und auch auf Tunnelbauten, die in offener Bauweise errichtet werden, zu. Für in geschlossener Bauweise errichtete Tunnel oder maschinell aufgefahrene Tunnelbauwerke wurden Sonderlösungen entwickelt (siehe Kapitel 3.2.6 „Tunnel in geschlossener Bauweise“ bzw. „Tunnel in offener Bauweise“).

Die Bauwerksgeometrie bestimmt in erster Linie die Anordnung der einzelnen Absorberelemente. Im Weiteren ist auch die Einbindung des Bauwerks in den Untergrund zu beachten, da dadurch der natürliche Grundwasserstrom verändert werden kann. Nicht zuletzt sind insbesondere bei Massivabsorbersystemen mögliche thermische Kurzschlussf-

ekte zwischen dem Bauteilinneren und dem Massivabsorbersystem zu berücksichtigen.

2.5 Systeme von Absorberelementen

Der Transport der Wärme im Untergrund erfolgt über unterschiedliche Mechanismen, wobei in gering durchlässigen Böden neben anderen Übertragungsmechanismen die Wärmeleitung (Konduktion) vorherrscht, in stark durchlässigen Grundwasser führenden Bodenschichten aber die Wärmeströmung (Konvektion) entscheidend für die Wärmeübertragung ist.

Für den Transport von Wärme- bzw. Kälteenergie ist ein Temperaturunterschied zwischen dem zur Nutzung herangezogenen Untergrund und dem Transportmedium erforderlich. Grundsätzlich wird zwischen zwei Systemen unterschieden:

- geschlossene Systeme (Absorberkreislauf),
- offene Systeme (direkte Grundwasserentnahme).

Bei geschlossenen Systemen zirkuliert ein Wärmeträgermedium durch die Absorberleitungen, welches beim Durchströmen entweder erwärmt oder abgekühlt wird.

Bei offenen Systemen wird das Grundwasser aus dem Aquifer entnommen und direkt genutzt, anschließend wird das erwärmte oder abgekühlte Wasser wiederum dem Grundwasserträger zugeführt. Offene Systeme werden im Zuge dieses Forschungsprojektes nicht weiter betrachtet.

In Bezug auf den Betrieb der Absorberelemente kann prinzipiell zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Möglichkeiten der geothermischen Energiebewirtschaftung unterschieden werden:

- einfache geothermische Energieentnahme bzw. -zufuhr,
- saisonaler Betrieb mit Wärme- und Kältespeicherung.

Während beim einfachen geothermischen Betrieb, d. h., entweder wird nur Energie aus dem Boden entnommen oder nur Energie in den Boden eingetragen, der Energiefluss lediglich in eine Richtung erfolgt, wird beim saisonalen Betrieb die thermodynamische Trägheit des Bodens herangezogen, um Energie im Boden zu speichern, sodass diese

zum benötigten Zeitpunkt wiederum entnommen werden kann. Bei einem saisonalen Speicher ist es daher möglich, eine ausgeglichene Energiebilanz im Zeitraum eines Jahres zu gewährleisten. Böden mit hoher Durchlässigkeit eignen sich besonders gut für den einfachen Betrieb zur Wärme- oder Kältenutzung, da durch die Grundwasserströmung kontinuierlich die erwärmten bzw. abgekühlten Bodenzonen regeneriert werden. Böden mit geringer Durchlässigkeit eignen sich hingegen besonders gut für die saisonale Speicherung, da kein nennenswerter Massenstrom stattfindet und somit die Temperaturverhältnisse weitgehend gleich bleiben.

2.6 Technische und wirtschaftliche Anforderungen

Die Planung und Umsetzung von Erdwärmeanlagen unterliegen naturgemäß technischen Anwendungsgrenzen. Diese sind vor allem durch Maximaltemperaturen im Absorbersystem (Auswirkungen auf die Statik der Absorberbauteile) oder durch Minimaltemperaturen bei statisch wirksamen Bauteilen (Eislinsbildung) gegeben. Auch Wärmeverluste durch zu lange Sammelleitungen oder zu hohe Druckverluste bei langen Absorberkreisen können die Anwendung beschränken. Wesentlich ist auch die Wahl des Wärmeträgers. Üblicherweise kommt in Absorbersystemen ein frostgeschützter Wärmeträger (1,2-Propylenglycol-Wasser-Gemisch) zum Einsatz. Werden jedoch die Anlagenauslegung und -planung derart durchgeführt, dass als Wärmeträger Wasser ohne Beimischung von Frostschutz zur Anwendung kommen kann, bieten sich folgende Vorteile gegenüber einem frostgeschützten Wärmeträger:

- geringere Kosten bei der Anlagenbefüllung, da die Kosten des Frostschutzmittels (1,2-Propylenglycol oder Gleichwertiges) entfallen,
- geringere Betriebskosten, da die Viskosität des Wassers geringer und die Wärmekapazität höher ist als jene eines Frostschutz-Wasser-Gemisches und somit geringere Pumpleistungen ausreichen,
- besserer Wärmeübergang im Absorbersystem gegenüber einem Frostschutz-Wasser-Gemisch,
- Außenflächen von Fundamentbauteilen dürfen aus statischen Gründen ohnehin nicht unter 0 °C abkühlen, um Eislinsbildung zu verhindern,

- keine schädlichen Umweltauswirkungen bei Rohrleckagen.

Zu den wirtschaftlichen Grenzen zählt die Amortisationszeit bzw. die Annuität im Vergleich zu anderen Formen der Energieversorgung. Diese Grenzen werden meist projektspezifisch vom Bauherrn definiert, sodass eine Wirtschaftlichkeitsberechnung fixer Bestandteil der Planung sein sollte. Erdwärmeanlagen zeichnen sich meist durch höhere Investitionskosten bei oft sehr niedrigen Betriebskosten gegenüber konventionellen Energieträgern aus.

3 Planungsleitfaden für Erdwärmeanlagen in Tunnelbauwerken

3.1 Allgemeines

Eine so genannte Tunnelthermie-Anlage besteht im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen:

- Absorberanlage, welche in das Tunnelbauwerk integriert ist,
- Sammelleitungen bzw. Energieverteilersysteme, welche von den Einspeisepunkten im Tunnel bis zu den Wärmepumpen/Kältemaschinen des Verbrauchers reichen,
- Nutzersystem, welche die Wärme-/Kälteerzeugung samt der Wärme-/Kälteverteilung im Gebäude des Nutzers umfasst.

In Bild 4 ist der allgemeine Aufbau einer Tunnel-Erdwärmeanlage (Tunnelthermie-Anlage) dargestellt. Generell kann unterschieden werden, ob die aus dem Bauwerk entzogene Energie vom Eigentümer selbst genutzt wird oder ob ein Verkauf der Energie angestrebt wird. Die Zwischenschaltung eines Energieverteilunternehmens ist nur notwendig, wenn die Energie weiterverkauft werden soll und keine direkten Verträge zwischen dem Eigentümer des Infrastrukturbauwerks und dem Energieabnehmer abgeschlossen werden sollen. Dieses Energieverteilungsunternehmen kann auch die Anlagenwartung bis zum Nutzersystem übernehmen.

Im Zusammenhang mit der Vertragserstellung zwischen dem Eigentümer des Infrastrukturbauwerks und dem Energieabnehmer sind insbesondere auch zeitliche Aspekte zu berücksichtigen, da aus dem Tunnel die Energie meist erst kurz vor der Tun-

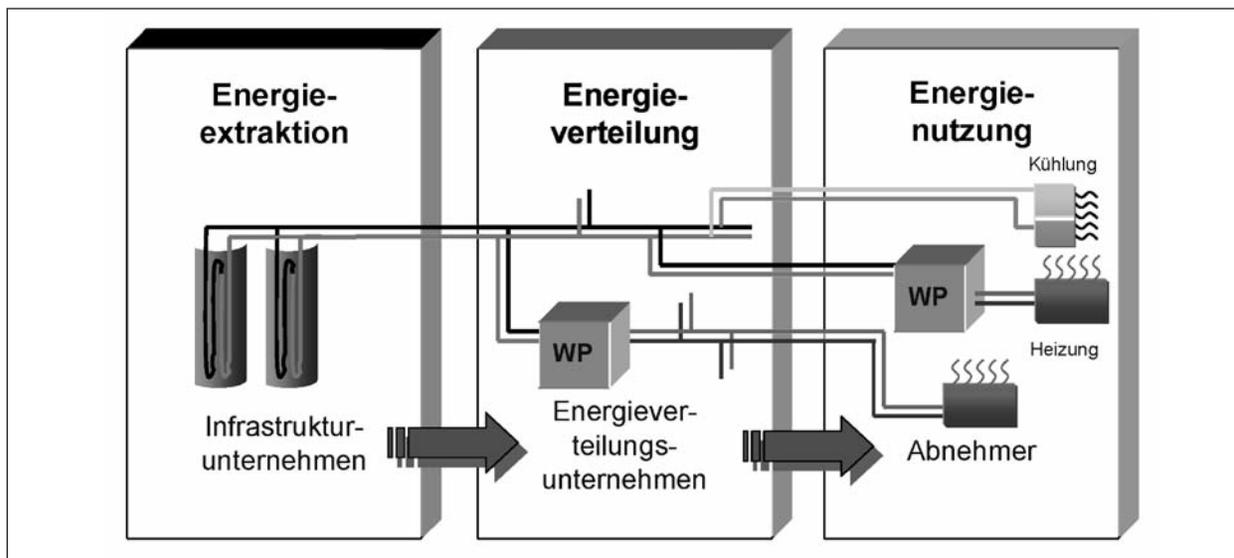


Bild 4: Schematischer Aufbau der Tunnelthermie-Nutzung

nelfertigstellung geliefert werden kann und der Energieabnehmer (z. B. ein Hochbau an der Geländeoberfläche) die Energie bereits zu einem früheren Zeitpunkt benötigt (nach Fertigstellung des Hochbaus). Terminverschiebungen, die insbesondere bei Tunnelbauwerken möglich sind, können die vertragliche Gestaltung zusätzlich erschweren.

Um Aussagen über die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen treffen zu können, müssen sich die Kosten mit marktüblichen Energiepreisen vergleichen lassen. Erdwärmeanlagen erfordern wegen der Errichtung der Absorber, der Leitungsführungen und evtl. höherer Anschaffungskosten für die Wärmepumpen höhere Anfangsinvestitionen als konventionelle Energieanlagen, welche durch die niedrigeren Betriebskosten in vernünftigen Amortisationszeiten ausgeglichen werden können.

Die Vielzahl an Einflussfaktoren ohne Wertung der Sensitivität ist in Bild 5 dargestellt.

3.2 Einflussfaktoren Anlagenplanung

Die Herstellung der Absorber verursacht relativ zu den gesamten Errichtungskosten einer Erdwärmeanlage die höchsten Kosten, weshalb sich hier Optimierungen sehr stark auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems auswirken. Um Optimierungen durchführen zu können, müssen die Randbedingungen für mögliche Optimierungsschritte untersucht und festgelegt werden. Wie bereits aus Bild 5 ersichtlich ist, gibt es eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf das zu optimierende Absorbersystem.

Das Forschungsprojekt befasst sich vorwiegend mit dem Bereich der Absorberplanung. Die Haustechnikplanung ist neben den anderen Einflussfaktoren (generelles Energiepreisniveau, Emissionseinsparung etc.) wesentlich für eine wirtschaftliche Energieanlage. Diese muss sich an den Rahmenbedingungen für Niedrigenergiebauweise samt niedrigerer thermaler Energieverteilung (Fußboden- und Wandheizungen, Bauteilaktivierung, kontrollierte Wohnraumlüftung etc.) orientieren.

Generell lassen sich die nachfolgend aufgelisteten Einflussfaktoren für eine Absorberplanung angeben, die für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb wesentlichen sind:

- Nutzer der Erdwärmeanlage,
- Lage der Erdwärmeabsorber,
- Tunnelbauweise,
- Boden-/Grundwasserverhältnisse,
- Boden-/Tunnellufttemperaturen,
- Absorberelemente bei Tunnelbauwerken,
- Bauablauf,
- Betriebsweise,
- Art des Wärmeentzuges/Wärmeträgers.

In den nachfolgenden Kapiteln werden diese Einflussfaktoren näher beschrieben und deren Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit erläutert, wobei darauf hinzuweisen ist, dass die genannten Einfluss-

faktoren für jedes Projekt einzeln untersucht und bewertet werden sollten. Die Komplexität der Zusammenhänge erlaubt kaum eine „checklistenartige“ Planung, sondern bedingt eine Gesamtschau der Randbedingungen mit einem Abwägen maßgebender positiver und negativer Auswirkungen von Systementscheidungen.

3.2.1 Nutzer der Erdwärmeanlage

Prinzipiell können betriebsinterne Nutzungsszenarien und externe Nutzungsszenarien unterschieden werden.

Interne Nutzungsszenarien umfassen:

- Klimatisierung (Beheizung, Kühlung) von Betriebsgebäuden,
- Straßenteisung im Bereich von Tunnelportalen, Rampen, Brücken etc.

Externe Nutzungsszenarien umfassen:

- Gebäudeklimatisierung (Heizung, Kühlung),
- Industrieprozesse,

- Enteisung von Gehsteigen und nicht innerbetrieblichen Straßen.

Aus hydraulischer und thermischer Sicht ist anzumerken, dass Abnehmer in der unmittelbaren Umgebung der Tunnelthermie-Anlage situiert sein sollten. Es ist empfehlenswert, nach Identifizierung externer Nutzungsszenarien potenzielle Abnehmer/Kunden möglichst frühzeitig zu kontaktieren und vertragsrechtliche Rahmenbedingungen zu definieren. In diesem Planungsstadium kann der Nutzer noch in den Planungsprozess mit eingebunden werden, was wiederum zur Optimierung der Tunnelthermie-Anlage beiträgt.

3.2.2 Lage der Erdwärmeanlage

Die Erdwärmeanlage sollte möglichst nahe am Nutzersystem liegen, um lange Leitungswege zu vermeiden. Die Leitungswege sollten je nach Anlagengröße wenige 100 m (empfohlen max. 500 m) nicht überschreiten, da die Leitungskosten (Grabungs- und Verlegearbeiten) in die Errichtungskosten eingehen und somit die Amortisationszeit sowie die Betriebskosten durch Leitungsverluste (Rohrrei-

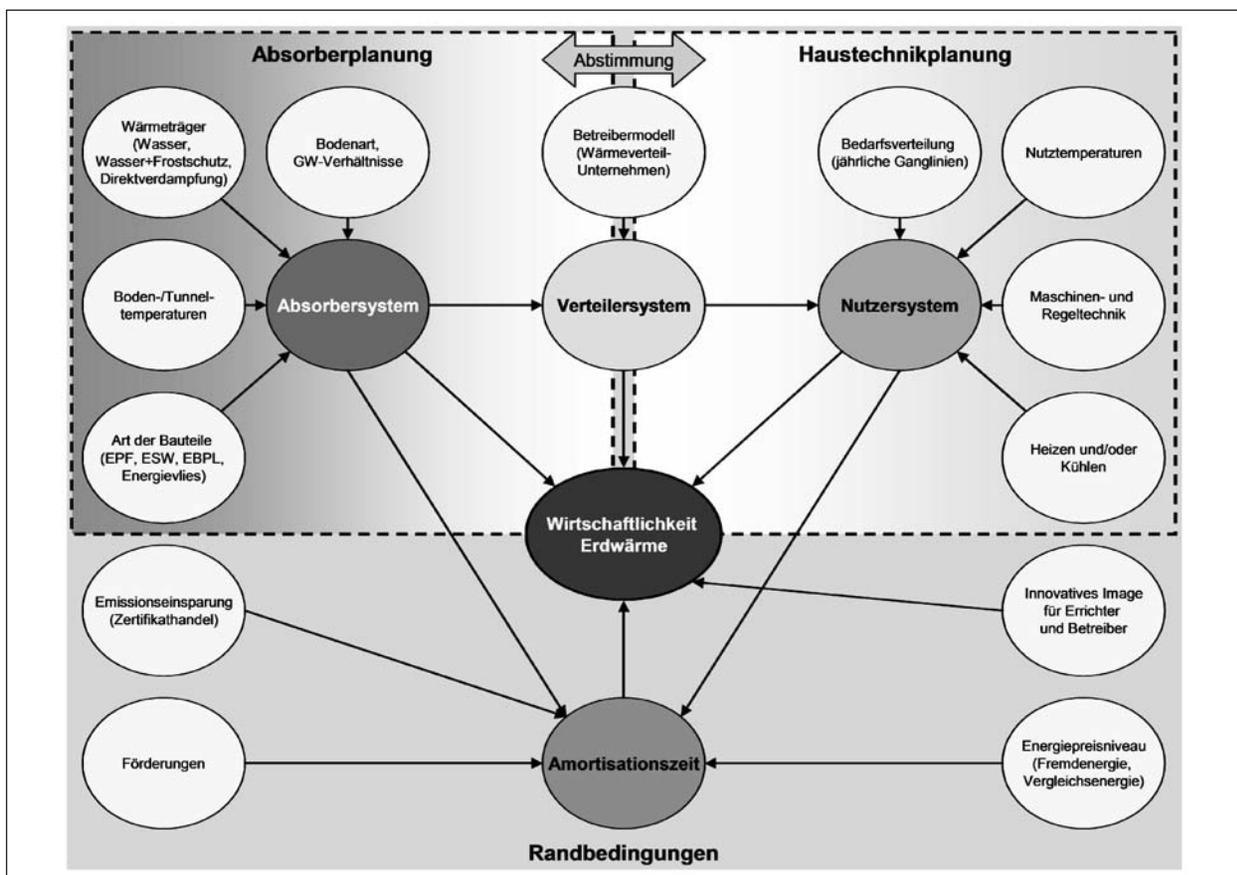


Bild 5: Einflussfaktoren für eine wirtschaftliche Erdwärmeplanung und -nutzung

bungs- und evtl. Wärmeverluste, vgl. Kapitel 3.3.2) direkt beeinflussen.

Ebenso sollte die Anlage nicht im unmittelbaren Portalbereich des Tunnels liegen, um eine zu starke Beeinflussung durch die Außenlufttemperatur zu vermeiden. Damit ergibt sich, dass eine Situierung der Erdwärmeabsorber möglichst in Tunnelmitte zu bevorzugen ist (vgl. dazu Empfehlungen im Kapitel 3.7).

3.2.3 Tunnelbauweise

Folgende Tunnelbauweisen sind gemäß ZTV-ING [13] zu unterscheiden:

- Geschlossene Tunnelbauweise (bergmännische Bauweise): Der Tunnel wird durch Aushub des Bodens unter Tage hergestellt. Dabei wird eine temporär stützende Außenschale aus Spritzbeton hergestellt, welche anschließend mit einer permanent stützenden Innenschale ausgebaut wird. Die Energienutzung ist mit einem „Energievlies“ bzw. einer Sohlbelegung machbar, welche zwischen Außen- und Innenschale eingebracht wird. Die nutzbaren Tunnelabschnitte sind jedoch durch die Kreislängen der Absorberleitungen begrenzt und der Einbau sehr stark an den Bauablauf des Tunnelausbaus gebunden. Als zusätzliche Möglichkeit des Energieentzuges wurde auch ein „Energieanker“ entwickelt, der allerdings noch keine Serienreife erlangt hat.
- Offene Tunnelbauweise: Der Tunnel wird durch Aushub des Bodens von der Oberfläche hergestellt, wobei noch zwischen der Deckelbauweise und der klassischen offenen Baugrube unterschieden werden kann. Bei diesen Bauwerken werden häufig Schlitzwände und/oder Bohrpfähle für die seitliche Erddruckabstützung bzw. die Bauwerksgründung und massive Bodenplatten zur Aussteifung und für die Aufnahme von Grundwasserdrücken errichtet. Eine Energienutzung ist mit Energiepfählen, Energieschlitzwänden und Energiebodenplatten möglich.
- Maschinell vorgetriebene Tunnel (Schildvortriebsmaschine, Tunnelbohrmaschine): Der Tunnel wird durch automatisierten Aushub des Bodens von unter Tage hergestellt. Für derartige Tunnel sind „Energietübbinge“, also mittels Absorbertechnologie versehene Ausbauelemente für die Innenschale, entwickelt worden. Bei zweischaligen Tunnels mit Ortbetoninnenschale kann auch ein Energievlies auf die Außenschale

vor dem Betonieren der Ortbetoninnenschale montiert werden. Für dieses Verfahren gelten die gleichen Möglichkeiten und Grenzen wie für die geschlossene Bauweise.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Absorberelemente findet sich im Kapitel 3.2.6.

3.2.4 Boden-/Grundwasserverhältnisse

Der Boden sollte eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität aufweisen. Dies ist bei im Grundwasser liegenden Tunnels durchwegs der Fall.

Wärmespeicherung ist im Allgemeinen bei einer Erdwärmeanlage im Tunnelbau nur in einem beschränkten Ausmaß möglich, da die Bauteile stets von der Tunnelluft umströmt werden und so ein verstärkter Temperatursausgleich existiert. Für die (saisonale) Wärmespeicherung sind Erdwärmesondensfelder oder die gruppierte Anordnung von Energiepfählen wesentlich besser geeignet. Für den Wärmeentzug bzw. den Wärmeeintrag sind jedoch Tunnels gut geeignet, besonders wenn höhere Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten und eine über das Jahr möglichst gleichmäßige Tunnellufttemperatur vorliegen.

3.2.5 Boden-/Tunnellufttemperaturen

Die Boden-/Tunnellufttemperaturen beeinflussen wesentlich die Temperatur des Wärmeträgers während des Wärmetausches. Höhere Boden-/Tunnellufttemperaturen sind für den Wärmeentzug während der Heizperiode günstig, in der Kühlperiode sollten jedoch möglichst tiefe Boden-/Tunnellufttemperaturen vorherrschen, um den Wärmeeintrag zu verbessern. Kühlt die Tunnelluft im Winter zu sehr ab, ist die Lage der Absorberleitungen eher in Richtung Erdreich zu verschieben, um eine direkte Beeinflussung der Absorberrtemperatur durch die Tunnelluft zu unterbinden. Bei hohen Kühllasten und niedrigen sommerlichen Tunnellufttemperaturen kann aber eine Anordnung der Absorberleitungen nahe an der Tunnelluftseite günstiger sein, um eine schnellere Abkühlung des Bauteiles zu ermöglichen.

3.2.6 Absorberelemente bei Tunnelbauwerken

Allgemeines

Derzeit vorhandene Möglichkeiten für Erdwärmeabsorber bei Tunnelbauwerken wurden bereits im

Schlussbericht zum Forschungsprojekt der BAST „Anwendung der Geothermie in Straßentunneln“ [18] zusammengestellt. Diesem Bericht sind u. a. auch Grundlagen zur Funktionsweise und zu geothermisch aktivierten Bauteilen zu entnehmen, weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird.

Aus Gründen der Vollständigkeit werden nachfolgend die einzelnen Absorberelemente allerdings nochmals kurz beschrieben. Da der Schwerpunkt des Forschungsprojektes die Nutzung der Erdwärme mittels Massivabsorbertechnologie ist, wird auf andere Möglichkeiten der Erdwärmennutzung wie Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, die thermische Nutzung von Dränagewässern, Abwässern oder Luftabwärme nicht näher eingegangen.

Wie bereits erwähnt, ist beim Einbau von Erdwärmeabsorberelementen in Tunnelbauwerken zwischen geschlossenem (Bild 12), offenem (Bild 15) und maschinell vorgetriebenem Tunnelbau zu unterscheiden.

Tunnel in geschlossener Bauweise

- Energievlies

Beim Energievlies handelt es sich um eine neuere Entwicklung, bei dem zwischen zwei vernadelten Vliesbahnen Absorberrohre eingelegt werden. Überall dort, wo Vliese im Erd-, Grund- und Tunnelbau zum Trennen, Filtern, Drainieren, Verstärken und Bewehren eingesetzt werden, kann das Energievlies grundsätzlich verwendet werden. Erste Anwendungen erfolgten beim Bau des Lainzer Tunnels in Wien, bei dem im Rahmen einer Pilotanlage (Bild 6) die Trennung zwischen Innen- und Außenschale mittels des Energievlieses erfolgte.

Eine Weiterentwicklung fand im Zuge der Geothermischen Versuchsanlage im Fasanenhofunnel der U-Bahnlinie U6 in Stuttgart statt (Bild 7), bei der anstelle einer Parallelschaltung der Absorberrohre eine Serienschaltung ausgeführt und nur eine Vlieslage als Trägerebene verwendet wurde [17, 18].

Für weiterführende Informationen zum Energievlies wird an dieser Stelle auf den Schlussbericht zum Forschungsprojekt der BAST „Anwendung der Geothermie in Straßentunneln“ [18], Kapitel 3.2.2 verwiesen.

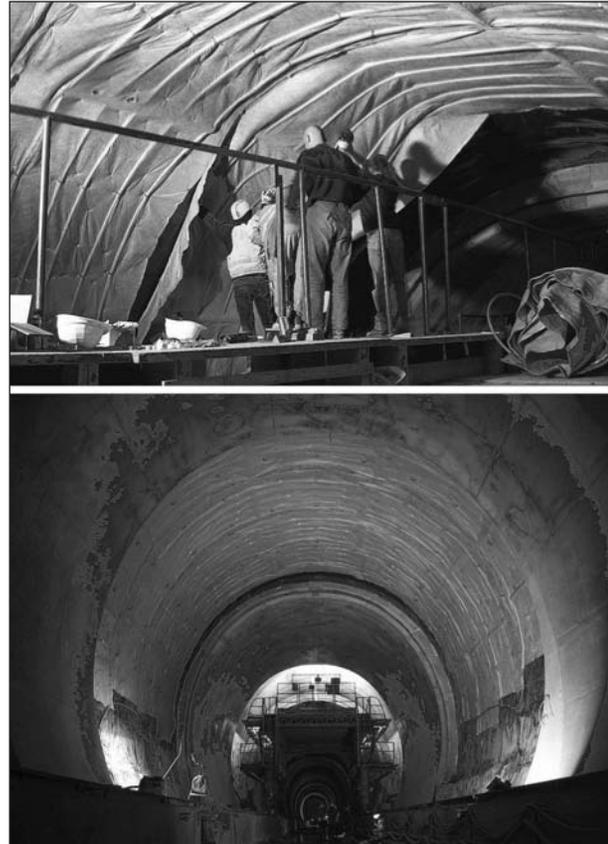


Bild 6: Einbau des Energievlieses in einem Testabschnitt des in geschlossener Bauweise errichteten Lainzer Tunnels



Bild 7: Einbau des Energievlieses in einem Testabschnitt des Fasanenhofunnels in Stuttgart [18]

- Energieanker

Anker werden für die Stabilisierung von Hängen und Böschungen sowie zur Sicherung von Tunnelbauwerken verwendet. Die Anker reichen damit tief in den Berg und erschließen große Volumina (s. Bild 10, links), die zur Geothermienutzung herangezogen werden können. Grundsätzlich werden Rohranker in Abhängigkeit vom Innendurchmesser mit geschlossenen Koaxialrohren ausgestattet oder das Ankerrohr selbst dient als Absorber, wodurch

nur ein offenes Rohr in den Anker eingebracht wird. In diesem Fall ist insbesondere auf die Abdichtung im Bereich des Ankerfußes zu achten.

Energieanker wurden erstmals im Zuge einer Versuchsanlage auf einer Böschung (s. Bild 10, rechts) der Errichtung des Lainzer Tunnels in Wien eingesetzt.



Bild 8: Herstellung eines Energieankers [29]



Bild 9: Beispiel einer absorberbelegten Tunnelsohle bei geschlossener Tunnelbauweise

Für weiterführende Informationen zum Energieanker wird an dieser Stelle auf den Schlussbericht zum Forschungsprojekt der BAST „Anwendung der Geothermie in Straßentunneln“ [18], Kapitel 3.2.2.3 verwiesen.

- Energiesohle

Um in geschlossener Bauweise errichtete Tunnelabschnitte kostengünstig zu aktivieren, bietet sich die Sohlbelegung an, welche weitgehend der Bodenplattenbelegung der offenen Bauweise entspricht. Da im Sohlbereich oftmals ein Toleranzbereich vorhanden ist, kann die Belegung im Bereich dieser Toleranzfläche erfolgen. Die belegbare Tunnellänge richtet sich weitgehend nach der zulässigen Absorberkreislänge (siehe Bild 9).

Für weiterführende Informationen zur Energiesohle wird an dieser Stelle auf den Schlussbericht zum Forschungsprojekt der BAST „Anwendung der Geothermie in Straßentunneln“ [18], Kapitel 3.2.2.4 verwiesen.

Tunnel in offener Bauweise

- Überblick

Bei Tunnelbauwerken, die in offener Bauweise errichtet werden, können in Abhängigkeit der Bauabfolge folgende Absorberelemente eingesetzt werden:

- Deckelbauweise (top-down method):
 - Energieschlitzwände,
 - Energiepfähle,
 - Energiebodenplatten,

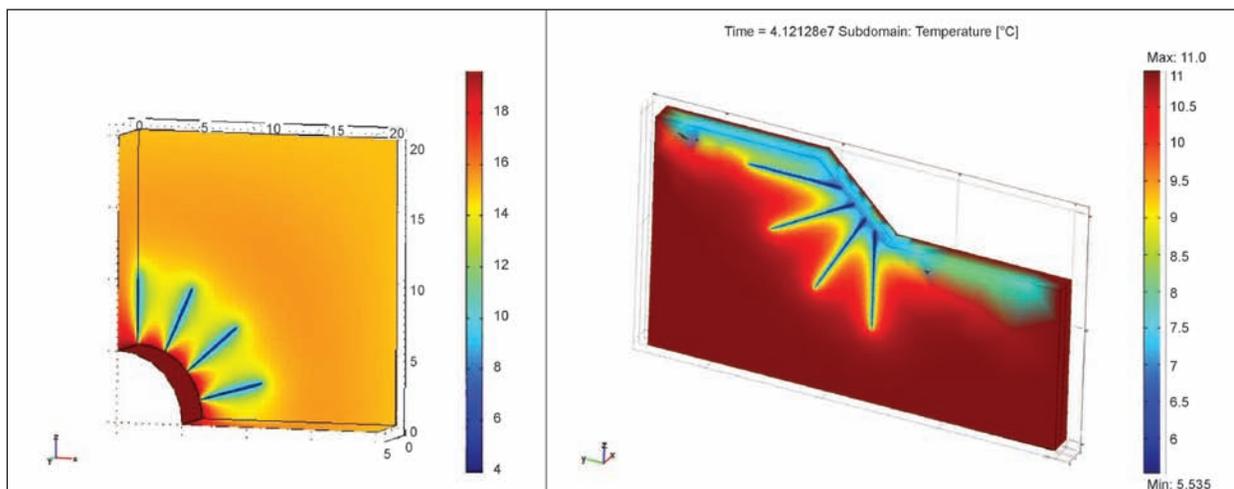


Bild 10: Links: thermische Nutzung von Ankern im geschlossenen Tunnelbau; rechts: thermische Nutzung von Ankern zur Böschungsstabilisierung

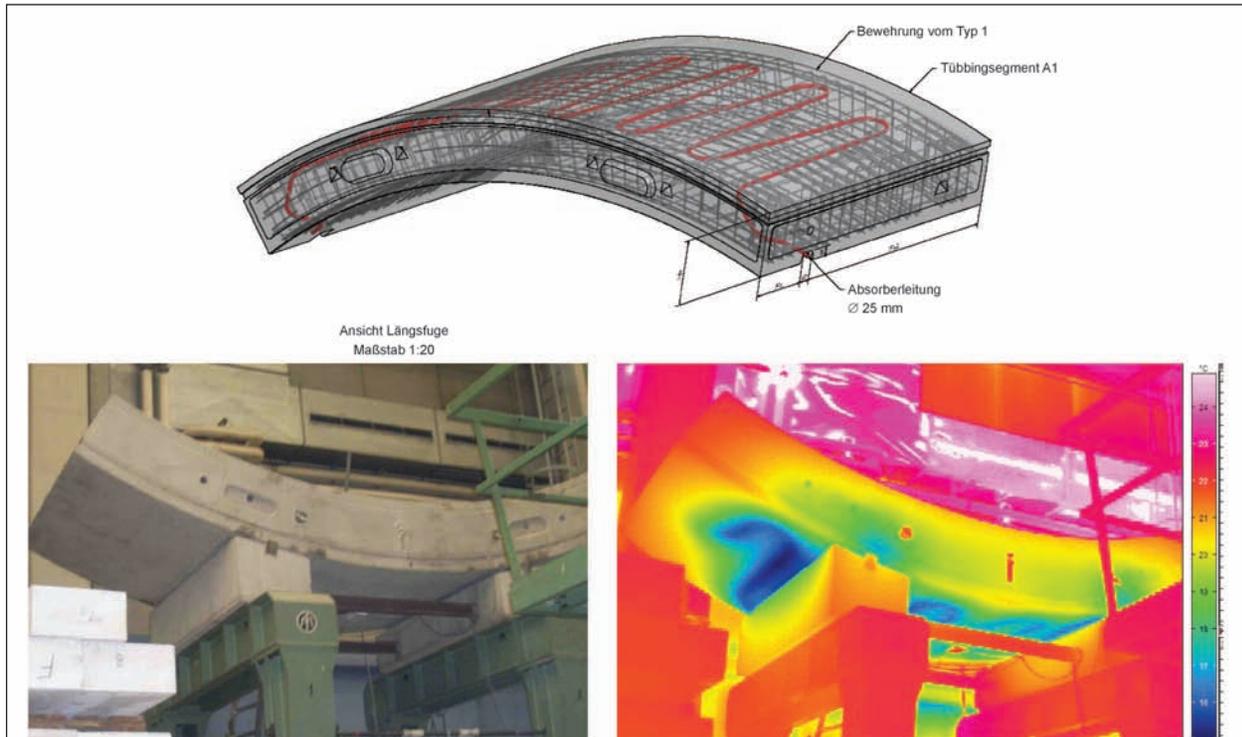


Bild 11: Energietübingung: Anordnung der Absorberelemente innerhalb des Betonfertigteils (oben) und testen eines Prototyps im Labor (unten) [33]

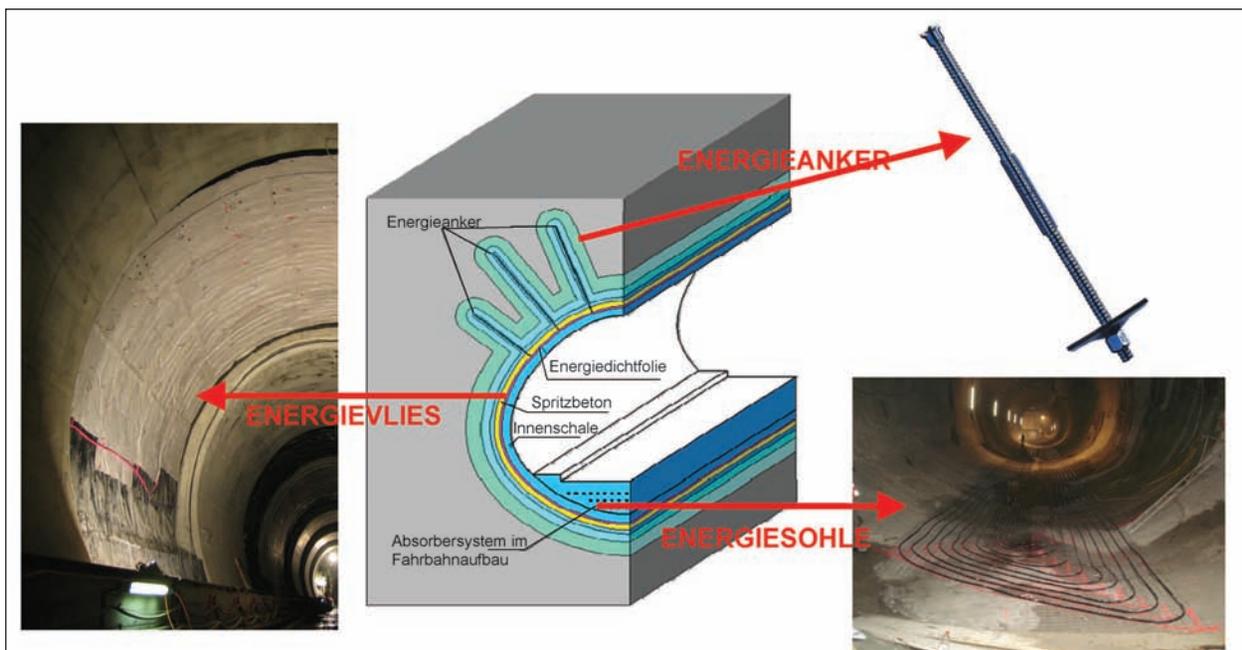


Bild 12: Möglichkeiten der Erdwärmenutzung bei geschlossenem Tunnelvortrieb

- Energiebrunnen.
- Offene Baugrube (bottom-up-method):
 - Energiebodenplatten,
 - Energiebrunnen.

- Energieschlitzwand

Für die Herstellung von Energieschlitzwänden sind in der Regel Bewehrungskörbe notwendig, welche im späteren Aushubzustand die Zugkräfte im Bauteil aufnehmen können. In diese Bewehrungskörbe werden die Absorberleitungen eingebaut, somit

sind die Leitungen während des Ablassens des Korbes in den Schlitz geschützt.

Eventuell muss ein Teilbereich des Korbes von der Belegung ausgespart werden, um beim Betonieren mit dem Kontraktorrohr eine Leitungsbeschädigung zu vermeiden. Die Anschlussstelle kann je nach gewähltem System oben am Schlitzwandkopf oder unten im Bereich der Bodenplatte angeordnet werden. Bei Körben mit zwei Korbteilen kann relativ einfach ein Stoß der Absorberleitungen vorgenommen werden. Die Körbe können schon im Bewehrungswerk oder auf der Baustelle mit Absorberleitungen belegt werden. Die Behinderung des Bauablaufes ist sehr gering (siehe Bild 13).

Für weiterführende Informationen zu Energieschlitzwänden wird an dieser Stelle auf den Schlussbericht zum Forschungsprojekt der BAST „Anwendung der Geothermie in Straßentunneln“ [18], Kapitel 3.1.2.4 verwiesen.

- Energiepfahl

Die Belegung der Pfahlkörbe mit Absorberleitungen entspricht sinngemäß jener der Energieschlitzwand. Es sind ebenso Korbstöße als auch Anschlussstellen am Pfahlkopf sowie im Bodenplattenbereich möglich. Die Behinderung des Bauablaufes ist ebenso gering (siehe Bild 14).

Für weiterführende Informationen zu Energiepfählen wird an dieser Stelle auf den Schlussbericht zum Forschungsprojekt der BAST „Anwendung der Geothermie in Straßentunneln“ [18], Kapitel 3.1.2.3 verwiesen.

- Energiebodenplatte

Als relativ einfaches System hat sich die Belegung unterhalb der eigentlichen Bodenplatte herausgestellt. Um die Arbeiten zu vereinfachen, sollte eine (je nach Bodenverhältnissen ca. 5 cm starke) Sauberkeitsschicht auf die fertige Aushubsohle aufgebracht werden, worauf die Absorberleitungen auf Befestigungshilfen (z. B. Bewehrungsmatten, Systemschienen o. Ä.) unverrückbar befestigt werden.

Erfolgt die Errichtung des Tunnelbauwerkes mittels der Deckelbauweise und kommen auch Energieschlitzwände oder Energiepfähle zum Einsatz, so kann die Anbindung dieser Absorberelemente auf Höhe der Bodenplatte erfolgen. Die dafür erforderlichen Anbindeleitungen können gemeinsam mit der Bodenplattenbelegung verlegt werden.



Bild 13: Beispiel einer Energieschlitzwand



Bild 14: Beispiel eines Energiepfahles

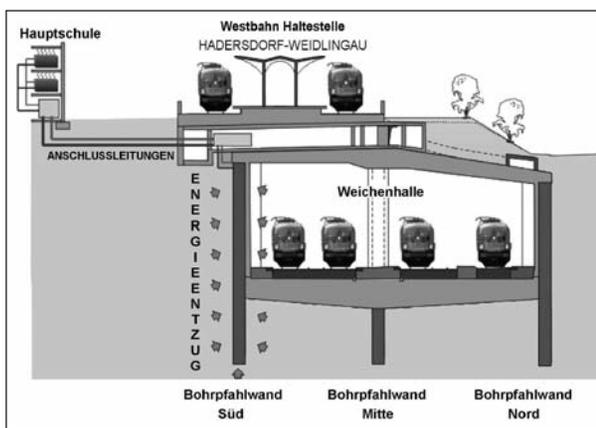


Bild 15: Beispiel einer Energiepfahlanwendung in einem Eisenbahntunnel in offener Bauweise

Sollen die Absorberleitungen ins Tunnelinnere geführt werden (Verteiler im Tunnelinneren situiert), so muss in Abhängigkeit vom vorhandenen Wasserdruck im Endzustand eine wasserdichte Durchführung durch die Bodenplatte hergestellt werden. Danach kann eine Schutzbetonschicht auf die Absorberleitungen aufgebracht werden, um Beschädigungen während der nachfolgenden Bewehrungsarbeiten der Bodenplatte zu vermeiden. Im Bauablauf müssen für die Belegung mit Absorberleitungen je nach belegter Fläche zumindest einige Tage als

Montagezeit eingeplant werden. Günstig sind möglichst große, in einem Stück herzustellende Bodenplattenabschnitte (siehe Bild 16).

Für weiterführende Informationen zu Energiebodenplatten wird an dieser Stelle auf den Schlussbericht zum Forschungsprojekt der BAST „Anwendung der Geothermie in Straßentunneln“ [18], Kapitel 3.1.2.4 verwiesen.

- Energiebrunnen

Bei zahlreichen Tunnelprojekten werden Brunnen zur Absenkung des Grundwasserspiegels benötigt. Diese meist temporären Maßnahmen können auch zur Heizung und/oder Kühlung benachbarter Bauwerke genutzt werden, und zwar sowohl temporär als auch permanent.

Derartige Energiebrunnen können begleitend zu Tunnelbauwerken realisiert werden. Da sich der Schwerpunkt dieses Forschungsprojektes allerdings auf die Nutzung der Erdwärme mittels Massivabsorbertechnologie bezieht, wird im Folgenden auf Energiebrunnen nicht näher eingegangen.

Maschinell vorgetriebene Tunnel

- Energietübbing

Der Energietübbing (Bild 11) wurde von den Firmen Ed. Züblin AG und Rehau AG + Co sowie parallel dazu auch von den PSP Beratenden Ingenieuren entwickelt. Damit kann nun auch aus maschinell vorgetriebenen Tunneln, bei denen Betonfertigteile (Tübbing) als Tunnelschale verwendet werden, Erdwärme entzogen werden. Nach bereits erfolgten Labor- und Feldversuchen wurde nun erstmalig beim Eisenbahntunnel Jenbach im Tiroler Unterinntal eine Tunnellänge von 54 m mit Energietübbingen ausgestattet, um den nahe gelegenen Bauhof der Gemeinde Jenbach mit Wärme aus dem Tunnel bzw. Erdreich zu versorgen [33].

Für weiterführende Informationen zum Energietübbing wird an dieser Stelle auf den Schlussbericht zum Forschungsprojekt der BAST „Anwendung der Geothermie in Straßentunneln“ [18], Kapitel 3.3.1 verwiesen.

3.2.7 Bauablauf

Der Bauablauf einer Erdwärmeanlage im Tunnelbau richtet sich weitgehend nach der Tunnelbau-

weise. Generell ist es von Vorteil, wenn die Absorberanlage in möglichst wenigen Arbeitsschritten unabhängig von anderen Bautätigkeiten hergestellt und bis zur Betriebsaufnahme gut geschützt werden kann, um Beschädigungen vorzubeugen. Grundsätzlich kann die Herstellung einer Erdwärmeanlage in mehrere Bauphasen gegliedert werden, wobei darauf zu achten ist, dass die diesbezüglichen Arbeiten möglichst im selben Takt wie die sonst üblichen Tunnelbauarbeiten (z. B. Betonieren der Innenschale) erfolgen.

3.2.8 Betriebsweise

In unseren Breitengraden und bei den vorherrschenden Temperaturen im Erdreich bzw. der Tunnelluft seichtliegender Straßentunnels sind sowohl reiner Heizbetrieb, reiner Kühlbetrieb als auch der saisonal wechselnde Heiz- und Kühlbetrieb technisch realisierbar. Je höher jedoch die Nutzungsdauer im Jahr (Jahresbetriebsstunden) und damit die Jahressumme aus entzogener und abgegebener Wärme ist, desto geringer wird die Amortisationszeit der Anlage.

3.2.9 Art des Wärmeentzuges/Wärmeträgers

Um die in den Bauteilen gespeicherte Wärme nutzen zu können, müssen Absorberleitungen in diese verlegt werden. Physikalisch günstig wäre eine dichte Verlegung sehr dünner Leitungen (Kapillarrohre) in vielen Lagen, was jedoch aus mechanischen, verletechnischen und auch wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist. Als Absorberrohre werden deshalb in der Praxis fast ausschließlich PE-HD-Rohre mit einem Querschnitt von 25 x 2,3 mm bzw. 32 x 2,9 mm (Außendurchmesser x Wandstärke) verwendet, da diese einen guten Kompromiss aus Verlegbarkeit, Kosten/lfm und Druckverlust durch die Rohrströmung aufweisen.

Als Wärmeträger kann entweder reines Wasser oder ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmitteln verwendet werden. Dabei ist besonders auf die Umweltverträglichkeit zu achten, da der Anlageninhalt oft mehrere tausend Liter beträgt. Hier bieten sich 1,2-Propylenglycol als Frostschutzmittel an. Das Frostschutz-Wasser-Gemisch hat eine etwas höhere Zähigkeit als reines Wasser, was bei der Dimensionierung der Umwälzpumpe und deren Stromverbrauch zu beachten ist.

Denkbar wäre auch die Anwendung der Direktverdampfung von Kältemitteln im Absorbersystem.

Dabei würde zwar die Leistungszahl von Wärmepumpenanlagen spürbar erhöht, der Kühlbetrieb wäre aber nicht möglich und als Rohrmaterial müsste aufgrund der höheren Drücke wesentlich teureres Kupferrohr o. Ä. verwendet werden. Leckagen wären bei diesem System durch Gasaustritte zudem wesentlich problematischer.

3.3 Einflussfaktoren Anlagenbetrieb

Grundsätzlich hat ein Großteil der Einflussfaktoren für die Planung auch wesentlichen Einfluss auf den Betrieb und somit die Betriebskosten einer Erdwärmeanlage, da nachträgliche Adaptierungen an den Anlageneigenschaften (Absorbertemperaturen in Abhängigkeit der Leistung und der Betriebsdauer) nicht mehr ohne weiteres möglich sind. Wesentliche Systementscheidungen mit deren Auswirkungen auf den Betrieb sowie sonstige betriebsbedingte Einflüsse sind:

- Betriebsweise,
- Lage der Erdwärmeabsorber,
- Wärmeträger/Absorberflüssigkeit,
- Wärmepumpen und Kältemaschinen.

Generell haben Tunnelthermie-Anlagen einen sehr geringen Wartungsaufwand. Wie bei jeder Energieerzeugungsanlage kann aber auch hier durch nicht optimale Betriebsweisen und Fehleinstellungen ein unnötiger Mehraufwand an Betriebskosten entstehen.

3.3.1 Betriebsweise

Für günstige Betriebskosten sind Betriebstemperaturen für die Wärme- bzw. Kälteanlagen des Abnehmers erforderlich, welche nahe an den Absorbertemperaturen liegen, um möglichst wenig Fremdenergie zuführen zu müssen. Somit bieten sich insbesondere für die Wärmeverteilung beim Nutzer großflächige Wärmetauscher wie betonkernaktivierte Decken, Fußboden- oder Wandheizungen an. Zudem sollten im Idealfall sowohl Heiz- als auch Kühlbedarf innerhalb eines Betriebsjahres vorhanden sein.

3.3.2 Lage der Erdwärmeabsorber

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 angegeben, hat die Lage der Erdwärmeabsorber einen wesentlichen Einfluss auf den Betrieb.

Je weiter die Erdwärmeabsorber vom Nutzer entfernt sind, desto größer sind die Rohrreibungsverluste bei der Umwälzung des Wärmeträgers. Bei im Erdreich verlegten Sammelleitungen ergeben sich eventuell Energieverluste infolge Wärmeleitung an den Boden, wenn z. B. im Winter die Bodentemperatur geringer als die Absorbertemperatur ist. Es kann in der Übergangszeit durch die Sammelleitungen aber auch zu einer Energieaufnahme entlang des Leitungsweges kommen und somit die Absorberfläche vergrößert werden. Um aber einen thermischen Kurzschluss zwischen Vor- und Rücklauf der Sammelleitungen zu vermeiden, sollten diese entweder gedämmt oder in einem Abstand von mind. 50 cm im Boden verlegt werden.

3.3.3 Wärmeträger/Absorberflüssigkeit

In der Regel wird je nach erforderlicher Minimaltemperatur reines Wasser oder ein Gemisch aus Wasser und umweltverträglichen Frostschutzmitteln als Wärmeträger verwendet. Reines Wasser hat den Vorteil geringerer Kosten für die Anlagenbefüllung und geringerer Viskosität bei der Umwälzung des Wärmeträgers im Absorbersystem, wovon direkt der Energieaufwand für die Umwälzpumpen abhängt. Zudem ist bei reinem Wasser die spezifische Wärmekapazität größer.

Der Anlagendruck sollte bei Betriebsbeginn öfter (z. B. jeden Monat), im weiteren Verlauf jährlich überprüft werden. Dabei ist auch auf eine gleichmäßige Durchströmung aller Kreise an den Verteilern zu achten, welche durch die Topmeter (Feinregulierventile mit Durchflussanzeige) sichtbar gemacht wird. Sind Kreise bei nachfolgenden Kontrollen schlechter durchströmt als zu Betriebsbeginn, kann dies an Ausgasungen und Luftblasenbildung in den Absorberkreisen liegen. Diese Kreise können bei Revisionen neuerlich einzeln entlüftet werden. Jedenfalls empfiehlt sich der Einbau von Entlüftern in den Sammelleitungen. Sollten Kreise ausfallen, was im laufenden Betrieb nur durch Verschmutzung oder Beschädigung von Absorberbauteilen passieren kann, können diese Kreise an den Verteilern abgeschlossen werden.

Bei Gemischen von Wasser und Frostschutzmitteln sollte regelmäßig (z. B. alle 5 Jahre) der Gefrierpunkt überprüft werden, um Schäden an den Wärmetauschern der Wärmepumpen vorzubeugen.

3.3.4 Wärmepumpen und Kältemaschinen

Die Wärmepumpen und Kältemaschinen sind in regelmäßigen Intervallen zu überprüfen. Evtl. sollte auch die Regelungstechnik an geänderte Betriebsbedingungen adaptiert werden. Bei größeren Anlagen empfiehlt sich der Einbau von mehrstufigen oder drehzahlgeregelten Umwälzpumpen für die Absorberanlage, welche eine bessere Anpassung an den Leistungsbedarf der Energieverbraucher ermöglichen und die Betriebskosten reduzieren. Bei Anlagen mit Verschmutzungsgefahr (z. B. infolge späterer Anlagenerweiterungen) sollten Schmutzfänger in die Sammelleitungen eingebaut werden, welche regelmäßig zu überprüfen bzw. zu reinigen sind.

3.4 Ausfallrisiken

3.4.1 Allgemeines

Die Verwendung von Bohrpfählen bzw. Schlitzwänden und Bodenplatten als Absorberbauwerke für die Gewinnung geothermischer Energie ist seit Jahren erprobt und an vielen Bauwerken wissenschaftlich untersucht worden. Trotzdem treten in der Diskussion über den möglichen Einsatz einer geothermischen Anlage wiederholt Fragen über mögliche Beschädigungen der Absorberleitungen beim Einbau bzw. beim Betrieb und über Handlungsweisen beim Ausfall der gesamten Anlage durch äußere Einflüsse auf.

Aus diesem Grund wird an dieser Stelle näher auf diese Fragen eingegangen.

3.4.2 Schäden an Absorberleitungen

Derzeit ist es üblich, dass während des Betoniervorganges der Absorberbauteile die Absorberleitungen mittels Druckluft unter einem Druck von mindestens 2 bar gehalten werden, um dem auftretenden Betondruck entgegenzuwirken. Nach dem vollendeten Abbindevorgang wird jeder einzelne Kreislauf mit einem Druck von 8 bar auf Dichtheit überprüft. Erfahrungsgemäß treten während des Herstellvorganges an weniger als 3 % aller Absorberleitungen Schäden auf, weshalb diese Kreisläufe in weiterer Folge nicht für die Wärmeextraktion verwendet werden können. Die restlichen auf Dichtheit und Durchgängigkeit überprüften Kreisläufe werden mit einem Wärmeträger gefüllt. Die einbetonierten Absorberleitungen sind durch den Beton vor

weiteren Beschädigungen bestens geschützt, weshalb nach der Bauphase Schäden an den Absorberleitungen praktisch auszuschließen sind.

Sollte es hypothetisch dennoch zu einem ungewollten Austritt des Wärmeträgers (z. B. Frostschutz-Wasser-Gemisch) kommen, ist mit keinen negativen Auswirkungen auf Beton, Boden oder Grundwasser zu rechnen, da es sich sowohl bei Wasser als auch bei 1,2-Propylenglycol um lebensmittelrechte, umweltverträgliche Stoffe handelt. Des Weiteren wäre die austretende Menge gering, da das Auftreten eines Lecks in einer Leitung zum sofortigen Druckabfall und in weiterer Folge zum Ausschalten der Wärmepumpe führen würde. Die einzige treibende Kraft für das Austreten des Wärmeträgers wäre dann die Schwerkraft. Demzufolge könnten, aufgrund der schlangenförmig verlegten Absorberleitungen, auch nur geringe Mengen des Wärmeträgers austreten.

3.4.3 Bodengefrieren

Für den Betrieb der Anlage ist es wichtig, dass die Oberflächentemperatur an den Absorberbauteilen zu keiner Zeit unter den Gefrierpunkt fällt, um ein Bodengefrieren und damit Eislinnenbildung zu vermeiden. Dies wird durch eine richtige Anlagenauslegung und zusätzlich mit einer automatischen Abschaltung der Wärmepumpe bei Unterschreiten des Gefrierpunktes im Wärmeträger erreicht.

3.5 Rechtliche Rahmenbedingungen

Gemäß [36] sind für die Genehmigung von geothermischen Anlagen in Deutschland grundsätzlich folgende Gesetze zu berücksichtigen:

- Bundesberggesetz (BergG),
- Lagerstättengesetz,
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG),
- Landeswassergesetze,
- Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG).

In Bezug auf das Bergrecht wird in [36] angeführt, dass es sich bei Erdwärme um einen so genannten bergfreien Bodenschatz handelt und bei einer Gewinnung somit eine bergrechtliche Bewilligung erforderlich ist. Eine Ausnahme davon besteht, wenn die Erdwärmennutzung auf einem Grundstück aus Anlass

oder im Zusammenhang mit dessen baulicher Nutzung steht, was beispielsweise bei einem Haus mit Energiepfählen als Gründung der Fall wäre.

Bei einem Tunnelbauwerk, bei dem „nebenbei“ Erdwärme dem Gebirge entzogen und diese dann veräußert wird, steht die Erdwärmennutzung nicht unmittelbar mit der baulichen Nutzung im Zusammenhang. Im Gegensatz dazu kann bei einer betriebsinternen Verwendung der entzogenen Energie (z. B. zur Klimatisierung von Betriebsgebäuden) ein Zusammenhang mit der baulichen Nutzung abgeleitet werden. Zu beachten ist weiter, dass ein Tunnelbauwerk bzw. eine Tunnelthermie-Anlage meistens grundstücksübergreifend ist, weshalb eine bergrechtliche Bewilligung erforderlich sein dürfte [36].

Derzeit gibt es in Deutschland jedenfalls keine eindeutigen Bestimmungen in Bezug auf die Errichtung einer Tunnelthermie-Anlage, sodass die Behörden voraussichtlich eine Einzelfallprüfung vornehmen werden.

Aufgrund der damit verbundenen rechtlichen Unsicherheit ist insbesondere im Rahmen der ersten Pilotprojekte eine möglichst frühzeitige Kontaktaufnahme mit den entsprechenden Behörden zu empfehlen, um die gegenseitigen Vorstellungen und Möglichkeiten abzustimmen.

3.6 Projektstufen einer Tunnelthermie-Anlage

Eine erfolgreiche Implementierung einer Tunnelthermie-Anlage in ein Tunnelbauwerk basiert auf einer möglichst frühen Berücksichtigung der Erdwärmanlage im allgemeinen Tunnelplanungsprozess, im optimalen Fall sollte die Möglichkeit einer thermischen Nutzung bereits in der Vorplanungsphase untersucht werden. In diesem Zusammenhang gilt es, nicht nur anlagentechnische (Anlagendesign), sondern auch ökologische, rechtliche (Beeinflussung fremder Rechte) und wirtschaftliche (mögliche Abnehmer und Vertriebspartner) Gesichtspunkte möglichst früh in Zusammenhang zu setzen.

Da die Erdwärmanlage ein Bestandteil der Tunnelanlage ist, können Mehraufwand und einzusetzendes Risikokapital bei einer mehrstufigen Anlagenentwicklung durch Synergieeffekte minimiert werden, zumal die benötigten Basisinformationen ohnehin im Rahmen des allgemeinen Planungsprozesses erhoben werden.

Die einzelnen Projektstufen zur Implementierung einer Erdwärmanlage in ein Tunnelbauwerk können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- 1) Grundsatzstudie,
- 2) Erkundungsphase,
- 3) Machbarkeitsstudie und Entwurfsplanung,
- 4) Behördenvorabstimmung,
- 5) Wirtschaftlichkeitsuntersuchung,
- 6) Genehmigungsplanung und Planfeststellung (in Österreich: Einreichplanung),
- 7) Ausschreibung,
- 8) Bauphase,
- 9) Betriebsphase.

Die angeführten Planungsstufen bauen aufeinander auf und liefern teilweise Meilensteine und Kriterien, die erfüllt werden müssen, damit eine erfolgreiche Umsetzung der Tunnelthermie-Anlage gewährleistet werden kann. Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Entwicklungsphasen sind den nachfolgenden Kapiteln zu entnehmen.

3.6.1 Grundsatzstudie

Zielsetzung

- Abschätzung des verfügbaren thermischen Entzugspotenzials,
- Identifizierung möglicher Wärmeabnehmer und Aufbau eines grundsätzlichen Nutzungskonzepts,
- Identifizierung von Konfliktszenarien: Sensible Grundwasserkörper, Beeinflussung fremder Rechte (Grundwassernutzung, thermische Bodennutzung).

Bearbeitungszeitfenster

- Vorerkundungsphase, Trassenauswahl.

Erforderliche Grundlagen

- Vorhandenes Tunnelkonzept: Trassierung, Bauweise,
- geologische und hydrogeologische Grundlagen: geologische Basiskarten, geowissenschaftliche Basisdaten aus vorhandenen Fremdunterlagen

oder aus bereits im Zuge der Vorerkundung erhobenen Basisdaten.

Durchzuführende Leistungen

- Systemauswahl, Vorauswahl von Absorbertechnologien zur Nutzung der Erdwärme,
- Bewertung von umsetzbaren Absorbertechnologien und Empfehlungen für die weitere Vorgangsweise (Erkundungen, Untersuchungen, Planungsschritte etc.),
- Ermittlung des zur Verfügung stehenden bzw. sinnvoll zu nutzenden Erdwärmepotenzials,
- Ermittlung möglicher Konflikte,
- Bedarfsabschätzung, Ermittlung von Nutzungsszenarien.

Erfolgskriterien

- Wirtschaftlich sinnvolles Nutzungskonzept, Identifizierung von Abnehmern.

3.6.2 Erkundungsphase

Im Rahmen der Erkundungsphase sollen jene Basisdaten erhoben werden, die eine exakte Dimensionierung der Erdwärmeanlage ermöglichen. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um geowissenschaftliche und geotechnische Basisdaten, die in Abstimmung mit dem allgemeinen Erkundungs- und Beweissicherungsprogramm akquiriert werden können (vgl. Kapitel 4).

3.6.3 Machbarkeitsstudie und Entwurfsplanung

Zielsetzung

- Untersuchung der technischen Machbarkeit einer Erdwärmeanlage.

Bearbeitungszeitfenster

- Nach Festlegung des Trassenverlaufs und des Bauwerkskonzeptes (Querschnitte, Bauweise etc.),
- nach Abschluss bzw. begleitend zur Erkundungsphase,
- vor Beginn eines eventuellen Umweltverträglichkeitsprüfungsverfahrens,

Erforderliche Grundlagen

- Grundsatzstudie,
- Tunnelplanung (Regelquerschnitt etc.),
- Baukonzept (geschlossene, offene oder maschinelle Tunnelbauweise),
- Heiz- und Kühllast potenzieller Nutzer oder Abschätzung des Tunnel-Energiepotenzials (Spitzenwerte und jährliche Arbeitsleistung),
- detaillierte Angaben zu den Grundwasserverhältnissen,
- Datengrundlage zur Erstellung eines geologischen Untergrundmodells.

Durchzuführende Leistungen

- Aufbau eines geologischen Umgebungsmodells (für Anlagendimensionierung und Bewertung von technischen Gefährdungsmomenten),
- Untersuchung der technischen Machbarkeit einer Erdwärmeanlage unter Zugrundelegung der Erkenntnisse aus der Grundsatzstudie, welche Absorbertechnologien technisch sinnvoll umgesetzt werden können:
 - Auswahl von umsetzbaren Absorbertechnologien und Festlegung des ungefähren Umfangs sowie der Situierung von Absorberelementen,
 - Abschätzung der Wärmeaustauschraten,
 - Abschätzung der möglichen bzw. erforderlichen Absorberfläche zur Abdeckung des Heiz- und Kühlbedarfs,
 - Abschätzung von Absorberabstand bzw. Absorbertiefe in Abhängigkeit von den eingesetzten Technologien,
- Abstimmung mit Tunnelplanung:
 - Grobplanung des Leitungskonzeptes (Leitungsführung, Durchbrüche etc.),
 - Auswahl der(s) Verteilerstandorte(s),
 - Auswahl der(s) Wärmepumpenstandorte(s),
- Abstimmung mit Energieabnehmer,
- Simulation der Umweltauswirkungen (z. B. Temperaturänderungen im Untergrund).

Erfolgskriterien

- Technische Umsetzbarkeit der Anlage,
- Konflikte mit Wasserrechten bzw. anderen fremden Rechten.

3.6.4 Behördenvorabstimmung

Nach Prüfung der technischen Machbarkeit empfiehlt es sich, eine Abstimmung mit den entsprechenden Behörden (vgl. Kapitel 3.5) durchzuführen, um die rechtlichen Randbedingungen im Zusammenhang mit der Errichtung der Tunnelthermie-Anlage abzuklären. Damit kann bereits in einem frühen Planungsstadium ein Konsens zwischen Behörde und Anlagenbauer gefunden und in der weiteren Planung berücksichtigt werden.

3.6.5 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Zielsetzung

- Untersuchung der Wirtschaftlichkeit einer Erdwärmearanlage.

Erforderliche Grundlagen

- Machbarkeitsstudie,
- Heiz- und Kühlbedarf des Nutzers bzw. geplanter Energieentzug:
 - Spitzenwerte der Heiz- und Kühlleistung [kW],
 - Jahresheiz- und Jahreskühlarbeit [kWh],
- detaillierte Angaben zu den Untergrund- und Grundwasserverhältnissen:
- Angabe infrage kommender konventioneller Energieträger.

Durchzuführende Leistungen

- Untersuchung der Wirtschaftlichkeit einer Erdwärmearanlage unter Zugrundelegung der Erkenntnisse aus der Machbarkeitsstudie, an welchen Standorten und in welchem Umfang die Absorbertechnologien technisch sinnvoll umgesetzt werden können:
 - Abschätzung der Herstellungskosten,
 - Abschätzung der Betriebskosten,

- Gegenüberstellung von Erdwärme zu herkömmlichen Energieträgern (Strom, Öl, Gas, Fernwärme etc.),
- Ermittlung der Amortisationszeit (statisch und dynamisch) unter Verwendung der prognostizierten Energiepreisentwicklung,
- Untersuchung von klimarelevanten Einflüssen (CO₂-Einsparung etc.),
- Abstimmung mit Behörden bezüglich der Möglichkeiten von Förderungen.

3.6.6 Genehmigungplanung sowie Planfeststellung

Zielsetzung

- Planfeststellungsantrag zur Erwirkung der Genehmigung für die Umsetzung der Erdwärmearanlage (Planfeststellungsbeschluss).

Erforderliche Grundlagen

- Geologisches Gutachten,
- geotechnisches Gutachten,
- hydrogeologisches Gutachten,
- Tunnelplanung,
- Heiz- und Kühlbedarf des Nutzers bzw. geplanter Energieentzug:
 - jahreszeitlicher Verlauf der Heiz- und Kühlleistung [kW],
 - jahreszeitlicher Verlauf der Heiz- und Kühlarbeit [kWh].

Durchzuführende Leistungen

- Darstellung der Temperaturverhältnisse im Bereich der Erdwärmearanlage,
- detaillierte geothermische Systemberechnung (transiente Simulation der Absorberanlage),
- technischer Bericht zur geplanten Erdwärmearanlage,
- planliche Darstellung der Erdwärmearanlage,
- Abstimmung mit Behörden.

3.6.7 Ausschreibung

Zielsetzung

- Ausschreibung der Erdwärmeanlage gemeinsam mit dem Tunnelprojekt, sodass der Auftragnehmer ein Angebot und in weiterer Folge die Ausführungsplanung erstellen kann.

Erforderliche Grundlagen

- Entwurfsplanung und Planfeststellungsbeschluss.

Durchzuführende Leistungen

- Detaillierte geothermische Systemberechnung (transiente Simulation der Absorberanlage),
- Optimierung der Anlage,
- technischer Bericht zur geplanten Erdwärmeanlage,
- Erstellung der Ausschreibungspläne für die Erdwärmeanlage (Absorber, Leitungsführung, Anschlussdetails etc.),
- Erstellung des Leistungsverzeichnisses sowie der Ausschreibungsunterlagen.

3.6.8 Bauphase

Die Herstellung der Absorberanlage erfolgt grundsätzlich wie in den Kapiteln 5.5 und 5.6 beschrieben.

Besonderes Augenmerk ist auf eine kontinuierliche Druckhaltung zu legen, damit einerseits eventuelle Beschädigungen frühzeitig erkannt werden und andererseits ein Gegendruck beim Betoniervorgang vorhanden ist.

Des Weiteren ist in Form von Bohrverboten etc. darauf zu achten, dass bereits einbetonierte Absorberleitungen nicht nachträglich beschädigt werden.

Zwecks späterer Feinabstimmung und Überwachung der Anlage können im Zuge der Errichtung diverse Messaufnehmer bzw. Messinstrumente installiert werden.

Nach Fertigstellung und vor Inbetriebnahme der Tunnelthermie-Anlage ist zu empfehlen, einen Leistungstest durchzuführen. Dazu wird eine definierte Energiemenge in die Absorberanlage eingebracht und deren Impulsantwort an mehreren Positionen des Rücklaufs (Verteilerstandorte, Eingang

Wärmepumpenkreislauf etc.) überwacht. Hierdurch lassen sich eventuell vorhandene Probleme identifizieren.

3.6.9 Betriebsphase

Im Zuge der ersten 3 bis 5 Betriebsjahre der Tunnelthermie-Anlage sollte eine verstärkte thermische Überwachung zwecks Feinabstimmung der Anlagenparameter erfolgen.

Die Betriebsführung einer Tunnelthermie-Anlage erfolgt grundsätzlich in gleicher Weise wie bei herkömmlichen Heiz- und Kühlanlagen. Wartungsarbeiten fallen somit im Wesentlichen im Bereich der Wärmepumpenanlage und eventuell im Bereich der Verteiler (z. B. Nachjustierung des Durchflusses in einzelnen Absorberkreisen, Entlüftung der Leitungen) an.

Bei den Absorberleitungen kann davon ausgegangen werden, dass keine Wartungsarbeiten anfallen werden, da diese einbetoniert und somit bestens gegen äußere Beschädigungen geschützt sind.

Mit Hilfe eines Monitoringprogramms (Temperaturfühler, Wärmemengenzähler, Stromzähler etc.) empfiehlt es sich, letztendlich – wie auch bei herkömmlichen Heiz- und Kühlanlagen – den Betrieb der Anlage zu überwachen.

3.7 Planungssystematik und Angabe von Entwurfsparametern

Auf Basis der Beschreibungen in den vorangegangenen Kapiteln lassen sich für den Entwurf einer Tunnelthermie-Anlage folgende Entwurfsparameter zusammenfassen:

Energieabnehmer

- Abnehmer der aus dem Tunnelbauwerk entzogenen Energie sollten in der unmittelbaren Umgebung der Tunnelthermie-Anlage liegen.
- Beim Abnehmer sollte ein Niedertemperaturheizsystem (z. B. Fußbodenheizung, Betonkernaktivierung) vorhanden sein, um beim Betrieb von Wärmepumpen wirtschaftliche Leistungszahlen zu erreichen.
- Der Leistungsbedarf sollte zumindest ca. 50 kW betragen. Bei kleinerem Leistungsbedarf kann meist mit anderen Systemen (z. B. Erdwärmesonden) das Auslangen gefunden werden.

- Ein Energiebedarf (kWh pro Jahr) sollte möglichst ganzjährig bestehen, damit der Anlagenbetrieb auch ganzjährig geführt werden kann. Dadurch kann ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb erreicht werden. Es sollte sowohl ein Heiz- als auch ein Kühlbedarf bestehen, um eine ausgeglichene Energiebilanz zu erreichen.
- Aus betrieblicher (Wartungsarbeiten) und vertraglicher Sicht ist es vorteilhafter, wenn die aus einer Tunnelthermie-Anlage entzogene Energie für den Eigenbedarf (z. B. Klimatisierung von Betriebsgebäuden, Eisfreihaltung etc.) verwendet wird.

Aufbau der Tunnelthermie-Anlage

- Eine Tunnelthermie-Anlage besteht im Wesentlichen aus den Absorberelementen, den Anbindeleitungen (Verbindung Absorberelemente und Verteiler), dem Verteiler, den Sammelleitungen (Verbindung Verteiler und Wärmezentrale) und der Wärmezentrale (Wärmepumpe, Kältemaschine, hydraulische Betriebseinrichtungen).
- Bild 17 bis Bild 20 zeigen schematisch den prinzipiellen Aufbau einer Tunnelthermie-Anlage für

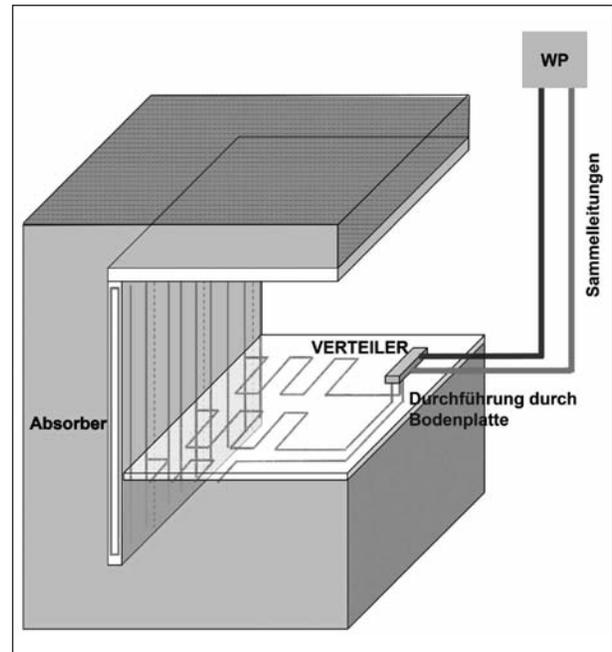


Bild 18: Beispielhafter Aufbau einer Tunnelthermie-Anlage bei einem in offener Bauweise errichteten Tunnelbauwerk (Deckelbauweise) mit Energieschlitzwänden und Energiebodenplatte. Die Anbindung der Energieschlitzwände erfolgt dabei im Bereich der Bodenplatte. Sämtliche Absorberleitungen werden durch die Bodenplatte in das Tunnelinnere geführt, wo auch der Verteiler situiert ist (z. B. in einer Nische). Vom Verteiler verlaufen die Sammelleitungen bis zum Abnehmer

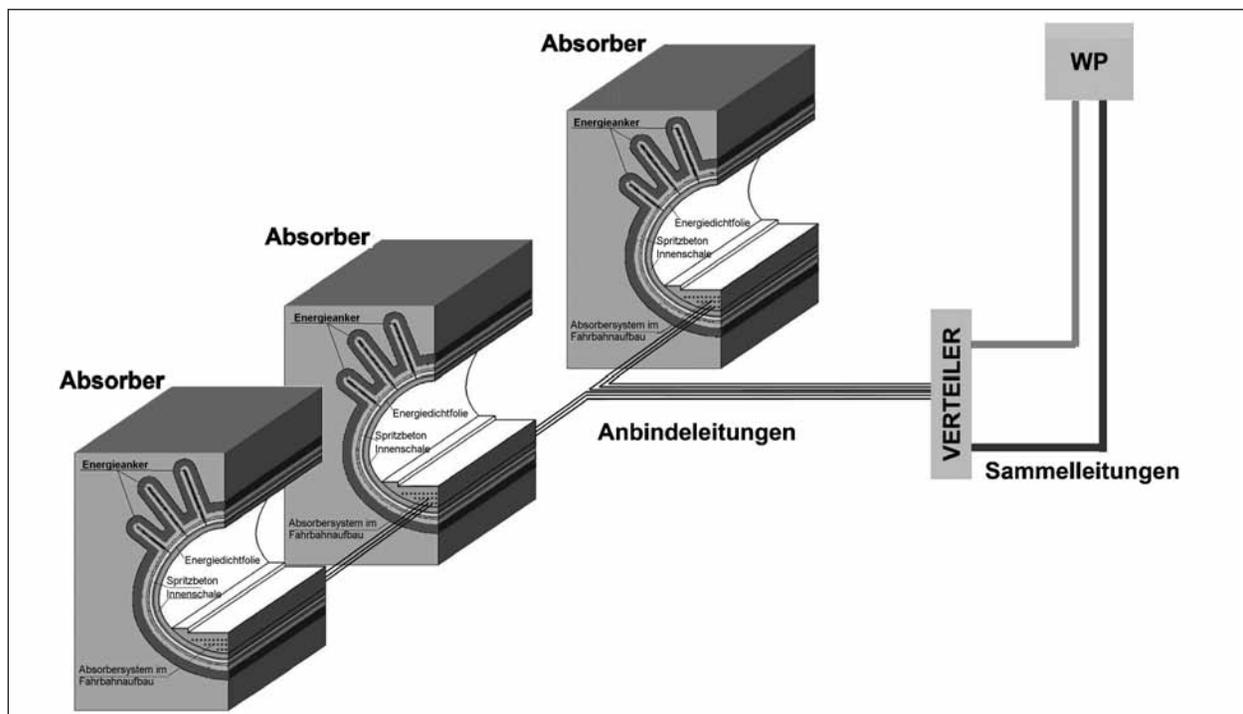


Bild 17: Beispielhafter Aufbau einer Tunnelthermie-Anlage bei einem in geschlossener Bauweise errichteten Tunnelbauwerk. Die Anbindeleitungen zu den einzelnen Absorberelementen werden in der Tunnelsohle geführt und an zentraler Stelle an den Verteiler (z. B. in einem Querschlag situiert) angeschlossen. Vom Verteiler verlaufen die Sammelleitungen bis zum Abnehmer, wobei die Sammelleitungen beispielsweise über separat hergestellte Vertikalbohrungen bis an die Geländeoberfläche geführt werden

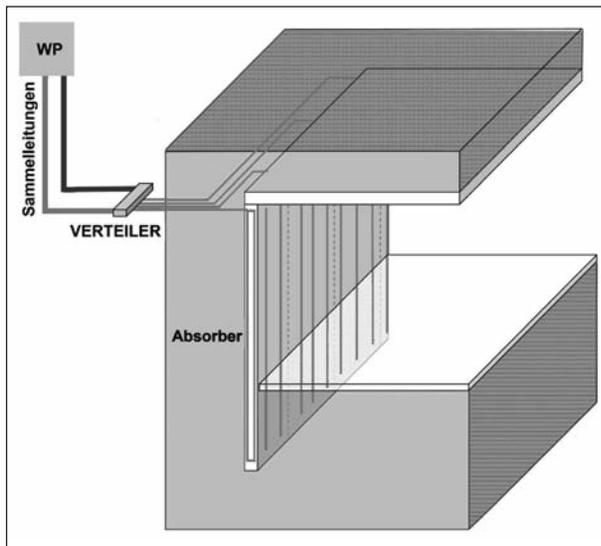


Bild 19: Beispielhafter Aufbau einer Tunnelthermie-Anlage bei einem in offener Bauweise errichteten Tunnelbauwerk (Deckelbauweise) mit Energieschlitzwänden. Die Absorberleitungen werden dabei im Kopfbereich der Schlitzwände herausgeführt und seitlich des Deckels bis zum Verteiler (z. B. in einem Betriebsraum oder einem Schacht situiert) geführt. Vom Verteiler verlaufen die Sammelleitungen bis zum Abnehmer

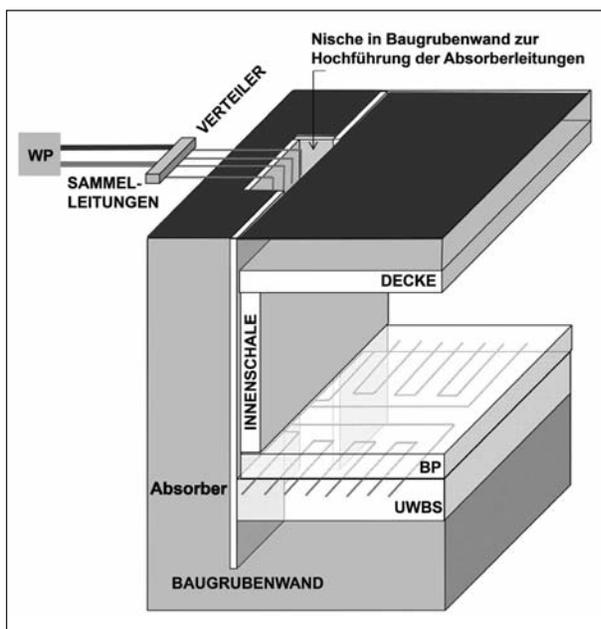


Bild 20: Beispielhafter Aufbau einer Tunnelthermie-Anlage bei einem in offener Bauweise errichteten Tunnelbauwerk (offene Baugrube mit temporären Baugrubenwänden) mit Energiebodenplatte. Die Absorberleitungen werden dabei auf der Unterwasserbetonsohle (oder einer Sauberkeitsschicht) verlegt. Sollen die Absorberleitungen nicht ins Tunnelinnere geführt werden, so können diese beispielsweise in einer Nische der Baugrubenwand seitlich des Bauwerkes hochgeführt und an den Verteiler angeschlossen werden (z. B. in einem Betriebsraum oder einem Schacht situiert)

unterschiedliche Tunnelbauarten mit unterschiedlichen Varianten der Leitungsführung.

- Die Leistungsfähigkeit der Absorberelemente in einem Tunnelbauwerk wird auch von der Tunnellufttemperatur beeinflusst. Um somit eine starke Beeinflussung durch die Außenlufttemperatur hintanzuhalten, sollten die Absorberelemente möglichst weit entfernt von den Portalen situiert sein. Auf Basis der Beschreibungen im Kapitel 4.3 kann angegeben werden, dass die Absorberelemente zumindest ca. 300 m vom Tunnelportal entfernt sein sollten, um den Einfluss der Außenluft zu reduzieren.

Absorberelemente

In Abhängigkeit von der Tunnelbauweise stehen folgende Absorberelemente zur Verfügung, wobei darauf hinzuweisen ist, dass bei den einzelnen Elementen ein unterschiedlicher Entwicklungsstand vorliegt (siehe dazu Tabelle 2 in Kapitel 5.2):

- geschlossene Bauweise:
 - Energievlies,
 - Energieanker,
 - Energiesohle,
- offene Bauweise mit Deckelbauweise („top-down method“):
 - Energieschlitzwände,
 - Energiepfähle,
 - Energiebodenplatten,
- offene Bauweise mit offener Baugrube („bottom-up method“):
 - Energiebodenplatten,
- maschinell vorgetriebener Tunnel:
 - Energietübbing.

Im Allgemeinen sollten möglichst einfach herzustellende Absorberbauteile wie Bodenplatten, Schlitzwände und Bohrpfähle thermisch aktiviert werden, um die Errichtungskosten zu minimieren.

In Bezug auf den Absorberrohrdurchmesser kann eine übliche Dimension von DN 25 x 2,3 mm (HD-PE) angegeben werden.

Bei den Absorberrohrabständen kann von folgenden Richtgrößen ausgegangen werden:

- Energievlies: Achsabstand ca. 30 cm (vgl. Plan GB-2 im Anhang A),
- Energiesohle: Achsabstand ca. 25 cm (vgl. Plan GB-2 im Anhang A),
- Energietübbing: vgl. Energievlies,
- Energieschlitzwand: Achsabstand ca. 20 cm (vgl. Pläne OB-1 und OB-2 im Anhang B),
- Energiepfahl \varnothing 90: ca. 8 bis 10 Absorberrohre im Querschnitt (vgl. Pläne OB-5 und OB-6 im Anhang B),
- Energiebodenplatte: Achsabstand ca. 20 bis 40 cm (vgl. Pläne OB-7 und OB-8 im Anhang B).

Der tatsächlich erforderliche Achsabstand ist im Zuge der Anlagendimensionierung zu ermitteln.

Die Fließgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit in den Absorberrohren soll 0,2 bis maximal 1,0 m/s betragen, wobei eine turbulente Strömung aufgrund der besseren Wärmeübertragung zu bevorzugen ist.

Bei der Belegung von Energiepfählen und Energieschlitzwänden kann es sinnvoll sein, dass nur auf der erdberührten Seite Absorberleitungen verlegt werden und auf der Luftseite keine Belegung stattfindet. Dadurch wird einerseits die Beeinflussung durch die Tunnelluft reduziert und andererseits werden in der Bauphase Beschädigungen der Leitungen – etwa durch die Herstellung von Bohrungen – hintangehalten.

Die Lage der Anschlussstellen von Energiepfählen, Energieschlitzwänden etc. ist festzulegen (entweder im Kopfbereich oder im Bereich der Bodenplattenanbindung).

Anbindeleitungen (Verbindung Absorberelemente mit Verteiler)

Die Anbindeleitungen sollten – soweit möglich – auf kürzestem Wege, parallel mit ausreichendem Abstand und ohne Kreuzungspunkte zum Verteiler geführt werden.

Unmittelbar vor dem Verteiler sind die einzelnen Leitungen so zu verschwenken, dass diese direkt an den Verteiler angeschlossen werden können (Trennung Vor- und Rücklaufleitungen).

Sämtliche Absorberleitungen müssen während der folgenden Bauarbeiten vor Beschädigungen geschützt sein.

Rohrverbindungen sind mittels Elektro-Schweißmuffen auszuführen.

Um zahlreiche Muffenverbindungen zu vermeiden, sollte die Verlegung der Anbindeleitungen entsprechend den Betonierabschnitten der Baufirma erfolgen.

Erforderlichenfalls sind druckwasserdichte Durchführungen durch einzelne Bauteile (z. B. Bodenplatte im Grundwasser) einzuplanen.

Im Bereich von Bauwerksfugen sind gegebenenfalls planerische Maßnahmen zum Schutz der Leitungen zu treffen (z. B. Polsterschlauch).

Mit dem Bauwerksstatiker ist abzustimmen, inwieweit einzelne Bereiche nicht mit Absorberleitungen belegt werden dürfen.

Im Betrieb sollten Temperaturen der Absorberflüssigkeit unter dem Gefrierpunkt über einen längeren Zeitraum vermieden werden, damit kein Bodengefrieren auftritt.

Verteiler

Der Verteiler sollte möglichst zentral und nahe an den Absorberelementen situiert werden, damit lange Leitungswege vermieden werden.

Mögliche Aufstellungsorte in einem Tunnelbauwerk sind Nischen, Querschläge oder auch diverse Räume, die an das Tunnelbauwerk angeschlossen sind. Bei seicht liegenden Tunnelbauwerken kann der Verteiler erforderlichenfalls auch in einem Schacht an der Geländeoberfläche situiert werden (vgl. Bild 20).

Der Verteiler soll grundsätzlich leicht zugänglich sein.

Die einzelnen am Verteiler angeschlossenen Absorberkreise sollten eine maximale Leitungslänge von ca. 300 m nicht überschreiten, damit die Rohrreibungsverluste in einem vertretbaren Ausmaß bleiben. Erforderlichenfalls können die Anbindeleitungen auch mit einem größeren Rohrquerschnitt (z. B. DN 32 statt DN 25) ausgeführt werden, um die Rohrreibungsverluste zu reduzieren.

Soll ein größerer Tunnelbereich mit Absorberelementen ausgerüstet werden, sodass sich Absorberkreislängen von mehr als 300 m ergeben, so sollten mehrere Verteiler bzw. Unterverteiler vorgesehen werden. Diese Verteiler sind dann wiederum über

Sammelleitungen miteinander zu verbinden. Ein Beispiel dafür zeigt Bild 46 in Kapitel 5.5.5 für einen Tunnel in geschlossener Bauweise. Die Verbindung der einzelnen Verteiler soll schließlich im Tichelmann-Prinzip erfolgen, damit eine gleichmäßige Durchströmung aller Verteiler und damit auch aller Absorberleitungen gewährleistet ist.

Es sollten alle am Verteiler angeschlossenen Absorberkreise die gleiche Gesamtlänge aufweisen. Geringfügige Unterschiede in der Gesamtlänge spielen dabei keine Rolle, da der Durchfluss eines jeden Absorberkreises am Verteiler eingestellt werden kann, vorausgesetzt, der Verteiler verfügt über derartige Feineinstellventile. Damit können unterschiedliche Rohrreibungswiderstände ausgeglichen werden.

Im Betrieb sollte darauf geachtet werden, dass alle Absorberkreise möglichst gleich durchströmt werden. Dies kann am Verteiler eingestellt werden.

Im Nahbereich der Verteiler kommt es zu einer Sammlung aller Absorberkreise, da diese ja an den Verteiler angeschlossen werden müssen. Aus Platzgründen müssen diese Anbindeleitungen im Regelfall nebeneinander oder übereinander geführt werden. Dabei empfiehlt es sich, die Leitungen getrennt nach Vor- und Rücklauf zu sammeln und bei langen Leitungswegen (ca. ab 50 m) thermische Trennelemente (XPS-Körper) zwischen den Vor- und Rücklaufleitungen zu situieren.

Sammelleitungen (Verbindung Verteiler mit Wärmezentrale)

Die Sammelleitungen, mit denen die Verbindung zwischen dem Verteiler und der Wärmezentrale erfolgt, sollten wiederum möglichst kurz sein, um Rohrreibungsverluste, Wärmeverluste und auch die Errichtungskosten zu minimieren. Als Richtgröße kann eine Länge von ca. 500 m angegeben werden.

Bei größerer Entfernung sind eventuell zusätzliche Maßnahmen, wie größere Rohrquerschnitte, thermische Isolierung etc. vorzusehen.

Je nach Lage des Verteilers (innerhalb oder außerhalb des Tunnelbauwerkes) müssen die Sammelleitungen aus dem Tunnelbauwerk herausgeführt werden. Der Verlauf der Sammelleitungen wird sich dabei im Allgemeinen an der Situierung des Abnehmers orientieren, wobei eine möglichst kurze und direkte Leitungsführung anzustreben ist.

Eine Leitungsführung im Tunnelinneren ist nicht anzustreben, da die Platzverhältnisse (Lichtraumprofil) meist nicht vorhanden sind, eine starke thermische Beeinflussung durch die Tunnelluft gegeben ist und zudem aus Gründen des Brandschutzes.

Grundsätzlich sollten die Sammelleitungen über diverse vertikale Schächte (z. B. Brandrauchentlüftung, Notausstiege, Lüftungsbauwerke) oder auch über separat hergestellte Bohrungen aus dem Tunnelbauwerk herausgeführt und erforderlichenfalls an der Geländeoberfläche in einer Künette (künstlich hergestellter Graben) bis zum Abnehmer geführt werden.

Prinzipiell ist auch eine Herausführung der Sammelleitungen über die Tunnelportale denkbar. Aus technischer Sicht ist dies allerdings als eher ungünstig zu bewerten, da damit lange Leitungswege verbunden sind (Absorberelemente sollten möglichst weit weg von den Portalen situiert sein). Sollen die Sammelleitungen dennoch über ein Portal herausgeführt werden – um z. B. eine Betriebszentrale in Portalnähe anzuschließen –, so ist eine Leitungsführung im Tunnelsohlbereich (z. B. parallel zur Tunnelentwässerung) oder auch im Hinterfüllungs- bzw. Überschüttungsbereich des Tunnelbauwerkes denkbar.

Um einen thermischen Kurzschluss zwischen Vor- und Rücklauf der Sammelleitungen zu vermeiden, sollten diese entweder gedämmt oder in einem Abstand von mind. 50 cm im Boden verlegt werden.

Der Verlauf der Sammelleitungen ist mit dem Bauwerksstatiker abzustimmen, da gegebenenfalls entsprechende Durchbrüche oder Öffnungen erforderlich sein können.

4 Thermische Erkundung

4.1 Ziel

Zur Abschätzung des thermischen Potenzials einer Tunnelthermie-Anlage werden Basisdaten benötigt, die u. a. im Zuge der Untergrunderkundung ermittelt werden können.

In diesem Kapitel sollen Empfehlungen zur Art und zum Umfang geothermischer Untersuchungen und von Möglichkeiten der Kombination mit üblichen geotechnischen Untersuchungen erarbeitet werden.

4.2 Untergrundparameter

Je nach erforderlichem Detaillierungsgrad (Abschätzung im Zuge der Erstellung einer Grundsatzstudie oder Detailberechnung im Zuge der Entwurfsplanung) zur Bestimmung des thermischen Potenzials einer Tunnelthermie-Anlage werden insbesondere folgende Parameter benötigt:

- a) Oberflächentemperatur (Temperatur an der Geländeoberfläche),
- b) geologischer Aufbau des Untergrundes (Ausdehnung ca. 100 m links und rechts der Tunneltrasse),
- c) thermisch relevante Materialkennwerte des Untergrundes: Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Gesteinsdichte bzw. Bodendichte,
- d) hydrogeologische Grundlagen: Lage von Grundwasserkörpern, Grundwassertemperatur, Grundwassermächtigkeit, Grundwasserströmungsgeschwindigkeit, Grundwasserströmungsrichtung,
- e) ungestörte Bodentemperatur, terrestrische Wärmestromdichte bzw. geothermischer Gradient.

Auf Grundlage der Parameter a) bis c) lassen sich die Wärmeleitung und Wärmespeicherung zwischen dem Untergrund und den Absorberelementen bereits abbilden.

Bei Vorhandensein von Grundwasserkörpern sind zusätzlich auch konvektive Wärmetransportprozesse zu berücksichtigen, wofür der Parameter d) benötigt wird.

Der Anteil des terrestrischen Wärmestroms e) ist bei geringen Überlagerungshöhen meist vernachlässigbar. Erst bei Überlagerungshöhen von mehr als 100 m sollte auch dieser Effekt berücksichtigt werden.

4.2.1 Oberflächentemperatur

Der jahreszeitliche Verlauf der Temperatur an der Geländeoberfläche dient als Grundinformation für die klimatischen Verhältnisse. Dazu sind Ganglinien der Außenlufttemperatur bzw. Bodentemperatur in geringer Tiefe (weniger als 1 m unter Gelände) zu eruieren. Diese Parameter können meist aus benachbarten meteorologischen Stationen übernommen bzw. interpoliert werden.

4.2.2 Geologischer Aufbau des Untergrundes

Sollten noch keine näheren Informationen zum geologischen Untergrundaufbau aus der Tunnelplanung (Seismik, geologische und hydrogeologische Kartierung, Erkundungsbohrungen) vorliegen, so kann der zu erwartende geologische Aufbau des Untergrundes b) aus bestehenden geologischen Kartenwerken abgeschätzt werden. Darüber hinaus können bestehende geologische Fremddaten (z. B. benachbarte Bohrungen) recherchiert und eingearbeitet werden. Eine systematische Aufarbeitung der räumlichen Ausdehnung der einzelnen Untergrundschichten ist vor allem im Hinblick auf die Erstellung von geologischen Prognoseprofilen bereits in einer frühen Planungsphase zu empfehlen und üblicherweise ohnehin für die Tunnelplanung erforderlich.

Die Erhebung geologischer Basisdaten umfasst u. a.:

- geologische Karten,
- Baugrunderkater,
- Probebohrungen,
- Strukturdaten (Fallrichtung und Fallwert von Schichten und Störungen),
- bodengeophysikalische Strukturerkundungsmaßnahmen (Seismik, Geo-Elektrik),
- Vertikalschnitte (Längsprofil, Querprofile),
- Horizontalschnitte.

4.2.3 Thermisch relevante Materialkennwerte des Untergrundes

Allgemeines

Der dominierende Wärmetransportmechanismus in Böden ist die Wärmeleitung. Andere Effekte wie Wärmestrahlung, Verdampfungs- und Kondensationsprozesse, Ionenaustausch und Frost-Tau-Vorgänge sind für Erdwärmeanlagen üblicherweise zu vernachlässigen. In grundwasserführenden Bodenschichten ist neben der Wärmeleitung auch die Konvektion von Bedeutung, worauf in Kapitel 4.2.4 näher eingegangen wird.

Die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte (Trocken- bzw. Feuchtdichte) ist von erheblicher Bedeutung für die Berechnung der entziehbaren bzw. speicherbaren Wärme.

Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität sind generell Kennwerte in Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung, der Porosität und Porenfüllung sowie der Temperatur. Aufgrund der niedrigen Temperaturen in oberflächennahen Tiefenlagen können beide Parameter jedoch als temperaturunabhängig angesehen werden.

Bei der Bestimmung dieser Parameter handelt es sich um eine Zusatzmaßnahme, die im allgemeinen Erkundungsprogramm der Tunnelprojektierung üblicherweise nicht vorgesehen ist.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität näher erläutert und angegeben, wie diese bestimmt werden können. Auf eine Erläuterung der Dichte (Trocken- bzw. Feuchtdichte) bzw. deren Bestimmung wird an dieser Stelle verzichtet.

In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass die im Folgenden beschriebenen Verfahren bzw. Messmethoden nicht genormt sind und keine diesbezüglichen Regelwerke vorliegen.

Wärmeleitfähigkeit

• Allgemeines

Die Wärmeleitfähigkeit λ_B [W/(mK)] hängt von den mengenmäßigen Anteilen der Stoffkomponenten und ihrer räumlich-geometrischen Anordnung ab. Da Luft ein schlechter Wärmeleiter ist, erfolgt die Wärmeleitung praktisch allein über die feste und flüssige Bodenphase. Somit wird die Wärmeleitfähigkeit des Bodens stark durch den Wassergehalt und die Trockendichte des Bodens beeinflusst (siehe Bild 33) und kann somit innerhalb eines großen Bereiches schwanken. Dies zeigt auch Bild 32 für untersuchte Proben aus Sandstein und Sand in Abhängigkeit des Porenanteils und des Poreninhaltes. Aufgrund dieser großen möglichen Schwankungsbreite der Wärmeleitfähigkeit sind bei numerischen Berechnungen zur Auslegung von Erdwärmeanlagen Parametervariationen unumgänglich.

Wie bereits erwähnt, erfolgt der Wärmetransport im Boden hauptsächlich durch Wärmeleitung. In Abhängigkeit von der Kornverteilung bzw. vom Porenvolumen und dem Sättigungsgrad kann jedoch auch Wärme durch freie und erzwungene Konvektion in Wasser und Luft, durch Wärmestrahlung oder durch Diffusion transportiert werden. Aus die-

sem Grund ist die effektive Wärmeleitfähigkeit des gesamten Bodensystems stark von der Bodenart, der Dichte (Trocken- bzw. Feuchtdichte) und dem Wassergehalt (auch die chemischen Eigenschaften des Wassers haben einen Einfluss) des Bodens abhängig. Wie Bild 33 zu entnehmen ist, ist die Wärmeleitfähigkeit umso größer, je dichter und wassergesättigter der Boden ist.

• Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Labor

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit basiert im Wesentlichen darauf, dass ein zu untersuchendes Bodenvolumen mit einem Temperaturgradienten belastet wird. Dies verursacht jedoch einen erheblichen Feuchtigkeitstransport in ungesättigten Böden. Da die Messmethode demnach die Bodeneigenschaften verändert, sollten diese Einflüsse auch berücksichtigt werden. Dies erweist sich messtechnisch jedoch als äußerst schwierig. Es erfolgt zwar ein gewisser Feuchtigkeitstransport auch im Feldversuch, doch dieser ist im Labor aufgrund der größeren Temperaturgradienten wesentlich stärker ausgeprägt.

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Labor existieren grundsätzlich zwei Methoden. Bei der ersten Methode handelt es sich um die so genannte „Steady State Method“, bei der die Messungen stattfinden, sobald sich die zu untersuchende Bodenprobe in einem stationären Zustand befindet. Bei der „Transient Method“ ändert sich die Temperatur der untersuchten Bodenprobe mit der Zeit. Diese Methode ist vielseitiger, einfacher zu handhaben und in einer kürzeren Zeit zu bewerkstelligen als die „Steady State Method“. Aus diesem Grund wird im Folgenden nur auf Bestimmungsmethoden mit der „Transient Method“ eingegangen:

- QTM-Messmethode: Bei der QTM-Messmethode wird die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen mit einer Halbraumlinienquelle nach der „Transient Method“ gemessen. Dabei bildet ein Heizdraht, der zusammen mit einem Thermoelement auf einer Asbestplatte aufgespannt ist, die Messsonde. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wird diese Messsonde auf eine ebene Gesteinsfläche gedrückt, wobei für eine gewisse Zeit eine Aufheizung der Gesteinsprobe mit konstanter Leistung erfolgt. Aus dem resultierenden Temperaturanstieg wird die Wärmeleitfähigkeit berechnet [35, 28].

- Tk04-Messmethode: Die Tk04-Methode beruht auf dem gleichen Messprinzip wie die QTM-Messmethode. Das Messgerät ist jedoch mit einer ausgereiften Software zur Überwachung und Auswertung der Messungen ausgerüstet. Mit dieser Methode kann nicht nur die Wärmeleitfähigkeit von festen Gesteinen, sondern auch von Gesteinsfragmenten wie z. B. Bohrklein bestimmt werden. Es existieren derzeit verschiedene Bautypen der Messgeräte. Zwei davon, die Nadelsonde und der eingegossene Heizdraht, werden näher vorgestellt [35, 28].

Nadelsonde

Dieses Gerät misst die Wärmeleitfähigkeit mit einer nadelförmigen Linienquelle, die in die Versuchssprobe eingebracht wird. Über einen festgelegten Zeitraum wird eine konstante Heizleistung an die Probe abgegeben, wobei ein Thermistor in der Mitte der Nadelsonde die Temperatur an der Grenzfläche Nadel – Boden registriert.

Infolge der linienförmigen Wärmequelle und der zylindrischen Geometrie der Wärmeausbreitung wird die Sondentemperatur T_{Sonde} während des Heizvorganges in Relation zur Zeit t bestimmt und mit Hilfe der theoretischen Lösung für eine linienförmige Heizquelle ausgewertet [35, 28]:

$$T_{\text{Sonde}} - T_0 = \frac{\bar{q}}{4\pi\lambda_B} \ln(t + t_0) + K$$

mit

T_0 : Anfangstemperatur [°C]

\bar{q} : Wärmestrom pro Längeneinheit [W/m]

λ_B : Wärmeleitfähigkeit des Bodens [W/mK]

t_0 : Zeitkorrektur zur Berücksichtigung der Sondenabmessung und des Kontaktwiderstandes zwischen Sonde und Bodenprobe [s]

K : Integrationskonstante

Die entsprechende Gleichung für die Sondentemperatur während der Kühlung nach Heizbetrieb mit der Zeitdauer t_h ist gegeben durch:

$$T_{\text{Sonde}} - T_0 = \frac{\bar{q}}{4\pi\lambda_B} [\ln(t + t_0) - \ln(t + t_0 - t_h)] + K$$

Durch Lösen dieser nichtlinearen Gleichungen kann die Wärmeleitfähigkeit λ_B bestimmt werden.

Eine Vereinfachung ergibt sich bei der Annahme, dass $t_0 \ll t$, womit $\ln(t + t_0)$ näherungsweise gleich $\ln(t)$ wird. Damit kann die Wärmeleitfähigkeit mit der unabhängigen Variablen $\ln(t)$ für den Heizprozess bzw. der unabhängigen Variablen $\ln(t/(t - t_h))$ für den Kühlprozess bestimmt werden [28].

In der Auswertung wird eine weitere Näherung für die Aufheizung T_{Sonde} verwendet, die durch folgende Gleichung beschrieben wird:

$$T_{\text{Sonde}} = \frac{\bar{q}}{4\pi\lambda_B} \ln(t)$$

Diese Gleichung ist nur gültig, solange die Aufheizkurve logarithmisch verläuft, d. h., die Wärmeausbreitung wird nur von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens bestimmt. Dies ist meistens bereits nach 20 Sekunden der Fall. Es werden bestimmte Teilabschnitte der Aufheizkurve für die Berechnung herangezogen. Anschließend wird die Wärmeleitfähigkeit „aus der besten Lösung“ ermittelt:

$$\lambda_B = \frac{\bar{q}}{4\pi} \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{T_2 - T_1}$$

mit

t_1, t_2 : Zeitpunkte am Anfang bzw. Ende des für die beste Lösung ausgewählten Heizkurvenabschnittes [s]

T_1, T_2 : Temperaturen an der Grenze Sonde/Gestein zu den Zeiten t_1 bzw. t_2 [°C]

\bar{q} : Wärmestrom pro Längeneinheit (Heizleistung der Nadelsonde) [W/m]

Die entsprechende Gleichung für eine anschließende Kühlung lautet:

$$\lambda_B = \frac{\bar{q}}{4\pi} \frac{\ln\left[\frac{(t_2/t_1)(t_1 - t_h)}{(t_2 - t_h)}\right]}{T_2 - T_1}$$

Der Kontakt zwischen Sonde und Boden stellt ein wesentliches Kriterium bei dieser Messmethode dar. Ist dieser nicht vollflächig gegeben, ist die Messung unbrauchbar.

Laboruntersuchungen [14] haben ergeben, dass die Wärmeleitfähigkeiten beim Heizprozess im Allgemeinen geringfügig höher sind als beim Kühlprozess.

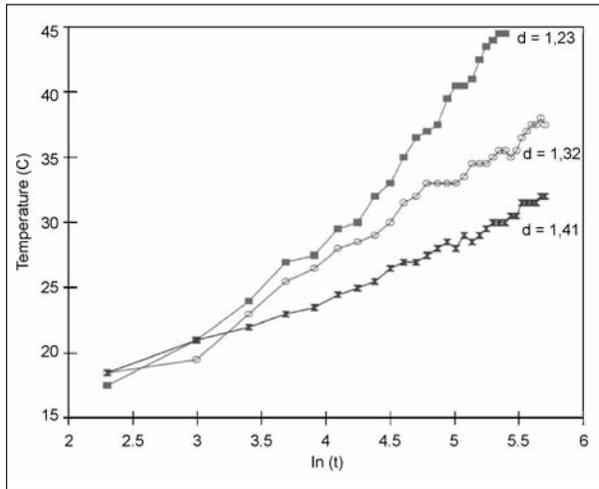


Bild 21: Typische Messergebnisse für die Aufheizung von sandigem Lehm mit einem Wassergehalt von 1,4 % und unterschiedlichen Dichten d [g/cm^3], [14, 28]



Bild 22: Beispiel eines Wärmeleitfähigkeits-Messgerätes in Form der Nadelsonde [37]

Eingegossener Heizdraht

Dieses Messgerät besteht aus einem Plexiglaszylinder, auf dessen Unterseite ein Heizdraht mit Thermoelement eingegossen ist. Wie bei der Nadelsonde wird über den Heizdraht ein Wärmeimpuls mit einer Regeldauer von 90 Sekunden in die Versuchsprobe eingeleitet. Die Wärmeleitfähigkeit wird in weiterer Folge wie bei der Nadelsonde bestimmt.

Soll die Wärmeleitfähigkeit von Bohrklein bestimmt werden, wird diese an einem künstlich erzeugten Bohrklein-Wassergemisch gemessen.

Die Auswertung erfolgt mit nachfolgender Gleichung [35, 28]:

$$\lambda_B = \lambda_{gem} \left(\frac{\lambda_{gem}}{\lambda_w} \right)^{\frac{m_w \rho_B}{m_B \rho_w}}$$

mit

λ_w : Wärmeleitfähigkeit von Wasser bei 20 °C (= 0,62 W/mK)

λ_B : Wärmeleitfähigkeit des Bodens [W/mK]

λ_{gem} : gemessene Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

ρ_B : Trockendichte des Bodens [kg/m^3]

ρ_w : Dichte von Wasser bei 20 °C [kg/m^3]

m_B : Trockengewicht des Bohrkleins [kg]

m_w : Gewicht des Wasseranteils [kg]

Die effektive Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes λ_{eff} kann schließlich folgendermaßen berechnet werden:

$$\lambda_{eff} = \lambda_B^{1-\phi} \cdot \lambda_w^\phi$$

mit

ϕ : effektive Porosität

Optischer Thermoscanner

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an Festgesteinen ist der so genannte „Optische Thermoscanner“. Die Messung basiert auf dem „Scannen“ einer Probenoberfläche mit einer fokussierten Wärmequelle und der kontaktlosen Temperaturmessung mittels Infrarot-Thermosensoren. Hierfür wird die Strahler- und Messeinheit an der Probe entlang bewegt. Die emittierte Licht- und Wärmestrahlung wird auf die Oberfläche der Probe fokussiert, wodurch die Probe aufgeheizt wird. In einem festen Abstand zum Strahler befinden sich Infrarottemperatursensoren, welche die Temperatur der Probe vor und nach dem Erhitzen messen. Für die Größe der Wärmeleitfähigkeit ist entscheidend, ob die Messungen an trockenen oder feuchten Bohrkernen durchgeführt wurden. Bei anisotrop ausgebildeten Gesteinen kann die Messung in verschiedenen Raumrichtungen durchgeführt werden [31].

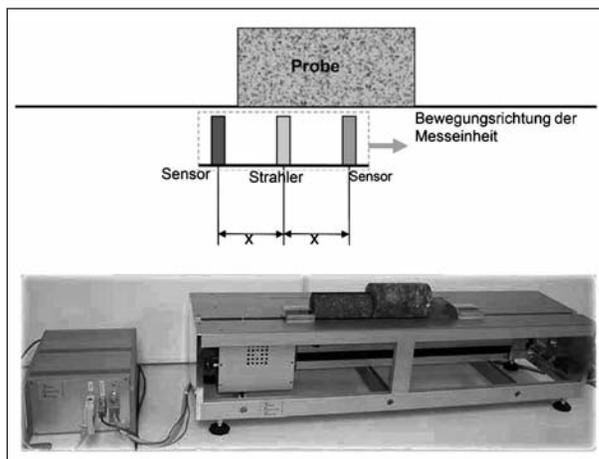


Bild 23: Messprinzip (oben) und Fotoaufnahme (unten) eines Optischen Thermoscanners [31]

• Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Feld

Thermal-Response-Test

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{B,eff}$ im Feld erfolgt üblicherweise mit dem so genannten „Thermal-Responsest“, der in der Regel an einer fertig eingebauten Erdwärmesonde durchgeführt wird. Die Messung erfolgt über die gesamte Absorberlänge, wodurch sich eine effektive Wärmeleitfähigkeit unter Einbeziehung der Bohrlochverfüllung, der wechselnden Untergrundverhältnisse einschließlich einer eventuell vorhandenen Grundwasserströmung bestimmen lässt. Zusätzlich wird der so genannte thermische Bohrlochwiderstand R_b ermittelt, der ebenfalls zur Dimensionierung von Erdwärmeeinheiten herangezogen wird [34].

Zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit wird bei der Versuchsdurchführung eine festgelegte Wärmeleistung an eine Erdwärmesonde angelegt und die Vor- und Rücklauftemperaturen des zirkulierenden Wärmeträgermittels aufgezeichnet. Die am meisten angewandte Methode zur Auswertung der Versuchsergebnisse basiert auf der Kelvin'schen Linienquellentheorie. Diese Methode wurde bereits in der Mitte des vorigen Jahrhunderts für die Berechnung erdgekoppelter Wärmeeinheiten zur Erfassung der zeitabhängigen Temperaturentwicklung im Erdreich verwendet. Das Temperaturfeld um ein Bohrloch kann als Funktion von Zeit und Bohrlochradius mit folgender Gleichung beschrieben werden [23, 28]:

$$\Delta T_B(r_b, t) = \frac{\bar{q}}{4\pi\lambda_{B,eff}} \int_{r/2\sqrt{a_B t}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta$$

mit

$\Delta T_B(r_b, t)$: Temperaturanstieg im Boden [K]

\bar{q} : Wärmestrom (Wärmeeintragsrate) pro Bohrlochlänge [W/m]

$\lambda_{B,eff}$: effektive Wärmeleitfähigkeit des Bodens [W/mK]

t : abgelaufene Zeit seit Beginn der Wärmeabgabe/-entnahme (ab Versuchsbeginn) [s]

a_B : Temperaturleitfähigkeit des Bodens ($a_B = \lambda_B / (\rho_B c_B)$)

c_B : Wärmekapazität [Ws/kgK]

r : Entfernung vom Mittelpunkt des Bohrloches [m]

r_b : Bohrlochradius [m]

β : Integrationsvariable [-]

Diese Gleichung kann nun für den Thermal-Response-Test mit folgender Formulierung für ein Temperaturfeld um ein Bohrloch adaptiert werden:

$$\Delta T_B(r_b, t) = \frac{\bar{q}}{4\pi\lambda_{B,eff}} \left(\ln \frac{4a_B t}{r_b^2} - \bar{\gamma} \right)$$

wobei

$$t > t_{min} = \frac{5r_b^2}{a_B}$$

mit

$\bar{\gamma}$: Eulerkonstante (0,5772...)

Dabei wird Folgendes vorausgesetzt:

- Konstante Temperatur entlang des Bohrlochs. Dies ist in der Praxis nicht der Fall, jedoch ist der axiale Temperaturgradient im Vergleich zum radialen Temperaturgradienten vergleichsweise klein.
- Unendliche Länge des Bohrlochs. In der Praxis ist die Bohrlochlänge wesentlich größer als der Bohrlochradius, weshalb bei Betrachtung von kurzen Zeitabschnitten (wie es beim Thermal-Response-Test der Fall ist) die Effekte am Bohrlochende vernachlässigt werden können.

Wesentlich für die Dimensionierung einer Erdwärmesonde ist der thermische Widerstand zwischen dem Wärmeträgermittel und der Bohrlochwand.

Dieser thermische Widerstand R_b bestimmt die Temperaturdifferenz zwischen dem zirkulierenden Wärmeträgermittel (T_m) und der Wandtemperatur des Bohrloches (T_b) für einen bestimmten Wärmestrom (\bar{q}):

$$T_m - T_b = R_b \bar{q}$$

Der Bohrlochwiderstand R_b hängt im Wesentlichen von der Anordnung der Absorberleitungen und den thermischen Eigenschaften des verwendeten Verfüllmaterials bzw. des umgebenden Bodens ab und verursacht Temperaturverluste, die den Wärmestrom vom bzw. zum Erdreich negativ beeinflussen.

Die Gleichung für das Temperaturfeld unter Berücksichtigung des Temperaturverlustes aufgrund des thermischen Bohrlochwiderstandes R_b lautet:

$$\Delta T_B(r_b, t) = \bar{q} \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_{B,eff}} \left(\ln \frac{4a_B t}{r_b^2} - \bar{\gamma} \right) \right]$$

Durch weitere Umformung erhält man:

$$T_m = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda_{B,eff}L_b} \ln(t) + \left[\frac{\dot{Q}}{L_b} \left(\frac{1}{4\pi\lambda_{B,eff}} \left(\ln \left(\frac{4a_B}{r_b^2} \right) - \bar{\gamma} \right) - R_b \right) + T_B \right]$$

wobei

$$t > t_{min} = \frac{5r_b^2}{a_B}$$

mit

T_m : mittlere Temperatur der Absorberflüssigkeit $T_m = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2}$ [°C]

\dot{Q} : konstanter Wärmeeintrag bzw. Wärmeentzug [W]

R_b : thermischer Bohrlochwiderstand [K/(W/m)]

T_B : ungestörte Boden- bzw. Erdreichtemperatur [°C]

L_b : effektive Bohrlochlänge [m]

Diese Gleichung kann zu einer linearen Beziehung zwischen T_m und $\ln(t)$ vereinfacht werden:

$$T_m = k \ln(t) + m$$

wobei k und m Konstanten sind, die folgendermaßen definiert sind:

$$k = \frac{\dot{Q}}{4\pi\lambda_{B,eff}L_b} \quad \text{und}$$

$$m = \frac{\dot{Q}}{L_b} \left(\frac{1}{4\pi\lambda_{B,eff}} \left(\ln \left(\frac{4a_B}{r_b^2} \right) - \bar{\gamma} \right) - R_b \right) + T_B$$

Die effektive Wärmeleitfähigkeit kann nun ermittelt werden, indem die mittlere Wärmeträgertemperatur über den dimensionslosen Zeitparameter $\tau = \ln(t)$ aufgetragen und die Steigung k der Geraden bestimmt wird:

$$\lambda_{B,eff} = \frac{\dot{Q}}{4\pi k L_b}$$

Damit kann in weiterer Folge auch der thermische Widerstand zwischen dem Wärmeträgermittel und der Bohrlochwand ermittelt werden:

$$R_b = \frac{L_b}{\dot{Q}} (T_m - T_B) - \frac{1}{4\pi\lambda_{B,eff}} \left(\ln(t) + \ln \left(\frac{4a_B}{r_b^2} \right) - \bar{\gamma} \right)$$

Je größer der thermische Bohrlochwiderstand ist, desto größer ist auch der Temperatur sprung

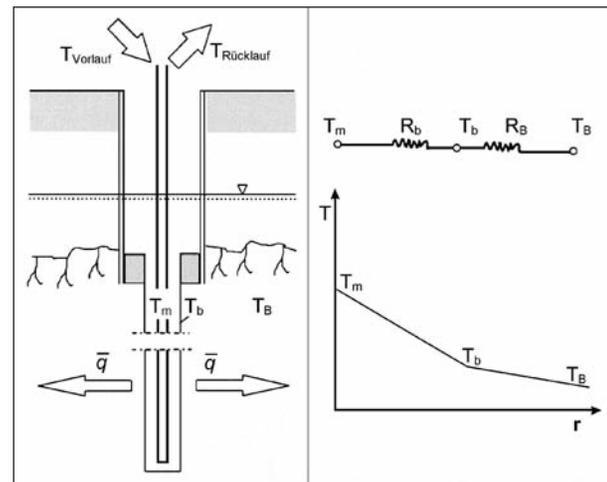


Bild 24: Temperaturverlust aufgrund des thermischen Widerstandes des Absorber- und Verfüllmaterials bei einer Erdwärmesonde [23]



Bild 25: Messeinrichtung zur Durchführung eines Thermal-Response-Tests an einer Doppel-U-Sonde

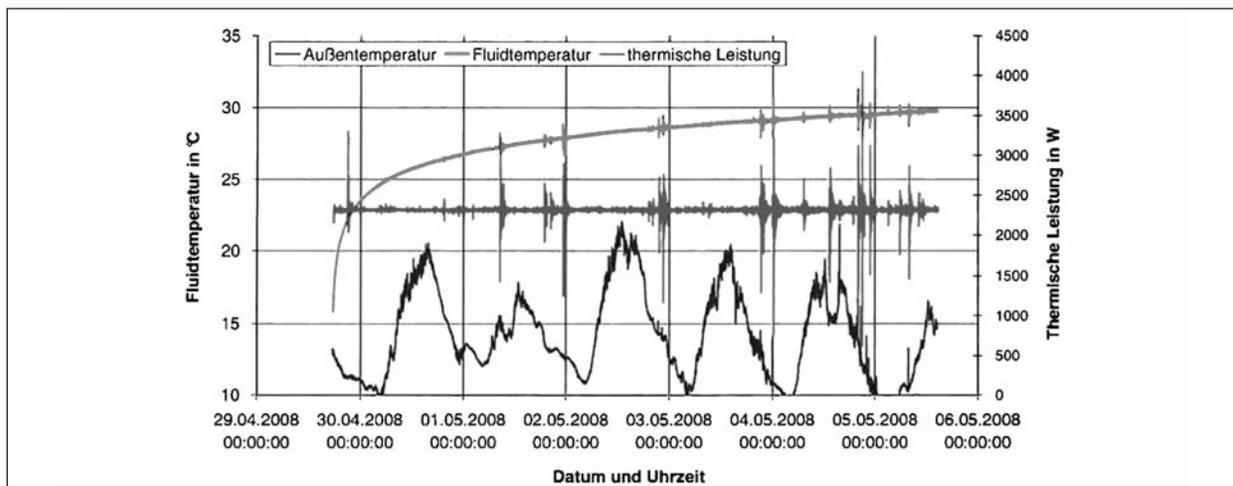


Bild 26: Beispiel eines Thermal-Response-Tests: zeitlicher Verlauf der mittleren Sondentemperatur (oben), des Wärmestroms (Mitte) und der Umgebungstemperatur (unten)

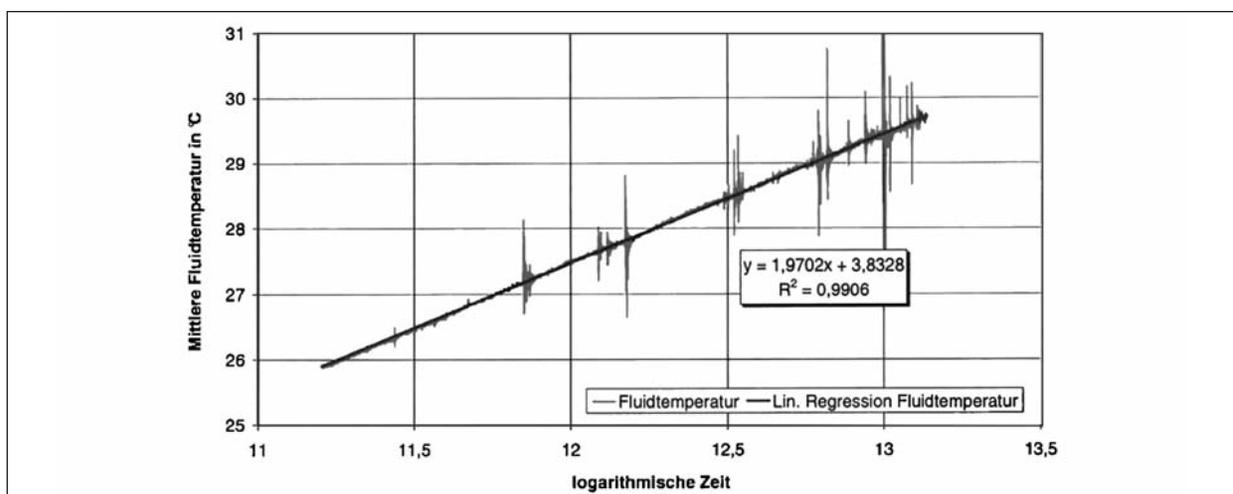


Bild 27: Beispiel eines Thermal-Response-Tests: mittlere Sondentemperatur auf logarithmischer Zeitskala zur Bestimmung der Regressionsgeraden

zwischen dem Wärmeträgermittel und dem Erdreich.

Im Zusammenhang mit der Durchführung eines Thermal-Response-Tests ist zu erwähnen, dass oftmals begleitend dazu mittels entsprechender Temperaturmessungen auch ein Temperaturprofil entlang der Erdwärmesonde erstellt werden kann.

Dazu wird einerseits unmittelbar vor dem Wärmeintrag durch den Thermal-Response-Tests und andererseits ca. 12 Stunden nach Beendigung des Wärmeintrages jeweils ein Temperaturprofil aufgenommen. Aus dem Vergleich der beiden Kurven können qualitativ Tiefenbereiche identifiziert werden, die sich schneller regenerieren als andere (z. B. infolge von grundwasserführenden Bodenschichten).

Bild 28 zeigt ein Beispiel durchgeführter Temperaturmessungen entlang einer Erdwärmesonde. Anhand der ungestörten Temperaturkurve (links) ist zu erkennen, dass oberflächennah (bis etwa 15 m Tiefe) der Einfluss der Außentemperatur gegeben ist. Anschließend folgt bis zur Endteufe eine neutrale Zone mit ganzjährig einheitlicher Temperatur, wobei kein geothermischer Gradient (Zunahme der Temperatur mit der Tiefe) festgestellt werden kann. In den Bereichen von 10 bis 13 m sowie von 24 bis 27 m ergibt sich anhand der Temperaturmessung (rechts) nach dem Thermal-Response-Test eine erhöhte Regenerationsfähigkeit bzw. Wärmeleitfähigkeit. Dies ist auf wasserführende Tiefenbereiche zurückzuführen, wie dem Bohrprofil (graue Bereiche entsprechen Kiesen) entnommen werden kann.

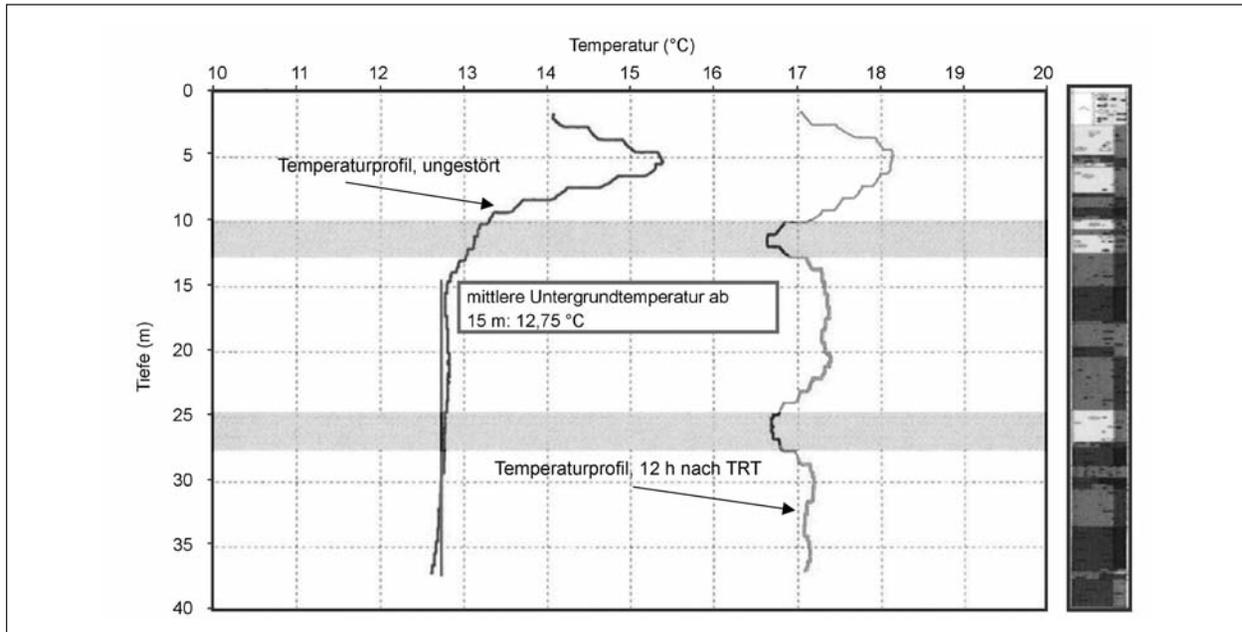


Bild 28: Beispiel eines Temperaturprofils entlang einer Erdwärmesonde, gemessen vor (links) und nach (rechts) Durchführung eines Thermal-Response-Tests. Rechts ist das entsprechende Bodenprofil angegeben

Messsonde mit Druck- und Temperatursensor

In der Schweiz wurde eine neue Messsonde entwickelt, mit der auf Basis von Temperaturmessungen die Wärmeleitfähigkeit entlang einer Erdwärmesonde berechnet werden kann. Im Vergleich zu Laboruntersuchungen und dem Thermal-Response-Test handelt es sich dabei um ein schnelleres Verfahren.

Bei Thermal-Response-Tests liefert die Auswertung jeweils die mittlere Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Erdwärmesonde, wohingegen mit der gegenständlichen Messsonde das Tiefenprofil (welches – bedingt durch die Lithologie – signifikante Variationen aufweisen kann) detailliert bestimmt werden kann.

Die drahtlose Bohrlochsonde besteht aus Sensoren für Druck und Temperatur sowie einem Mini-Datenlogger inklusive Prozessor in einem geschlossenen wasserdichten Metallzylinder. Die Sonde sinkt mit einer durch angebauten Schwimmer einstellbaren Geschwindigkeit zum Fuß der U-förmigen Erdwärmesonde [32].

Unterwegs registriert die Sonde in wählbaren Zeitintervallen Druck (= Tiefe) und Temperatur. Nach Ende der Messfahrt wird die Sonde aus dem U-Rohr herausgespült und an einen Laptop zur Datenauslesung angeschlossen. Eine Messfahrt in einer 300 m tiefen Erdwärmesonde dauert weniger als 50 Minuten [32].

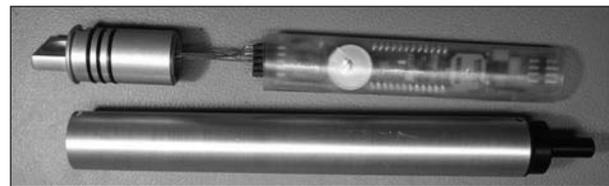


Bild 29: Messsonde mit einer Länge von 235 mm, einem Durchmesser von 23 mm und einem Gewicht von 98 g [32]

Bei der Datenverarbeitung wird aus den Messwerten das Temperaturgradienten-Profil der Bohrung berechnet und daraus, mit Hilfe des lokalen Wärmeflusswertes, das Wärmeleitfähigkeits-Profil ermittelt [32].

Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit in der jeweiligen Tiefe basiert auf der Annahme reiner Wärmeleitung. Deshalb müssen die Messwerte auf mögliche Störeffekte wie Schwankungen der Oberflächentemperatur, Grundwassereinfluss etc. vor der Berechnung korrigiert werden [32].

Zunächst wird der geothermische Gradient schichtweise bestimmt (1. Ableitung des Temperaturlogs) [32]:

$$\nabla T_i = \frac{T_u - T_l}{z_u - z_l}$$

mit

∇T_i : Temperaturgradient im Tiefenabschnitt i

T_u : gemessene Temperatur an der Oberkante ($z = z_u$)

T_i : gemessene Temperatur an der Basis ($z = z_i$)

Schließlich wird mit Hilfe des lokalen Wärmeflusswertes q_{loc} der Wärmeleitfähigkeitswert für jeden Tiefenabschnitt berechnet. Der lokale Wärmeflusswert q_{loc} muss dabei regionalen Wärmeflusskarten entnommen werden [32].

Bild 30 zeigt ein Beispiel einer Erdwärmesonde in der Schweiz, bei der die Messsonde zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eingesetzt worden ist. Links sieht man das gemessene Temperaturprofil sowie das geologische Profil der Bohrung. Die berechneten Gradientenprofile sind ebenfalls geplotet. Rechts ist das berechnete Wärmeleitfähigkeitsprofil dargestellt. Zum Vergleich sind die Resultate

von Labormessungen an Cuttings-Proben aus der gleichen Bohrung dargestellt (vertikale Striche) [32].

Spezifische Wärmekapazität

• Allgemeines

Die spezifische Wärmekapazität c [Ws/(kgK)] gibt die Wärmemenge Q [Ws] an, die benötigt wird, um einen Stoff mit einer Masse von $m = 1$ kg um $\Delta T = 1$ K zu erwärmen.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

Die Wärmekapazität des Bodens ist von dessen mengenmäßiger Zusammensetzung abhängig, nicht aber von der Mikrostruktur. Sind die volume-

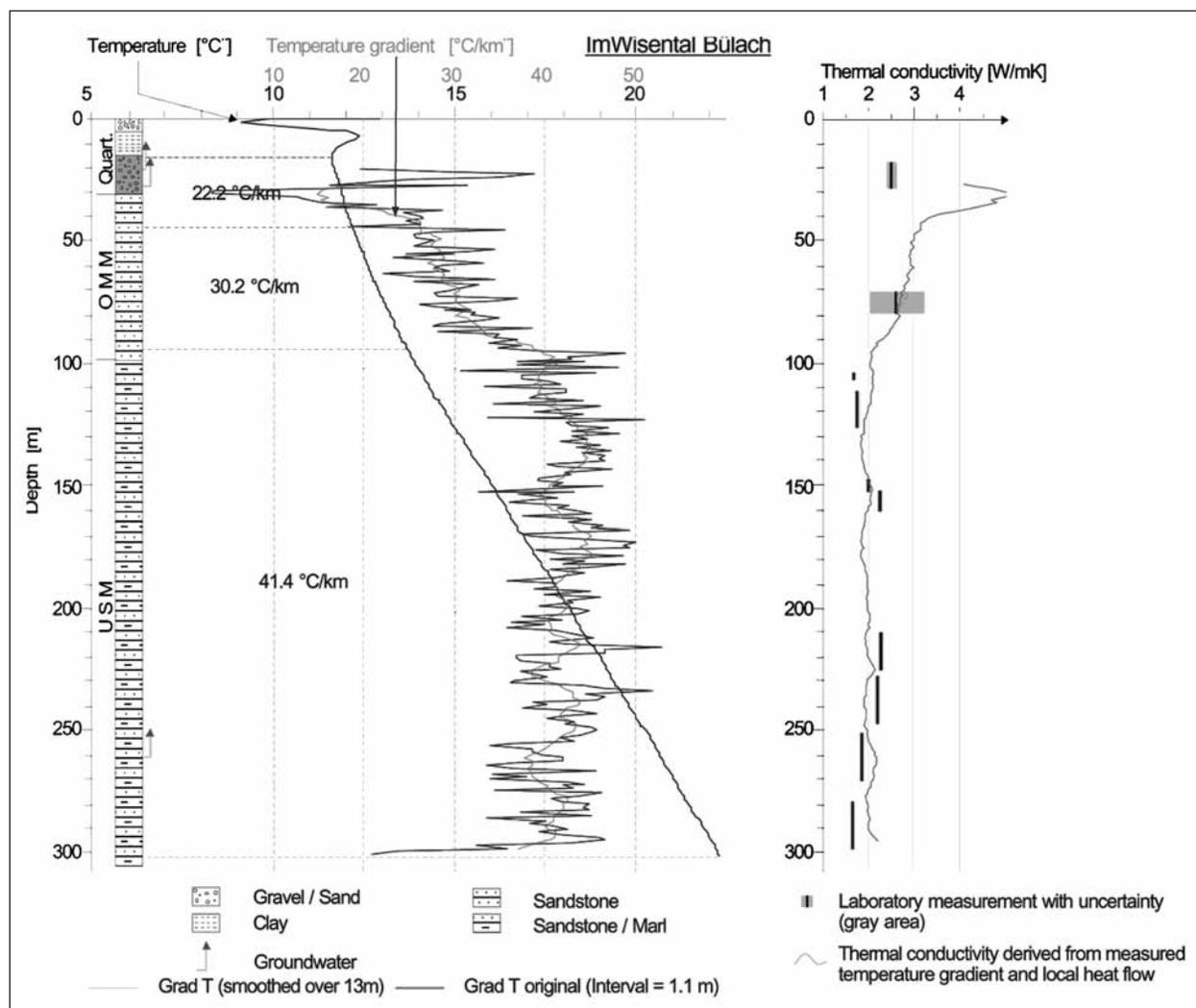


Bild 30: Beispiel einer Erdwärmesonden-Bohrung in der Schweiz. Links: geologisches Bohrprofil, Temperaturlog (ausgezogene Linie, mit Gradienten-Abschnitten), Gradientenkurve (schwankend: berechnet mit einem Tiefenintervall von $\Delta z = 1,1$ m, geglättet mit $\Delta z = 13$ m). Rechts: berechnetes Wärmeleitfähigkeitsprofil (ausgezogene Linie) sowie Labormessungen (Striche) [32]

trischen Anteile der Bodenbestandteile bekannt, kann die Gesamtwärmekapazität des Bodens durch additive Überlagerung der Einzelkomponenten berechnet werden:

$$c_B = C_s X_s + c_w x_w + c_l x_l$$

Darin ist x der jeweilige Volumenanteil ($x_s = 1 - n$; $x_w = nS$; $x_l = n(1 - S)$) mit dem Porenanteil n und der Sättigungszahl S), der Index s kennzeichnet den Feststoffgehalt, w den Wassergehalt und l die Porenluft. Die Wärmekapazitäten von Wasser und Luft können als konstant angenommen werden, wobei jene der Luft vernachlässigbar ist. Kurzfristig gesehen, ist nur der Wassergehalt eine veränderliche Größe. Die Gesamtkapazität nimmt demnach mit der Bodenfeuchte zu.

In der Literatur findet sich oftmals die Angabe einer volumetrischen Wärmekapazität, die sich aus der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte (Trocken- bzw. Feuchtdichte) des Bodens errechnet, wobei die volumetrische Wärmekapazität des Mehrphasensystems Boden wiederum als das gewichtete arithmetische Mittel der einzelnen Bodenkomponenten definiert ist:

$$C_{v,B} = \sum \rho_i c_i x_i \text{ Ws}/(\text{m}^3\text{K})$$

• Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität im Labor

Das Messprinzip zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität c beruht auf der Vermischung von Wasser und Boden mit unterschiedlichen Temperaturen. Unter der Annahme, dass die gesamte thermische Energie der beiden Stoffe konstant bleibt



Bild 31: Messgeräte zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität [35, 28]

und die Wärmekapazität einer der beiden Stoffe (Wasser) bekannt ist, kann die Wärmekapazität des anderen Stoffes (Boden) bestimmt werden.

Üblicherweise werden die Temperatur des Bodens mit 0°C und jene des Wassers mit ca. 20°C festgesetzt. Durch Messen der Gleichgewichtstemperatur des Gemisches kann die spezifische Wärmekapazität des Bodens bestimmt werden. Für feuchte Böden wird die spezifische Wärmekapazität c_B entsprechend dem Wasseranteil korrigiert.

Die Energiebilanz (kein Wärmetransport über die Systemgrenzen) des Wasser-Boden-Gemisches unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität $c(T)$ lautet [35, 28]:

$$c_B(T_B)T_B m_B + c_w(T_w)T_w m_w = [c_B(T_{\min})m_B + c_w(T_{\min})m_w]T_{\min}$$

mit

T_B : Temperatur der abgekühlten Bodenprobe [$^\circ\text{C}$]

T_w : Wassertemperatur vor der Mischung [$^\circ\text{C}$]

T_{\min} : minimale Mischtemperatur [$^\circ\text{C}$]

m_B : Gewicht des Probenmaterials [kg]

m_w : Gewicht des Wassers [kg]

c_B : Wärmekapazität des Bodens [Ws/kgK]

c_w : Wärmekapazität von Wasser [Ws/kgK]

Literaturangaben zu Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität

Die ISO 13370 [4] enthält im Anhang G Angaben zu thermischen Eigenschaften von Böden. Diese sind in Tabelle 1 wiedergegeben, um einen Überblick über die Größenordnung und die Bandbreite der einzelnen wärmetechnischen Bodenparameter zu geben. Die volumetrische Wärmekapazität wurde dabei folgendermaßen berechnet:

$$C_{v,B} = \rho_s (c_s + c_w \frac{w}{100})$$

mit

c_s : spez. Wärmekapazität der Mineralien, für die meisten Mineralien ist bei 10°C $c_s = 1.000 \text{ Ws}/(\text{kgK})$

c_w : spez. Wärmekapazität von Wasser, $c_w = 4.180 \text{ Ws}/(\text{kgK})$

		Trocken-	Wasser-	Feuchte-	Wärmeleitfähigkeit		spez.	vol.
		dichte	gehalt	dichte	$\lambda_{B,min}$	$\lambda_{B,max}$	Wärmekapazität	Wärmekapazität
		$\rho_{B,d}$	w	$\rho_{B,f}$	[W/(mK)]		c_B	$C_{V,B} = \rho \cdot c$
		[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]			[Ws/(kgK)]	[Ws/(m ³ K)]
Ton	von	1.200	20	1.440	0.9	1.4	1.836	2.203.200
	bis	1.600	40	2.240	0.9	1.4	2.672	4.275.200
Schluff	von	1.400	10	1.540	1.0	2.0	1.418	1.985.200
	bis	1.800	30	2.340	1.0	2.0	2.254	4.057.200
trockener Sand	von	1.700	4	1.768	1.1	2.2	1.167	1.984.240
	bis	2.000	12	2.240	1.1	2.2	1.502	3.003.200
nasser Sand	von	1.700	10	1.870	1.5	2.7	1.418	2.410.600
	bis	2.100	18	2.478	1.5	2.7	1.752	3.680.040
Torf	von	400	5	420	0.2	0.5	1.209	483.600
	bis	1.100	200	3.300	0.2	0.5	9.360	10.296.000

Tab. 1: Wärmetechnische Bodenparameter typischer Böden, basierend auf den Angaben der ISO 13370 [4]

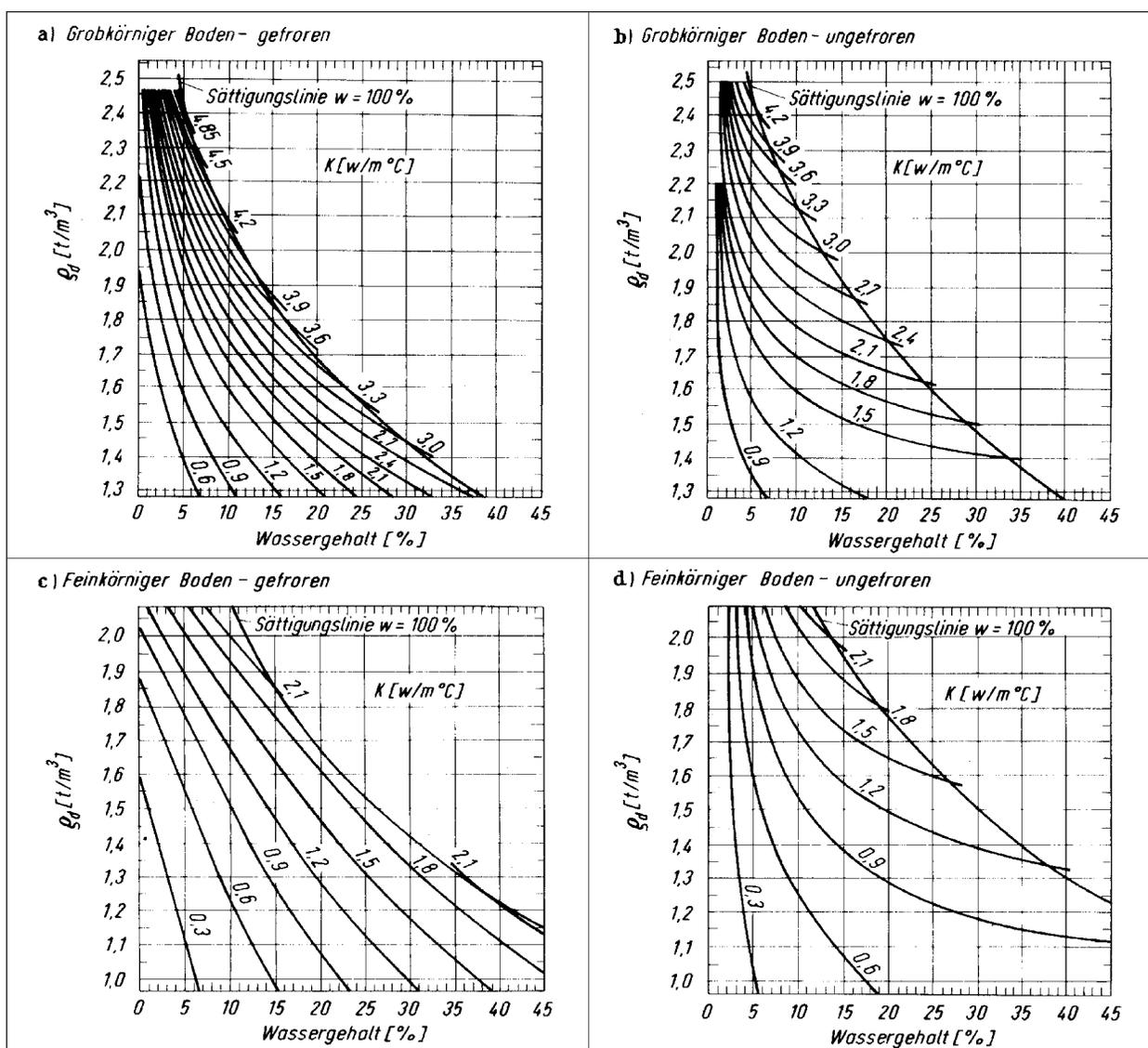


Bild 32: Wärmeleitfähigkeit des Bodens (K) in Abhängigkeit von Trockendichte (ρ_d) und Wassergehalt [26]

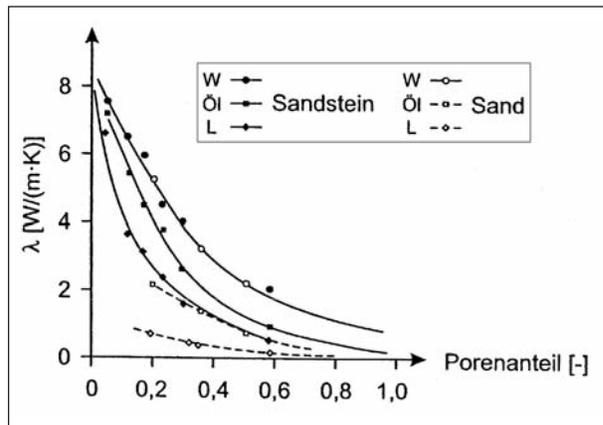


Bild 33: Einfluss von Porenanteil und Poreninhalt (Wasser (W), Öl (Ö), Luft (L)) auf die Wärmeleitfähigkeit (λ) von Sandstein und Sand [21]

w: Wassergehalt [%]

ρ_s : Korndichte [kg/m^3]

Weitere Richtwerte für Wärmeleitfähigkeit, Wärmespeicherkapazität und Dichte finden sich beispielsweise in der VDI 4640-1 [8], dem ÖWAV-Regelblatt 207 [5] und der SIA D 0136 [6] sowohl für Lockergesteine als auch für Festgesteine.

4.2.4 Hydrogeologische Grundlagen

In Abstimmung mit dem allgemeinen hydrogeologischen Erkundungsprogramm zur Trassenerkundung empfiehlt es sich, jene nachfolgend aufgelisteten hydrologischen Parameter zu bestimmen, die einerseits zu einer verbesserten Abschätzung der entziehbaren thermischen Leistung der Erdwärmanlage führen (Berücksichtigung des konvektiven Wärmetransport) und andererseits auch eine Darstellung der Umweltauswirkungen ermöglichen:

- Niveaus der freien und gespannten Grundwasserspiegel:
 - Grundwasserpegelganglinien,
 - Pegelmessungen (Ausbau von ausgewählten Bohrlöchern),
- Durchlässigkeit der Wasser führenden Bodenschichten:
 - bodenphysikalische Untersuchungen,
 - Pumpversuche in den Bohrlöchern,
- Fließgeschwindigkeit, hydraulisches Gefälle der Grundwasserhorizonte und Strömungsrichtung:
 - Auswertung von Pegelmessungen,

- Fließgeschwindigkeitsmessungen in den Bohrlöchern.

Die allgemeinen hydrogeologischen Verhältnisse können bei Fehlen entsprechender Beobachtungsdaten (benachbarte Pegel, hydrologische Beobachtungsstationen etc.) zunächst auf Grundlage der zu erwartenden geologischen Untergrundsituation abgeschätzt werden.

Werden sensible bzw. wirtschaftlich genutzte Wasserhorizonte angetroffen, so sollten – in Abstimmung mit dem allgemeinen hydrogeologischen Beweissicherungsprogramm – Grundwasserbeobachtungspegel eingerichtet und mit Messaufnehmern ausgestattet werden. Hierdurch werden die Feinabstimmung der Tunnelthermie-Anlage in den ersten Betriebsjahren sowie die Beweisführung der Umweltauswirkung ermöglicht.

An dieser Stelle soll noch kurz der Einfluss von Grundwasser auf den Wärmeentzug bzw. Wärmeinput behandelt werden:

Bei stehendem Grundwasser wird die Wirkung des Wassers durch eine höhere Wärmeleitfähigkeit bzw. höhere spezifische Wärmekapazität für den Boden (mit Wasser) berücksichtigt. Ein konvektiver Wärmetransport tritt nicht auf.

Fließendes Grundwasser bewirkt hingegen, je nach Darcy-Geschwindigkeit, einen konvektiven Wärmetransport, der zudem durch die hohe spezifische Wärmekapazität des Wassers begünstigt wird. Dabei spielt die Gesamtwassermenge, die durch den Grundwasserleiter fließt, die entscheidende Rolle.

Bei der Auslegung von Erdwärmanlagen wird allerdings häufig die positive Wirkung des Grundwassers nicht miteinbezogen, da sich die Grundwasserverhältnisse (z. B. durch eine tiefreichende Nachbarbebauung) ändern könnten. Aus diesem Grund ist das Grundwasser bei Erdwärmanlagen oftmals eine Art „stille Reserve“.

4.2.5 Ungestörte Bodentemperatur und terrestrischer Wärmestrom

Wie bereits erwähnt, ist der Anteil des terrestrischen Wärmestroms bei geringen Überlagerungshöhen meist vernachlässigbar. Erst bei Überlagerungshöhen von mehr als 100 m sollten bereits verfügbare geothermische Basisdaten aus der Region in Form von geothermischen Karten und Einzel-

messungen in benachbarten Bohrungen recherchiert werden, um die terrestrische Wärmestromdichte in den Berechnungen berücksichtigen zu können.

Aus der Überlagerung der Außenlufttemperatur und des terrestrischen Wärmestroms resultiert die ungestörte Bodentemperatur, die oftmals als Startwert in den Berechnungen zur Ermittlung des thermischen Potenzials einer Tunnelthermie-Anlage benötigt wird. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang jedoch, dass durch die Tunnelherstellung die natürlichen Verhältnisse gestört werden und somit bei Betriebsbeginn einer Tunnelthermie-Anlage bereits andere Temperaturverhältnisse vorliegen. Diese können erforderlichenfalls durch geeignete Simulationsberechnungen ermittelt werden.

Zur Ermittlung der ungestörten Untergrundtemperaturen ist zu empfehlen, Temperaturmessungen in ausgewählten Erkundungsbohrungen entlang des Trassenverlaufs durchzuführen. Zwar werden oftmals Temperaturmessungen in Bohrungen (z. B. mittels Temperaturfühler in wassergefüllten Bohrlöchern) im Zuge des allgemeinen Trassenerkundungsprogramms durchgeführt, es sollte jedoch auf Einstellung eines thermischen Gleichgewichts im Bohrloch geachtet werden, um exakte Temperaturverläufe im Untergrund bestimmen zu können. Thermisches Gleichgewicht stellt sich jedoch erst nach einer Ruhezeit der Bohrung von einigen Tagen ein. Aus diesem Grund sollten erforderlichenfalls repräsentative Bohrungen (große Bohrtiefe, Durchteufung möglichst vieler unterschiedlicher Untergrundschichten) zu Beobachtungspegeln für thermische Wiederholungsmessungen ausgebaut werden.

4.3 Tunnellufttemperatur

Der Tunnelinnenraum liefert selbst einen nicht vernachlässigbaren Beitrag zur thermischen Gesamtleistung einer Tunnelthermie-Anlage. Der Jahresgang der Tunnelinnentemperatur ist jedoch kaum bekannt, wodurch gegenwärtig in der Regel nur Annahmen getroffen werden können.

Hinweise zur Temperaturverteilung gibt beispielsweise die ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1:2007 [13], die für die statische Berechnung der Innenschale von Straßentunneln eine Temperaturverteilung entsprechend Bild 34 empfiehlt, falls nicht besondere Bauwerksverhältnisse genauere Ansätze der Temperaturen erfordern. Die Temperaturverteilung im Querschnitt ist gemäß ZTV-ING linear anzuneh-

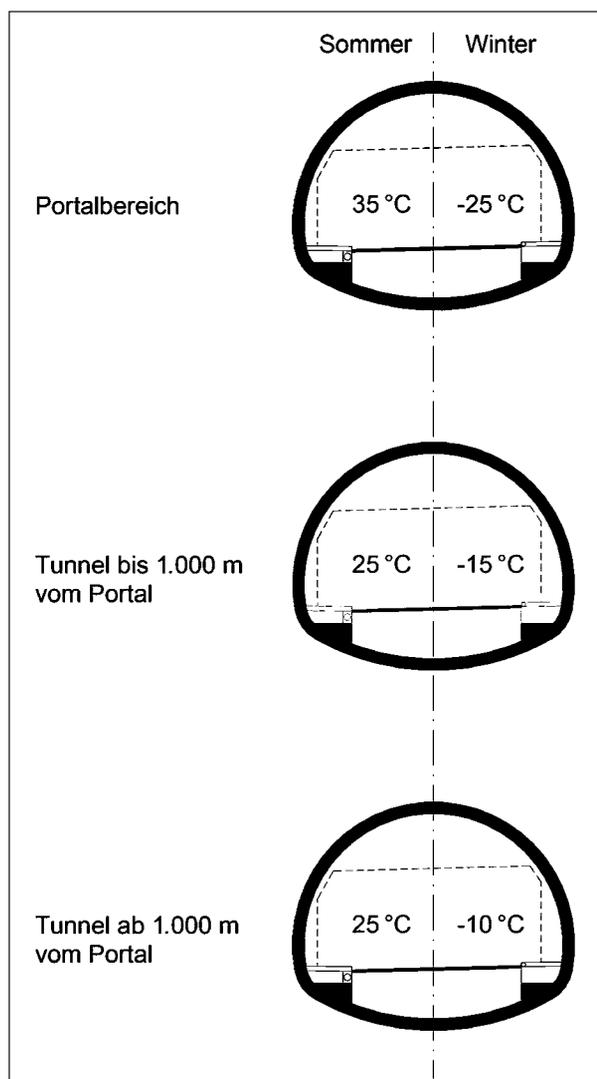


Bild 34: Temperaturen an den inneren Bauteiloberflächen bzw. Straßenflächen gemäß ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1:2007 [13]

men, wobei – unabhängig von der Schalendicke – eine Temperaturdifferenz von 10 K rechnerisch sowohl für die Sommer- als auch Winterperiode anzusetzen ist.

Temperaturmessungen wurden in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2001 im damals längsten in Betrieb befindlichen Straßentunnel Königshainer Berge durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden erläutert [24]:

Der Tunnel Königshainer Berge befindet sich in Sachsen und ist mit einer Länge von 3.300 m nach dem Rennsteigtunnel derzeit der zweitlängste zweiröhrige Straßentunnel Deutschlands. Der Tunnelbau im anstehenden Granit erfolgte im bergmännischen Sprengvortrieb und Spritzbetonausbau nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT).

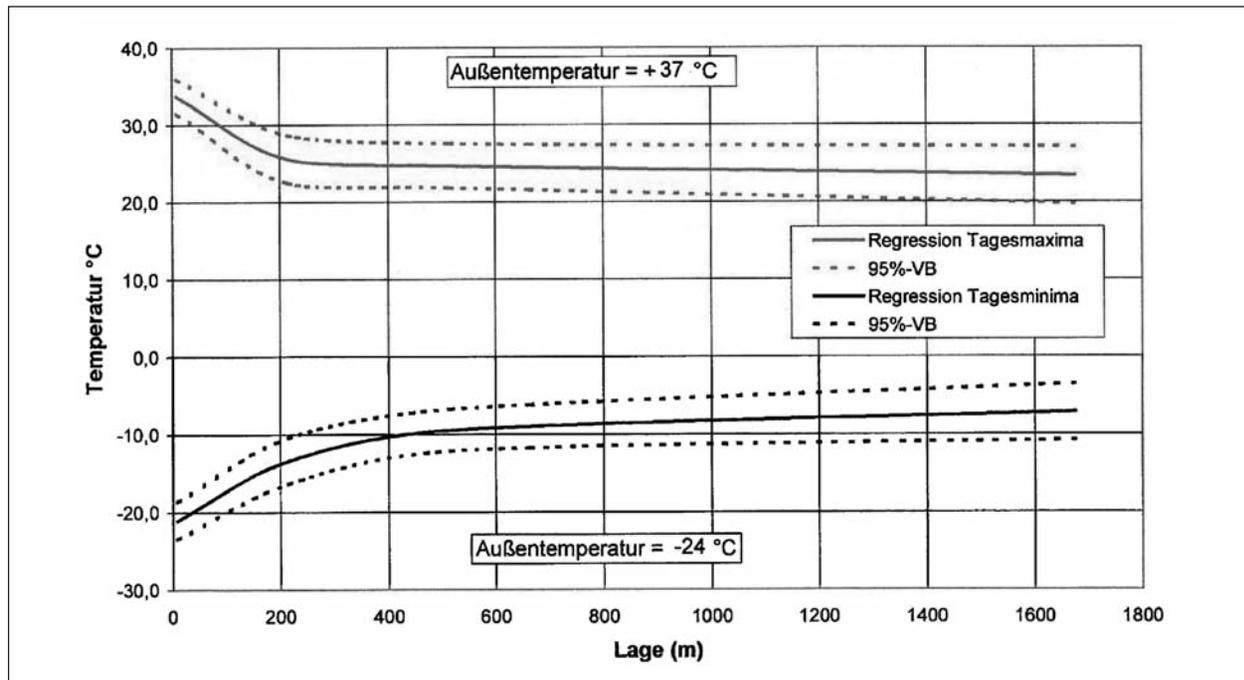


Bild 35: Temperaturverlauf in Tunnellängsrichtung bei einer Außentemperatur von +37 °C (Sommer) bzw. -24 °C (Winter). Die gestrichelten Kurven stellen den 95%igen Vertrauensbereich dar [24]

Temperatursensoren wurden in insgesamt 4 Messquerschnitten in unterschiedlicher Entfernung (9 m, 215 m, 515 m und 1.675 m) zum Tunnelportal installiert.

Die Messungen haben ergeben, dass mit einer zunehmenden Entfernung vom Portal der lineare Zusammenhang zwischen der Außenlufttemperatur und den Tunnellufttemperaturen abnimmt. Damit wurde nachgewiesen, dass ausgehend von einem extremen Außenlufttemperaturwert auf die Tunnellufttemperaturwerte geschlossen werden kann.

Auf Basis der so ermittelten Regressionsgeraden wurde u. a. der Temperaturverlauf in Tunnellängsrichtung bei einer Außentemperatur von +37 °C (Sommer) bzw. -24 °C (Winter) ermittelt (siehe Bild 35) [24].

Die Untersuchungen im Tunnel Königshainer Berge haben letztendlich ergeben, dass im Vergleich zu den Vorgaben der ZTV-ING (mit einer Stufung der Temperatur in einer Entfernung von 1.000 m vom Portal) sich der tatsächliche Verlauf der Temperatur über eine Kurve darstellen lässt, die bis ca. 200 m vom Portal einen steilen Gradientenverlauf aufweist, von 200 bis 500 m Entfernung abfällt und sich ab einer Entfernung von 500 m nur noch unwesentlich ändert [24].

Es wurde daher empfohlen, den Portalbereich aus Sicht der Lufttemperaturverteilung über eine Länge

von 200 m zu definieren, bis zu dessen Ende die Extremwerte sowohl für die Sommer- als auch Winterperiode nach der ZTV-ING anzusetzen sind. Ab einer Entfernung von 1.000 m vom Beginn des Portalbereiches wurde zudem für die Winterperiode empfohlen, den Temperaturwert auf -10 °C festzulegen. Des Weiteren wurde empfohlen, die anzusetzenden Extremwerte mit +37 °C und -24 °C zu definieren [24].

Zu beachten ist, dass sich diese Empfehlungen noch auf einen älteren Stand der ZTV-ING (Entwurf aus dem Jahr 2002) beziehen und in der derzeit gültigen Version aus dem Jahr 2007 bereits andere Temperaturextremwerte angegeben sind.

In Bild 36 ist schließlich eine Gegenüberstellung der in der ZTV-ING:2007 definierten Werte und der Empfehlungen gemäß den Untersuchungen der BAST für den Tunnel Königshainer Berge dargestellt.

In Bezug auf die Temperaturverteilung über den Querschnitt der Innenschale ist gemäß ZTV-ING [13] ein Temperaturunterschied von 10 K anzusetzen. Dabei sind von innen nach außen für die Sommerperiode eine Temperaturabsenkung von 10 K und für die Winterperiode eine Temperaturerhöhung von 10 K zu berücksichtigen. Diese Vorgaben konnten im Zuge der durchgeführten Messungen bestätigt werden [24].

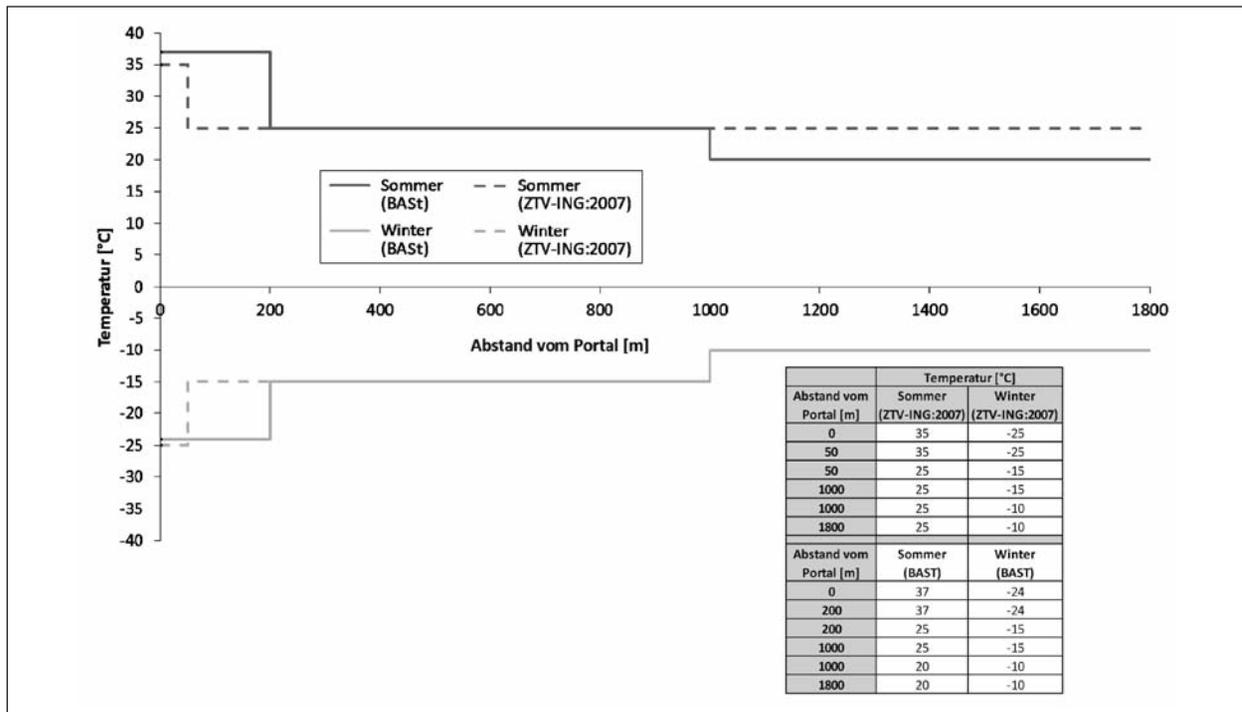


Bild 36: Gegenüberstellung der Angaben gemäß ZTV-ING:2007 [13] und der Empfehlungen auf Basis der Tunnellufttemperaturmessungen im Tunnel Königshainer Berge [24]

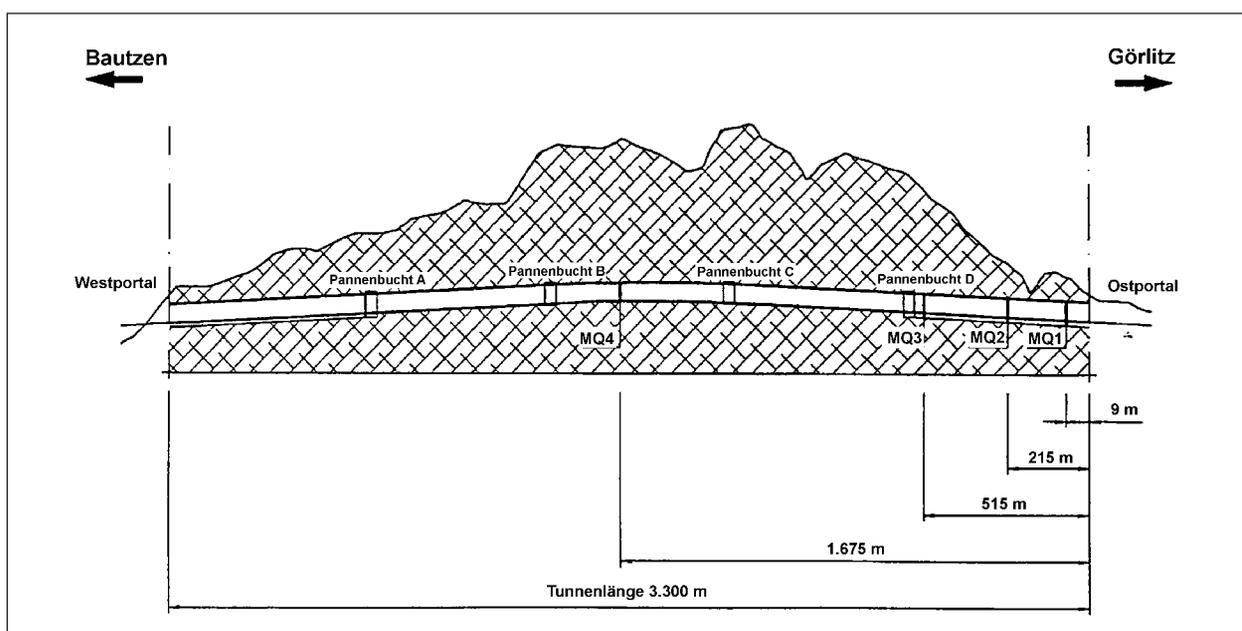


Bild 37: Längenschnitt Tunnel Königshainer Berge mit Situierung der Messquerschnitte [24]

Für die Auslegung einer Tunnelthermie-Anlage können die beschriebenen Messergebnisse allerdings nur bedingt verwendet werden, da es sich bei den angegebenen Temperaturwerten um Extremwerte (Außentemperatur -24 °C bzw. $+37\text{ °C}$) handelt, die – wenn überhaupt – nur an wenigen Tagen innerhalb eines Jahres erreicht werden. Für die Auslegung einer Tunnelthermie-Anlage sind aber vielmehr die tatsächliche Jahresganglinie der Außen-

temperatur und die daraus resultierende Tunnellufttemperatur von Bedeutung. Dazu müssten die in [24] durchgeführten Messungen über mehrere Jahre dargestellt werden, da [24] nur die Ganglinien einzelner Monate enthält (siehe z. B. Bild 38).

Anhand der dargestellten Messergebnisse in Bild 38 ist beispielsweise zu erkennen, dass beim Messquerschnitt 4, somit in einer Entfernung von

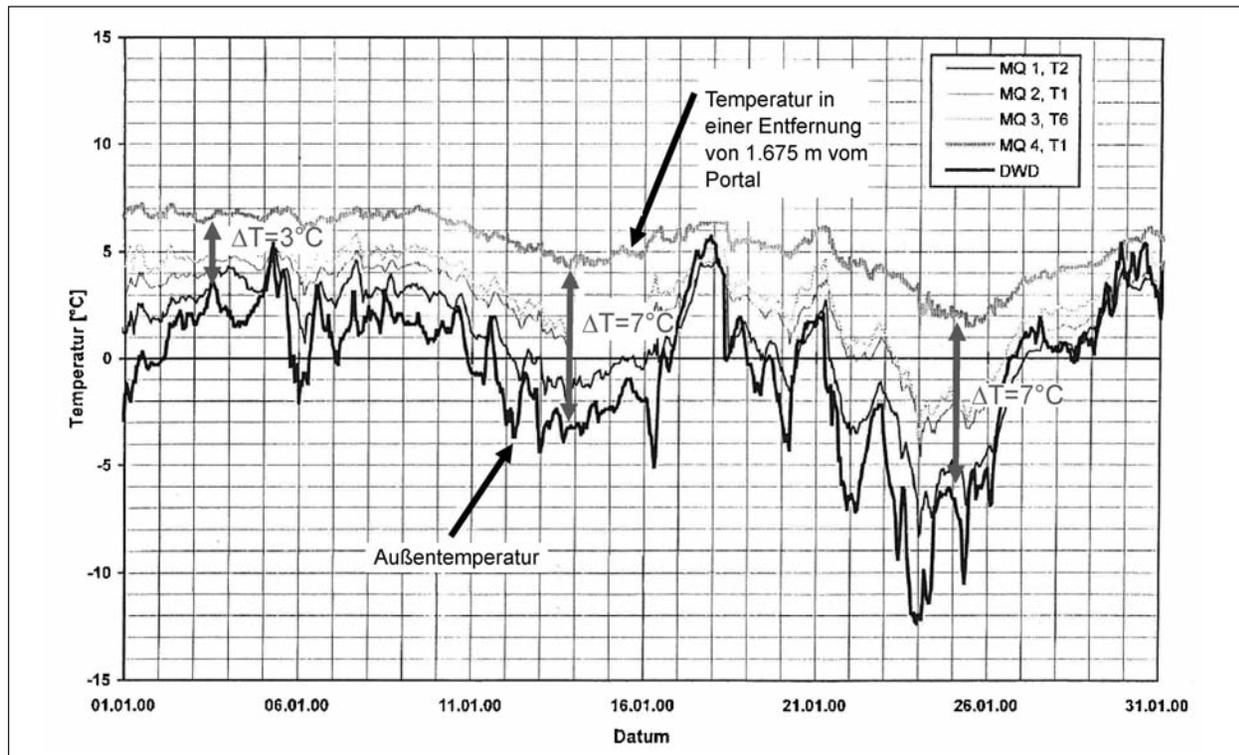


Bild 38: Lufttemperaturwerte in den Messquerschnitten 1 bis 4 im Vergleich zur Außenlufttemperatur (exemplarisch für die Winterperiode) [24]

1.675 m vom Portal, die Tunnellufttemperatur um rund 3 bis 7 °C höher ist als die jeweilige Außentemperatur und im betrachteten Zeitraum die Tunnellufttemperatur nicht unter den Gefrierpunkt sank.

4.4 Empfehlungen zur thermischen Erkundung in Kombination mit üblichen geotechnischen Aufschlüssen

Die nachfolgenden Empfehlungen beziehen sich auf eine angenommene Länge der Tunnelthermie-Anlage von ca. 300 m.

Untergrundparameter

Die geologische und geotechnische Untergrunderkundung ist bei Tunnelbauwerken in Abhängigkeit von den Untergrundverhältnissen, der Tunnelbauart, der Überlagerung, der Nachbarbebauung etc. meist sehr unterschiedlich. Anhaltswerte für übliche Aufschlussmethoden sind beispielsweise der DIN EN 1997-2, Anhang B [3] für unterschiedliche Etappen (Voruntersuchungen, Hauptuntersuchungen, Kontrolluntersuchungen), unterschiedliche Gründungsarten (Pfahl- bzw. Flachgründung) und unterschiedliche Böden bzw. Fels zu entnehmen. In

Bezug auf die Untersuchungsabstände gibt die DIN EN 1997-2 im Anhang B [3] für bergmännische Tunnel einen Abstand von 20 bis 200 m vor und eine Aufschlusstiefe bis zur 1- bis 2fachen Ausbruchsbreite unterhalb der Tunnelsohle.

Die Festlegung der erforderlichen Aufschlussart, Aufschlussdicke und -tiefe wird letztendlich vom geologisch-geotechnischen Projektteam getroffen.

Die zusätzliche thermische Erkundung kann sich im Regelfall den Festlegungen des geologisch-geotechnischen Aufschlussprogramms unterordnen, da beispielsweise der Schichtaufbau des Untergrundes oder die Grundwasserverhältnisse ohnehin für die Tunnelplanung erkundet werden müssen und in gleicher Weise auch für die Planung einer Tunnelthermie-Anlage relevant sind.

Zusätzlich zum üblichen geologisch-geotechnischen Untersuchungsprogramm empfiehlt es sich jedoch im Nahbereich der geplanten Tunnelthermie-Anlage, das Temperaturprofil sowie die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes zu bestimmen. Dazu werden im Idealfall (bei Annahme einer Länge der Tunnelthermie-Anlage von ca. 300 m) zumindest zwei ohnehin herzustellende geologisch-geotechnische Aufschlussbohrungen als Erdwärmesonden (Doppel-U-Sonde) ausgebaut.

Anhand dieser Erdwärmesonden empfiehlt sich des Weiteren die Durchführung von Thermal-Response-Tests gemäß in Kapitel 4.2.3 „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Feld“ sowie die Erstellung eines Temperaturprofils entlang der Tiefe. Bei größeren Überlagerungshöhen kann auch die in Kapitel 4.2.3 beschriebene Messsonde zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in bestimmten Tiefenstufen verwendet werden.

In Ergänzung dazu ist auch die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an Bohrkernen zu empfehlen, wobei idealerweise zumindest jeweils 3 Bohrkern (Bereich Tunnelfirste, Bereich Tunnelmitte, Bereich Tunnelsohle) aus 2 Bohrungen im Bereich der Tunnelthermie-Anlage untersucht werden sollten. Die Ergebnisse sämtlicher Messungen sollten in weiterer Folge einander gegenübergestellt und interpretiert werden, da unterschiedliche Messmethoden bzw. Messsysteme (Thermal-Response-Test liefert nur eine mittlere Wärmeleitfähigkeit im Testbereich, Ergebnisse der Messsonde sind abhängig von verfügbaren Wärmekarten, Labormessungen sind abhängig von der Probenqualität) zum Einsatz kommen.

In Bezug auf die spezifische Wärmekapazität ist festzuhalten, dass üblicherweise vorhandene Literaturangaben ausreichen und keine speziellen Untersuchungen erforderlich sind.

Bei Vorhandensein von Grundwasser sind die in Kapitel 4.2.4 angegebenen Parameter (Lage von Grundwasserkörpern, Grundwassertemperatur, Grundwassermächtigkeit, Grundwasserströmungsgeschwindigkeit, Grundwasserströmungsrichtung) zu ermitteln. Dies erfolgt üblicherweise ohnehin im Rahmen der geologisch-geotechnischen Aufschlusskampagne. Hervorzuheben ist allerdings, dass für die Planung von Tunnelthermie-Anlagen insbesondere der jahreszeitliche Verlauf der Grundwassertemperatur von Interesse ist. Dafür ist im Idealfall (bei Annahme einer Länge der Tunnelthermie-Anlage von ca. 300 m) ein separater Temperaturlogger in einem ausgebauten Grundwasserpegel zu installieren.

Tunnellufttemperatur

Die Kenntnis der Tunnellufttemperatur im Bereich der geplanten Tunnelthermie-Anlage ist ebenfalls von größter Bedeutung für die Berechnung der Anlagenkapazität. Zur Bestimmung der Temperaturverhältnisse im Tunnelinneren muss dabei auf bestehende Tunnel zurückgegriffen werden.

Kritisch anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass bislang kaum Messwerte vorliegen. Aus diesem Grund wird dringend empfohlen, Temperaturaufzeichnungen (Jahresganglinie!) in bereits bestehenden Straßentunneln durchzuführen, um eine größere Datengrundlage (in Abhängigkeit von der Tunnellänge, der Überlagerung, der Belüftung etc.) für künftige Projekte zu schaffen.

5 Technische Detaillösungen

5.1 Ziel

In diesem Kapitel werden technische Detaillösungen zu nachfolgend angeführten Themenbereichen beschrieben und zeichnerisch dargestellt:

- Auswahl der geothermisch zu aktivierenden Bauteile, des Leitungsmaterials, der Leitungsführung/-durchmesser und der Verbindungen,
- konstruktiver Schutz der Leitungen vor Beschädigungen,
- Durchführung von Leitungen durch Bauteile und Abdichtungen (WUB-KO/KDB),
- Anordnung von Wärmepumpe und Verteilerkästen sowie ggf. weiterer erforderlicher Aggregate.

5.2 Geothermisch aktivierbare Bauteile

In diesem Kapitel werden anhand von typischen Tunnelquerschnitten Möglichkeiten zur geothermischen Aktivierung von einzelnen Bauteilen aufgezeigt. Die Auswahl an geothermisch aktivierbaren Bauteilen berücksichtigt dabei die unterschiedlichen Tunnelbauweisen.

Eine Gliederung der Tunnelquerschnitte kann grundsätzlich in Anlehnung an die ZTV-ING, Teil 5 [13] folgendermaßen erfolgen:

- geschlossene Bauweise:
 - mechanischer Ausbruch,
 - Sprengen,
 - maschineller Ausbruch,
- offene Bauweise:
 - Flachfundierung mit Bodenplatte,
 - Tieffundierung mit Pfählen oder Schlitzwänden,

- maschinelle Schildvortriebsverfahren:
 - mit Tunnelbohrmaschine (TBM),
 - mit Schildmaschine (SM),
 - Tunnelvortriebsmaschinen (TVM).
- Neben den unterschiedlichen Bauverfahren sind noch folgende Unterscheidungen von Bedeutung:
- Ausbau:
 - 1-schalige Konstruktion,
 - 2-schalige Konstruktion,
 - Abdichtungssystem:
 - keine Abdichtung,
 - Abdichtungsbahnen (z. B. Regenschirmabdichtung),
- WUB-KO (wasserundurchlässige Betonkonstruktion),
 - Profilform:
 - Kreisprofil,
 - Hufeisenprofil,
 - Maulprofil,
 - etc.

Die für die einzelnen Bauweisen zur Verfügung stehenden Absorberelemente wurden bereits im Kapitel 3.2.6 beschrieben. Darauf aufbauend findet sich in Tabelle 2 eine Zusammenstellung dieser Absorberelemente inklusive einer Bewertung der Vor- und Nachteile.

Absorberelement	Vorteile	Nachteile
Energiepfähle, Energieschlitzwände	<ul style="list-style-type: none"> • Elemente im Hochbau langjährig erprobt, • Elemente im Tunnelbau erstmals beim Lainzer Tunnel in Wien und bei Wiener U-Bahnbaulosen angewandt, • gute Erfahrungen mit Einbau, • Anbieterfirmen auf dem Markt, daher größerer Preisdruck (kleinerer Marktpreis), • geringe Beeinflussung durch Außentemperatur. 	<ul style="list-style-type: none"> • gegenseitige Beeinflussung benachbarter Elemente ist zu beachten, • hohe Leistung nur im Einbindebereich erzielbar, • Durchdringungspunkte durch Innenschale und Abdichtung.
Energiebodenplatten, Energiesohlen	<ul style="list-style-type: none"> • Elemente im Hochbau langjährig erprobt, • Sohlbelegung im Tunnelbau erstmals bei Wiener U-Bahn Linie U2 angewandt, • Anbieterfirmen auf dem Markt, daher größerer Preisdruck (kleinerer Marktpreis), • hohe Flexibilität und Anpassungsmöglichkeiten gegeben. 	<ul style="list-style-type: none"> • stärkere Beeinflussung durch Außen- bzw. Tunnellufttemperatur, • Durchdringungspunkte durch Innenschale und Abdichtung.
Energievliese	<ul style="list-style-type: none"> • Prototyp in einer Testanlage beim Lainzer Tunnel in Wien und beim Fasanenhofunnel in Stuttgart erprobt, • gute Erfahrungen aus Testanlagen. 	<ul style="list-style-type: none"> • bislang kein großmaßstäblicher Einsatz, • derzeit nur vereinzelt Produzenten verfügbar (hoher Marktpreis), • Beeinflussung durch Tunnellufttemperatur, • Entlüftungsproblematik zu beachten, • Durchdringungspunkte durch Innenschale und Abdichtung.
Energieanker	<ul style="list-style-type: none"> • Prototyp in einer Testanlage beim Lainzer Tunnel in Wien erprobt (Hangsicherung), • geringe Beeinflussung durch Außentemperatur, • Möglichkeit zur späteren Nachrüstung von unterirdischen Bauwerken. 	<ul style="list-style-type: none"> • im Tunnelbau noch nicht erprobt, • lediglich Prototyp vorhanden, • keine Serienreife, • derzeit nur eine Herstellerfirma (hoher Marktpreis), • zusätzliche Arbeitsschritte erforderlich, • Durchdringungspunkte durch Innenschale und Abdichtung, • hohe Beschädigungsgefahr der Anbindeleitungen.
Energietübbinge	<ul style="list-style-type: none"> • Prototyp in einer Testanlage erprobt, • großmaßstäblicher Einsatz im Unterinntal in Österreich, • wenige zusätzliche Arbeitsschritte erforderlich, da die Elemente vorgefertigt sind. 	<ul style="list-style-type: none"> • Für Ringspaltverpressung sollte thermoaktiver Zement verwendet werden (teurer), • stärkere Beeinflussung durch Tunnellufttemperatur.

Tab. 2: Bewertungsmatrix für Erdwärme-Absorberelemente mittels Massivabsorbertechnologie

5.3 Leitungsmaterial und Verbindungen

5.3.1 Rohrmaterial

Für die Absorberleitungen stehen am Markt unterschiedliche Materialien zur Verfügung, die sich u. a. hinsichtlich Temperaturbeständigkeit, Flexibilität, Bruchdehnung, Wärmeeigenschaften, Verarbeitung, Reibungswiderstand und Preis unterscheiden. Bei den meisten realisierten Anlagen kamen PE-HD-Rohre zum Einsatz, da diese Rohre einen guten Kompromiss zwischen den technischen Eigenschaften und den Rohrkosten aufweisen. Andersartige Absorberrohre, die teilweise günstigere technische Eigenschaften (z. B. erhöhte Flexibi-

lität) aufweisen, wurden meist nur bei Forschungsprojekten eingesetzt. In [17] wurde eine Zusammenstellung unterschiedlich eingesetzter Absorberleitungsmaterialien erarbeitet (siehe Tabelle 3).

Wie bereits erwähnt, wird als Rohrmaterial für die Belegung der Bauteile meist der Kunststoff PE-HD angewandt. Dieser ist sowohl gegenüber dem verwendeten Wärmeträger im Rohr als auch gegen alle im normalen Betrieb von außen auftretenden chemischen, thermischen oder mechanischen Belastungen beständig.

Die Absorberleitungen in den Betonbauteilen entsprechen strengen Qualitätsrichtlinien bezüglich Werkstoff und Verarbeitung. Die zugrunde liegende

Material	Einstzort	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 Spannungsrissbeständigkeit, 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, ohne chem. Beständigkeit, gut schweißbar
PE-RT Unvernetztes Polyethylen „Resistant Temperature“ (Gabotherm 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 (Gabotherm 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, sauerstoffdicht, nicht für Hochdruck geeignet, max. Betriebstemperatur 80 °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

Tab. 3: Materialien für Absorberleitungen [17]

Norm für Rohre aus Polyethylen ist die DIN 8074 [1]. In dieser Norm finden sich Tabellen über Zeitstandskurven der Rohre unter normalen Betriebsbedingungen, d. h., die Rohre sind den Einflüssen der Atmosphäre ausgesetzt. Die Absorberleitungen in den Betonbauteilen sind jedoch wesentlich besser gegen schädigende Einflüsse geschützt.

Für Erdwärmeanlagen werden meist Rohre aus PE 80 bzw. 100 in der Dimension 25 x 2,3 mm verwendet. Bei einer mittleren Betriebstemperatur von 30° (entspricht in etwa der oberen Grenze für den Absorberbetrieb) ergibt sich eine Zeitstandskurve wie in Bild 39 angegeben.

Bezüglich der Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe des Wärmeträgers 1,2-Propylenglycol ($C_3H_8O_2$, auch als 1,2-Propandiol bezeichnet) lässt sich die DIN 8075, Beiblatt 1 (Rohre aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), Chemische Widerstandsfähigkeit von Rohren und Rohrleitungsteilen) heranziehen, deren Bedingungen das Rohrmaterial der Absorberrohre erfüllen muss. Dabei wird dem Rohrmaterial volle Widerstandsfähigkeit gegenüber technisch reiner Konzentration an 1,2-Propylenglycol (die in den Wärmeträgermischungen mit Wasser nicht erreicht wird) in allen Temperaturbereichen attestiert.

Aus Bild 39 ist ersichtlich, dass je nach erwarteten Betriebsjahren ein Betriebsüberdruck zwischen 7,2 bar (5 Jahre) und 6,7 bar (50 Jahre) bei einem Sicherheitsfaktor von 2,0 zulässig ist. Eine Extrapolation auf 100 Jahre würde einen zulässigen Betriebsüberdruck von 6,6 bar ergeben. Dieser wird im Regelfall bei Erdwärmeanlagen unterschritten. Beispielsweise liegt bei den ausgeführten Erdwärmeanlagen der Wiener U-Bahn der Betriebsdruck in etwa bei 4,5 bar. Somit ist eine ausreichende

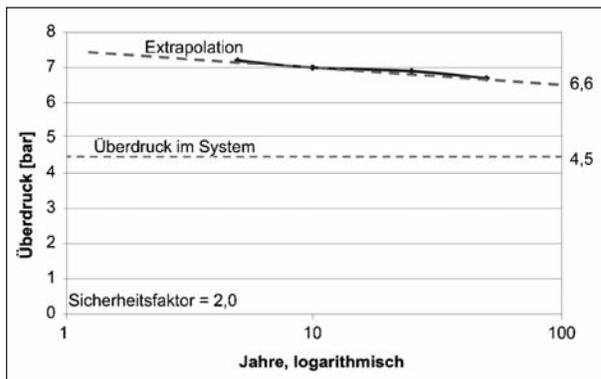


Bild 39: Zeitstandskurve nach DIN 8074 für PE-80-Rohre der Dimension DN 25 x 2,3 mm, Durchflussmedium Wasser, Sicherheitsfaktor = 2,0

Sicherheit bei der Lebensdauer der Absorberleitungen gegeben.

5.3.2 Verbindungen

Die Verbindungen der Absorberleitungen unterscheiden sich in Abhängigkeit des Leitungsmaterials und sind oftmals auch herstellerspezifisch. Am meisten verbreitet sind Elektroschweißmuffen.



Bild 40: Elektroschweißmuffe zur Verbindung von PE-HD-Rohren im Zuge des Bewehrungsstoßes eines Schlitzwandelementes



Bild 41: Heiz- und Steuergerät für die Herstellung einer Elektroschweißmuffe

Generell zu beachten bei Schweißverbindungen ist, dass die Aufheizung und Schmelzung des Rohrmaterials exakt nach Herstellerangabe ausgeführt werden. Bei zu kurzer Aufheizung sind eine verminderte Beanspruchbarkeit und Dichtigkeit zu befürchten. Bei zu langer Aufheizung besteht die Gefahr, dass Querschnittsverengungen entstehen, indem Schmelze in das Rohrinne ausweicht.

5.4 Weiteres Vorgehen

In Bezug auf die Themenbereiche „Konstruktiver Schutz der Leitungen vor Beschädigungen“, „Durchführung von Leitungen durch Bauteile und Abdichtungen“ sowie „Anordnung von Wärmepumpe und Verteilerkästen sowie ggf. weiterer erforderlicher Aggregate“ ist darauf hinzuweisen, dass generelle Angaben dazu sehr schwierig sind und Detaillösungen projektspezifisch geplant und entwickelt werden müssen.

Um dennoch unterschiedliche Möglichkeiten dafür aufzuzeigen, werden nachfolgend Erläuterungen zu Erdwärmeanlagen in Tunnelbauwerken gegeben, wobei Tunnelbauwerke in geschlossener und offener Bauweise (Deckelbauweise) unterschieden werden. Anhand von typischen Tunnelquerschnitten wird der Aufbau einer Erdwärmeanlage im Detail beschrieben und anschließend mittels eines virtuellen Beispielprojektes auch planerisch dargestellt. Dies kann dann sinngemäß auch auf andere Tunnelquerschnitte bzw. andere Projekttrandbedingungen übertragen werden, wie dies in Kapitel 5.7 für in Deutschland übliche Tunnelbauwerke aufgezeigt wird.

5.5 Erdwärmeanlage bei geschlossener Tunnelbauweise (geschlossene Sohle mit Innenschale als WUB-KO)

5.5.1 Allgemeines

Tunnelbauwerke, die in geschlossener Bauweise errichtet werden, beinhalten oftmals vertikale Schächte wie z. B. Start- und Zielschacht, Schächte für Notausstiege, Lüftungsschächte etc., über die die unterirdischen Tunnelröhren mit der Geländeoberfläche verbunden sind. Der Grundgedanke bei der Erdwärmenutzung von Tunnelbauwerken ist, dass die Tunnelröhre selbst als Erdwärmeabsorber dient und die Verbindung mit dem Verbraucher – der zumeist an der Geländeoberfläche liegen wird –

über vertikale Schächte oder auch separat hergestellte Bohrungen erfolgt.

Da die Absorberbauteile und die Verbraucher in der Regel örtlich getrennt sind, müssen sie durch ein Leitungssystem miteinander verbunden werden. Die Absorberleitungen müssen dabei aus den Absorberbauteilen herausgeführt und mittels Anbindeleitungen an einen Verteiler angeschlossen werden. Danach kann eine Leitung größeren Durchmessers zur Wärmepumpe geführt werden, die sich in der Nähe des Verbrauchers befinden sollte.

Der Einbau von Erdwärmeabsorbern soll einerseits eine möglichst große Fläche im Tunnel thermisch aktivieren, andererseits möglichst kostengünstig sein und den Bauablauf nur wenig beeinflussen. Als optimale Lösung hat sich der Einsatz eines Energiefestes herausgestellt, das diese Anforderungen gut erfüllt, da die Funktion der ohnehin vorzusehenden Gleitfolie lediglich um die thermische Funktion ergänzt wird.

Um zudem teure und arbeitsintensive wasserdichte Durchführungen durch die Innenschale bzw. durch eine Abdichtungsebene zu vermeiden, sollten die Anbindeleitungen zu den Verteilern vorab im Sohlbeton verlegt werden, womit gleichzeitig auch die Sohle thermisch aktiviert wird. Die Anbindeleitungen werden dann konzentriert an vorgesehenen Stellen (z. B. Nischen, Querschläge) gut geschützt durch die Abdichtungsebene (z. B. Innenschale als WUB-KO) geführt und mit den Verteilern verbunden.

Die einzelnen Verteiler werden mittels Sammelleitungen, die entweder im Tunnelinneren oder im Sohlbeton situiert sind, miteinander verbunden und an geeigneter Stelle (z. B. über vertikale Schächte oder separat herzustellende Bohrungen) an die GOK zu den Endverbrauchern geführt.

Das gesamte Rohrsystem wird unter Überdruck gehalten und laufenden Druckproben unterzogen. Dadurch können Undichtigkeiten rechtzeitig erkannt und repariert werden.

Bei in geschlossener Bauweise hergestellten Tunnelbauwerken bietet sich für eine Absorberbelegung eine Unterteilung in Sohle und Gewölbe an.

5.5.2 Absorberleitungen in der Tunnelsohle (Energiesohle)

Tunnelröhren können zur Energieextraktion genutzt werden, indem ähnlich der Verlegung von Fußbo-

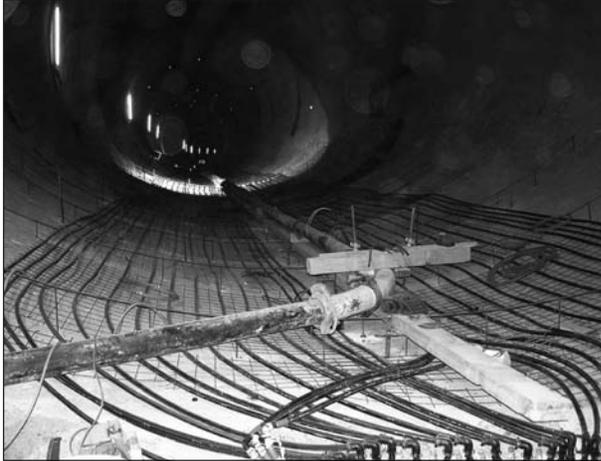


Bild 42: Beispiel einer Tunnelsohlbelegung

denheizungen oder Flächenkollektoren die Absorberleitungen in der Ausgleichsschicht zwischen Außenschale und Sohle angeordnet werden. Da im Sohlbereich oftmals ein Toleranzbereich vorhanden ist, kann die Belegung im Bereich dieser Toleranzfläche erfolgen (s. Bild 42).

Eine Anwendung ist sowohl bei einschaligem als auch zweischaligem Ausbau möglich.

5.5.3 Absorberleitungen im Tunnelgewölbe (Energievlies)

Die Ausstattung der Tunnelsohle lässt leider einen großen Teil des Umfangs des Tunnels ungenutzt. Um auch hier eine Lösung zu finden, wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes in Wien [28] das so genannte Energievlies entwickelt.

Hierbei wird ein Vlies, auf dem die Absorberleitungen bereits vormontiert sind, an der Tunnelaußenschale befestigt. Die Verlegung erfolgt dabei in ähnlicher Weise, wie es für die Montage der konstruktiv erforderlichen Gleitfolie zwischen Außen- und Innenschale erforderlich ist. Während bei der erwähnten Versuchsanlage noch Gleitfolie und Energievlies separat verlegt wurden, sollte bei zukünftigen Projekten das Energievlies auch die Funktion der Gleitfolie übernehmen, sodass im Vergleich zu herkömmlichen Tunnelbauwerken kein zusätzlicher Arbeitsschritt für den Einbau des Energievlieses notwendig ist (s. Bild 43).

Alternativ zur dargestellten Parallelschaltung der einzelnen Energievliesbahnen im Tichelmann-Prinzip (gleiche Durchströmung aller Leitungen) gemäß Bild 45 ist auch eine Serienschaltung möglich. Dies ergibt sich letztendlich aufgrund der hydraulischen Auslegung (Pumpwiderstand) und der Entlüftungs-



Bild 43: Beispiel einer Gewölbebelegung mit Energievliesbahnen

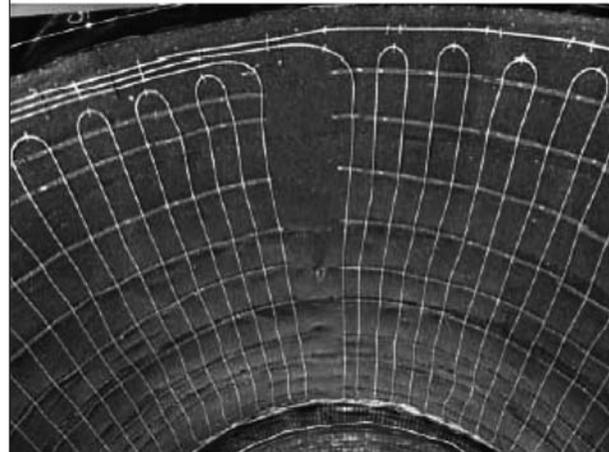
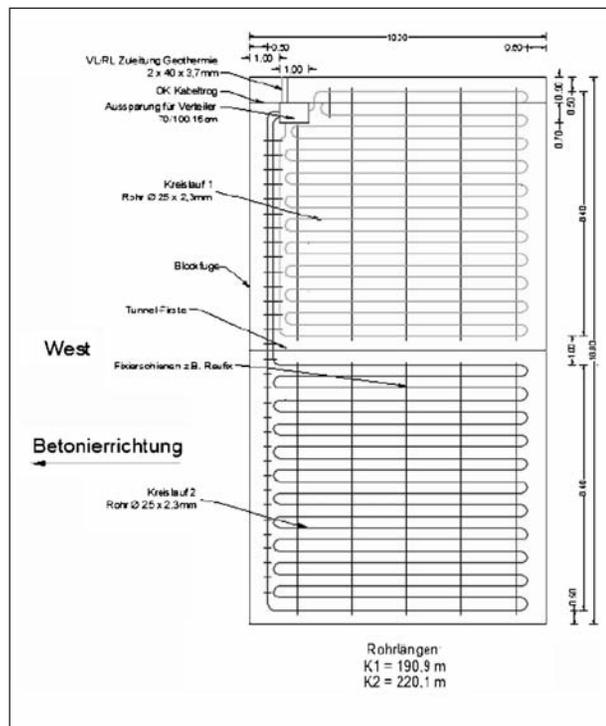


Bild 44: Verlegeschema (oben) und Fotoaufnahme (unten) des Energievlieses in einem Testabschnitt des Fasanenhofstunnels in Stuttgart [18]

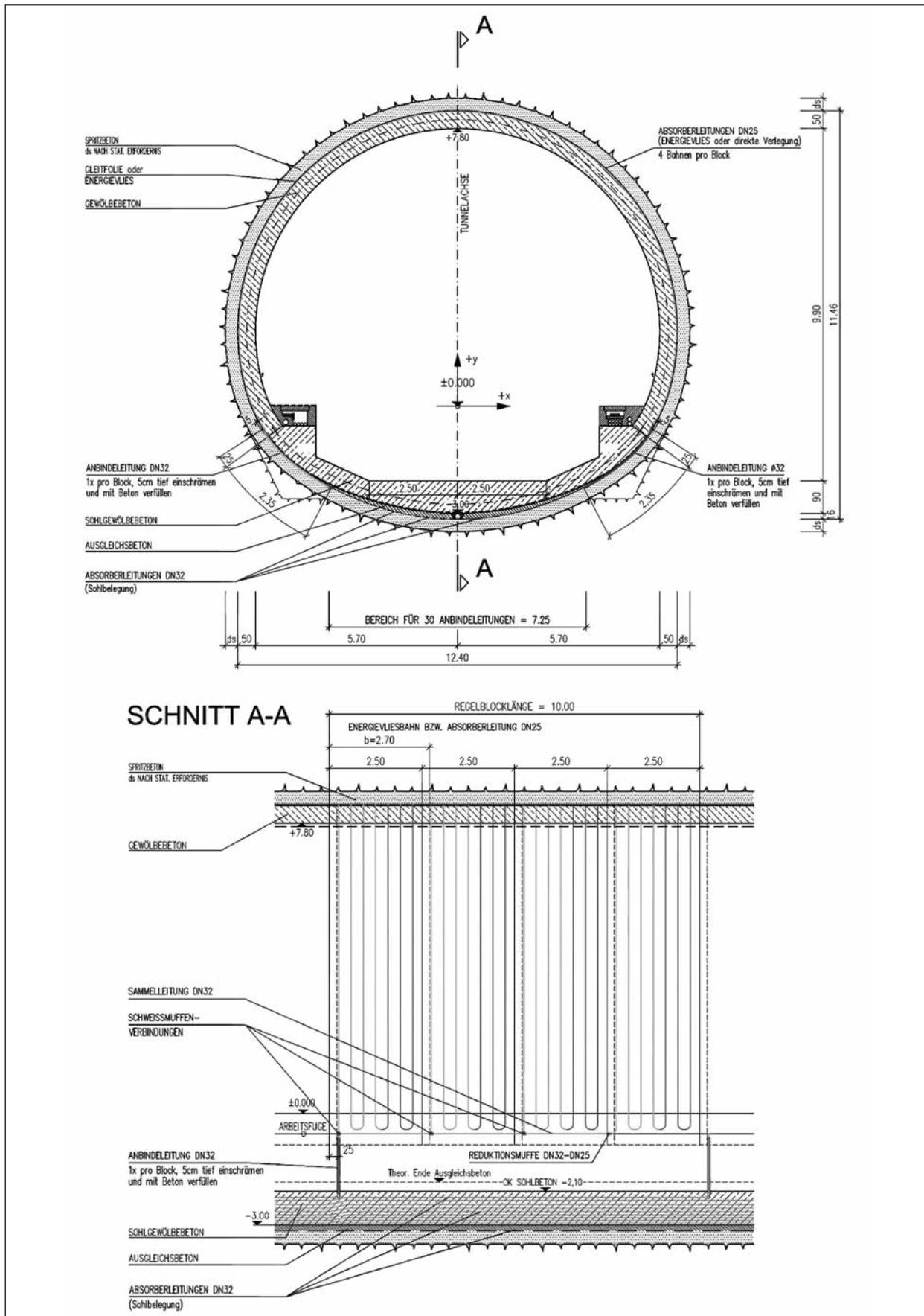


Bild 45: Tunnelröhre in geschlossener Bauweise mit 2-schaliger Konstruktion. Regelquerschnitt und Längsschnitt mit Absorberleitungen (vgl. auch Plan GB-2 im Anhang A)

möglichkeiten. Eine derartige Serienschaltung der Absorberleitungen wurde beispielsweise bei der geothermischen Versuchsanlage im Fasanenhof-tunnel der U-Bahnlinie U6 in Stuttgart realisiert (siehe Bild 44). Die montierten Absorberleitungen wurden in zwei Teilkreisläufe aufgeteilt und so verlegt, dass nur einzelne Hochpunkte vorhanden sind. Dadurch konnte das System hydraulisch optimiert und eine bessere Entlüftungsmöglichkeit geschaffen werden [18].

Die Anwendung des Energievlieses ist primär für einen zweischaligen Ausbau entwickelt worden, bei dem die wasserabdichtende Ebene auf der Innenseite des Energievlieses eingebaut wird. Bei dieser wasserabdichtenden Ebene kann es sich um eine Innenschale als WUB-KO (wasserundurchlässige Betonkonstruktion) oder eine Abdichtungsfolie handeln. Wie bereits erwähnt, ist zu empfehlen, dass die Anbindeleitungen zu den Energievliesbahnen ebenfalls außerhalb der Abdichtungsebene im Bereich der Sohle geführt werden und nur an möglichst wenigen Stellen (jeweils bei den Erdwärmeverteiltern) eine Durchführung durch die Abdichtungsebene hergestellt wird.

Bei einem einschaligen Ausbau können die Absorberleitungen direkt an der Bewehrung befestigt und damit im Gewölbe eingebaut werden. Bei unbewehrtem Gewölbe müsste eine Hilfskonstruktion ausgeführt werden, um Absorberleitungen im Gewölbebeton einbauen zu können.

5.5.4 Anbindeleitungen

Bei einem zweischaligen Ausbau befinden sich die Absorberleitungen in der Sohle bzw. im Gewölbe zwischen Außen- und Innenschale, weshalb an gewissen Stellen Anbindeleitungen durch die Innenschale (WUB-KO) geführt werden müssen. Diese Leitungen können mit wasserdichten Durchführungen durch die Innenschale in den Innenraum des Tunnels geführt werden. Die Lage dieser Durchführungsstellen ist vom gesamten Anlagenkonzept abhängig. Grundsätzlich stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- für die Absorberleitungen in der Sohle:
 - Durchführung bei den Nischen und Verbindung mittels Sammelleitungen im Tunnelinneren → nicht zu empfehlen, da Leitungen im Tunnelinneren geführt werden müssten (Platzbedarf, Brandschutz etc.),

- Durchführung z. B. bei Querschlägen → zu empfehlen, da Durchführung durch die Innenschale außerhalb der Tunnelröhre erfolgen kann (für das Beispielprojekt im Kapitel 5.5.6 gewählt),

- für die Absorberleitungen im Gewölbe:
 - Durchführung in jedem Block und Verbindung mittels Sammelleitungen im Tunnelinneren → nicht zu empfehlen, da Leitungen im Tunnelinneren geführt werden müssten (Platzbedarf, Brandschutz etc.),
 - Durchführung bei den Nischen und Verbindung mittels Sammelleitungen im Tunnelinneren → nicht zu empfehlen, da Leitungen im Tunnelinneren geführt werden müssten (Platzbedarf, Brandschutz etc.),
 - Verbindung mit den Absorberrohren in der Sohle → zu empfehlen, da keine Durchführung durch die Innenschale notwendig ist (für das Beispielprojekt im Kapitel 5.5.6 gewählt).

5.5.5 Ausstattungsvarianten

Folgende Ausstattungsvarianten bieten sich prinzipiell an:

- Variante 1 (Maximalausstattung)

Es erfolgt eine Absorberbelegung von Gewölbe und Sohle, die Verteiler werden in Nischen und Querschlägen angeordnet. Die Sammelleitungen (Verbindung der einzelnen Verteiler) werden von den Unterverteilern zu einem zentralen Verteiler verlegt, wo sie in die vertikalen Steigleitungen zu den Endverbrauchern münden (siehe Bild 46).

Nachteilig bei dieser Variante ist die erhöhte Pumpenleistung aufgrund des Leitungskonzeptes. Vom zentralen Verteiler muss zunächst zu den Unterverteilern gepumpt werden und „wieder zurück“ zu den einzelnen Absorberkreisen.

- Variante 2 (Teilausstattung)

Die Variante 2 leitet sich aus Variante 1 ab, es werden jedoch nur jene Tunnelbereiche mit Absorbern ausgestattet, die beidseits (ca. 150 m) vom zentralen Verteiler mit einer Absorberkreislänge erfassbar sind. Gegenüber der Variante 1 reduziert sich damit die erzielbare Gesamtleistung, es erübrigen sich dadurch aber die Unterverteiler in den Nischen, wodurch Durchführungen in Nischen sowie im Tunnel-

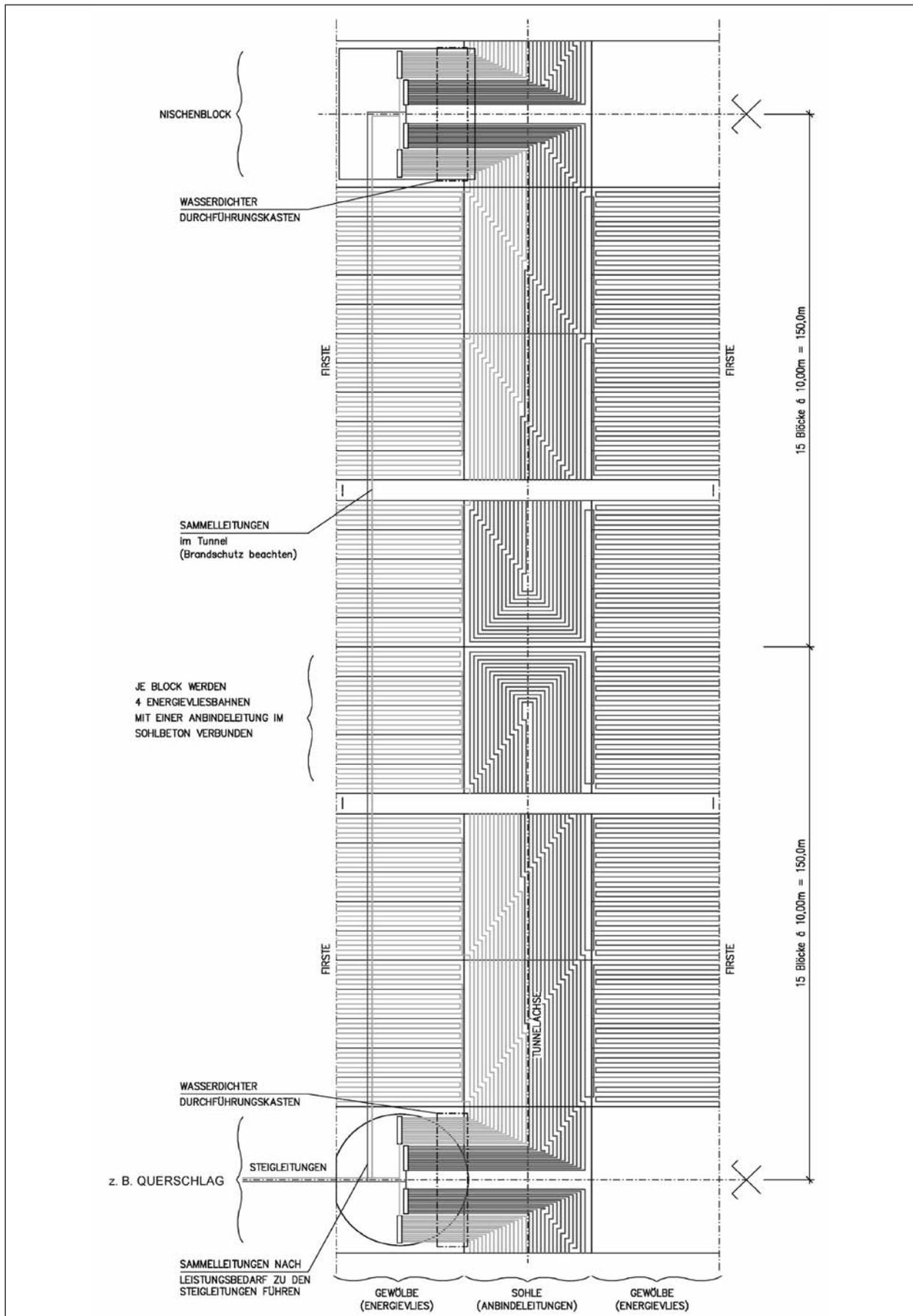


Bild 46: Prinzipschema für die Variante 1 (Abwicklung an der Tunnelrinne aufgeschnitten)

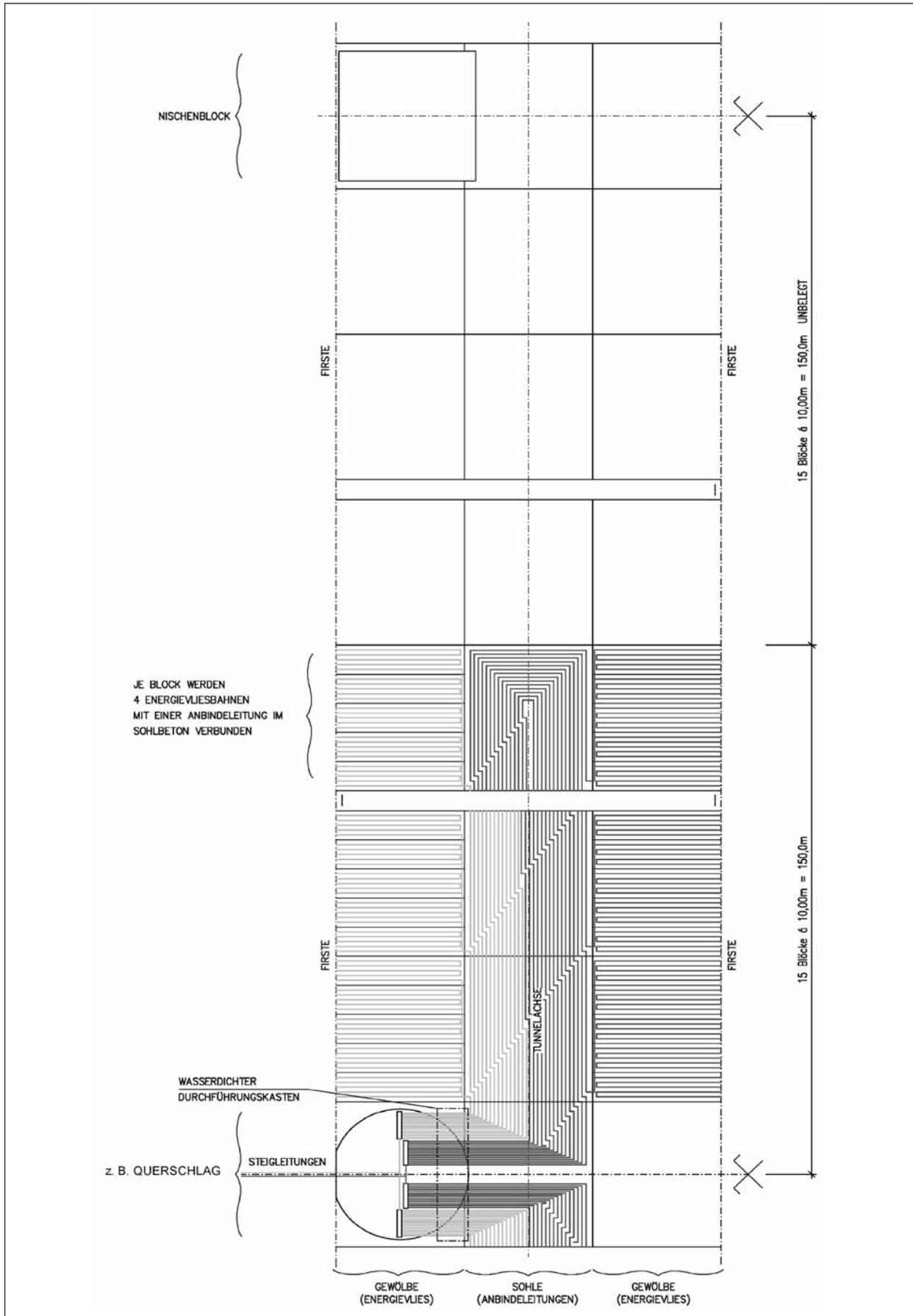


Bild 47: Prinzipschema für die Variante 2 (Abwicklung an der Tunnelfirste aufgeschnitten)

inneren verlegte Sammelleitungen vermieden werden können.

Alternativ zur Variante 2 besteht natürlich auch die Möglichkeit, dass nur ein Teilbereich des Tunnels (z. B. im Bereich eines einzigen Querschlages) ausgerüstet wird, wodurch sich die Kosten erheblich verringern. Diese Alternative ist vor allem dann sinnvoll, wenn ein konkreter Abnehmer im Bereich eines Querschlages vorliegt (siehe Bild 47).

Die Entscheidungsfindung zwischen den einzelnen Varianten ergibt sich zunächst aus dem erforderlichen Energiebedarf und der daraus resultierenden erforderlichen Absorberfläche. Neben diesem energetischen Gesichtspunkt dürfen aber konstruktive Details nicht außer Acht gelassen werden. Beispielsweise ist zu hinterfragen, ob – wie bei der Variante 1 – eine Führung der Sammelleitungen im Tunnelinneren aus Brandschutzgründen und/oder aus Platzgründen möglich ist. Dies kann ein limitierender Faktor sein, sodass beispielsweise nur die Ausstattung eines Tunnel-Teilbereiches gemäß Variante 2 möglich ist.

5.5.6 Beispielprojekt

Allgemeines

Mit Hilfe eines Beispielprojektes soll gezeigt werden, wie eine Erdwärmeanlage bei einem in geschlossener Bauweise errichteten Tunnelbauwerk realisiert werden könnte. Querschnitt, Geometrie, Lage, Abmessungen etc. sind dabei frei gewählt.

Der Anhang A enthält dazu die folgenden Planunterlagen, auf die nachfolgend Bezug genommen wird:

- GB-1: Übersicht Erdwärmenutzung im Grundriss,
- GB-2: Regelquerschnitt Erdwärmeabsorber,
- GB-3: Regelquerschnitt Nische,
- GB-4: schematische Leitungsführung Erdwärme,
- GB-5: Leitungsführung Querschlag – Grundriss,
- GB-6: Leitungsführung Querschlag – Schnitt,
- GB-7: Übergang Tunnelröhre – Querschlag,
- GB-8: Schnitt Querschlag,
- GB-9: Verteiler, wasserdichte Durchführung – Grundriss, Schnitt 1-1,

- GB-10: Verteiler, wasserdichte Durchführung – Schnitt 2-2.

Beschreibung der Erdwärmeanlage

Beim gewählten Beispielprojekt handelt es sich um einen Tunnelquerschnitt mit einem Ausbruchsdurchmesser von rund 13 m, der in geschlossener Bauweise errichtet wird und aus einer Spritzbetonaußenschale sowie einer Innenschale mit geschlossener Sohle besteht. Die Tunnelthermie-Anlage soll dabei im Bereich eines Querschlages situiert werden, in dem der Erdwärmeverteiler situiert wird. Vom Erdwärmeverteiler verlaufen die Sammelleitungen bis an die Geländeoberkante, wofür separate Vertikalbohrungen vorgesehen werden.

Der Plan GB-1 (siehe Anhang A) zeigt die Tunnelröhre im Grundriss, wobei sich der Bereich der Erdwärmenutzung auf eine Länge von rund 300 m (150 m beidseits des Querschlages) erstreckt.

Es werden Absorberleitungen zwischen Innen- und Außenschale im Gewölbe eingebaut. Dabei kann entweder ein Energiefvlies eingesetzt werden, wobei das zu verwendende Vlies auch die Funktion einer Gleitfolie zu übernehmen hat, oder es werden die Absorberleitungen mit geeigneten Montagebehelfen direkt an der Spritzbetonschale befestigt. In diesem Fall wird die Gleitfolie in einem getrennten Arbeitsgang montiert.

Der Plan GB-2 (siehe Anhang A) zeigt dazu den Regelquerschnitt und einen Regel-Längenschnitt. Bei einer Regelblocklänge von 10 m können insgesamt 4 Energiefvliesbahnen (oder eine direkte Verlegung) im Gewölbe installiert werden. Die Absorberleitungen haben einen Durchmesser DN 25. Die einzelnen Energiefvliesbahnen sind schließlich über Sammelleitungen DN 32 miteinander verbunden.

Die erwähnten Sammelleitungen werden in jedem Block zur Tunnelsohle geführt. Diese so genannten Anbindeleitungen sind einmal auf der rechten (Vorlaufleitung) und einmal auf der linken (Rücklaufleitung) Tunnelseite einzuschrämen und anschließend wieder mit Beton zu verfüllen. Jeder Innenschalenblock bildet dadurch eine Einheit bzw. einen Kreis.

Auf der Tunnelsohle verlaufen schließlich die Anbindeleitungen in Tunnelängsrichtung bis zum Querschlag. Wie dem Regelquerschnitt (Plan GB-2) zu entnehmen ist, ist beim gewählten Querschnitt Platz für 30 Anbindeleitungen (15 x Vorlauf-

leitungen und 15 x Rücklaufleitungen) vorgesehen, wodurch auch der Tunnelsohlbereich thermisch aktiviert wird.

Im Bereich von Nischen erfolgt die Belegung des Gewölbes und der Sohle in gleicher Weise wie beim Regelquerschnitt, wobei zu empfehlen ist, dass die Nische selbst unbelegt bleibt und Absorberleitungen nur im übrigen Gewölbebereich situiert werden. Dies illustriert Plan GB-3 (siehe Anhang A).

Die Absorberleitungen in der Sohle werden, wie bereits erwähnt, bis zum Querschlag verlegt, wo schließlich die Weiterführung bis zum Erdwärmeverteiler erfolgt. Der Plan GB-4 (siehe Anhang A) zeigt schematisch die Leitungsführung in Tunnel-längsrichtung. Die Belegung der Tunnelröhre erfolgt beidseits des Querschlags auf einer Länge von jeweils 150 m (15 Blöcke). Sämtliche Anbindeleitungen (30 Stück je Seite) werden letztendlich beim Querschlag aus der Tunnelröhre herausgeführt.

Durch diese Belegung (entspricht der Variante 2 gemäß Kapitel 5.5.5) kann die Absorberbelegung im Gewölbe blockweise mit der Herstellung des jeweiligen Innenschalenblocks erfolgen und die Absorberleitungen in der Sohle unmittelbar vor Herstellung des Sohlbetons eingebaut werden.

Die Pläne GB-5 und GB-6 (siehe Anhang A) zeigen die Leitungsführung der Erdwärmeanlage im Querschlag sowie die beiden Vertikalbohrungen im Überblick. Die Anbindeleitungen werden zunächst noch in der Sohle des Querschlags bis zum Standort des Erdwärmeverters (Nische im Querschlag) weitergeführt. An dieser Stelle werden sämtliche Leitungen durch den Innenschalenbeton hindurchgeführt und an den Erdwärmeverteiler angeschlossen. Von diesem Erdwärmeverteiler werden schließlich Sammelleitungen (ca. DN 150) über zwei Vertikalbohrungen nach oben bis zur Geländeoberfläche geführt, von wo die Anbindung an den Verbraucher erfolgen kann.

Plan GB-7 (siehe Anhang A) zeigt den Übergang der Absorberleitungen in der Sohle von der Tunnelröhre zum Querschlag im Detail.

Im Plan GB-8 (siehe Anhang A) ist der Querschlag im Querschnitt dargestellt. Die Absorberleitungen verlaufen im Sohlbereich des Querschlages. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse müssen die Absorberleitungen unmittelbar nebeneinander und

übereinander angeordnet werden. Da es sich dabei nur um kurze Distanzen handelt, kann die gegenseitige thermische Beeinflussung vernachlässigt werden.

In den Plänen GB-9 und GB-10 (siehe Anhang A) sind die wasserdichte Durchführung der Absorberleitungen durch die Bodenplatte sowie der Erdwärmeverteiler dargestellt. Unmittelbar vor dem Verteilerstandort werden die einzelnen Absorberleitungen so verschwenkt, dass alle Vorlauf- und alle Rücklaufleitungen getrennt voneinander hochgeführt werden. Die druckwasserdichte Durchführung besteht im Prinzip aus einem Lochblech mit Schaumkörper, wobei Letzterer während des Betoniervorganges als Platzhalter fungiert und im Anschluss daran ausinjiziert wird (z. B. System Rascor). Es werden alle Leitungen sowie alle aufgehenden Stützprofile des Durchführungskastens durch einen Schaumkörper geführt, der mit Injektionsleitungen an der Bodenplattenoberkante verbunden wird. Dieser Schaumkörper wird in die Bodenplatte einbetoniert und nach Aushärtung dieser mit einem dauerelastischen Harz verpresst. Dabei wird ein Druck von etwa 3,0 bar nicht überschritten, um eine Beschädigung der Absorberleitungen zu vermeiden, jedoch genügend Innendruck gegenüber eindringendem Grundwasser gegeben ist. Für hoch beanspruchte Durchführungen wird dieses System in zwei Ebenen ausgeführt.

Vom Erdwärmeverteiler werden schließlich Sammelleitungen verlegt, über die der Anschluss an den Verbraucher erfolgt.

Bauablauf

Der Bauablauf ist stark vom Vortriebs- und Betonierkonzept abhängig. Insofern ist die Abfolge der angeführten Tätigkeiten variabel. Grundsätzlich kann allerdings von folgendem Bauablauf ausgegangen werden:

- Verlegen von Absorberleitungen auf der Spritzbetonsohle,
- Einschrämmen von Schlitzten in die Spritzbetonschale von der Sohle bis über die Arbeitsfuge zwischen Sohlgewölbebeton und Gewölbebeton,
- Verlegen von Anbindeleitungen in den Schlitzten,
- Schützen der Absorberleitungen in der Sohle durch die Ausgleichsbetonschicht,

- Verlegen von Absorberleitungen auf der Spritzbetonschale im Gewölbe. Die Montage der Absorberleitungen des Gewölbes erfolgt entweder
 - als Energiefvlies, wobei das Energiefvlies gleichzeitig die Funktion der Gleitfolie übernimmt, oder
 - mittels Montagebehelfe direkt an der Spritzbetonschale, wobei zusätzlich eine Gleitfolie anzubringen ist,
- blockweises Herstellen der Innenschale,
- gebündelte Ausleitung der Anbindeleitungen in Richtung Querschlag. Die Verlegung im Querschlag erfolgt auf der Spritzbetonsohle. Die Leitungen werden mittels Ausgleichsbetonschicht geschützt,
- Einbau eines druckwasserdichten Durchführungssystems durch die Innenschale. Einbau der Verteiler,
- Spülen, Befüllen und Entlüften der Erdwärmanlage.



Bild 48: Tunnel in offener Bauweise mit Ausleitung der Absorberleitungen im Kopfbereich. Die Absorberleitungen werden seitlich des Deckels bis zum Erdwärmeverteiler geführt

5.6 Erdwärmanlage bei offener Tunnelbauweise (in Deckelbauweise)

5.6.1 Allgemeines

Bei Tunnelbauwerken, die mittels Deckelbauweise errichtet werden, gilt der gleiche Grundgedanke wie bei Tunnelbauwerken in geschlossener Bauweise, dass zur Erdwärmenutzung die Tunnelröhre selbst als Erdwärmeabsorber dient und die Verbindung mit dem Verbraucher – der zumeist an der Geländeoberfläche liegen wird – über vertikale Schächte (z. B. Notausstiege, Lüftungsschächte) erfolgt.

Die Absorberleitungen müssen dabei ebenfalls aus den Absorberbauteilen herausgeführt, zu Sammelleitungen zusammengefasst und an einen Verteiler angeschlossen werden. Danach kann eine Leitung größeren Durchmessers zur Wärmepumpe geführt werden, die sich in der Nähe des Verbrauchers befinden sollte.

Als Erdwärmeabsorber können je nach Bauwerk Pfähle, Schlitzwände und Bodenplatten herangezogen werden, die im Sinne von Synergieeffekten nicht nur konstruktiv, sondern auch thermisch genutzt werden.

Bei der Belegung der Pfähle und Schlitzwände ist zu überlegen, ob die Absorberleitungen im Kopfbereich oder im Bereich der Bodenplatte herausgeführt werden. Dies ergibt sich üblicherweise in Abhängigkeit des Bauwerkes und der Lage des Erdwärmeverteilers sowie der Lage des Nutzers.

Erfolgt die Ausleitung der Absorberleitungen im Bereich des Pfahlkopfes bzw. des Schlitzwandkopfes, so können sämtliche Absorberleitungen z. B. seitlich des Deckels entlang des Tunnelbauwerkes bis zum Erdwärmeverteiler geführt werden (siehe Bild 48).

Erfolgt die Ausleitung der Absorberleitungen im Bereich der Bodenplatte, so können die Leitungen unterhalb dieser verlegt werden und dann an einer zentralen Stelle in das Tunnelbauwerk eingeleitet werden. Dies hat den Vorteil, dass auch die Bodenplatte thermisch aktiviert wird, der Erdwärmeverteiler sollte dann allerdings im Tunnelbauwerk – am besten unmittelbar oberhalb der Bodenplatte – situiert sein (siehe Bild 49).

Sämtliche Absorberleitungen sollten möglichst gemeinsam an einer oder einigen wenigen Stellen in das Bauwerk einmünden, damit teure und arbeitsintensive wasserdichte Durchführungen minimiert werden.



Bild 49: Tunnel in offener Bauweise mit Ausleitung der Absorberleitungen im Bodenplattenbereich. Die Absorberleitungen werden unterhalb der Bodenplatte verlegt und an einer zentralen Stelle durch die Bodenplatte ins Tunnelinnere geführt

Von den einzelnen Verteilern erfolgt dann die Verbindung mit dem Nutzer mittels Sammelleitungen.

Das gesamte Rohrsystem sollte in der Bauphase unter Überdruck gehalten und laufenden Druckproben unterzogen werden. Dadurch können Undichtigkeiten rechtzeitig erkannt und repariert werden.

5.6.2 Absorberleitungen bei Pfählen und Schlitzwänden

Üblicherweise werden PE-HD-Rohrleitungen in der Dimension DN 25 x 2,3 mm, PN 10 gemäß DIN 8074 und DIN 8075 an den Bewehrungskörben der Pfähle bzw. Schlitzwände mit geeigneten Befestigungshilfen (Einschnürungen der Leitungen müssen vermieden werden) dauerhaft fixiert.

Die Bewehrungskörbe können bei Pfählen am gesamten Umfang bzw. bei Schlitzwänden auf der Erd- und Luftseite mit Absorberrohren belegt werden. Dabei ist auf Folgendes zu achten:

- Auf der Luftseite der Pfähle bzw. Schlitzwände wird die Oberflächentemperatur maßgeblich von der Tunnelinnenluft beeinflusst. Somit sollte im Zuge der Planung überprüft werden, ob eine Belegung auf der Luftseite energetisch sinnvoll ist. Sollte sich die Tunnelinnenlufttemperatur ungünstig auswirken, so kann auch nur auf der Erdseite eine Belegung stattfinden.

- Im Zuge des Baufortschrittes sind oftmals diverse Öffnungen in den Pfählen bzw. Schlitzwänden notwendig, beispielsweise Bohrungen für Hilfskonstruktionen, Bohrungen für Verdübelungen oder größere Öffnungen zur kraftschlüssigen Verbindung mit konstruktiven Bauteilen (z. B. Auflagerung der Bodenplatte oder von Deckenkonstruktionen). Bei der Herstellung derartiger Öffnungen besteht immer die Gefahr der Beschädigung von Absorberleitungen. Aus diesem Grund kann es zweckdienlich sein, dass ebenfalls nur auf der Erdseite Absorberleitungen situiert werden oder Öffnungen nur in nicht belegten Pfählen bzw. Schlitzwänden hergestellt werden. (z. B. Absorberbelegung nur bei jedem 3. Pfahl einer Pfahlreihe, wobei in den dazwischen liegenden Pfählen problemlos Öffnungen hergestellt werden können).

Bei der Belegung von Schlitzwänden kann es für die Verbindungen der Leitungsnetze bzw. für die Ausbildung der Anschlussstellen erforderlich sein, zusätzliche Betonstähle als Schutz für die Absorberleitungen am Bewehrungskorb zu befestigen. Damit können Beschädigungen der Absorberleitungen beim Betonieren mit Kontraktorrohr vermieden werden. Bei Schlitzwandkörben sollte die mittlere Kammer soweit möglich nicht mit Absorberleitungen belegt werden, damit wiederum beim Betonieren Beschädigungen durch das Kontraktorrohr vermieden werden.

Die Montage der Absorberleitungen kann entweder im Werk des Korbherstellers oder auf der Baustelle erfolgen. Im Falle der Belegung auf der Baustelle ist die Koordination im zeitlichen (Abstimmung mit den anderen Baumaßnahmen), räumlichen (erforderlicher Platz für die Montage) und maschinellen Sinn (Kran zum Wenden des Bewehrungskorbes) von großer Bedeutung.

Nach erfolgter Montage der Absorberleitungen am Bewehrungskorb sollten die Absorberkreise hinsichtlich ihrer Druckdichtheit überprüft werden. Dazu können an einem Kreisende eine Absperreinrichtung und am anderen Kreisende ein Manometer angeschlossen werden. Mittels Prüfdrucks von mindestens 8 bar, der über den Zeitraum von einer Stunde im Absorberkreislauf ohne Druckabfall gehalten werden sollte, kann die Dichtigkeit kontrolliert werden. Im Falle eines Druckabfalls kann die schadhafte Stelle im Absorberkreis aufgefunden und unverzüglich repariert werden. Die Druckprüfung sollte in regelmäßigen Abständen wiederholt



Bild 50: Ausleitung der Absorberleitungen im Kopfbereich der Bohrpfähle. Die Absorberleitungen werden in der Bau-phase durch entsprechende Schutzrohre geschützt

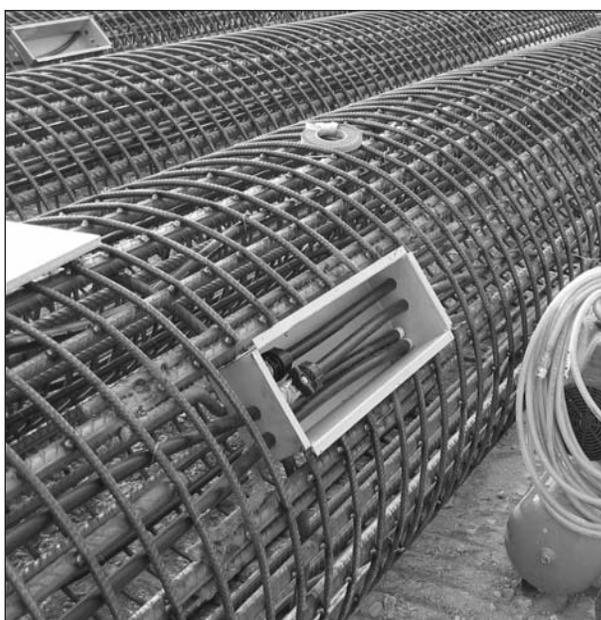


Bild 51: Ausleitung der Absorberleitungen im Bodenplattenbereich bei Bohrpfählen. Die Absorberleitungen werden durch einen Schutzkasten geschützt

werden, weshalb im Absorberkreis ein ständiger Druck von mindestens 2 bar aufrechterhalten werden sollte.

Nach Montage und Druckprüfung können die Arbeiten zur Herstellung der Anschlussstelle fertig gestellt werden. Die Anschlussstelle ist jener Bereich, von dem in weiterer Folge alle Absorberkreise (üblicherweise 1 bis 2 Leitungskreise je Bewehrungskorb) des Pfahles bzw. Schlitzwandelements ausgeleitet werden (im Kopfbereich oder im Bereich der Bodenplatte).

Damit die Leitungen beim Absenken des Bewehrungskorbes nicht verrutschen oder beschädigt

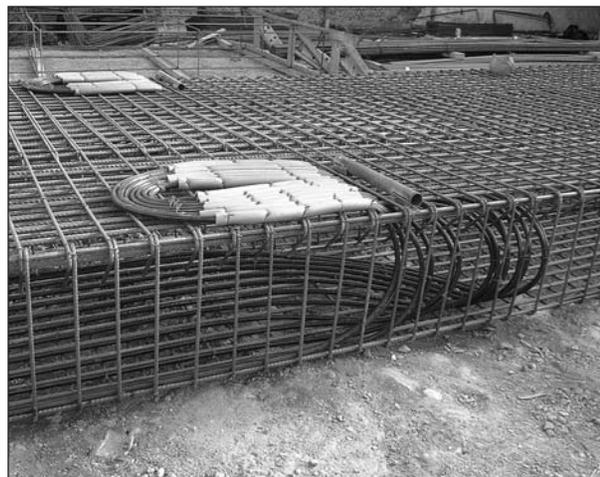


Bild 52: Ausleitung der Absorberleitungen im Bodenplattenbereich bei Schlitzwänden. Die Absorberleitungen werden durch eine Ummantelung geschützt. Weiters ist ein Eisen-Schutzrohr unterhalb der Anschlussstelle befestigt, mit dem die – an der Außenseite der Schlitzwand befestigten Absorberleitungen – beim Einbau des Bewehrungskorbes geschützt werden

werden, ist darauf zu achten, dass alle Leitungen geschützt und dauerhaft lagerichtig positioniert sind. Um die Leitungskreise eindeutig identifizieren zu können, sollten zudem die Leitungsenden bei der Anschlussstelle dauerhaft gekennzeichnet werden.

Befindet sich die Anschlussstelle im Kopfbereich, kann ein Schutzrohr verwendet werden, das über den Pfahlbeton hinausragt (Bild 50). Liegt die Anschlussstelle im Bereich der Bodenplatte, ist die spätere Auffindbarkeit der Anschlussstelle (nach den Aushubarbeiten) sicherzustellen. Dies kann beispielsweise durch eine geringere Betonüberdeckung oder mithilfe eines Leitungssuchgerätes (Einbau von Kupferteilen oder Ähnlichem) erfolgen.

5.6.3 Einbau Bewehrungskorb

Entsprechend der Empfindlichkeit der PE-HD-Absorberrohre hinsichtlich spitzer Gegenstände, hoher Temperaturen etc. sollte die Handhabung des mit den Absorberleitungen bestückten Bewehrungskorbes insbesondere beim Anheben und Absenken mit Umsicht erfolgen.

Bei zweiteiligen Bewehrungskörben sind die Anbindeleitungen des unteren und die Leitungsenden des oberen Bewehrungskorbes zu stoßen. Dies erfolgt üblicherweise mittels Elektroschweißmuffen, wobei der dafür erforderliche zeitliche Mehraufwand zu berücksichtigen ist.

Beim Betonieren im Kontraktorverfahren muss auf die Absorberbelegung der Bewehrungskörbe Rücksicht genommen werden. Insbesondere im Bereich der Anschlussstelle sollte darauf geachtet werden, dass Leitungen weder losgerissen noch beschädigt werden.

5.6.4 Aushub Baugrube

Es ist zu empfehlen, dass für die mit Absorberleitungen bestückten Bohrpfähle (Energiepfähle) und Schlitzwände (Energieschlitzwände) Bohr- und Schrämarbeiten mit einer Eindringtiefe bis zu den Absorberleitungen nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Auftraggebers ausgeführt werden.

5.6.5 Freilegen der Anschlussstellen bei Situierung im Kopfbereich

Die Freilegung der Absorberleitungen kann unmittelbar nach Fertigstellung der Pfähle bzw. Schlitzwände erfolgen. Dies wird meist gleichzeitig mit dem Säubern der Anschlussbewehrung im Kopfbereich durchgeführt.

Zu diesem Zeitpunkt sollte die Dichtigkeit der Absorberkreise erneut kontrolliert werden (vgl. Kapitel 5.6.2).

Anschließend können die Absorberleitungen mittels Elektroschweißmuffen verlängert und aus dem Kopfbereich herausgeführt werden.



Bild 53: Ausleitung der Absorberleitungen im Kopfbereich eines Energiepfahls. Verbindung der Absorberleitungen mittels Elektroschweißmuffen

In weiterer Folge kann schließlich der Tunneldeckel hergestellt werden.

5.6.6 Freilegen der Anschlussstellen bei Situierung im Bodenplattenbereich

Sofern die Anschlussstellen im Bereich der Bodenplatte situiert sind, können diese nach Fertigstellung der Aushubarbeiten lokalisiert und vorsichtig freigelegt werden.

Anschließend können die Absorberleitungen aus den Pfählen bzw. Schlitzwänden herausgeführt werden, wobei das Ausschneiden von Bewehrungseisen zur besseren Zugänglichkeit nur im Ausnahmefall und nur mit Zustimmung des Statikers erfolgen sollte. Je nach Genauigkeit der Lage



Bild 54: Ausleitung der Absorberleitungen im Bodenplattenbereich einer Energieschlitzwand. Oben: Freilegen der Anschlussstelle. Unten: Verbindung der Absorberleitungen mittels Elektroschweißmuffen

der Anschlussstelle kann ein lokaler Mehraushub erforderlich werden. Zu diesem Zeitpunkt sollte die Dichtigkeit der Absorberkreise erneut kontrolliert werden (vgl. Kapitel 5.6.2).

Im Anschluss kann der Beton für die Sauberkeitsschicht der Bodenplatte eingebracht werden.

5.6.7 Absorberleitungen Bodenplatte

Auf die Sauberkeitsschicht der Bodenplatte werden Montagebehelfe, üblicherweise Stahlmatten oder Kunststoffschienen, verlegt. Auf den Montagebehelfen können schließlich die Absorberleitungen der Bodenplatte (übliche Dimension DN 25 x 2,3 mm oder DN 32 x 2,9 mm) fixiert werden.

Von den Anschlussstellen bis zu den Durchführungskästen (und in weiterer Folge bis zu den Verteilern) müssen die Absorberkreise verlängert werden. Dies erfolgt üblicherweise mittels Elektroschweißens von Muffen und Formteilen. Die Anbindeleitungen sollten schließlich ebenfalls auf den Montagebehelfen fixiert werden.

Da die Bodenplatte üblicherweise in mehreren Abschnitten hergestellt wird, sollten die Absorberleitungen der Bodenplatte und die Anbindeleitungen zu den Pfählen und Schlitzwänden abschnittsweise einer Druckprüfung unterzogen werden (vgl. Kapitel 5.6.2). Bis zum Stoßen mit einer weiteren Anbindeleitung sollte wiederum ein Druck von mindestens 2 bar zur ständigen Druckkontrolle aufrechterhalten werden.

Um die Leitungskreise jederzeit eindeutig identifizieren zu können, sollten die Leitungsenden (abschnittsweise) dauerhaft gekennzeichnet werden. Besteht im Fugenbereich der Bodenplatte die Gefahr größerer Differenzsetzungen der Bodenplattenabschnitte, so können die Absorberrohre mit Schaumstoffummantelungen geschützt werden.

Alle Rohrleitungen werden schließlich zu den Durchführungskästen geführt und die wasserdichte Durchführung hergestellt. Die Absorberkreise sollten zu diesem Zeitpunkt erneut einer Druckprüfung (vgl. Kapitel 5.6.2) unterzogen werden und anschließend der Druck wiederum auf mindestens 2 bar gehalten werden.

Nach Verlegung aller Absorber- und Anbindeleitungen ist das Aufbringen einer 10 cm dicken Schutzbetonschicht auf der mit Montagebehelfen und Leitungen belegten Sauberkeitsschicht zu empfeh-

len. Ab diesem Arbeitsschritt sind Reparaturarbeiten an den Absorbern kaum mehr möglich. Daher sind das Niederbringen von Bohrungen durch die Schutzbetonschicht sowie jede andere Tätigkeit, welche die Rohrleitungen beschädigen kann, zu vermeiden. So sollte etwa für die Befestigung der Schalung für die Bodenplatte bereits vorher Sorge getragen werden, wie generell alle Arbeiten und Bauabläufe auf die Absorberleitungen Rücksicht nehmen und entsprechend koordiniert werden sollten. Auch sollten punktuelle Belastungen mit schweren Gegenständen oder das Befahren mit schweren Fahrzeugen, die die Schutzbetonschicht beschädigen können, vermieden werden.

Anschließend kann die druckwasserdichte Durchführung (z. B. System Rascor) hergestellt werden, bei der ein Schaumkörper während des Betoniervorganges als Platzhalter fungiert und im Anschluss daran ausinjiziert wird. Für hoch beanspruchte Durchführungen wird dieses System in zwei Ebenen angewendet.



Bild 55: Beispiel einer wasserdichten Durchführung der Absorberleitungen durch die Bodenplatte nach dem System Rascor. Die Abdichtung erfolgt in zwei Ebenen, die anhand der weißen Schaumkörper (s. Pfeile) erkennbar sind. Die Bodenplatte reicht von der Sohle bis zum grauen Kasten. Darüber ist bereits der Verteilerblock installiert

Sollten sich nach Beendigung einer allenfalls erforderlichen Grundwasserabsenkung Undichtigkeiten im Bereich der Bodenplattendurchführung zeigen, können Nachinjektionen mittels der dafür vorgesehenen Injektionsschläuche durchgeführt werden.

Im Zuge des Innenausbaus erfolgt der Anschluss der Absorberleitungen an den Verteiler. Abschließend ist gegebenenfalls eine Brandschutzabdeckung über den Verteilern anzubringen. Dabei sollte allerdings darauf geachtet werden, dass Kondensat auf den Verteilern entstehen kann und dieses abgeleitet werden sollte.

5.6.8 Befüllen

Nach Fertigstellung des Absorbersystems und Anschluss der Verteiler ist eine abschließende Prüfung der Dichtigkeit aller Absorberkreise mittels Druckluft zu empfehlen. Anschließend kann das gesamte Absorbersystem mit Wasser gespült und entlüftet werden. Um ein Einfrieren der Leitungen in der weiteren Bauphase zu vermeiden, sollte schließlich ein Wasser-Frostschutzgemisch im Absorbersystem belassen werden.

5.6.9 Beispielprojekt

Allgemeines

Mit Hilfe eines Beispielprojektes soll wiederum gezeigt werden, wie eine Erdwärmeanlage bei einem in offener Bauweise errichteten Tunnelbauwerk realisiert werden könnte. Querschnitt, Geometrie, Lage, Abmessungen etc. sind dabei frei gewählt.

Der Anhang B enthält dazu die folgenden Planunterlagen, auf die nachfolgend Bezug genommen wird:

- OB-1: Schlitzwand Belegeschema – einkreisige Körbe,
- OB-2: Schlitzwand Belegeschema – zweikreisige Körbe,
- OB-3: Querschnitt Tunnelbauwerk mit Bauteilaktivierung,
- OB-4: Abwicklung Schlitzwand 2 und 3,
- OB-5: Bohrpfahl Belegeschema – Anschlussstelle unten,
- OB-6: Bohrpfahl Belegeschema – Anschlussstelle oben sowie Arbeitsvorbereitung,

- OB-7: Bodenplatte Belegeschema mit Anbindung an Schlitzwandbelegung,
- OB-8: Bodenplatte Belegeschema, Detail Messlanze, Ausbildung Blockfuge,
- OB-9: Bodenplattendurchführung, Erdwärmeverteiler.

Beschreibung der Erdwärmeanlage

Beim gewählten Beispielprojekt handelt es sich um ein Tunnelbauwerk, das in offener Bauweise mit Schlitzwänden und Bodenplatten errichtet werden soll. Beim Bauwerk soll es sich beispielsweise um einen Knotenpunkt handeln, bei dem neben der Hauptfahrbahn auch eine abgetrennte Nebenfahrbahn errichtet wird.

Als Erdwärmeabsorber dienen die Schlitzwände und die Bodenplatte. Die Anschlussstellen der Absorberleitungen innerhalb der Schlitzwand sind im Bereich der Bodenplatte vorgesehen. Von dort werden die Absorberleitungen unterhalb der Bodenplatte verlegt, sodass diese ebenfalls thermisch aktiviert wird.

Sämtliche Absorberleitungen werden unterhalb der Bodenplatte bis zu einer zentralen Stelle geführt, wo schließlich eine wasserdichte Durchführung durch die Bodenplatte sowie der Erdwärmeverteiler hergestellt werden.

Von diesem Erdwärmeverteiler führen schließlich Sammelleitungen bis zum Nutzer der Erdwärmeanlage.

Die Pläne OB-1 und OB-2 (siehe Anhang B) zeigen die Belegung der Schlitzwandkörbe mit den Absorberleitungen, und zwar für „kleinere“ Schlitzwandkörbe mit nur einem Absorberkreis sowie für „größere“ Schlitzwandkörbe mit zwei Absorberkreisen. Unterhalb des Bodenplattenniveaus erfolgt eine Belegung der Schlitzwandkörbe sowohl auf der Erd- als auch auf der Luftseite, oberhalb des Bodenplattenniveaus nur auf der Erdseite.

Die Anschlussstelle für die Ausleitung der Absorberleitungen, ist im Bereich der Bodenplatte vorgesehen. Dazu werden die Absorberkreise auf die Außenseite des Bewehrungskorbes verschwenkt, damit diese später – beim Freilegen der Anschlussstelle – leichter zugänglich sind. Im Bereich der Anschlussstelle werden die Absorberleitungen mittels einer Schaumstoffumhüllung geschützt. Zusätzlich

ist unterhalb der Anschlussstelle ein Eisen-Schutzrohr befestigt, damit die Anschlussstelle beim Einheben des Bewehrungskorbes in den offenen Schlitz geschützt ist.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass von der Anschlussstelle auch zwei Leitungen bis zum Schlitzwandkopf hochgeführt werden. Bei diesen Leitungen handelt es sich um Prüfleitungen, mit denen eine Druckprüfung des gesamten Kreises bzw. der beiden Kreise unmittelbar vor und auch nach dem Betonieren des Schlitzwandelementes möglich ist, da ja die Anschlussstelle bei eingebautem Bewehrungskorb nicht mehr zugänglich ist.

Die mittlere Korbkammer ist jeweils unbelegt, damit beim Betoniervorgang Beschädigungen durch das Kontraktorrohr vermieden werden. Lediglich im Fußbereich des Schlitzwandkorbes ist eine Verbindungsleitung zwischen den beiden außen liegenden Kammern vorgesehen. Diese Leitung wird auch durch ein separates Eisen-Schutzrohr vor Beschädigungen geschützt.

Des Weiteren ist die so genannte „plangemäß absorberbelegte Fläche“ (vgl. dazu auch Anhang C) dargestellt. Diese dient der Abrechnung der Leistung. Es handelt sich dabei um das Produkt aus der Länge vom Scheitel der obersten Rohrschlaufe bis zum Scheitel der untersten Rohrschlaufe und der Breite des Bewehrungskorbes der Schlitzwand. Die Größe der plangemäß absorberbelegten Fläche ist dabei unabhängig davon, ob die Schlitzwand ein- oder zweiseitig belegt ist.

Im Plan OB-3 (siehe Anhang B) ist der Querschnitt des beispielhaften Tunnelbauwerkes dargestellt. Es handelt sich um einen Tunnel mit Haupt- und Nebenfahrbahn, wobei diese höhenmäßig versetzt und durch eine Mittelmauer voneinander getrennt sind.

Zusätzlich sind für diesen Querschnitt die mit Absorberleitungen bestückten Bauteile im Überblick dargestellt. Die außen liegenden Schlitzwände sowie die Schlitzwand für die Mittelmauer werden unterhalb des Bodenplattenniveaus erd- und luftseitig belegt. Oberhalb des Bodenplattenniveaus erfolgt nur bei den außen liegenden Schlitzwänden eine Belegung auf der Erdseite. Des Weiteren soll auch die Bodenplatte mittels Absorberleitungen thermisch aktiviert werden.

Im Plan OB-4 (siehe Anhang B) ist exemplarisch für die Schlitzwand 2 (Mittelwand) und Schlitzwand 3

(außen liegende Wand) eine Längsabwicklung dargestellt.

Ergänzend zur Belegung von Schlitzwandkörben zeigen die Pläne OB-5 und OB-6 (siehe Anhang B) beispielhaft die Belegung von Bohrpfählen mit Absorberleitungen.

Beim Energiepfahl gemäß Plan OB-5 befindet sich die Anschlussstelle ebenfalls im Bereich der Bodenplatte, wobei diese mittels eines Styroporschuttkörpers hergestellt wird. Eine Belegung mit Absorberleitungen erfolgt nur unterhalb des Bodenplattenniveaus. Zusätzlich sind Schutzrohre für den Einbau von Temperaturmessfühlern dargestellt, die gegebenenfalls zur späteren Anlagensteuerung bzw. -überwachung herangezogen werden können.

Außerdem ist eine Einbautoleranz des Bewehrungskorbes von $\pm 45^\circ$ gefordert, damit die Absorberleitungen „auf der richtigen Pfahlseite“ herausgeführt werden können.

Beim Energiepfahl gemäß Plan OB-6 ist die Anschlussstelle im Kopfbereich situiert. Es handelt sich dabei um einen Pfahl mit zwei getrennten Bewehrungskörben, sodass die Absorberleitungen im Zuge des Einbaues verbunden werden müssen. Der diesbezügliche Arbeitsablauf ist illustrativ dargestellt.

Plan OB-7 (siehe Anhang B) zeigt die Absorberleitungen unterhalb der Bodenplatte im Grundriss. Die belegten Schlitzwandkörbe sind dargestellt und es sind die Anbindeleitungen zu den einzelnen Schlitzwandelementen zu erkennen. Die Absorberleitungen werden schließlich unterhalb der Bodenplatte geführt, sodass diese auch thermisch aktiviert wird. Sämtliche Leitungen werden zu einer zentralen Stelle geführt, bei der eine wasserdichte Bodenplattendurchführung und in weiterer Folge der Erdwärmeverteiler hergestellt werden.

Ergänzend dazu zeigt der Plan OB-8 (siehe Anhang B) ein alternatives Tunnelbauwerk, bei dem Absorberleitungen nur unterhalb der Bodenplatte situiert sind und keine Belegung der Schlitzwände erfolgt. Sämtliche Absorberleitungen werden wiederum zu einer zentralen Stelle geführt, bei der eine wasserdichte Bodenplattendurchführung und in weiterer Folge der Erdwärmeverteiler hergestellt werden.

Im Weiteren ist die Situierung von Grundwasserbrunnen und Grundwasserpegeln dargestellt, die oftmals in der Bauphase zur Grundwasserabsen-

kung erforderlich sind. Diese stellen keine Behinderung für die Absorberbelegung da, da die Absorberleitungen um diese Elemente herumgeführt werden können.

Mittels Temperaturlanzen kann die Temperatur gegebenenfalls unterhalb der Bodenplatte überwacht werden. Der Plan OB-8 enthält dazu eine Detailzeichnung der Messlanzen. An ausgewählten Stellen der Bodenplatte (siehe Grundriss) können die Messlanzen bis zu einer Tiefe von ca. 5 m abgeteuft werden. In das eingerammte verzinkte Stahlrohr (mit einem Rammdorn versehen) wird ein Schutzrohr eingebracht, das am unteren Ende mit einem Endstück verschlossen wird. In das Schutzrohr können beispielsweise 2 Temperaturfühler – einer am oberen und einer am unteren Ende – eingeführt werden. Die Ringräume zwischen Messfühler und Schutzrohr sowie zwischen Schutzrohr und Stahlrohr werden mit einer Zementsuspension verfüllt. Die Schutzrohre und Messkabel werden bis zum Durchführungskasten verlängert. Der Plan OB-8 enthält auch eine Detailzeichnung zur Ausbildung von Blockfugen bei der Herstellung der Bodenplatte.

Der Anschluss dieser Absorberleitungen an den Erdwärmeverteiler ist im Plan OB-9 (siehe Anhang B) zusammen mit der wasserdichten Bodenplattendurchführung dargestellt.

Die druckwasserdichte Durchführung besteht im Prinzip aus einem Lochblech mit Schaumkörper, wobei Letzterer während des Betoniervorganges als Platzhalter fungiert und im Anschluss daran ausinjiziert wird (z. B. System Rascor). Dadurch sind druckwasserdichte Durchführungen realisierbar. Wie bereits beschrieben, werden alle Leitungen sowie alle aufgehenden Stützprofile des Durchführungskastens durch einen Schaumkörper geführt, der mit Injektionsleitungen an der Bodenplattenoberkante verbunden wird. Dieser Schaumkörper wird in die Bodenplatte einbetoniert und nach Aushärtung dieser mit einem dauerelastischen Harz verpresst. Dabei wird ein Druck von etwa 3 bar nicht überschritten, um eine Beschädigung der Absorberleitungen zu vermeiden, jedoch genügend Innendruck gegenüber eindringendem Grundwasser gegeben ist. Für hoch beanspruchte Durchführungen wird dieses System in zwei Ebenen angewendet.

Vom Erdwärmeverteiler werden schließlich Sammelleitungen verlegt, über die der Anschluss an die Verbraucher erfolgt.

5.7 Anwendung bei in Deutschland üblichen Tunnelquerschnitten

5.7.1 Definition üblicher Tunnelbauwerke

Bei den in Deutschland am häufigsten hergestellten Straßentunneln handelt es sich um Mittelgebirgstunnel mit geringen Überlagerungshöhen. Die durchschnittliche Tunnellänge beträgt dabei in etwa 1 km, wobei der Tunnelquerschnitt meist 2-röhrig ausgeführt wird und die einzelnen Röhren über Querschläge miteinander verbunden sind. Auch ein Fluchtstollen ist häufig Bestandteil eines Straßentunnels.

Bei in geschlossener Bauweise hergestellten Tunneln überwiegen Tunnelbauwerke mit offener Sohle und Regenschirmabdichtung (vgl. Bild 56). Eine ge-

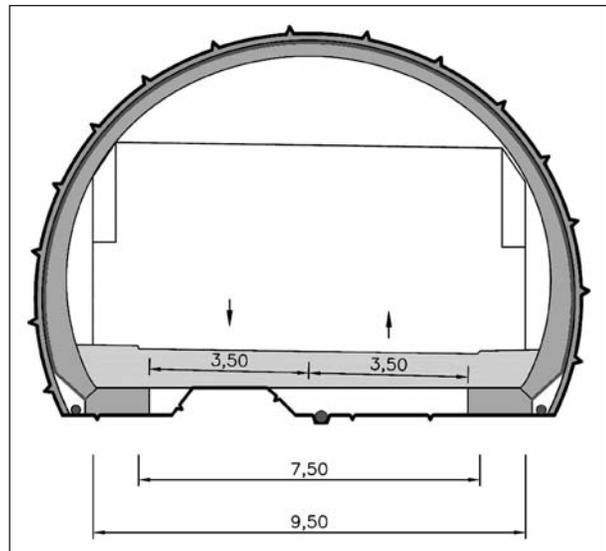


Bild 56: Beispiel eines typischen Regelquerschnittes eines Tunneln in geschlossener Bauweise mit Regenschirmabdichtung

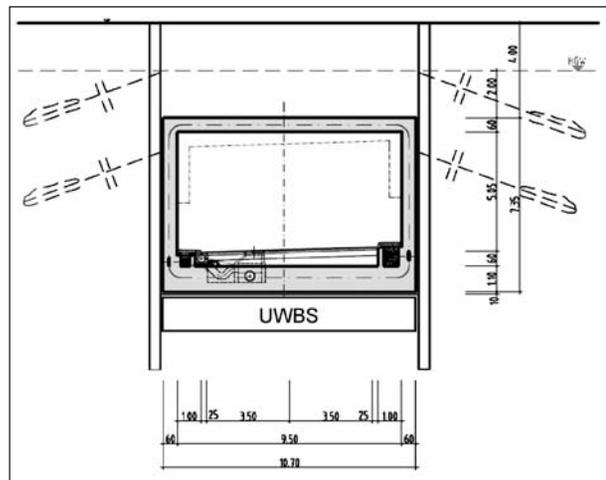


Bild 57: Beispiel eines typischen Regelquerschnittes eines Tunneln in offener Bauweise mit verankerten Baugrubwänden

schlossene Sohle wird üblicherweise in den Portalbereichen sowie bei geologischen Störungszonen vorgesehen.

Bei in offener Bauweise hergestellten Tunneln wird meist eine Baugrube mit verankerten Spundwänden hergestellt. Zusätzlich dazu wird bei hohen Grundwasserständen häufig eine Unterwasserbetonsohle ausgeführt, um auch eine horizontale Baugrubenabdichtung zu erzielen. Innerhalb dieser Baugrubenumschließung wird schließlich das Tunnelbauwerk errichtet und nach dessen Herstellung hinterfüllt und überschüttet (vgl. Bild 57).

5.7.2 Tunnel in geschlossener Bauweise (mit Regenschirmabdichtung)

Bei dem in Bild 56 dargestellten Querschnitt handelt es sich um einen Tunnel, bei dem der Ausbruchquerschnitt mittels Spritzbetons gesichert ist. Als Abdichtungssystem wird eine Regenschirmabdichtung eingesetzt. Dabei wird auf der Spritzbetonaußenschale zunächst ein Vlies als Trenn- und Gleitlage aufgebracht und anschließend eine Kunststoffdichtungsbahn als Dichtebene verwendet. Die Bergwässer werden dadurch

bis zur Tunnelsohle abgeleitet und mittels Ulmen- drainagen, die auf beiden Seiten angeordnet sind, in Längsrichtung aus dem Tunnel herausgeführt.

Auf der Tunnelinnenseite folgt nach der Kunststoffdichtungsbahn die Innenschale, die im Sohlbereich auf den beiden Widerlagern aufgelagert ist. Die Tunnelsohle bleibt dabei offen, wobei etwa in Tunnelmitte die Rohrleitung(en) für die Fahrbahnentwässerung und Tunnelhauptentwässerung situiert ist (sind).

Bild 58 zeigt nun eine mögliche Situierung von Absorberleitungen bei einem derartigen Tunnelbauwerk. Das Grundprinzip entspricht dabei den Beschreibungen des Kapitels 5.5, demzufolge Absorberleitungen im Gewölbe in Form eines Energievlieses oder direkt an der Außenschale befestigt werden. Die Belegung soll blockweise, z. B. entsprechend der Herstellung der Innenschalenblöcke, erfolgen, wobei sämtliche Absorberleitungen eines Blockes zu jeweils einer Vor- und einer Rücklaufleitung zusammengefasst werden.

Diese Vor- und Rücklaufleitungen verlaufen in weiterer Folge (Anbindeleitungen 1x pro Block) in den

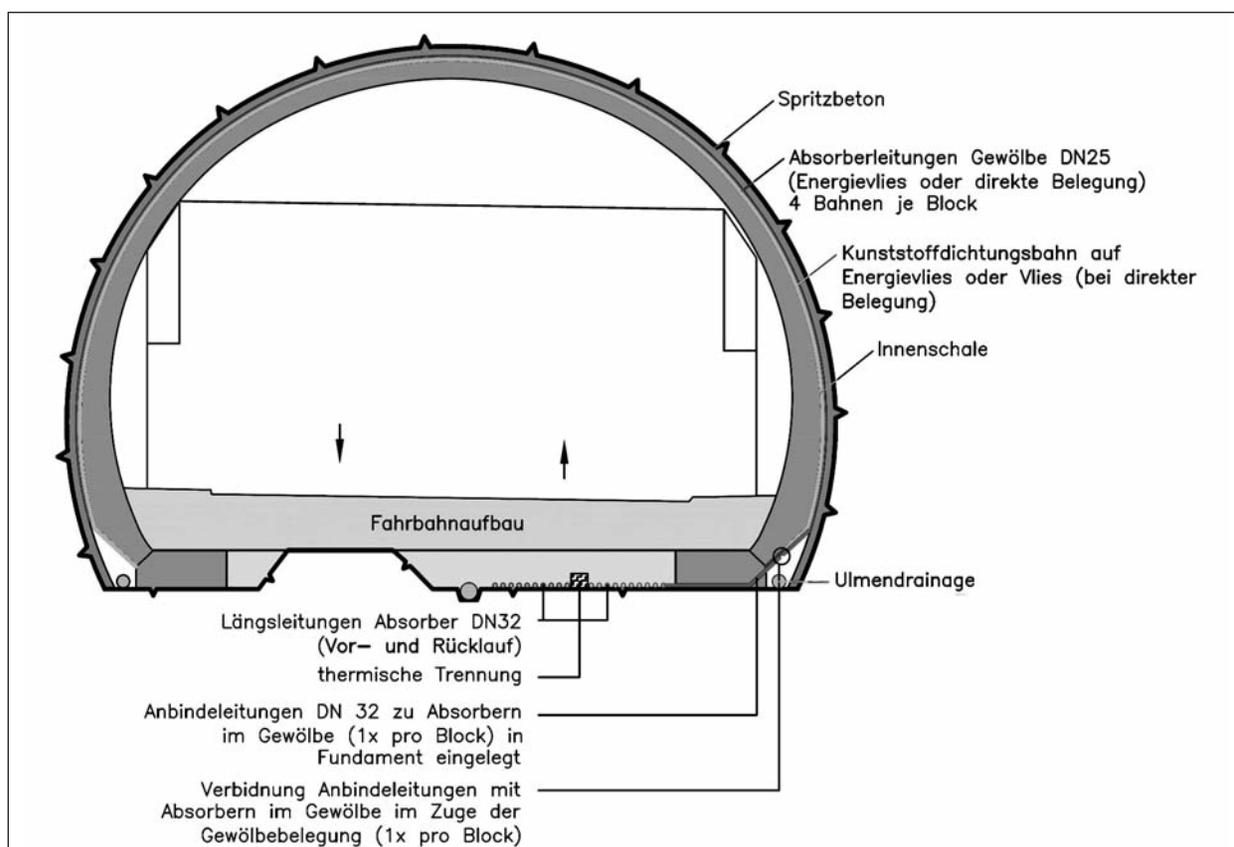


Bild 58: Beispielhafte Situierung von Absorberleitungen in einem Tunnel in geschlossener Bauweise mit Regenschirmabdichtung

Sohlbereich des Tunnels. Im Sohlbereich des Tunnels werden schließlich die Absorberleitungen in Tunnellängsrichtung vom jeweiligen Block bis zum Standort des Verteilers geführt. Sofern die Platzverhältnisse ausreichend sind, können sämtliche Längsleitungen in einem Teilbereich der Sohle situiert werden, wobei es sich empfiehlt, zwischen den Vor- und Rücklaufleitungen eine thermische Trennung (z. B. XPS-Körper) vorzusehen.

Folgende Arbeitsabfolge ergibt sich:

- Ausbruch des Tunnelquerschnittes,
- Herstellung der Spritzbetonsicherung (Außenschale),
- Verlegung der Ulmendrainagen,
- Herstellung der Widerlager: Dabei müssen bei jedem Block jeweils zwei Anbindeleitungen (Vor- und Rücklaufleitung, z. B. DN 32) mit einbetoniert werden,
- Herstellung der Absorberbelegung (z. B. DN 25) im Gewölbe entweder in Form eines Energievlieses oder durch direkte Montage der Absorberleitungen an der Außenschale,
- Verbindung der Anbindeleitungen mit den Absorberleitungen im Gewölbe (1x pro Block),
- Einbau des Vlieses als Trenn- und Gleitlage im Gewölbe, sofern das Energievlies diese Anforderungen nicht bereits erfüllt,
- Einbau der Kunststoffdichtungsbahn im Gewölbe,
- Herstellung der Innenschale,
- Einbau der Tunnelentwässerung in der Sohle,
- Verlegen der Absorber-Längsleitungen (z. B. DN 32) im Sohlbereich des Tunnels zur Verbindung der einzelnen Blöcke mit dem Verteiler. In Abhängigkeit der Qualität des Aushubplanums ist erforderlichenfalls im Vorfeld eine Sauberkeitsschicht herzustellen,
- Herstellung einer Schutzbetonschicht über den Absorberleitungen, um diese vor Beschädigungen im Zuge der weiteren Bauarbeiten zu schützen,
- Verfüllung des Sohlbereiches und Herstellung des Fahrbahnaufbaus.

Die Ausführung der einzelnen Arbeitsschritte erfolgt im Tunnelbau üblicherweise in einem bestimmten Takt. Die zusätzlichen Arbeitsschritte für den Einbau der Absorberleitungen sollten dabei idealerweise vorausseilend im selben Takt erfolgen. Der Einbau der Absorberleitungen im Gewölbe kann dabei am besten mit einem separaten Verlegewagen erfolgen, wie er auch zur Montage der Vlieslage verwendet wird.

5.7.3 Tunnel in offener Bauweise (mit offener Baugrube)

Bild 59 zeigt einen Tunnel in offener Bauweise, bei dem beispielsweise eine Spundwand zur vertikalen Baugrubenumschließung und eine Unterwasserbetonsohle zur horizontalen Abdichtung der Baugrube eingesetzt werden.

Bei diesem System ist eine Situierung der Absorberleitungen zwischen Unterwasserbetonsohle und Bodenplatte des Tunnelbauwerkes möglich. Nach dem Lenzen der Baugrube können die Absorberleitungen wie bei einer Energiebodenplatte (vgl. Kapitel 5.6.7 und Plan OB-8 im Anhang B) verlegt werden.

Auf der Unterwasserbetonsohle (bzw. auf einer Ausgleichsschicht) können Montagebehelfe, üblicherweise Stahlmatten oder Kunststoffschienen, verlegt werden, mit Hilfe derer die Absorberleitungen (z. B. DN 25 oder DN 32) fixiert werden.

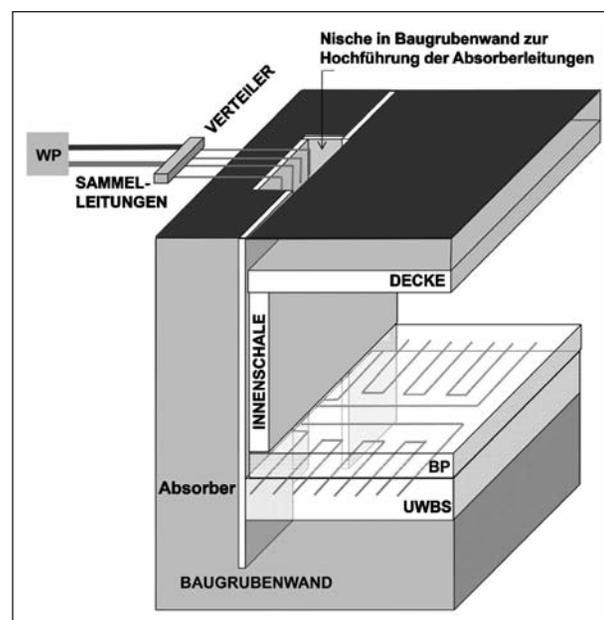


Bild 59: Beispielhafte Situierung von Absorberleitungen in einem Tunnel mit offener Bauweise (z. B. mit Spundwand und Unterwasserbetonsohle als Baugrubenumschließung)

Nach Verlegung aller Absorber- und Anbindeleitungen wird die Herstellung einer 10 cm dicken Schutzbetonschicht empfohlen, um die Absorberleitungen zu schützen. Diese Schutzbetonschicht kann in weiterer Folge als Planum für die Herstellung der Bodenplatte herangezogen werden.

Um eine wasserdichte Durchführung der Absorberleitungen in das Tunnelinnere zu vermeiden, können die entsprechenden Anbindeleitungen außerhalb des Tunnelbauwerkes – z. B. in einer Nische der Baugrubenwand – hochgeführt und an den Verteiler angeschlossen werden. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass im Fall einer Spundwand als Baugrubenwand diese im Nischenbereich nicht gezogen werden sollte, um Beschädigungen an den Leitungen zu vermeiden. Die Nische sollte schließlich mit einem fließfähigen selbstverdichtenden Material verfüllt werden.

Der Verteiler an der Geländeoberfläche wird idealerweise in einem Schacht oder nahe liegenden Bauwerk untergebracht.

Durch die beschriebene Leitungsführung wird eine vollständige Entkoppelung der Erdwärmeanlage vom Tunnelbauwerk erreicht, wodurch sich insbesondere aus vertraglichen und betrieblichen Gründen (z. B. Zugangsberechtigung bei Wartungsarbeiten) Vorteile ergeben.

Alternativ dazu besteht auch die Möglichkeit, dass die Absorberleitungen mittels einer wasserdichten Durchführung (vgl. Plan OB-9 im Anhang B) in den Tunnelinnenraum geführt werden und der Verteiler z. B. im Bereich einer Nische situiert wird.

5.7.4 Schlussbemerkungen

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass bei den in Deutschland üblichen Tunnelbauwerken mit geringen Überlagerungshöhen und einer mittleren Tunnellänge von ca. 1 km die Wirtschaftlichkeit einer Tunnelthermie-Anlage im Vorfeld geprüft werden sollte. Eine Situierung der Tunnelthermie-Anlage in Tunnelmitte ist dabei sicherlich anzustreben, wenngleich der Einfluss aus den Portalbereichen weit in das Tunnelbauwerk reichen wird (vgl. Kapitel 4.3). Insbesondere aufgrund der geringen Tunnellänge ist somit zu erwarten, dass die Tunnellufttemperatur stark von der Außentemperatur abhängt, weshalb bei nahe an der Tunnelluft situierten Absorberelementen nur geringe Entzugsleistungen zu erwarten sind.

6 Bauvertrag

6.1 Ziel

In diesem Kapitel sollen bauvertragliche Lösungen zusammengestellt werden. Diese sollen u. a. folgende Themenbereiche umfassen:

- Einbindung der Ausführung der geothermischen Anlage in das Bauvorhaben,
- Regelung des Beschädigungsrisikos von Leitungen während der Ausführung,
- Berücksichtigung von Behinderungen, Verzögerungen und Erschwernissen infolge der Ausführung der geothermischen Anlage sowie von Messeinrichtungen und Messungen,
- Definition der Schnittstelle zwischen geothermischer Aktivierung und Haustechnik bei der Planung und Ausführung der geothermischen Anlage,
- Möglichkeiten der Abstimmung zwischen dem geothermischen Fachplaner des AG und des AN im Zuge der Ausführungsplanung,
- Bauüberwachung.

6.2 Eingliederung der Erdwärmeanlage in die zu erstellende Ausschreibung

Die Ausschreibung von Erdwärmeanlagen ist noch sehr stark dadurch charakterisiert, dass es in diesem Marktbereich nur wenige kompetente Anbieter für die Bauleistungen gibt. Die zu empfehlende Form der Ausschreibung ist die Überantwortung der Erdwärmearbeiten in den Hauptbauauftrag. Die Erdwärmeanlage wird damit ähnlich ausgeschrieben wie hoch spezialisierte Sondertiefbaumaßnahmen, wie beispielsweise Vereisungen oder Hebungsinjektionen, für die es auch nur wenige befähigte Sonderunternehmungen gibt.

In Bezug auf Patentlösungen wie z. B. das Energievlies oder den Energieanker ist darauf hinzuweisen, dass es dafür nur beschränkte Hersteller gibt und das jeweilige Produkt patentrechtlich geschützt ist. Dies ist bei der Planung und Ausschreibung zu berücksichtigen.

6.3 Regelung des Beschädigungsrisikos von Leitungen während der Ausführung

Ein besonderer Schwerpunkt in der Ausschreibung einer Erdwärmeanlage ist die Regelung des Ausfallrisikos. Auch bei sorgfältigster Ausführung einer Absorberanlage sind Ausfälle von Absorberkreisen nicht auszuschließen. Allerdings liegt es sehr wohl im Kompetenzbereich der ausführenden Firma, derartige Ausfälle durch sorgfältige Arbeit zu minimieren.

Erdwärmeanlagen sind grundsätzlich relativ unempfindlich gegenüber geringen Ausfällen, da bei reduzierten Absorberflächen lediglich die Arbeitstemperatur im Absorbersystem sinkt (bei Heizbetrieb) bzw. steigt (bei Kühlbetrieb) und dadurch der Wirkungsgrad abfällt. Zugleich sind genau dadurch die Zusammenhänge sehr komplex und jeder Mangel am Absorbersystem senkt den Wert der Anlage für den Eigentümer.

Auf Basis der Erfahrungen, die mit der Errichtung von Erdwärmeanlagen in Österreich gemacht worden sind, sind Ausschreibungsbedingungen zu empfehlen, die die Interessen des Auftraggebers optimal schützen, dem Auftragnehmer keine unzumutbaren Belastungen auferlegen und zugleich mit den Werkvertragsnormen kompatibel sind.

Im Wesentlichen kann dabei ein gewisser Ausfall (etwa 3 % der gesamten Absorberlänge als Toleranzbereich) als systemimmanent akzeptiert werden, für höhere Ausfälle hat der Auftragnehmer Ersatz zu schaffen oder er muss eine Entgeltminderung hinnehmen. Dabei hat der Auftragnehmer aber zu garantieren, dass eine gewisse Grenze (etwa 10 % Ausfall) nicht überschritten wird.

Wie auch im Anhang C, Punkt 5 angeführt, kann der Ausfall von Absorberkreisen im Bauvertrag folgendermaßen geregelt werden:

„In der Planung sind entsprechende Sicherheiten vorgesehen, die die Funktionsfähigkeit der Anlage auch bei Ausfall einiger Absorberkreise sicherstellen. Für die Anlage existiert jedoch ein Minimum an funktionsfähigen Absorberkreisen, unter dem die Anlage die erforderliche Heiz- bzw. Kühlleistung nicht mehr ausreichend erfüllen kann. Die Ermittlung des prozentualen Ausfalls der Absorberkreise erfolgt laufend durch den AG. Zu Abrechnungszwecken wird wie folgt vorgegangen:

- Wird bei einer Druckprüfung ein Kreis als ausgefallen erkannt, sind zunächst alle sinnvollen Möglichkeiten zur Reparatur des Kreises auszuschöpfen. Die Kosten der Reparaturversuche gehen zulasten des AN. Ist eine Reparatur nicht möglich, wird die nicht nutzbare Absorberlänge als „ausgefallen“ protokolliert.
- Ausfall im Toleranzbereich: Bleibt die Gesamtlänge der ausgefallenen Absorberkreise unter der Toleranzgrenze von 3 % der Gesamtlänge aller eingebauten Absorberkreise, hat dies keine Auswirkung auf die Abrechnung und auch diese ausgefallenen Absorberkreise werden bezahlt.
- Ausfall über Toleranzbereich: Steigt die Gesamtlänge der ausgefallenen Absorberkreise auf > 3 % der Gesamtlänge aller eingebauten Absorberkreise, so ist zu überprüfen, ob eine Verbesserung des Mangels durch die Belegung von noch freien Bauteilen mit Absorbern möglich ist. Ist dies möglich, werden die Positionen für die ausgefallenen Absorberkreise nicht aber die Positionen der Ersatzflächen vergütet.

Sind jedoch keine geeigneten Flächen vorhanden oder ist deren Belegung mit Absorberleitungen entsprechend dem Bauablauf nicht möglich, so wird gemäß der in der Planung berücksichtigten Sicherheiten bis zu einem Ausfall von 10 % der Absorberkreise eine Minderung des Entgelts geltend gemacht. Das gesamte Entgelt für die Erdwärmeanlage wird um den Teil des Prozentsatzes „ausgefallen“ in der Teil- und/oder Schlussrechnung gekürzt, der die Toleranzgrenze von 3 % überschreitet.

Der AN hat allerdings sicherzustellen, dass der Ausfall von Absorberkreisen 10 % nicht übersteigt.“

Damit etwaige Ausfälle möglichst frühzeitig erkannt werden können, empfiehlt sich die Durchführung von Druck- und Durchgangsprüfungen bei jedem wesentlichen Baufortschritt (z. B. vor dem Betonieren einer Energieschlitzwand, vor dem Betonieren der Sauberkeitsschicht u.s.w.). Des Weiteren sollen sämtliche eingebauten Absorberleitungen ständig unter Druck gehalten werden, damit über ein bzw. mehrere Manometer die Dichtigkeit laufend kontrolliert werden kann.

Im Anhang, Punkt 2 sind diese Druck- und Durchgangsprüfungen beispielsweise folgendermaßen geregelt:

„Zur Sicherstellung der Dichtigkeit bzw. zum Auffinden von Schäden an den Absorberkreisen und zur zeitgerechten Veranlassung von Reparaturarbeiten sind Druckprüfungen mit Luft bzw. Wasser durchzuführen. Dabei ist ein Prüfdruck von 8 bar über einen Zeitraum von einer Stunde zu halten. In weiterer Folge ist, soweit technisch möglich, ein Druck von 2 bar im Absorbersystem aufrechtzuhalten. Im Falle eines Druckabfalls sind jedenfalls Anschluss und Dichtigkeit von Absperrereinrichtung, Manometer bzw. Abschlusskappen zu kontrollieren und bei Verdacht auf eine Leckage der Rohrleitung die fehlerhafte Stelle zu suchen und die Reparatur unverzüglich zu veranlassen. Danach ist die Druckprüfung erneut durchzuführen.“

Insbesondere sind Druck- und Durchgangsprüfungen erforderlich:

- Nach Fertigstellung der Absorbermontage an der Bewehrung: Ein Druck von mindestens 2 bar ist danach aufrechtzuhalten.
- Nach Freilegen des Anschlussbereichs: Ein Druck von mindestens 2 bar ist danach bis zum Stoßen mit der Anbindeleitung aufrechtzuhalten.
- Nach Verlegen der Absorberleitungen unter der Bodenplatte: Ein Druck von mindestens 2 bar ist danach entweder bis zum Stoßen mit einer weiteren Anbindeleitung oder bis zum Anschluss an den Verteiler aufrechtzuhalten.
- Nach der Durchführung durch die Bodenplatte: Ein Druck von mindestens 2 bar ist danach entweder bis zum Stoßen mit einer Anbindeleitung oder bis zum Anschluss an den Verteiler aufrechtzuhalten.
- Nach Anschluss an den Verteiler.
- Nach Befüllen der Erdwärmeanlage mit dem fertig gemischten Wärmeträger (Hauptdruckprüfung): Vor der erstmaligen Inbetriebnahme ist die Dichtheit des erdverlegten Teils des Wärmeträgerkreislaufes mittels Wasserdruckprobe nachzuweisen. Die Druckprüfung ist entsprechend ÖWAV-Regelblatt 207 oder VDI 4640 mit einem Vertreter des AG durchzuführen und das Prüfprotokoll samt Diagramm des Druckverlaufes diesem auszuhändigen.

Wenn erforderlich, hat sich der AN durch zusätzliche Druckprüfungen davon zu überzeugen, dass die Funktionsfähigkeit der Anlage gewährleistet ist.

Über alle Druckprüfungen sind vom AN Protokolle zu verfassen und dem AG vorzulegen. Die Ergebnisse werden vom AN protokolliert und von AG und AN unterzeichnet.“

Abschließend sei an dieser Stelle angemerkt, dass bei sämtlichen Erdwärmeanlagen in Österreich, die auf Basis der angeführten Beschreibungen ausgeschrieben worden sind, die Ausfallrate jeweils unter den vertraglich fixierten 3 % der Absorberleitungen lag. Lediglich bei einem Projekt kam es mit einer Ausfallrate von 3,6 % zu einer geringfügigen Überschreitung. Dies wurde durch eine entsprechende Entgeltminderung berücksichtigt. Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Absorberanlage waren damit nicht verbunden, da der Ausfall durch die in der Planung berücksichtigten Sicherheiten abgedeckt war.

6.4 Berücksichtigung von Behinderungen, Verzögerungen und Erschwernissen

Am geeignetsten erscheint es, dass sämtliche Behinderungen, Verzögerungen und Erschwernisse im Zusammenhang mit der Errichtung einer Erdwärmeanlage in einzelnen Erschwernispositionen erfasst werden.

Beispielsweise kann bei der Herstellung einer Energieschlitzwand die „normale“ Schlitzwand vom Auftragnehmer wie üblich kalkuliert und die zusätzlichen Kosten infolge Behinderung, Verzögerung sowie Erschwernis infolge der Belegung mit Absorberleitungen separat in einer eigenen Erschwernisposition kalkulatorisch berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise kann sinngemäß auch für alle anderen Massivabsorberbauteile übernommen werden.

Bei 10 in Österreich realisierten Projekten mit Energieschlitzwänden, Energiebohrpfählen und Energiebodenplatten wurden Erschwernispositionen, wie beschrieben, in das Leistungsverzeichnis aufgenommen. Die Gesamtkosten dieser Erschwernispositionen lagen in einer Größenordnung zwischen 0,5 und 22 % bezogen auf die Gesamtkosten der jeweiligen Absorberanlage. Vernachlässigt man den Minimal- und Maximalwert, so ergibt sich ein

Mittelwert von rund 3,5 % für den Erschwernisanteil bezogen auf die Gesamtabsoberkosten.

Bezüglich der Nebenleistungen ist zu empfehlen, dass – wenn im Leistungsverzeichnis nicht anders bestimmt – alle Nebenleistungen und die zugehörigen Hilfsstoffe, Betriebsstoffe (wie z. B. Befestigungshilfen, Schweißmuffen und Formteile) und Hilfsgeräte, die zu einer vollständigen Erbringung einer Position notwendig sind, vom Auftragnehmer in den jeweiligen Einheitspreis einkalkuliert werden. Dazu zählen auch alle Maßnahmen zum Schutz sämtlicher Teile der Absorberanlage vor, während und nach dem Einbau.

Hinsichtlich der Montage von Absorberleitungen an Bewehrungskörben (Energiepfähle, Energieschlitzwände) ist darauf hinzuweisen, dass dies entweder im Werk des Korbherstellers oder auf der Baustelle erfolgen kann. Im Falle der Belegung auf der Baustelle ist die Koordination im zeitlichen (Abstimmung mit den anderen Baumaßnahmen), räumlichen (erforderlicher Platz für die Montage) und maschinellen Sinn (Kran zum Wenden des Bewehrungskorbes) von großer Bedeutung.

In Bezug auf die Installation von Messeinrichtungen sowie die Durchführung von Messungen für wissenschaftliche Zwecke (z. B. Installation eines Inklinometerrohres in einem Bohrpfahl) ist im Vorfeld zu entscheiden, ob die Messeinrichtung vom Auftraggeber oder vom Auftragnehmer geliefert und eingebaut werden soll. Im letzteren Fall sind entsprechende Leistungspositionen vorzusehen. Behinderungen bzw. Verzögerungen infolge des Einbaus der Messinstrumente bzw. auch infolge der Durchführung von Messungen können dabei ebenfalls durch entsprechende Erschwernispositionen abgedeckt werden.

6.5 Schnittstelle zwischen Erdwärmeanlage und Haustechnik

Die Planung einer Tunnelthermie-Anlage sollte von einem geothermischen Fachplaner erstellt werden, der über ein Spezialwissen einerseits in Bezug auf den Tunnelbau (Tunnelbauelemente, Bauablauf etc.) und andererseits in Bezug auf die Massivabsorbertechnologie (Dimensionierung, Einbau etc.) verfügt. Die Berechnung und Auslegung der Tunnelthermie-Anlage (Absorberplanung) erfolgen dabei üblicherweise getrennt von der Haustechnikplanung des Nutzers, wobei als Schnittstelle zwischen der Absorberplanung und der Haustechnik-

planung der Erdwärmeverteiler sowohl in der Planung als auch in der Bauausführung fungieren kann. Die Einflussfaktoren für die jeweiligen Planungen sind in Bild 5 dargestellt und wurden in Kapitel 3.2 bereits diskutiert.

Im Zuge des Planungsprozesses sind vom Haustechnikplaner des Nutzers folgende energietechnische Grundlagen zu ermitteln:

- Bedarf Spitzenheizleistung in [kW] (Monats- oder Tagesverteilung und Dauer des Spitzenbedarfs),
- Bedarf Spitzenkühlleistung in [kW] (Monats- oder Tagesverteilung und Dauer des Spitzenbedarfs),
- Heizenergiebedarf in [kWh] (Monats- oder Tagesverteilung),
- Kühlenergiebedarf in [kWh] (Monats- oder Tagesverteilung),
- Soll-Temperaturen des gewählten Heiz- und Kühlverteilsystems (z. B. Niedertemperaturheizung) vor der Wärmepumpe bzw. vor der Kältemaschine,
- Raumtemperaturen und Bauteilaufbauten, wenn das Nutzerbauwerk direkt an das Tunnelbauwerk anschließt.

Aufbauend auf diesen energietechnischen Grundlagen erfolgt die Absorberplanung vom geotechnischen Fachplaner, wobei sämtliche Bestandteile (Absorberelemente, Anbindeleitungen, Verteiler, Bodenplattendurchführungen etc.) der Anlage bis zum Erdwärmeverteiler zu planen und zu dimensionieren sind. Im Anschluss daran sind dem Haustechnikplaner zumindest folgende Informationen über die Absorberanlage zu übermitteln:

- Deckungsgrad Spitzenleistung Heizen und Kühlen (Monats- oder Tagesverteilung),
- Deckungsgrad Energiebedarf Heizen und Kühlen (Monats- oder Tagesverteilung),
- Vor- und Rücklauftemperaturen beim Erdwärmeverteiler bzw. erzielte Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf,
- Gesamtdruckverlust der Absorberanlage,
- Verlauf und Länge der Sammelleitungen (zur späteren Bestimmung des Druckverlustes und

der Rohrdimension) vom Erdwärmeverteiler bis zum Nutzer (Technikzentrale).

Vom Haustechnikplaner sollte in weiterer Folge das Gesamtsystem vom Erdwärmeverteiler über die Wärmepumpe/Kältemaschine bis zum Wärme- und Kälteverteilsystem geplant und dimensioniert werden. Dazu zählen neben den erforderlichen Umwälzpumpen insbesondere auch die Dimensionierung der Sammelleitungen zwischen Erdwärmeverteiler und Nutzer (Technikzentrale).

Die fertig geplanten Sammelleitungen (Rohrdurchmesser, Rohrmaterial, evtl. Wärmedämmung etc.) sowie allenfalls erforderliche weitere Anlagenkomponenten (Regelventile, Messfühler inkl. zugehöriger Messleitungen etc.) sind schließlich vom geotechnischen Fachplaner in die entsprechenden Pläne des Tunnelbauwerkes zu integrieren.

Für die Abgrenzung der Leistungen zwischen dem Errichter der Absorberanlage und dem Errichter der Haustechnikanlage (Anlagenbauer) in der Ausschreibung und somit auch in der Bauausführung eignet sich ebenfalls der fertig montierte Erdwärmeverteiler. Sämtliche Komponenten vor dem Erdwärmeverteiler (Absorberleitungen, Anbindeleitungen, Verteiler etc.) sollten gemeinsam ausgeschrieben und von einem einzigen Bauausführenden errichtet werden. Am fertig montierten Erdwärmeverteiler können erforderlichenfalls auch Abnahmeprüfungen zur Prüfung des gesamten Absorbersystems durchgeführt werden und in weiterer Folge an den Anlagenbauer zur Herstellung der Haustechnik übergeben werden.

Sollte es sich beim Nutzer der Tunnelthermie-Anlage um einen Dritten handeln, so können gegebenenfalls Sammelleitungen innerhalb des Tunnelbauwerkes auch gemeinsam mit der Tunnelausrüstung ausgeschrieben und errichtet werden. In diesem Fall ist eine weitere Schnittstelle im Nahbereich des Nutzers (z. B. Schacht an der Grundstücksgrenze) zu definieren.

6.6 Abstimmung zwischen dem geothermischen Fachplaner des AG und des AN

In Deutschland ist es bei der Umsetzung von Tunnelbauten üblich, dass die eigentliche Ausführungsplanung nicht vom Auftraggeber, sondern vom Auftragnehmer zu erstellen ist. Grundlage dafür ist der Planfeststellungsantrag bzw. der daraus resultie-

rende Planfeststellungsbeschluss sowie die Ausschreibung.

Für die Realisierung einer Tunnelthermie-Anlage bedeutet dies, dass diese bis zum Planfeststellungsantrag vom geothermischen Fachplaner des Auftraggebers geplant wird und die Ausführungsplanung (Detailplanung) schließlich vom geothermischen Fachplaner des Auftragnehmers durchgeführt wird. Durch die Ausschreibung hat der Auftraggeber somit sicherzustellen, dass die gewünschte Absorberanlage in ausreichendem Maße beschrieben bzw. definiert ist.

Zum Zeitpunkt des Planfeststellungsantrages sind üblicherweise die Konstruktion, die Bauteilaufbauten bzw. Abmessungen des geplanten Tunnelbauwerkes relativ fix, sodass im Zuge der Ausführung nur mehr geringfügige Anpassungen aufgrund der tatsächlich angetroffenen Untergrundverhältnisse erforderlich sein werden. Somit können auch die Massen für die geothermische Aktivierung des Tunnelbauwerkes mit ausreichender Sicherheit festgelegt werden.

Es empfiehlt sich, dass bereits für den Planfeststellungsantrag, spätestens allerdings im Rahmen der Ausschreibungsplanung eine möglichst detaillierte Planung der gesamten Absorberanlage erfolgt. Beispielsweise sollte für ein Tunnelbauwerk mit Energieschlitzwänden anhand eines typischen Schlitzwandquerschnittes bereits ein Regelplan mit Belegschema für die Montage von Absorberleitungen am Bewehrungskorb erfolgen. Dieser dient schließlich auch der Massenermittlung und bildet die Grundlage für die Ausschreibung.

Vor Baubeginn erfolgt vom Auftragnehmer schließlich die Ausführungsplanung. Beim gewählten Beispiel der Energieschlitzwand erfolgt dazu die Anpassung des Regelplans bzw. Belegschemas an die tatsächliche Schlitzwandgeometrie (tatsächliche Tiefe, Elementlänge, Elementbreite, Korbunterteilung etc.), wobei die Belegedichte (Absorberleitungen pro m² Schlitzwand) in etwa gleich wie in den Ausschreibungsplänen sein sollte.

Die Ausführungspläne sollten schließlich vom geothermischen Fachplaner des Auftraggebers überprüft und von diesem freigegeben werden. Damit liegt es in der Sphäre des geothermischen Fachplaners des Auftraggebers, dass die ausgeführte Absorberanlage mit der geplanten bzw. gewünschten Absorberanlage übereinstimmt bzw. die geplante Leistung erbringen wird.

Das Grundprinzip sollte somit sein, dass

- vom geothermischen Fachplaner des Auftraggebers Regelpläne bzw. Belegungsschemata der Absorberanlage erstellt werden,
- vom geothermischen Fachplaner des Auftragnehmers im Rahmen der Ausführungsplanung eine Anpassung an die tatsächlich ausgeführten Gegebenheiten (Bauteilabmessungen, Betonierabschnitte etc.) erfolgt und schließlich
- die Ausführungspläne vom geothermischen Fachplaner des Auftraggebers wiederum kontrolliert und freigegeben werden.

Es wird davon abgeraten, dass die Berechnung der Anlagenleistung der Absorberanlage vom geothermischen Fachplaner des Auftragnehmers erfolgt, wie dies beispielsweise bei der statischen Berechnung einer Baugrubensicherung üblich ist. Schließlich handelt es sich bei einer Absorberanlage um eine sehr komplexe Anlage mit zahlreichen Schnittstellen und nicht genormten Dimensionierungskriterien, sodass die Verantwortung hinsichtlich der Anlagenleistung in der Sphäre des Auftraggebers bleiben sollte.

Im Zuge der Bauausführung übernimmt der geothermische Fachplaner des Auftraggebers somit eine Art Prüffunktion, um die von ihm geplante und berechnete Leistung der Absorberanlage auch sicherzustellen.

6.7 Bauüberwachung

Während der Bauausführung ist eine Überwachung der Herstellung der Absorberanlage zu empfehlen. Diese sollte zumindest folgende Prüfungen beinhalten:

- Kontrolle der plangemäßen Belegung der Absorberelemente (Rohrmaterialien, Befestigungsabstände, Lage, Rohrabstände, Biegeradien, Leitungslängen, Anschlussstellen, etwaige Schutzmaßnahmen etc.),
- Kontrolle der vertraglich vereinbarten Druckprüfungen (z. B. 8 bar, eine Stunde lang), die zu folgenden Zeitpunkten durchgeführt werden sollten:
 - nach Fertigstellung der Absorbermontage an der Bewehrung (z. B. bei Schlitzwandkörpern),

- nach Freilegen der Anschlussstellen (z. B. wenn Anschlussstelle einer Energieschlitzwand im Bereich der Bodenplatte situiert ist),
- nach Verlegen der Anbindeleitungen,
- nach dem Stoßen von Absorberleitungen,
- nach Anschluss an den Verteiler.
- Kontrolle der ständigen Druckhaltung: Sämtliche Absorberleitungen sollten nach positiver Druckprüfung weiterhin mit einem Druck von zumindest 2 bar beaufschlagt bleiben und an den Enden mit entsprechenden Manometern zur Druckkontrolle ausgestattet werden. Dadurch kann z. B. täglich eine visuelle Kontrolle der Dichtheit erfolgen,
- Kontrolle der Ausführung von Muffenverbindungen (Einhaltung vorgegebener Heizzeiten etc.),
- Kontrolle der Schutzmaßnahmen (Schutzkappen, Abdeckungen etc.) zur Vermeidung von Beschädigungen,
- Begleitung der Hauptdruckprüfung der gesamten Absorberanlage nach Befüllung mit dem fertig gemischten Wärmeträger,
- gegebenenfalls Durchführung eines Durchflusstests der gesamten Absorberanlage.

7 Ausschreibung

7.1 Ziel

In diesem Kapitel sollen beispielhafte Ausschreibungstexte für eine geothermische Anlage erstellt werden.

7.2 Beispielhafte Leistungspositionen

7.2.1 Tunnelbau in offener Bauweise

Für eine beispielhafte Erdwärmeanlage in einem Tunnelbauwerk in offener Bauweise mit Absorberbelegung von Schlitzwänden und einer Bodenplatte (entsprechend dem Beispielprojekt gemäß Kapitel 5.6.9 bzw. den Plänen OB-1, 2, 7 und 9 im Anhang B) wurde ein Leistungsverzeichnis mit Einzelpositionen erstellt. Dieses Leistungsverzeichnis findet sich im Anhang C und ist folgendermaßen aufgebaut:

- Baustellengemeinkosten: zusätzliche Kosten zu den Baustellengemeinkosten für die Herstellung der Erdwärmeanlage,
- Baustelleneinrichtung: zusätzliche Kosten zur Baustelleneinrichtung für die Herstellung der Erdwärmeanlage,
- technische Vorbemerkungen zur Erdwärmeanlage: Es werden Angaben zu folgenden Punkten angeführt:
 - einzuhaltende Normen und Regelwerke,
 - Eigenschaften des zu verwendenden Absorbersystems,
 - Einbaubeschreibung,
 - generelle Bestimmungen,
 - Abkürzungen,
- ständige Vorbemerkungen zur Erdwärmeanlage: Es werden Angaben zu folgenden Punkten angeführt:
 - Beaufsichtigung,
 - Druckprüfungen,
 - Anforderungsnachweise,
 - Abrechnung,
 - Ausfall von Absorberkreisen,
 - Dokumentation,
- Erdwärmeanlage Schlitzwände:
 - Einbau Absorberleitungen,
 - Herstellen der Anschlussstelle,
 - Erschwernisposition für die Schlitzwandherstellung,
- Erdwärmeanlage Bodenplatten:
 - Freilegen der Schlitzwand-Anschlussstellen,
 - Verlegen der Absorberleitungen,
 - Herstellen der Bodenplattendurchführung,
 - Herstellen der Schutzbetonschicht,
 - Erschwernisposition für die Bodenplattenherstellung,
- Inbetriebnahme der Erdwärmeanlage:
 - Herstellen der Erdwärmeverteiler und Sammelleitungen,
 - Herstellen der Strangregulierventile,
 - Anlagenbefüllung,
 - Vorbereitung der Inbetriebnahme,
 - Aufzahlung für den Einsatz eines Frostschutzmittels: Die Position bezieht sich dabei auf eine Haustechnikposition, in der die genaue Zusammensetzung des Befüllmediums (Wasser inklusive Inhibitoren) angegeben ist.

7.2.2 Tunnelbau in geschlossener Bauweise

Aufbauend auf den Leistungsbeschreibungen im Anhang C für eine Erdwärmeanlage in einem in offener Bauweise errichteten Tunnelabschnitt enthält der Anhang D beispielhafte Positionstexte für die Errichtung einer Erdwärmeanlage in einem Tunnelabschnitt mit geschlossener Bauweise (2-schaliger Aufbau mit Spritzbeton und Innenschale).

Die Leistungsbeschreibungen beziehen sich dabei auf Plan GB-2 (siehe Anhang A), demzufolge Absorberleitungen im Gewölbe und in der Sohle eingebaut werden. Das diesbezügliche Leistungsverzeichnis umfasst folgende Positionen:

- Absorberleitungen Sohle:
 - Einbau der Absorberleitungen,
 - Herstellen der Anbindeleitungen zu den Absorberleitungen im Gewölbe,
 - Erschwernisposition für die Herstellung der Sohle,
- Absorberleitungen Gewölbe:
 - Einbau der Absorberleitungen mittels Energiefestes oder direkte Montage an der Spritzbetonaußenschale,
 - Herstellen der Sammelleitungen zur Verbindung der einzelnen Absorberkreise im Gewölbe.

Eine Erschwernisposition zur Abgeltung etwaiger Erschwernisse bei der Herstellung der Innenschale ist nicht vorgesehen, da keine Erschwernisse oder Behinderungen zu erwarten sind. Voraussetzung dafür ist, dass die Herstellung der Absorberelemente im Gewölbe mit ausreichendem Vorlauf vor der Herstellung der Innenschale erfolgt. Durch die Gewölbebelegung und die Herstellung der Innenschale im gleichen Takt ist dies jedenfalls gegeben.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Einleitend wurden die Grundlagen der geothermischen Energienutzung und die derzeit vorhandenen Absorbersysteme zur geothermischen Nutzung eines Tunnelbauwerks beschrieben sowie ein Planungsleitfaden erstellt, der u. a. wesentliche Einflussfaktoren für eine Tunnelthermie-Anlage, Entwurfparameter für die Planung sowie Projektstufen zur Umsetzung einer Tunnelthermie-Anlage enthält.

Die für eine Dimensionierung einer Tunnelthermie-Anlage erforderlichen Parameter wurden diskutiert, wobei neben den Untergrundparametern (Schichtprofil, Grundwasser, Temperatur, Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität etc.) insbesondere die Tunnellufttemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Absorberelemente hat. Auch wurden Möglichkeiten zur Bestimmung der thermischen Untergrundparameter sowie Empfehlungen für die Umsetzung in der Praxis angegeben.

Im Zusammenhang mit der Tunnellufttemperatur hat sich ergeben, dass bislang kaum Messwerte vorliegen und die Verteilung der Tunnellufttemperatur bei unterschiedlichen Tunneltypen (Querschnitt, Länge, Überlagerung, Belüftung, Gegenverkehrsbetrieb etc.) im Jahreszyklus weitgehend unbekannt ist. Aus diesem Grund wird dringend empfohlen, Temperaturaufzeichnungen (Jahresganglinie!) in bereits bestehenden Straßentunneln durchzuführen, um eine größere Datengrundlage für künftige Projekte zu schaffen.

Technische Detaillösungen wurden anhand von beispielhaften Tunnelthermie-Projekten erarbeitet und dargestellt. Die diesbezüglichen Pläne zeigen exemplarisch den Einsatz der Massivabsorbertechnologie in Tunnelbauwerken mit geschlossener und offener Bauweise.

Es wurden Empfehlungen für die Gestaltung eines Bauvertrages im Zuge der Ausschreibung einer Tunnelthermie-Anlage dargestellt sowie Schnittstellen einerseits zwischen der Erdwärmeanlage und der Haustechnik und andererseits zwischen dem geothermischen Fachplaner des Auftraggebers und jenem des Auftragnehmers definiert. Darüber hinaus wurden beispielhafte Leistungspositionen für Tunnelthermie-Anlagen erstellt.

Somit wurden wesentliche Aspekte in Bezug auf die Planung und Errichtung einer Tunnelthermie-Anla-

ge untersucht. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit können damit insbesondere der Vorbereitung, Planung und Umsetzung erster Pilotprojekte bei deutschen Straßentunneln dienen.

In diesem Zusammenhang ist hervorzuheben, dass bei den in Deutschland üblichen Tunnelbauwerken mit geringen Überlagerungshöhen und einer mittleren Tunnellänge von ca. 1 km die Wirtschaftlichkeit einer Tunnelthermie-Anlage im Vorfeld geprüft werden sollte, da eine starke Beeinflussung durch die Tunnellufttemperatur zu erwarten ist.

Um erste Erfahrungen mit Tunnelthermie-Anlagen zu machen, ist die Realisierung eines Pilotprojektes mit nur geringer Leistungsfähigkeit zu empfehlen, sodass die damit verbundenen Kosten überschaubar bleiben. Beispielsweise könnten in einem Fluchtstollen, begleitend zu einem Straßentunnel, Absorberelemente installiert und im Idealfall ein betriebseigenes Bauwerk beheizt bzw. gekühlt werden. Andere mögliche Nutzungsszenarien wären die Versorgung einer Löschwasser-Begleitheizung oder die Eisfreihaltung schwer räumbarer Flächen (z. B. Fluchtwege im Portalbereich). Die Erfahrungen, die mit der Umsetzung eines derartigen Pilotprojektes gemacht werden, können schließlich der Realisierung größerer Tunnelthermie-Anlagen dienen.

9 Literatur

Regelwerke

- [1] DIN 8074: Rohre aus Polyethylen (PE) – PE 63, PE 80, PE 100, PE-HD – Maße. Deutsches Institut für Normung e. V. August 1999
- [2] DIN 8075: Rohre aus Polyethylen (PE) – PE 63, PE 80, PE 100, PE-HD – Allgemeine Güteanforderungen, Prüfungen. Deutsches Institut für Normung e. V. August 1999
- [3] DIN EN 1997-2 (Eurocode 7-2): Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds. Deutsches Institut für Normung e. V. 10/2010
- [4] ISO 13370: Thermal performance of buildings – Heat transfer via the ground – Calculation methods. International Organization for Standardization. 2007

- [5] ÖWAV-Regelblatt 207: Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, 2. Auflage. Wien 2009
- [6] SIA D 0136: Grundlagen zur Nutzung der un- tiefen Erdwärme für Heizsysteme. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1996
- [7] VBI-Leitfaden: Oberflächennahe Geothermie. Verband Beratender Ingenieure (VBI), 2. Auf- lage, Berlin. Juni 2009
- [8] VDI 4640, Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI), Düsseldorf, Juni 2010
- [9] VDI 4640, Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpen- anlagen. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI), Düsseldorf, September 2001
- [10] VDI 4640, Blatt 3: Thermische Nutzung des Untergrunds – Unterirdische Thermische Energiespeicher. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI), Düsseldorf, Juni 2001
- [11] VDI 4640, Blatt 4: Thermische Nutzung des Untergrunds – Direkte Nutzungen. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI), Düsseldorf, September 2004
- [12] VDI 2067, Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäude- technischer Anlagen und Kostenberechnung. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI), Düsseldorf. 01/2007
- [13] ZTV-ING, Teil 5: Zusätzliche Technische Ver- tragsbedingungen und Richtlinien für Inge- nieurbauten – Teil 5: Tunnelbau. Bundesan- stalt für Straßenwesen. Ausgabe 12/2007. Download: www.bast.de
- [14] ABU-HAMDEH, N. H., KHADAIR, A. I., REEDER, R. C.: A comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44, 1073-1078. 2001
- [15] ADAM, D., MARKIEWICZ, R.: Geothermische Energienutzung im Bauwesen. Heft 54/Okto- ber 2003. Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. 2003
- [16] ADAM, D., MARKIEWICZ, R.: Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Geotechnique* 59, No. 3, 229-236. 2009
- [17] Amberg Engineering AG, Geowatt AG, Ver- suchsstollen Hagerbach AG: Energiege- winnung aus städtischen Tunneln, System- evaluation. Schweizerische Eidgenossen- schaft, Forschungsauftrag FGU 2008/006. 10/2010
- [18] BLOSFELD, J.: Anwendung der Geothermie in Straßentunneln. Schlussbericht zum FE- Projekt F1100.2309007. Bundesanstalt für Straßenwesen. 01/2011
- [19] BRANDL, H., ADAM D.: Die Nutzung geother- mischer Energie mittels erdberührter Bauteile. Festschrift der Universität für Architektur. *Geo- technique* 40 (1999-2001), Sofia, Bulgarien, 2002
- [20] BRANDL, H., MARKIEWICZ R.: Geothermi- sche Nutzung von Bauwerksfundierungen („Energiefundierungen“). In: *ÖIAZ*, 146. Jg., Heft 5-6/2001, Wien, 2001
- [21] ENNIGKEIT, A.: Energiepfahlanlagen mit Saisonalem Thermospeicher. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt – Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik. Darmstadt, 2002
- [22] FRANZIUS, J. N., PRALLE, N.: Mit Tunneln heizen. Nutzung des geothermischen Poten- zials im Eisenbahntunnel Jenbach. Präsen- tation. Berlin, 2009
- [23] GEHLIN, S.: Thermal-Response-Test – In-Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock. Division of Water Resources Engineering, Department of Environmental Engineering, Lulea University of Technology. Sweden, 1998
- [24] HEIMBECHER, F., DECKER, W., FAUST, H. G.: Temperaturmessungen in Straßentunneln. Bundesanstalt für Straßenwesen. Projekt 98 234/B3. Bergisch Gladbach, 2002
- [25] IC Consulente ZT GmbH, Institut für Grund- bau und Bodenmechanik, Technische Univer- sität Wien: Wirtschaftliche Optimierung von

Sonstige

- Tunnelthermie-Absorberanlagen, Grundlagenuntersuchung und Planungsleitfaden, erstellt für das Wiener Magistrat MA27, nicht veröffentlicht. Wien, 2005
- [26] JESSBERGER, H. L., JAGOW-KLAFF, R.: Frost im Baugrund. In: Grundbau-Taschenbuch. Teil 1. Fünfte Auflage. Ernst & Sohn Verlag. Berlin, Deutschland, 1996
- [27] MARKIEWICZ, R., ADAM, D.: Utilization of Geothermal Energy using earth coupled Structures – Theoretical and Experimental Investigations, Case Histories. Geotechnical Problems With Man-Made And Man Influenced Grounds. XIIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 2. 25-28th August 2003, Prag, 2003
- [28] MARKIEWICZ, R.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau. Dissertation am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Wien, Wien, 2004
- [29] OBERHAUSER, A.: Verfahrens- und Komponentenentwicklung zur Planung von Tunnelthermie-Anlagen. Doktorarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2006
- [30] OSTERMANN, N., ADAM, D., UNTERBERGER, W.: Erdwärmenutzung im Verkehrstunnelbau. Schriftenreihe der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik 53, S. 59-63. 2003
- [31] PK Tiefe Geothermie: Nutzungen der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie) – geowissenschaftliche Parameter und Untersuchungsverfahren. 24.01.2008. Download: <http://www.infogeo.de>
- [32] ROHNER, E., RYBACH, L., SCHÄRLI, U., KOHL, T.: Neue Methode zur In-situ-Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für die Dimensionierung von Erdwärmesonden-Feldern. Download: www.geophysik.rwth-aachen.de/Tagung_AC/Rohner.pdf
- [33] PRALLE, N., GOTTSCHALK, D., HOLUB, W.: Umweltfreundliche Wärmeenergieversorgung des Bauhofs Jenbach. Geothermisches Tunnelkraftwerk Jenbach. Download: www.jenbach.at/gemeindeamt/download/220621968_1.pdf. 2009
- [34] SANNER, B., REUSS, M., MANDS, E., MÜLLER, J.: Erfahrungen mit dem Thermal-Response-Test in Deutschland. Download: <http://www.ubeg.de/Downloads/GeRTGerm.pdf>
- [35] SCHÄRLI, U.: Persönliche Mitteilungen. Geologisches Büro, Zürich. Unveröffentlicht
- [36] SCHNEIDER, M., VERMEER, P.: Geothermie im Tunnelbau, Stand der Technik und Entwicklungen. Maschineller Tunnelbau – Möglichkeiten und Zukunftsperspektiven. Symposium HfT Stuttgart. 19.10.2007
- [37] Teka: Prospekt Wärmeleitfähigkeits-Messgerät Tk04. TeKa, Malplaquetstraße 10, D-13347 Berlin, 2011
- [38] UNTERBERGER, W., ADAM, D., HOFINGER, J.: Erdwärmenutzung im Verkehrstunnelbau. Zement+Beton 4/02. Zement + Beton Handels- und Werbegesellschaft mbH, Wien, 2002

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2003

- B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti von Weschpfennig € 11,50
- B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahntafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht Eilers, Kückler, Quaas € 12,50
- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau Städing, Krocker € 12,00
- B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2 Haardt € 13,50
- B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50

2004

- B 45: Erfahrungssamlungen: Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brückenseilen und -kabeln
Hemmert-Halswick € 13,00
- B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

- B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

- B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann, Wiggenhauser € 15,00
- B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haftung von Epoxidharz Raupach, Rößler € 13,50
- B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3 Holst € 13,50
- B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln Panzer, Hörner, Kropf € 12,50
- B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen Friedrich, Staack € 14,50
- B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen Tauscher € 14,50
- B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähner € 12,50

2007

- B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50

- B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50

- B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50

- B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel Sistenich € 14,50

2008

- B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme Schröder € 12,50

- B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewehrung Schröder € 13,50

- B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten Schröder, Staack € 13,00

- B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff Eilers € 12,00

- B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Heunisch, Hoepfner, Pierson (t), Dehn, Orgass, Sint € 17,50

- B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositions-kategorie XF4 Brameshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

- B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50

- B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00

- B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln Blofeld € 17,50

- B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 29,50

- B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50

- B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen Tauscher € 14,50

2010

- B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau
Kuhlmann, Euler € 22,50
- B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen
Weschpfennig, Kropf, von Witzenhausen € 13,50
- B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König € 21,00
- B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk
Müller € 14,00
- B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand
Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

2011

- B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems
Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00
- B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes
Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“
Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“
Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“
Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier, Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann € 29,50
- B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kuhlmann, Günther, Krauss € 18,50
- B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spannliedführung
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 15,50
- B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00
- B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse
Müller, Vogel, Neumann € 14,50
- B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand
Freundt, Böning € 16,00
- B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00
- B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00
- B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50
- B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton
Nguyen, Freitag € 13,50

2012

- B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00
- B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50
- B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50
- B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013

- B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00
- B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00
- B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsabrechnungen
Hegger, Reißen € 17,50
- B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
- B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00
- B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam, Unterberger, Hofinger € 17,00

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.