

Optimierungspotenziale der Erdwärmennutzung an Verkehrsinfrastrukturprojekten

DI Andreas Oberhauser

TU Wien, Institut für Eisenbahnwesen,
Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

Univ.-Doz. DI Dr.techn. Dietmar Adam

Geotechnik Adam ZT GmbH, Brunn am Gebirge

1 Nutzungsmöglichkeiten für Erdwärme

Neben der Nutzung warmer Tunnelwässer aus Basistunneln mit hoher Überdeckung [1] besteht unter Zuhilfenahme der Wärmepumpentechnologie die Möglichkeit, auch Tunnel mit geringer Überdeckung wie innerstädtische Eisenbahn-, U Bahn- oder Straßentunnel zur Gewinnung von Erdwärme zu nutzen ([2], [3] und [4]). Der Infrastrukturbetreiber kann die entzogene Erdwärme unterschiedlich verwerten. Möglichkeiten sind

- Eigennutzung (Nutzung im System)
- Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit (Eisfreihaltung von Bahnsteigen, Treppen)
- Drittnutzung (Veräußerung der Energie).



Abb. 1: Energievlies-Prototyp im Lainzer Tunnel, Baulos LT 22
Foto: © R. Markiewicz, Geotechnik Adam ZT GmbH

Abb. 2: Energiebodenplatte im Baulos U2/2 der Wiener U-Bahn
Foto: © J. Hofinger, ic-Consultanten ZT GmbH



Die Eigennutzung im System Eisenbahn bedeutet eine weit gehend energieautarke Beheizung und Kühlung von Stationsbauwerken, Betriebsräumen und Büros.

Sicherheitsmaßnahmen beinhalten die Beheizung von Bahnsteigen, Zufahrtsstraßen oder Brücken, um diese im Winter eisfrei zu halten.

Die Weitergabe der Wärme an Dritte ist ein zusätzlicher interessanter Aspekt. Wird ein Tunnel mit einem umfassenden Erdwärmesystem ausgestattet, so kann die gewonnene Wärmeenergie an interessierte Kunden, wie z. B. nahe der Tunneltrasse liegende Wohnhäuser oder Industrieobjekte, veräußert werden. Der Infrastrukturbetreiber agiert somit als Produzent und Verteiler von umweltfreundlicher Erdwärme.

2 Mögliche Betriebsformen

Eine wichtige Einschränkung bei der Betrachtung verschiedener Betriebsformen ist, dass die Bereitstellung von Erdwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau von etwa 35 °C am wirtschaftlichsten ist. Hierfür müssen geeignete Abnehmer gefunden werden. Das Wärmeverteilsystem eines angeschlossenen Verbrauchers muss auf eine dementsprechend niedrige Vorlauf-temperatur im Heizkreislauf ausgelegt sein. Um unter gegebenen Rahmenbedingungen die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten, ist eine umfassende geothermische Planung notwendig.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Energiesysteme für Tunnelthermie®“, welches sich mit der Entwicklung eines neuen Absorberelementes für den bergmännischen Tunnelbau befasst, wurde auch eine Methodik zur geothermischen Planung entwickelt, mit welcher neben den geotechnischen und anlagentechnischen Aspekten die Wirtschaftlichkeit einer Investition in ein Erdwärmesystem untersucht werden kann.

Grundsätzlich ist die Erstellung einer Energiebilanz erforderlich. Sowohl die aus dem Tunnelobjekt entziehbare thermische Leistung als auch die Heiz- bzw. Kühlleistung der

anzuschließenden Verbraucher müssen bekannt sein bzw. errechnet werden. Auch das Verbrauchsverhalten der Erdwärme Kunden hat einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Prinzipiell sind folgende Anlagenbetriebsformen möglich:

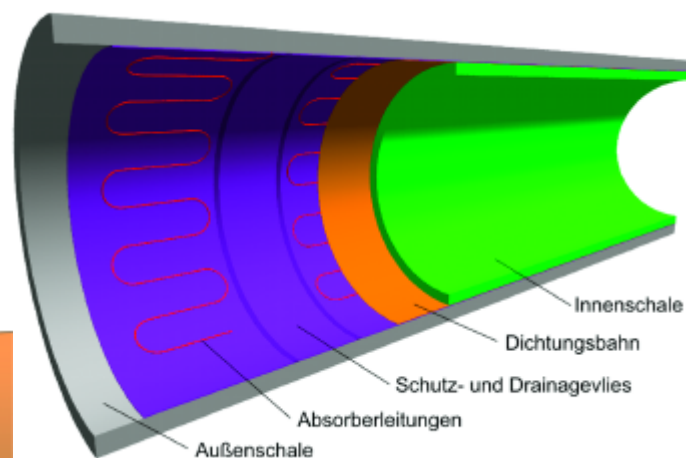
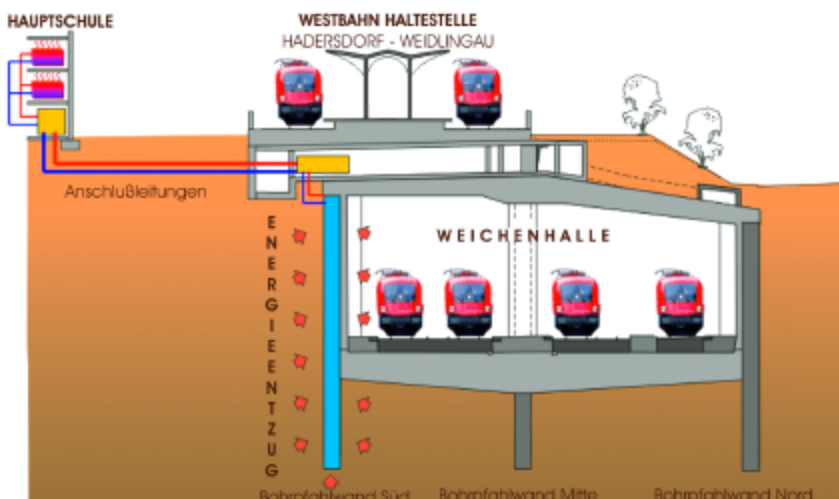
- reiner Heiz- oder Kühlbetrieb
- kombinierter Heiz- und Kühlbetrieb
- „Free Heating“ bzw. „Free Cooling“

Beim reinen Heiz- oder Kühlbetrieb wird dem Boden nur Wärme entzogen oder nur Wärme zugeführt.

Ein kombinierter Betrieb erlaubt eine ausgeglichene Bilanzierung – die Menge an im Winter extrahierter Wärme kann im Sommer während des Kühlbetriebes wieder zugeführt werden. Somit besteht auch eine geringere Gefahr der langfristigen Erschöpfung des Wärmespeichers im Boden.

Ein „Free Heating“- oder „Free Cooling“-Betrieb bedeutet eine Umwälzung des Absorbiermediums ohne Zuhilfenahme der Wärmepumpe. Ein solcher Betrieb eignet sich beispielsweise für Kühlanwendungen, wenn keine allzu starke Abkühlung notwendig ist.

Abb. 3: Energiepfähle im Lainzer Tunnel LT 24 und Energievlies
(Quelle: Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Wien)



Gegenüberstellung der Energieverbräuche verschiedener Heizsysteme:
Konventionell, Erdwärme - H&K, Erdwärme - Free Cooling
(Heizlast 80kW)

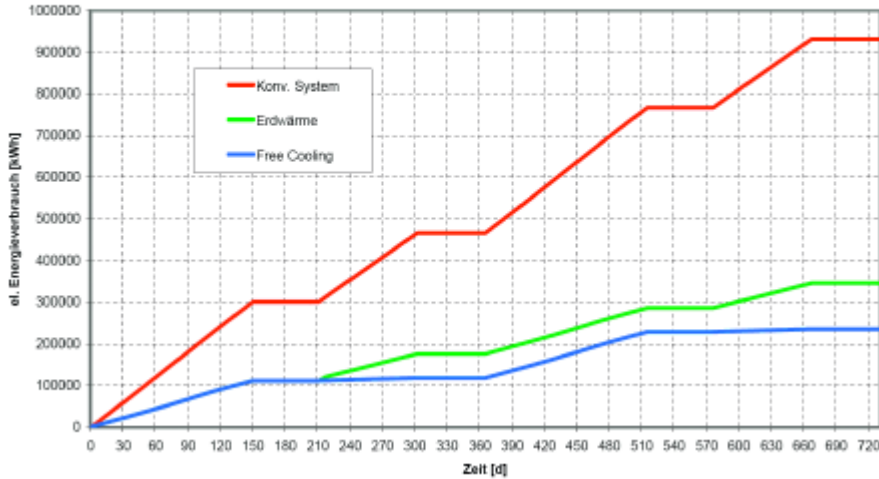


Abb. 4: Energieverbrauch eines konventionellen Systems (Heizung und elektrisch betriebene Klimaanlage) im Vergleich mit Erdwärme zum Heizen und Kühlen sowie mit Erdwärme zum Heizen und Free Cooling

3 Energiewirtschaftliche Simulationsberechnungen

Mithilfe numerischer Simulationssoftware [5] besteht die Möglichkeit, das Verbrauchsverhalten einer Erdwärmeanlage unter verschiedenen Randbedingungen zu analysieren und Prognosen über einen zukünftigen Energieverbrauch einer Anlage zu erstellen. Anhand der Messdaten aus den bestehenden Pilotanlagen zur Erdwärmenutzung im Lainzer Tunnel (Energievlies im LT 22 und Energiepfähle im LT 24, [6], [7]) lassen sich die Berechnungsmodelle kalibrieren.

Bei entsprechender Auslegung des Systems kann der resultierende Energieverbrauch, wie Abb. 4 zeigt, weit unter dem Verbrauch eines konventionellen Heizsystems liegen.

Energiekosten (Heizen)
für 80 kW Heizleistung aus 150 m Tunnel

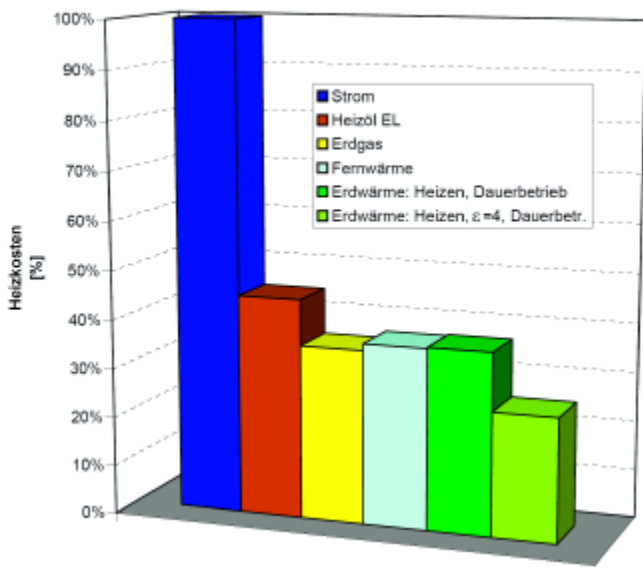


Abb. 5: Vergleich der Energiekosten für reinen Heizbetrieb für verschiedene Systeme. Die Kalibrierung des Modells wurde anhand der Messdaten aus dem Energievlies Prototypen im Lainzer Tunnel, Baulos LT 22, durchgeführt [7]. Bei einem optimalen Betrieb der Wärmepumpe (Leistungszahl $\epsilon = 4$) wird die Erdwärme deutlich günstiger (Preisbasis Oktober 2005).

Energiekosten (Heizen & Kühlen)
für 80 kW Heizleistung aus 150 m Tunnel

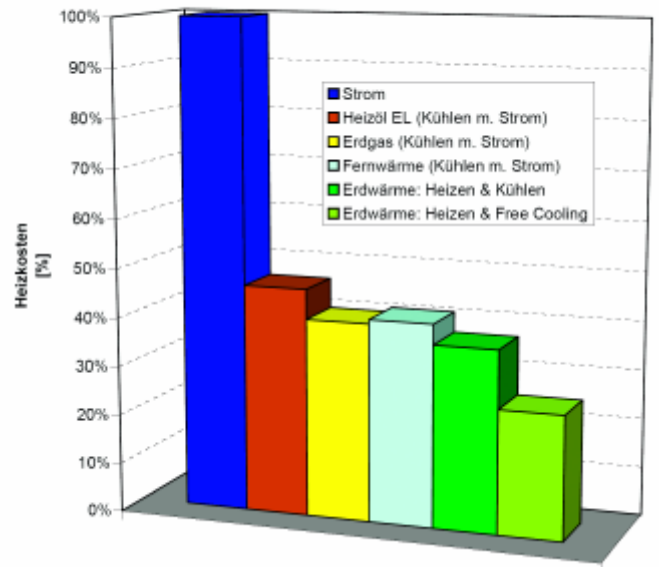


Abb. 6: Vergleich der Energiekosten für Heizen und Kühlen für verschiedene Systeme. Bei Heizöl, Erdgas und Fernwärme wurde für das Kühlen im Sommer mit Strom als Preisbasis gerechnet, was einer zusätzlich installierten Klimaanlage entspricht. Die Kalibrierung des Modells wurde ebenfalls anhand der Messdaten aus dem Lainzer Tunnel, Baulos LT 22, durchgeführt (Preisbasis Oktober 2005).

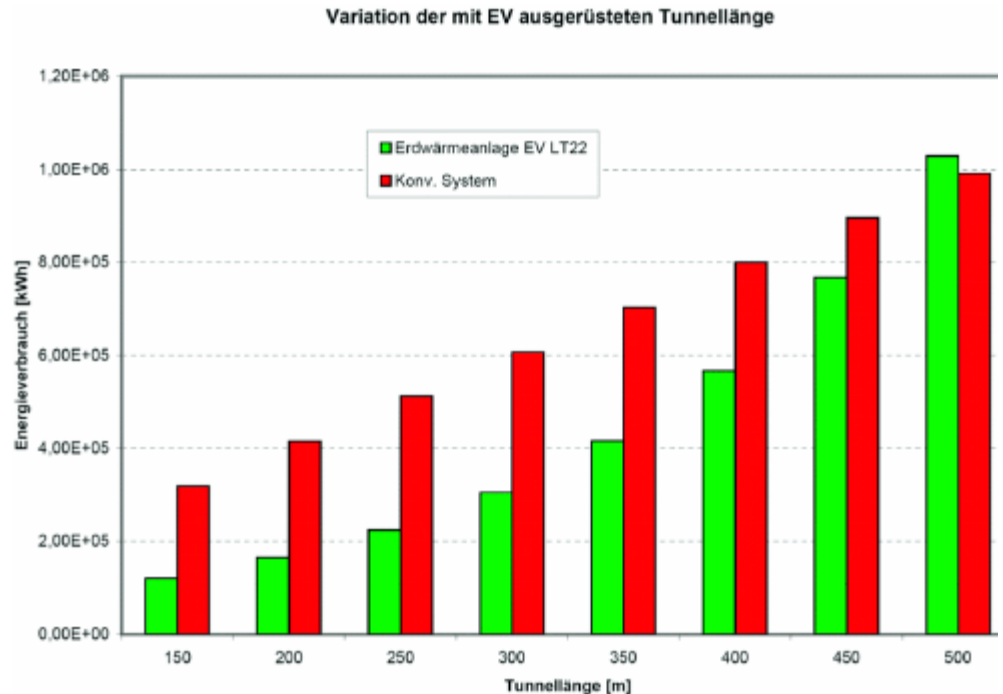


Abb. 7: Energieverbrauch einer Energievlies-Anlage mit Sammelleitung während einer Heizperiode (150 Tage) im Vergleich zu gleich stark dimensionierten konventionellen Systemen

Die Wirtschaftlichkeit von Erdwärmeanlagen ergibt sich, wie bereits beschrieben, vor allem dadurch, dass mit demselben System sowohl geheizt als auch gekühlt werden kann. Der Kunde erspart sich somit die Anschaffung eines getrennten Systems zur Klimatisierung, wodurch ein erheblicher Anteil der Investitionskosten entfällt. Es ist nun von Interesse zu erfahren, welches Ergebnis der Energieverbrauch bzw. die Verbrauchersparnis im Vergleich zu einem konventionellen System ergibt.

Hierzu ist es notwendig, den Brennstoffverbrauch eines Heizsystems zu kennen. Der Brennstoffverbrauch wird aus dem unteren Heizwert H_u in kWh/Masseneinheit und dem praktischen Endenergiebedarf E_{EPR} des Verbrauchers in kWh errechnet.

Es zeigt sich, dass die Energiekosten beim reinen Heizbetrieb für Erdwärme geringfügig höher sind als für Fernwärme und Erdgas.

Erdgas ist unter Berücksichtigung der aktuellen Energiepreise (Preisbasis Oktober 2005) als Preisbasis der stärkste Konkurrent von Erdwärmeanlagen.

Auf Basis wirtschaftlicher Überlegungen hat sich der Infrastrukturbetreiber nun die Frage zu stellen, wie lange der ausgerüstete Tunnelabschnitt sein soll, damit das System sowohl für den Betreiber als auch für den Erdwärmekunden wirtschaftlich bleibt. Ein physikalisches Kriterium ist hierbei die Umwälzpumpenleistung. Umwälzpumpen sind notwendig, um das Wärmeträgermedium im System zirkulieren zu lassen. Je länger der ausgestattete Tunnelabschnitt ist, desto größer wird auch die für den Betrieb der Pumpen benötigte Energiemenge. Abb. 7 zeigt wiederum anhand des mit den Energievlies Verbrauchsdaten kalibrierten Modells, dass der Energieverbrauch der Pumpen ab einer ausgerüsteten Tunnellänge von 500 m keinen wirtschaft-

lichen Betrieb mehr zulässt. Es ist demnach günstiger, kürzere Tunnelsegmente mit kleineren, geschlossenen Systemen auszustatten, als eine große Anlage zu bauen. Diese Tatsache spricht in erster Linie für eine Nutzung im innerstädtischen Tunnelbau, wo sich in relativ kurzen Abständen Notausstiege oder Lüftungsschächte befinden. An diesen in einer frühzeitigen Planung festzulegenden Stellen ergibt sich die Möglichkeit, umweltfreundliche Erdwärme auf kürzestem Wege dem Verbraucher zur Verfügung zu stellen.

Eine weitere wichtige Fragestellung, die eine detaillierte Betrachtung verdient, ist die Langzeitverfügbarkeit der Ressource Erdwärme (siehe auch [8]). Es besteht die Gefahr, durch eine zu exzessive Nutzung den Bodenspeicher langfristig auszukühlen. Dies ist einerseits von den thermischen Bodenparametern und den Grundwasser-Verhältnissen abhängig, andererseits wird

das Verhalten des Bodenspeichers massiv von der Betriebsform der Anlage beeinflusst. Hierbei gilt es, über das Jahr hinweg auf eine möglichst ausgeglichene Bilanz aus im Heizbetrieb entnommener und im Kühlbetrieb wieder zugeführter Energie zu achten. Eine mit der FE Software FEMLAB® durchgeführte Langzeitsimulation zeigt, dass bei ausgeglichener Bilanzierung die Dauerleistung auch nach mehreren Betriebsjahren nur unwesentlich sinkt. Lediglich während der ersten Jahre sinkt die Leistung des Systems etwas ab, um in weiterer Folge einen konstanten Wert einzunehmen.

Dieser Aspekt ist im Rahmen einer Entwurfsplanung für jede Anlage zu berücksichtigen und sollte nicht generalisiert werden! Bei reinem Heizbetrieb sinkt die Dauerleistung dementsprechend stärker ab. Für Anlagen, die lediglich zum Heizen verwendet werden, ist daher eine detaillierte Ermittlung der Boden- bzw. Felsparameter notwendig.

4 Wirtschaftlichkeitsaspekte der Tunnelthermie®

Der bei Weitem wichtigste Parameter, welcher über Erfolg oder Misserfolg einer technisch funktionierenden Erdwärmeanlage entscheidet, ist der finanzielle Erfolg. Der für die Wirtschaftlichkeit von Erdwärmeanlagen bestimmende Parameter ist der Energiepreis. Er wirkt sich auf die Amortisationszeiten einer Anlage unter Umständen stärker aus als die physikalischen Parameter.

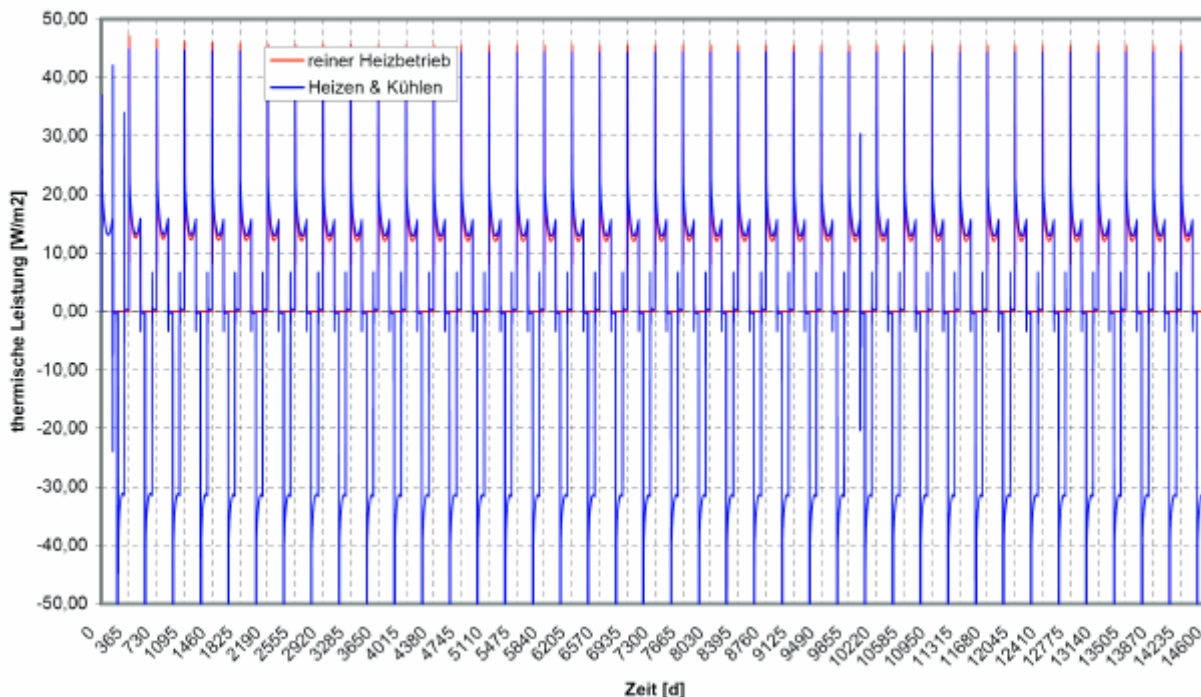
Alle Aspekte des Betriebes müssen in eine Wirtschaftlichkeitsberechnung mit einfließen. Nach Erhebung aller Parameter kann ein direkter Vergleich der Energiekosten mit konventionellen Heizsystemen wie Öl, Gas oder Fernwärme durchgeführt werden. Unter Berücksichtigung der Energiepreise zum gegebenen Zeitpunkt und einer möglichen Preissteigerung in der Zukunft können sowohl der erzielbare Verkaufspreis für

Wärme- und Kühlenergie als auch die Amortisationszeit der Investition für den Infrastrukturbetreiber errechnet werden. Auch für den Erdwärmeplaner ist es wichtig, einen möglichen Kostenrahmen für zukünftige Bauteilentwicklungen zu ermitteln.

Im Rahmen der Unternehmenssimulation für ein Unternehmen Erdwärme zeigt sich, dass die Amortisationszeit maßgeblich vom Erdwärme- und Kälteverkaufspreis abhängt. Unter Berücksichtigung der derzeitigen Gewerbestrompreise (www.e-control.at), welche für den Betrieb der Erdwärmeanlage maßgeblich sind, liegt die Amortisationszeit von Tunnelthermie® Anlagen zwischen 15 und 25 Jahren. Ein für den Betreiber akzeptabler Wert ist derzeit bei einem Erdwärmeverkaufspreis zwischen 9 und 12 Eurocent/kWh zu finden. Ein Ansteigen der Energiepreise in der Zukunft lässt Erdwärme jedoch zunehmend günstiger erscheinen [9].

Abb. 8: Langzeitsimulation einer Erdwärmeanlage in einem Eisenbahntunnel für Heizen bzw. Heizen & Kühlen. Es zeigt sich, dass es lediglich in den ersten 4 Jahren zu einem leichten Absinken der Dauerleistung kommt, welche danach konstant bleibt.

Langzeitsimulation einer Erdwärmeanlage



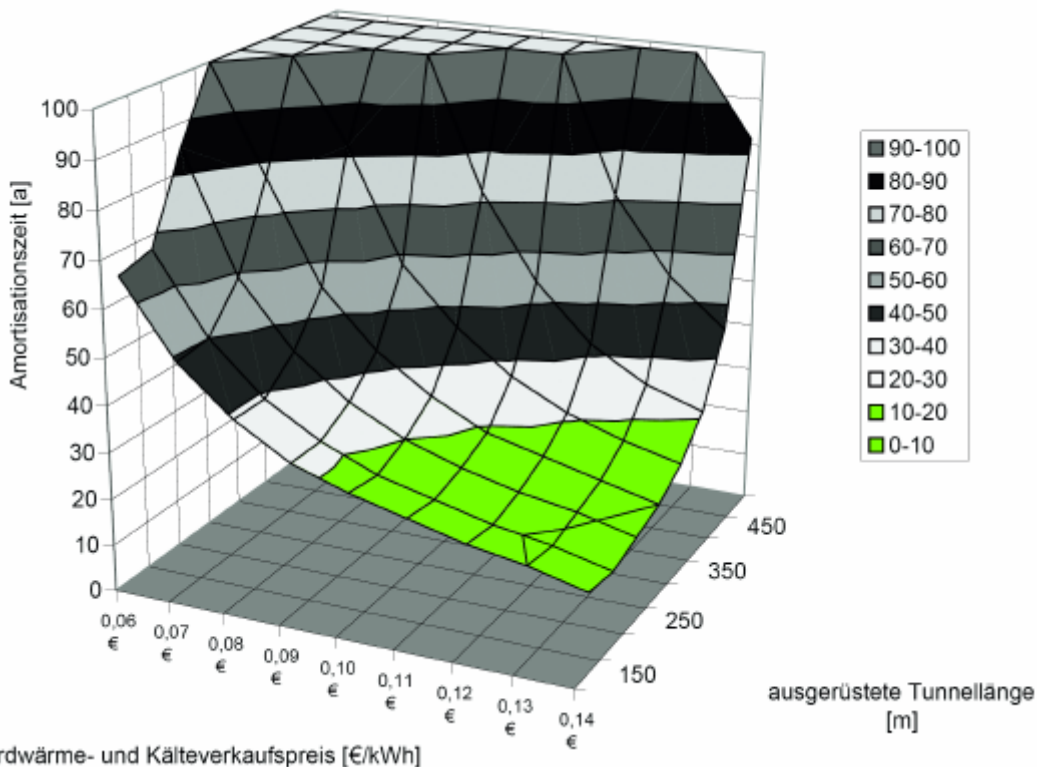


Abb. 9: Amortisationszeit unter Variation des Erdwärme- und Kälteverkaufspreises und der ausgerüsteten Tunnellänge. Der hellgrün hinterlegte Bereich bezeichnet die Zone einer möglichen Preisgestaltung.

5 Zusammenfassende Betrachtung

Solange die Errichtungskosten einer Geothermie Anlage im Vergleich zu konventionellen Systemen relativ hoch sind, amortisieren sich Anlagen dieser Art erst nach längeren Zeiträumen. Erdwärmeeanlagen an der Verkehrsinfrastruktur sind jedoch für alle Beteiligten ein neues Betätigungsfeld, womit eine zukünftige Kostenreduktion für alle Anlagenteile zu erwarten ist.

Unter den heutigen technischen Voraussetzungen und aktuellen Herstellungs- und Energiekosten scheint eine Amortisationszeit von etwa 20 Jahren realistisch. Der sofortige Gewinn bei der Nutzung dieser Technologie ist der Erhalt eines umweltfreundlichen Heiz- und Kühlsystems, welches, wenn man vom Anteil der fossilen Brennstoffe zur Stromerzeugung absieht, kein CO₂ oder andere Luftschadstoffe produziert. Unter dem Aspekt einer steigenden Volatilität der Energiepreise wird die Anwendung derartiger Systeme sowohl für den Infrastrukturbetreiber als auch für Anrainer und vor allem für die Umwelt von großem Interesse und Nutzen sein.

6 Literatur

- [1] Rybach, L.: Tunnelwärmenutzung: Grundlagen und Beispiele aus der Schweiz. In 4. Wiener Eisenbahnkolloquium. 2006. Wien, Eurailpress Tetzlaff Verlag.
- [2] Brandl, H.; Markiewicz, R.: Die Nutzung geothermischer Energie im Bauwesen. Zement+Beton, 2002 (4/02).
- [3] Adam, D.; Markiewicz, R.: Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile – Teil 1: Theoretische Grundlagen. Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 2002. 147 (4).
- [4] Adam, D.; Markiewicz, R.: Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile – Teil 2: Experimentelle Untersuchungen und Computersimulationen. Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 2002. 147 (5).
- [5] COMSOL: FEMLAB 3.1 – User's Guide. 2004.
- [6] Adam, D.; Markiewicz, R.: Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile – Teil 3: Ausführungsbeispiele und Neuentwicklungen. Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 2003. 148 (1).
- [7] 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. 2004, Technische Universität Wien. S. 333.
- [8] Rybach, L.: Geothermal energy: sustainability and the environment. Geothermics, 2003. 32: S. 463–470.
- [9] Oberhauser, A.: Wirtschaftlichkeitsaspekte der Tunnelthermie®. In 4. Wiener Eisenbahnkolloquium. 2006. Wien, Eurailpress Tetzlaff Verlag.