



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESÖV 2050)

Potenzial geothermischer Weichenheizungen in der Schweiz

Studie 041: Standortbedingungen für den Einsatz von geothermischen Weichenheizungen

Studie 065: Potenzialbestimmung für geothermische Weichenheizungen in der Schweiz

Schlussbericht

Dr. Andrea Grüniger, Grüniger PLUS GmbH

Flurweg 2a, 5034 Suhr, info@grueniger-plus.ch, www.grueniger-plus.ch

Dr. Sarah Signorelli, Dr. Thomas Mégel, Geowatt AG

Dohlenweg 28, 8050 Zürich, info@geowatt.ch, www.geowatt.ch

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

CH-3003 Bern

Programmverantwortung

Tristan Chevroulet, (BAV)

Projektnummer: 078000027 / 0780000278

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

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

Bern, den 06.09.2016

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	3
Kurzfassung.....	4
Résumé sommaire	4
Executive Summary	5
Zusammenfassung.....	6
Résumé.....	10
1 Einführung	14
1.1 Ausgangslage.....	14
1.2 Ziel der Arbeit	15
1.3 Abgrenzung der Arbeit	16
2 Aktueller Wissensstand.....	17
2.1 Weichenheizungen in der Schweiz	17
2.2 Geothermie in der Schweiz	19
2.3 Geothermische Weichenheizungen	19
2.3.1 Funktionsweise.....	19
2.3.2 Systeme mit Wärmepumpe	21
2.3.3 Systeme ohne Wärmepumpe.....	22
3 Methodik.....	24
3.1 Erarbeitung der Beurteilungskriterien.....	24
3.2 Vorgehen für quantitative GIS-Auswertung.....	24
3.3 Datenerhebung.....	24
3.3.1 Involvierte Bahnunternehmen	24
3.3.2 Standortkoordinaten der Weichenheizungen	25
3.3.3 Bewilligungszonen.....	26
3.3.4 Gleisachsen.....	27
3.3.5 Parzellengrenzen.....	27
3.3.6 Gewässernetz und Gebäude.....	28
4 Ergebnisse	29
4.1 Definition der Beurteilungskriterien	29
4.2 Quantitative Auswertung	31
4.2.1 Theoretisches Potenzial	31
4.2.2 Erschliessbares Potenzial	36
5 Diskussion	43
6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	45
6.1 Potenzial der Standorte	45

6.2 Energiesparpotenzial..... 45

6.3 Einsatzgrenzen geothermischer WHZ..... 46

6.4 Förderung geothermischer WHZ in der Schweiz 46

 6.4.1 Hemmnisse..... 46

 6.4.2 Förderung von F&E-Projekten..... 46

 6.4.3 Förderung von Demonstrationsanlagen 47

 6.4.4 Förderung von Erfahrungsaustausch 47

7 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis 48

8 Literaturverzeichnis 49

9 Anhang 50

Danksagung

Die vorliegende Studie wurde durch das Bundesamt für Verkehr (BAV) im Rahmen des Programms Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESÖV 2050) finanziert. Wir möchten uns beim Programmleiter Dr. Tristan Chevroulet und dem Projektleiter Dr. Stefan Schnell herzlich für diesen Auftrag und das in uns gesetzte Vertrauen bedanken.

Ebenso gilt unser grosser Dank den Teilnehmern des Expertenworkshops Hermann Willi, Rolf Guldenfels, Matthias Rücker, Daniel Föhn, Urs Guggisberg, Markus Bauhofer und Peter Güldenapfel, welche mit ihren fachlichen Hinweisen viel zum Gelingen dieser Studie beigetragen haben.

Weiter möchten wir uns bei allen Bahnunternehmen und ihren Vertretern bedanken, welche uns bereitwillig und in unkomplizierter Weise die benötigten Daten zur Verfügung gestellt haben. Wir wurden unterstützt durch die SBB, BLS, RhB, MGB und die SOB. Ohne diese Hilfe hätte diese Studie nicht durchgeführt werden können.

Kurzfassung

In der Schweiz werden pro Jahr durchschnittlich 60 bis 70 GWh Energie für Weichenheizungen verbraucht. In der Regel werden elektrische Widerstandsheizungen oder Gasweichenheizungen eingesetzt. Weichen können aber auch geothermisch beheizt werden, was den Energieverbrauch signifikant senkt. In Deutschland wurden in den letzten Jahren rund 30 geothermische Weichenheizungen in Betrieb genommen. In der Schweiz existiert bisher noch keine solche Anlage.

Das Ziel des vorliegenden Projekts ist, das Potenzial der geothermischen WHZ für die Schweiz abzuschätzen. In einem ersten Schritt wurden Kriterien festgelegt, welche die Eignung eines Weichenheizungsstandorts für geothermische Beheizung definieren. Anhand dieser Kriterienliste wurden anschliessend rund 8600 bestehende Weichenheizungsstandorte beurteilt. Dies erfolgte anhand einer automatisierten Auswertung auf GIS-Basis. Berücksichtigt wurden Bewilligungszonen, Abstände von Gewässern, Abstand vom Gleisbereich, bestehende Gebäude sowie Landbesitzverhältnisse.

Die Auswertung zeigt, dass rund die Hälfte der bisherigen Standorte für eine geothermische Beheizung in Frage kommen. Die grösste Einschränkung entsteht durch kantonale geregelte Verbotszonen für Erdwärmesonden. Ca. 40% der Standorte liegen in solchen Verbotszonen. Aufgrund der Studienresultate gibt es keine Hinweise dafür, dass die geothermische Beheizung von Weichenheizungen in der Schweiz nicht tauglich wäre.

Im Gebäudebereich hat sich die Nutzung der Geothermie zu Heiz- und Kühlzwecken seit längerem etabliert. Bei ca. 25% der Neubauten in der Schweiz werden Erdwärmesonden eingesetzt. Wenn bei den Weichenheizungen längerfristig auch ein Viertel des Bestandes durch geothermische Weichenheizungen ersetzt werden würde, könnten schätzungsweise rund 20% der benötigten Energie (bezogen auf alle Weichenheizungen in der Schweiz) eingespart werden.

Eines der grössten Hindernisse für die Verbreitung der Technologie sind die vergleichsweise hohen Investitionskosten bei gleichzeitig tiefen Energietarifen. Dazu kommen psychologische Hemmnisse und fehlendes Grundwissen über die physikalischen Vorgänge an der Weiche. Die Studie empfiehlt, dass mit einer entsprechenden Förderstrategie die Realisierung von geothermischen Weichenheizungen angestossen werden soll.

Résumé sommaire

En Suisse, le chauffage d'aiguillage ferroviaire consomme en moyenne 60 à 70 GWh d'énergie par an. En général, cette demande est satisfaite par des installations de chauffage électrique à résistance ou de chauffage au gaz. Les systèmes d'aiguillage pourraient aussi être chauffés par des sources géothermiques, ce qui réduirait significativement la consommation énergétique. En Allemagne, c'est le cas pour environ 30 installations qui ont été mises en service dans les dernières années. Il n'y a pour l'instant pas de telle installation en Suisse.

L'objectif du présent projet est l'estimation du potentiel du chauffage géothermique des systèmes d'aiguillage en Suisse. Dans un premier temps, des critères définissant si l'emplacement de l'aiguillage est adapté au chauffage géothermique ont été choisis. Environ 8600 aiguillages existants ont été analysés suivant ces critères. L'analyse a été réalisée par une évaluation automatique basée sur un SIG. Les zones d'autorisation, les distances aux cours d'eau, la distance à la zone de voie, les bâtiments existants ainsi que les propriétés foncières ont été considérés pendant l'analyse.

L'évaluation montre qu'environ la moitié des emplacements sont des candidats potentiels pour un chauffage géothermique. La contrainte la plus importante est due aux zones interdiction de forage géothermique, soumises aux cantons. Environ 40% des emplacements se situent dans de telles zones. D'après les résultats de l'étude, il n'y pas d'indication que le chauffage géothermique d'aiguillage ne serait pas adapté en Suisse.

Dans le domaine du bâtiment, l'utilisation de sources géothermiques à des fins de chauffage et de climatisation est depuis longtemps établie. Environ 25% des nouvelles constructions en Suisse comprennent des sondes géothermiques. A long terme, si un quart des chauffages d'aiguillages étaient remplacée par des chauffages géothermiques, environ 20% de la consommation énergétique (totale des chauffages d'aiguillages suisses) pourrait être économisée. L'un des plus gros obstacles pour la dissémination de cette technologie sont des coûts d'investissement relativement élevés combinés à des coûts énergétiques actuellement bas. A ceci s'ajoutent des barrières psychologiques et une connaissance insuffisante des processus physiques d'aiguillage ferroviaire. Une stratégie de soutien adaptée permettrait de déclencher la réalisation de chauffages géothermiques d'aiguillages ferroviaires.

Executive Summary

The energy consumption of railway switch point heaters in Switzerland amounts up to 60 to 70 GWh during the course of an average winter. Generally, electrical resistance heaters or gas heaters are used. It is, however, possible to use geothermal energy for switch point heating, which could reduce the energy consumption significantly. In the last years, around 30 geothermal switch point heaters were built in Germany but there is none in Switzerland so far.

This study aims to provide an estimation of the potential of geothermal switch point heaters in Switzerland. First, it had to be defined which factors are decisive for the suitability of a switch point position for geothermal heating. Thereafter, the positions of around 8600 switch point heaters were examined with an automatic GIS-analysis. In this analysis, prohibition zones for borehole heat exchangers, distance to waters and to rails, buildings and boundary of parcels were considered.

The analysis shows that about half of the positions of the existing switch point heaters in Switzerland would be suitable for geothermal heating. The main restriction results from the prohibition zones for borehole heat exchangers. Around 40% of the switch points are located in such zones. Nevertheless, the study did not reveal any hint that geothermal switch point heating is not suitable in Switzerland.

In the field of building technology, the use of geothermal energy for heating as well as cooling purposes is widespread. In nearly 25% of the new buildings in Switzerland borehole heat exchangers are used. If the same percentage of the switch point heaters were replaced by a geothermal heating, the energy consumption of all switch point heaters in Switzerland could be reduced by about 20%.

One of the main obstacles for the development of this technology in Switzerland are the relatively high investment costs and the currently low energy costs. Furthermore, there are psychological barriers as well as a lack of understanding of the physical processes at the rail. For a successful development strategy, these points have to be considered.

Zusammenfassung

Die Schweiz hat sich zum Ziel gesetzt, ihren CO₂-Ausstoss bis zum Jahr 2020 im Vergleich zum Jahr 1990 um 20% zu senken. Dazu sind erhebliche Anstrengungen nötig. Im Rahmen der Energiestrategie Öffentlicher Verkehr (ESÖV) 2050 ist auch der Bereich Weichenheizungen ein identifizierter Ansatzpunkt. Erhebungen aus dem Jahr 2014 ergaben, dass in der Schweiz zwischen 10'000 und 11'000 Weichenheizungen (WHZ) betrieben und dafür in einem klimatisch durchschnittlichen Winter ca. 60–70 GWh an Endenergie verbraucht werden. Durch Effizienzmassnahmen bei der SBB, welche eine Mehrheit dieser WHZ betreibt, dürfte der Gesamtenergieverbrauch in den letzten zwei Jahren etwas gesunken sein, es gibt dazu allerdings keine aktuellen Zahlen.

Neben Effizienzmassnahmen bei den bestehenden, mit Strom oder Gas betriebenen WHZ könnten geothermische WHZ den Energieverbrauch signifikant senken. Schätzungen zufolge liegt der Stromverbrauch bei geothermischen Systemen mit Wärmepumpe um bis zu 75% tiefer als bei konventionellen elektrischen WHZ. Es gibt sogar Pilotprojekte mit passiven geothermischen Systemen, welche keine zusätzliche Energie benötigen. In Deutschland wurden in den letzten Jahren rund 30 geothermische Weichenheizungen in Betrieb genommen. In der Schweiz existiert bisher noch keine solche Anlage. Hinsichtlich des Energieverbrauchs bieten die geothermischen Weichenheizungen offensichtliche Vorteile. Allerdings ist das Potenzial dieser Technologie beim Schweizerischen Schienennetz eine offene Frage, da verschiedene Standortbedingungen berücksichtigt werden müssen. Im vorliegenden Projekt soll daher das Potenzial der geothermischen WHZ für die Schweiz abgeschätzt werden, indem bestimmt wird, wie hoch der maximale Anteil der WHZ-Standorte ist, der mit geothermischen Weichenheizungen ausgerüstet werden könnte. Die Studie fokussiert auf die Eignung der Standorte für geothermische Beheizung. Die technologische Machbarkeit wird dabei als gegeben angenommen und es werden keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen vorgenommen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten geothermische Energie verfügbar zu machen. In der Schweiz haben sich Erdwärmesondensysteme gegenüber den anderen geothermischen Anwendungen durchgesetzt. In der vorliegenden Studie werden deshalb nur Weichenheizungen mit Erdwärmesondensystemen betrachtet, da dieses System ein weit verbreiteter Stand der Wärmetechnik und die planbarste geothermische Nutzungsart darstellt. Grundwasser oder Tunnelwasser könnten zwar auch für WHZ genutzt werden. Aufgrund ihres geringen Anteils an der gesamten Heizenergieproduktion (ca. 12%) und aufgrund der schlechten Planbarkeit stellen sie aber einen Sonderfall dar und wurden daher nicht in die quantitative Analyse einbezogen. In diesem Sinne wird das Potenzial konservativ geschätzt.

In der ersten Phase der Studie wurden die Kriterien erarbeitet, welche es erlauben zu beurteilen, ob an einem Standort eine geothermische Weichenheizung grundsätzlich realisierbar ist. Dazu wurde unter anderem ein Workshop mit einem Expertengremium durchgeführt. Es wurden verschiedene Aspekte diskutiert, die für die Realisierbarkeit einer geothermischen Weichenheizung wichtig sind. Dazu gehören:

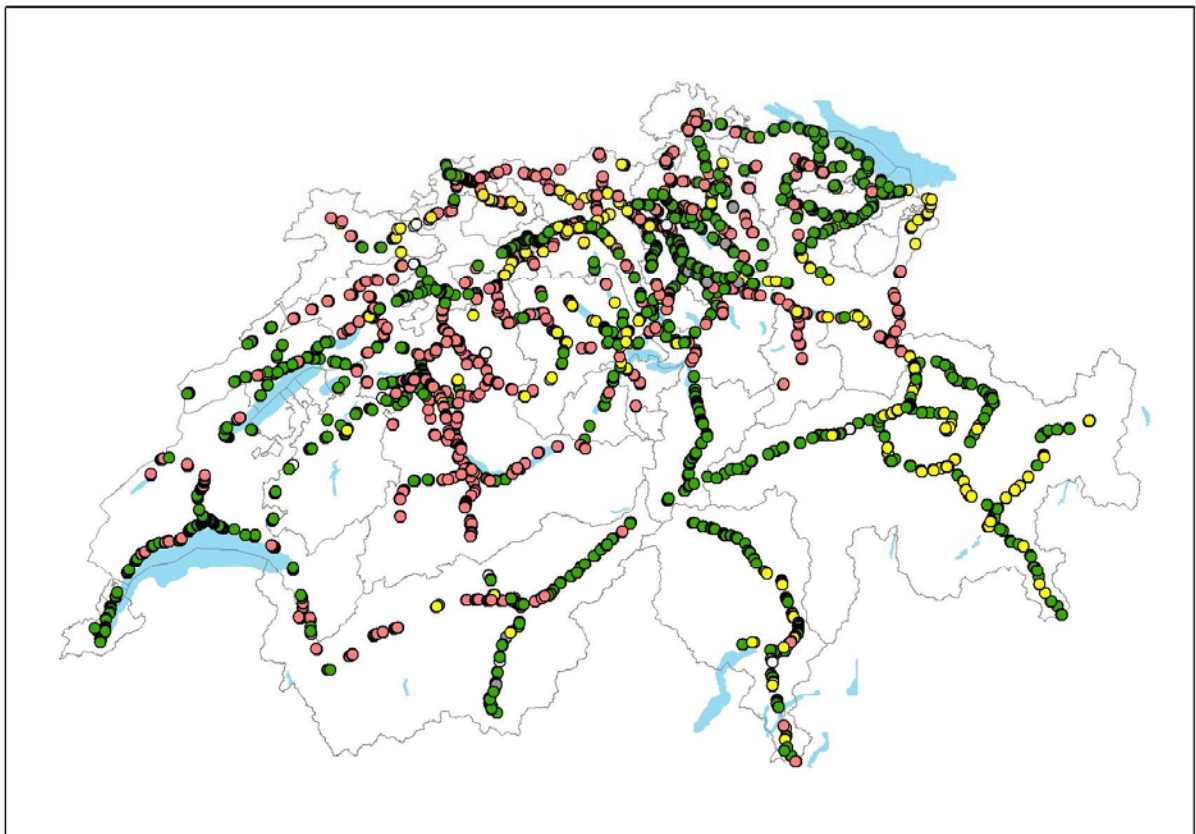
- Bewilligungszonen für Erdwärmesonden
- Parzellengrenzen (Landbesitzverhältnisse)
- Abstand zu Gewässern
- Abstand von Erdwärmesondenbohrung zu Gleisbereich
- Platzverhältnisse

Diese Aspekte wurden für die nachfolgende GIS-Analyse berücksichtigt. Dazu kommen weitere Aspekte, welche für die konkrete Umsetzung zu berücksichtigen sind und allenfalls die Wirtschaftlichkeit des Projektes beeinflussen, aber in der Schweiz in der Regel keine «Killerkriterien» darstellen:

- Geologische Verhältnisse
- Abstand zu Nachbarparzelle
- Höhenlage/Klima
- Technische Faktoren
- Wirtschaftliche Faktoren

Aufgrund der grossen Anzahl an WHZ in der Schweiz wurde die Standortanalyse automatisiert durchgeführt (mit ArcGIS). Dabei wurden die definierten Eignungskriterien auf die einzelnen Standorte der heutigen Weichenheizungen angewendet. Die notwendigen Daten wie Standortkoordinaten der WHZ, Gleisachsen und Parzellengrenzen der Bahnen wurden von 5 Schweizer Bahnunternehmen erhoben, welche zusammen über 80% des Schweizer Schienennetzes abdecken. Rund 8600 Standorte von bestehenden WHZ der SBB, BLS, RhB, MGB sowie SOB konnten so analysiert werden. Die kantonal geregelten Bewilligungszonen für Erdwärmesonden wurden von den meisten Kantonen digital zur Verfügung gestellt. Wenn nicht, wurden die Standorte entweder über zugängliche Online-Karten oder über die Grundwasserschutzzonen «manuell» beurteilt. Die Lage von Gewässern und Gebäuden wurde aus dem Topografischen Landschaftsmodell der Schweiz (swissTLM^{3D}) extrahiert.

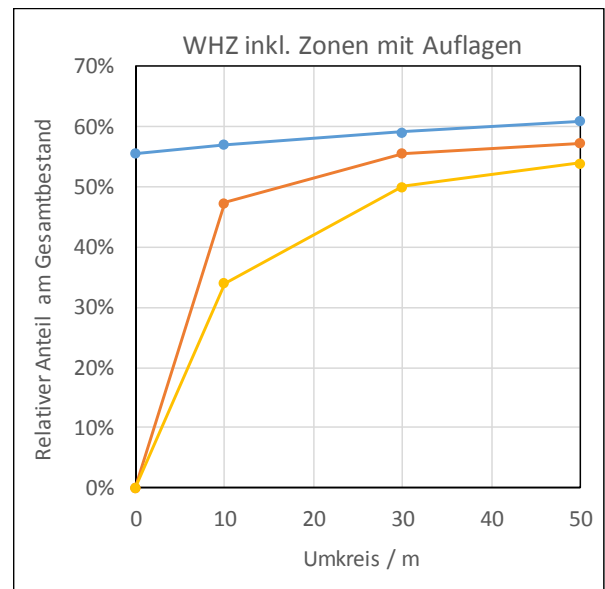
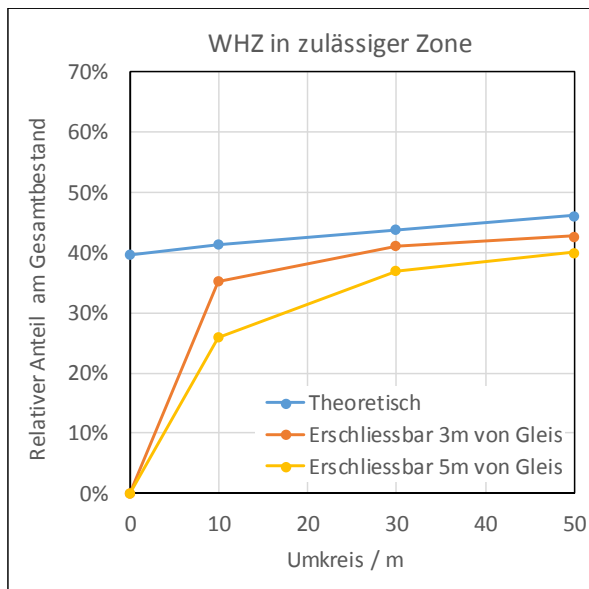
In einem ersten Schritt wurde das **Theoretische Potenzial** bestimmt. Darin wurde für jede WHZ bestimmt, ob am Standort gemäss Bewilligungskarte eine Erdwärmesondenbohrung zulässig ist. Dies ist eine Grundvoraussetzung dafür, dass eine geothermische WHZ bewilligungsmässig überhaupt realisiert werden kann. Für die Bestimmung des **Erschliessbaren Potenzials** wurden weitere Kriterien miteinbezogen wie der minimale Abstand der Erdwärmesondenbohrung von der Schienenachse, die Parzellengrenzen, die Gebäudegrundrisse und der minimale Abstand zu Gewässern. Da für die Platzierung der Bohrung eine gewisse Flexibilität besteht, wurde über eine Abstandsanalyse nicht nur der Standort der WHZ, sondern auch die Zone im Umkreis von bis zu 50 m analysiert. So ist es beispielsweise möglich, dass die Weiche selber nicht innerhalb einer Bewilligungszone liegt, aber im Umkreis von 50 m ein Bereich zu finden ist, wo gebohrt werden darf. Die folgende Abbildung gibt einen grafischen Überblick über die Eignung der ausgewerteten Standorte in der Schweiz. Die Standorte wurden in die fünf Stufen «zulässig» (grün), «zulässig mit Auflagen oder weiteren Abklärungen» (gelb), «nicht zulässig» (rot), im Gleisbereich (grau) oder «nicht auf eigener Parzelle» (weiss) eingeteilt.



Grafische Übersicht über Eignung der WHZ Standorte in der Schweiz für geothermische Beheizung (Erschliessbares Potenzial bei 50m Abstandstoleranz von Weiche und mindestens 3 m Abstand zur Gleisachse für die Erdwärmesondenbohrung)

Die grösste Einschränkung entsteht durch die kantonal geregelten Verbotszonen für Erdwärmesonden. Rund 40% der Standorte liegen in solchen Verbotszonen. Wenn eine WHZ in einer Zone liegt, in der es grundsätzlich erlaubt ist, Erdwärmesonden zu errichten, sind die weiteren einschränkenden Kriterien wie Minimalabstand vom Gleisbereich, Abstand zu Gewässern, Landeigentum etc. meist kein Hindernis für eine Realisierung. Voraussetzung dafür ist eine gewisse Flexibilität bezüglich Abstand der Erdwärmesonde zur WHZ. Aufgrund der unterschiedlichen Handhabung der Bewilligungspraxis in den Kantonen gibt es deutliche regionale Unterschiede. Sehr restriktiv ist insbesondere der Kanton Bern. Aufgrund dieser Unterschiede unterscheiden sich auch die Potenziale der verschiedenen Bahnunternehmen. Tendenziell liegen im Mittelland mehr Standorte in Verbotszonen als in den Alpengebieten.

Unter der Vorgabe von mindestens 3 m Abstand zur Gleisachse und maximal 50 m Abstand vom Sonde zur Weiche liegt der durchschnittliche Anteil der erschliessbaren Standorte bei 43%. Werden die Standorte mit Auflagen einbezogen, sind es total 58%. Wenn die Vorgabe zum Gleisabstand auf mindestens 5 m angehoben wird, sinken die Anteile auf 40% bzw. 54%. Ebenso sinken die Anteile, wenn der Umkreisradius verringert wird. Da im Gleisbereich per Definition nicht gebohrt werden darf, liegt das erschliessbare Potenzial am Standort selber (Umkreisradius null) folglich bei null. Aus diesen Resultaten lässt sich folgern, dass je nach Voraussetzungen und Flexibilität am Standort rund die Hälfte der bisherigen WHZ Standorte für eine geothermische Beheizung in Frage kommen. Es gibt keine Hinweise dafür, dass geothermische WHZ in der Schweiz wegen der geografischen Lage nicht geeignet wären. Klar ist andererseits jedoch auch, dass sie keine flächendeckende Lösung darstellen, sondern als energieeffiziente und umweltschonende Ergänzung zu den bisher verwendeten Technologien zu sehen sind.



Zusammenfassung der Theoretischen und Erschliessbaren Potenziale mit variablem Umkreisradius

Im Bereich der Gebäudetechnik haben sich Erdwärmesonden in den letzten Jahrzehnten in der Schweiz zur Standardtechnologie entwickelt. Bei rund einem Viertel aller Neubauten werden Erdwärmesonden verwendet. Dies zeigt, dass das entsprechende Knowhow in der Schweiz vorhanden ist. Für den Bereich der Weichenheizungen kann dieses technologische Wissen genutzt werden, zumindest was die Erdwärmesonde und die Wärmepumpe betrifft. Erfahrungslücken bestehen bei den Wärmeübertragern an der Schiene und der Anpassung der Steuerung. Die Haupthemmnisse für eine weitere Verbreitung der geothermischen WHZ sind jedoch das momentan schwierige wirtschaftliche Umfeld für Energieeffizienzprojekte (tiefen Energiepreise) sowie psychologische Faktoren (z.B. Skepsis gegenüber «neuen» Technologien).

Eine Prognose zur Entwicklung dieser Technologie und deren Verbreitung in der Schweiz in den nächsten Jahrzehnten ist schwierig. Sie wird hauptsächlich von der Entwicklung der Energiepreise sowie vom politischen Willen, die Energieziele der Energiestrategie 2050 zu verfolgen, abhängen. Wenn – in Anlehnung an den Neubaumarkt im Gebäudebereich – längerfristig ca. 25% aller bestehenden WHZ in der Schweiz durch geothermische WHZ ersetzt werden würden, könnten unter verschiedenen Annahmen

pro Jahr rund 12.6 GWh eingespart werden. Dies sind 21% der gemäss Stand 2014 verbrauchten Energie (60 GWh). Bei den aktuellen Energietarifen entspricht dies jährlich eingesparten Energiekosten von rund 1.1 Mio CHF und einer CO₂-Reduktion von ca. 2000 t. Es muss dabei immer berücksichtigt werden, dass der Energieverbrauch der WHZ stark vom klimatischen Verlauf des Winters abhängt und diese Werte daher Durchschnittswerte darstellen.

Résumé

La Suisse a pour objectif de diminuer de 20% ses émissions de CO₂ d'ici 2020 par rapport à 1990. Pour ce faire, des efforts considérables sont nécessaires. Dans le cadre de la stratégie énergétique 2050 des transports publics, une marge de manœuvre a été identifiée dans le domaine des chauffages d'aiguillage ferroviaire. Selon des données relevées en 2014, entre 10'000 et 11'000 chauffages d'aiguillage sont en service en Suisse. Dans un hiver aux températures classiques, leur exploitation représente une consommation d'énergie finale d'environ 60 à 70 GWh. Grâce aux mesures d'efficacité énergétique engagées par les CFF qui exploitent la plupart de ces chauffages d'aiguillage, la consommation totale d'énergie a légèrement diminué ces deux dernières années, mais il n'y a pas de chiffres actuels à ce sujet.

En plus des mesures d'efficacité énergétique mises en œuvre avec les chauffages d'aiguillage fonctionnant au gaz ou à l'électricité, les chauffages géothermiques d'aiguillage pourraient permettre une diminution notable de la consommation d'énergie. Selon les estimations, la consommation électrique des systèmes géothermiques avec pompe à chaleur est jusqu'à 75% inférieure à celle des chauffages électriques d'aiguillages conventionnels. Il existe même des projets pilotes avec des systèmes géothermiques qui ne nécessitent aucune énergie supplémentaire. En Allemagne, environ 30 chauffages géothermiques d'aiguillage ont été mis en service au cours de ces dernières années. En Suisse, il n'existe pas encore d'installation de ce type. Pourtant, les chauffages géothermiques offrent des avantages évidents en termes de consommation d'énergie. Cependant, le potentiel de cette technologie sur le réseau ferroviaire suisse reste une question en suspens car différentes conditions-cadres doivent être prises en compte. Par conséquent, le présent projet a pour but d'évaluer le potentiel du chauffage géothermique d'aiguillage en Suisse. Il détermine notamment quel est le pourcentage maximal d'emplacements de chauffages d'aiguillage qui pourraient être dotés de chauffages géothermiques. Un aspect central de cette étude consiste à déterminer si les sites sont adaptés à un chauffage géothermique. La faisabilité technologique est considérée comme garantie et aucune considération de rentabilité n'est prise en compte.

Différentes possibilités existent pour garantir un approvisionnement en énergie géothermique. En Suisse, les sondes géothermiques se sont imposées par rapport aux autres applications géothermiques. Cette étude prend uniquement en compte les chauffages d'aiguillage avec sondes géothermiques car ce système représente une technique de chauffage très répandue et constitue le type d'utilisation géothermique pouvant être le mieux planifié. Les eaux souterraines ou les eaux de tunnel peuvent certes être utilisées pour les chauffages d'aiguillage. Cependant, ces sources d'énergie représentent une faible part dans la production totale d'énergie thermique (environ 12%) et sont difficiles à planifier. Elles sont donc un cas particulier et n'ont pas été prises en compte dans l'analyse quantitative. Le potentiel est donc estimé de manière prudente.

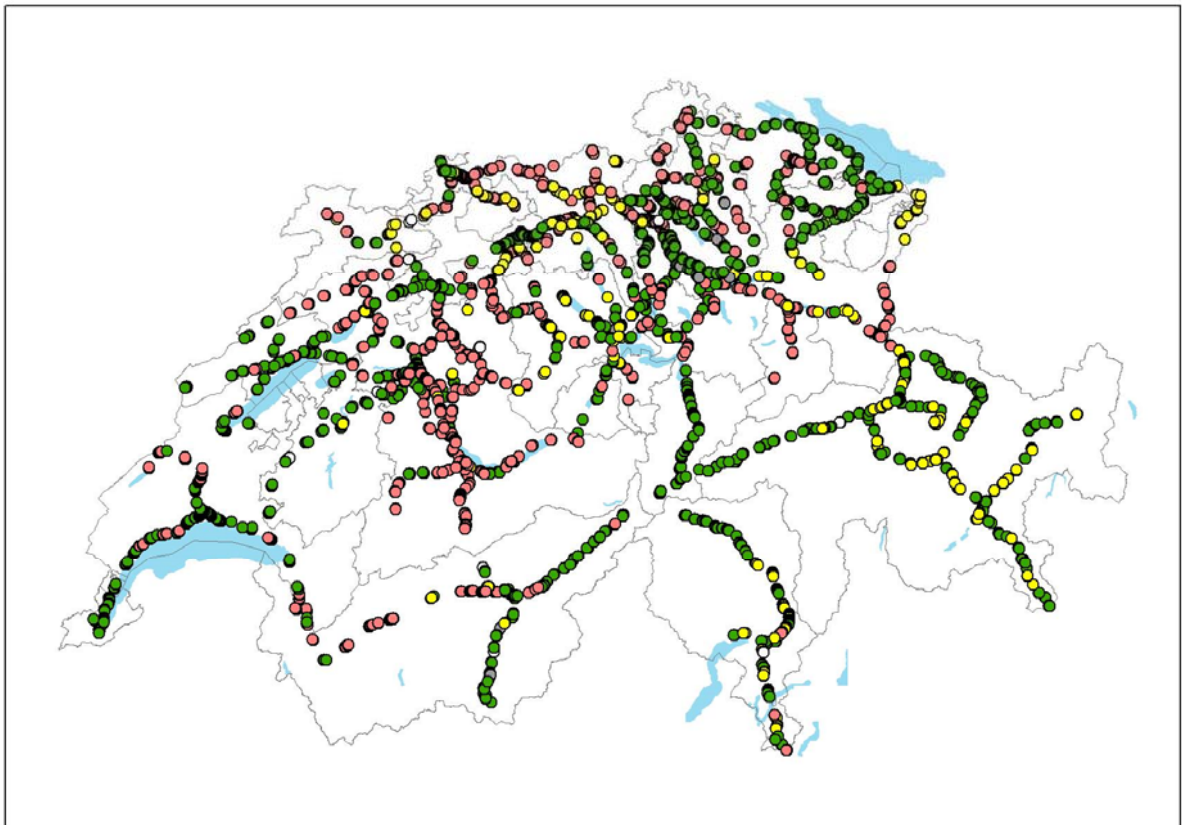
Au cours de la première phase de l'étude, nous avons élaboré les critères qui nous permettent d'évaluer si l'installation d'un chauffage géothermique d'aiguillage est possible sur un emplacement donné. Un atelier avec un comité d'experts a notamment été organisé. Dans ce cadre, différents aspects importants pour la faisabilité d'un chauffage géothermique d'aiguillage ont été abordés. Parmi ces aspects figurent notamment les points suivants:

- zones autorisées pour les sondes géothermiques
- limites de parcelles (conditions d'occupation des sols)
- distance par rapport aux eaux
- distance entre le forage pour sonde géothermique et les voies de chemin de fer
- place disponible.
-

Ces aspects ont été pris en compte dans l'analyse SIG effectuée ensuite. À cela s'ajoutent d'autres aspects qui doivent être pris en compte dans la mise en œuvre concrète et qui peuvent éventuellement influencer sur la rentabilité du projet. Ces aspects ne sont toutefois pas des critères d'exclusion en Suisse:

- conditions géologiques
- distance par rapport à la parcelle voisine
- altitude/climat
- aspects techniques
- aspects économiques

En raison du nombre élevé de chauffages d'aiguillage en Suisse, l'état de lieux a été effectué de manière automatisée (avec ArcGIS). Les critères d'aptitude définis ont été appliqués à chaque emplacement actuel de chauffage d'aiguillage. Les données nécessaires comme les coordonnées de l'emplacement du chauffage d'aiguillage, les axes des voies et les limites de parcelle des chemins de fer ont été collectées par 5 entreprises de chemin de fer suisses qui couvrent plus de 80% du réseau ferroviaire national. Ainsi, environ 8600 emplacements de chauffage d'aiguillage ont été analysés par les CFF, BLS, RhB, MGB et SOB. La plupart des cantons ont fourni au format numérique les zones d'autorisation réglementées au niveau cantonal se rapportant aux sondes géothermiques. Lorsque cela n'était pas le cas, les emplacements ont été évalués soit via les cartes disponibles en ligne, soit «manuellement» via les zones de protection des eaux. La position des eaux et des bâtiments a été extraite à partir du modèle topographique du paysage de Suisse (swissTLM^{3D}).



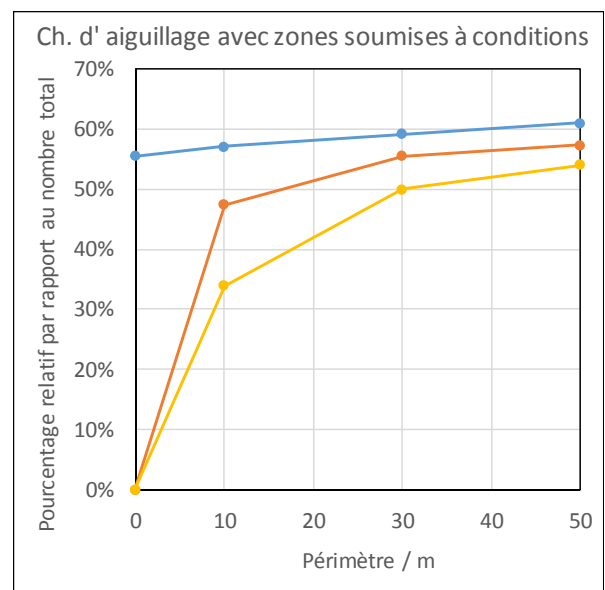
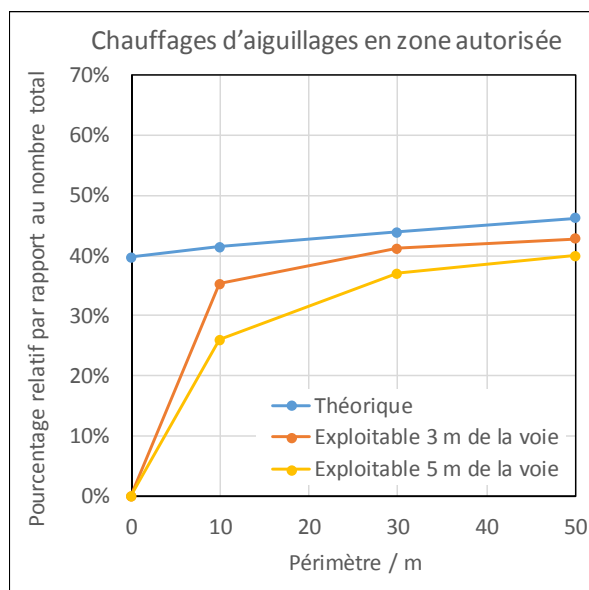
Représentation graphique de la capacité des emplacements de chauffage d'aiguillage en Suisse à être dotés d'un chauffage géothermique (potentiel exploitable dans un périmètre de 50 m autour de l'aiguillage et distance minimale de 3 m par rapport à l'axe des voies pour le forage pour sonde géothermique).

Dans un premier temps, le **potentiel théorique** a été défini. Pour chacun des chauffages d'aiguillage, nous avons déterminé si un forage pour sonde géothermique était autorisé sur la base de la carte indiquant les zones autorisées. Il s'agit d'une condition requise avant d'envisager l'installation d'un chauffage géothermique d'aiguillage dans le respect des autorisations. D'autres critères ont été pris en compte pour déterminer le **potentiel exploitable**: la distance minimale entre le forage pour sonde géothermique et l'axe des voies, les limites de parcelle, les plans de bâtiment et la distance minimale à

respecter par rapport aux eaux. Une certaine flexibilité existe pour l'emplacement du forage. Par conséquent, non seulement l'emplacement du chauffage d'aiguillage, mais un périmètre de 50 mètres autour de ce dernier ont été pris en compte dans l'analyse des distances. Ainsi, il se peut que l'aiguillage lui-même ne se trouve pas à l'intérieur d'une zone d'autorisation, mais qu'un forage soit autorisé dans un périmètre de 50 mètres autour de l'aiguillage. Dans l'illustration précédente, une vue d'ensemble graphique indique si les emplacements évalués sont autorisés en Suisse. Les emplacements ont été classés en cinq catégories: «autorisé» (vert), «autorisé avec conditions ou autres clarifications» (jaune), «non autorisé» (rouge), «dans la zone des voies» (gris) ou «par sur la propre parcelle» (blanc).

La principale restriction concerne les zones d'interdiction réglementées par les cantons s'appliquant aux sondes géothermiques. Environ 40% des emplacements de chauffage d'aiguillage se situent dans de telles zones. Si un chauffage d'aiguillage se trouve dans une zone dans laquelle les sondes géothermiques sont en principe autorisées, les autres critères restrictifs comme la distance minimale par rapport aux voies, la distance par rapport aux eaux, la propriété foncière, etc. ne sont pas des obstacles à la réalisation du projet. Pour cela, une certaine flexibilité est requise en ce qui concerne la distance entre la sonde géothermique et le chauffage d'aiguillage. Il existe de très fortes disparités régionales en raison des pratiques différentes en matière d'autorisation dans les cantons. Le canton de Berne est très restrictif. En raison de ces disparités, le potentiel des différentes entreprises de chemin de fer est également variable. De manière générale, les emplacements situés dans des zones d'interdiction sont plus nombreux dans le Plateau suisse que dans les zones alpines.

Le pourcentage moyen d'emplacements exploitables avec la géothermie est de 43%, après prise en compte de l'écart minimal de 3 m par rapport à l'axe de la voie et de la distance maximale de 50 m par rapport à l'aiguillage. Si l'on inclut les emplacements faisant l'objet de conditions, le chiffre atteint 58%. Si l'on relève à 5 m la distance prescrite par rapport aux voies, les pourcentages moyens des emplacements exploitables avec la géothermie baissent et atteignent respectivement 40% et 54%. Les pourcentages baissent également si l'on réduit le périmètre. Par définition, les forages dans la zone des voies est interdit. Par conséquent, le potentiel exploitable au niveau de l'emplacement du chauffage lui-même (périmètre de 0 m) est également nul. On peut déduire de ces résultats qu'environ la moitié des chauffages d'aiguillage actuels peuvent être dotés d'un chauffage géothermique, en fonction des conditions requises et de la flexibilité au niveau de l'emplacement. Aucun élément ne permet de prouver que les chauffages géothermiques d'aiguillage ne sont pas appropriés en Suisse en raison de la situation géographique. Il est évident que les chauffages géothermiques d'aiguillage ne peuvent être une solution pour l'ensemble du territoire. Ils doivent plutôt être perçus comme un complément écologique aux technologies actuelles.



Synthèse des potentiels théoriques et exploitables sur la base d'un périmètre variable

Dans le domaine de la technique du bâtiment, l'utilisation de sondes géothermiques s'est développée au cours des dernières décennies au point de devenir une technologie standard. Environ 25% des nouvelles constructions en Suisse utilisent des sondes géothermiques. Ce chiffre montre qu'un savoir-faire en la matière existe en Suisse. Ce savoir-faire peut être utilisé dans le domaine des chauffages d'aiguillage, tout du moins en ce qui concerne la sonde géothermique et la pompe à chaleur. En revanche, un déficit d'expérience existe en ce qui concerne les échangeurs de chaleur vers les voies et l'adaptation de la commande. À l'heure actuelle, les principaux obstacles à la généralisation des chauffages géothermiques d'aiguillage s'expliquent par la situation économique difficile que connaissent les projets dans le domaine de l'efficacité énergétique (les prix de l'énergie sont bas) et par des facteurs psychologiques (méfiance vis-à-vis des nouvelles technologies).

Il est difficile de faire des prévisions sur le développement de cette technologie et sur sa généralisation en Suisse dans les décennies à venir. Son succès dépendra principalement de l'évolution des prix de l'énergie et de la volonté politique à poursuivre les objectifs fixés dans le cadre de la stratégie énergétique 2050. Si, sur la base du marché des constructions neuves dans le secteur du bâtiment, env. 25% des chauffages d'aiguillage en Suisse étaient remplacés par des chauffages géothermiques, environ 12,6 Gwh pourraient être économisés par an, selon différentes estimations. Ceci représente 21% de l'énergie consommée par les chauffages d'aiguillage en 2014 (60 GWh). Sur la base des tarifs actuels de l'énergie, ceci représente une économie annuelle des coûts énergétiques d'environ 1,1 million de CHF et une réduction des émissions de CO₂ d'environ 2000 tonnes. Il faut tenir compte du fait que la consommation énergétique des chauffages d'aiguillage dépend grandement des conditions climatiques hivernales. Les données indiquées ici représentent donc des valeurs moyennes.

1 Einführung

1.1 Ausgangslage

Die Schweiz hat sich zum Ziel gesetzt, ihren CO₂-Ausstoss bis zum Jahr 2020 im Vergleich zum Jahr 1990 um 20% zu senken. Es sind dazu erhebliche Anstrengungen nötig, wie das Verfehlen des Reduktionsziels 2014 gezeigt hat. Im Rahmen der Energiestrategie Öffentlicher Verkehr (ESÖV) 2050 ist auch der Bereich Weichenheizungen ein identifizierter Ansatzpunkt. In der Schweiz werden zwischen 10'000 und 11'000 Weichenheizungen (WHZ) betrieben und dafür wird in einem klimatisch durchschnittlichen Winter gemäss einer Erhebung aus dem Jahr 2014 [1] ca. 60-70 GWh an Endenergie verbraucht. Durch Effizienzmassnahmen bei der SBB, welche eine Mehrheit dieser WHZ betreibt, dürfte der Gesamtenergieverbrauch in den letzten zwei Jahren etwas gesunken sein, es gibt dazu aber keine aktuellen Erhebungen.

Weichen werden beheizt, um ihre Funktionsfähigkeit auch bei winterlichen Verhältnissen zuverlässig und dauerhaft aufrecht zu erhalten. Durch Heizstäbe werden die Schienenelemente an den neuralgischen Stellen erwärmt und allfälliger Schnee oder Eis zwischen beweglichen Weichenteilen geschmolzen. Dabei ist stets zu beachten, dass der Zweck der WHZ nicht das Aufheizen der Schienenelemente ist, sondern das Schmelzen von Schnee und Eis. In der Regel werden in der Schweiz elektrische WHZ oder Gas-WHZ eingesetzt, wobei die elektrische WHZ den Standardfall darstellt. Im Gegensatz zu Heizsystemen im Gebäudebereich sind Weichenheizungen eine Nischenanwendung. Das kommerzielle Interesse an diesem Bereich ist dementsprechend eher gering. Für die Eisenbahnunternehmen steht die Zuverlässigkeit der Weichenfunktion im Vordergrund. Die Einführung von Neuentwicklungen ist eine grosse Herausforderung, da die Systeme schon einen hohen Ausreifungsgrad aufweisen müssen, um die gleiche Verfügbarkeit zu garantieren wie etablierte Systeme. Zudem ist der Bahnstromtarif in der Schweiz gegenwärtig sehr tief (ca. 11 Rp/kWh), was die Einführung von neuen energieeffizienten Technologien hemmt. Diesen ökonomischen Tatsachen stehen die Ziele der ESÖV 2050, wie z.B. die Steigerung der Energieeffizienz und Senkung des CO₂-Ausstosses entgegen. Es ist daher notwendig, in gewissen Bereichen unterstützend mit Fördergeldern einzugreifen, um den Einsatz von Weichenheizungstechnologien zu fördern, welche eine höhere Energieeffizienz aufweisen oder erneuerbare Energien verwenden.

Im Rahmen einer vom Bundesamt für Verkehr (BAV) in Auftrag gegebenen Übersichtstudie [1] wurde das Energiesparpotenzial von verschiedenen Massnahmen und neuen Technologien zur Weichenbeheizung abgeschätzt (Abb. 1). Dabei zeigte sich, dass geothermische WHZ, welche bisher in der Schweiz nicht eingesetzt werden, am energieeffizientesten arbeiten würden. Je nach gewähltem System liegt das Sparpotenzial gegenüber einer konventionellen elektrischen WHZ bei schätzungsweise 60-100%. Vor allem in Deutschland sind in den letzten Jahren einige geothermische WHZ-Anlagen gebaut worden. Die Hauptmotivation um elektrische WHZ zu ersetzen, dürfte dort vor allem beim hohen Bahnstromtarif liegen. Die Stromkosten werden bei der Deutschen Bahn mit über 0.50 €/kWh kalkuliert, etwa 5 mal höher als in der Schweiz.

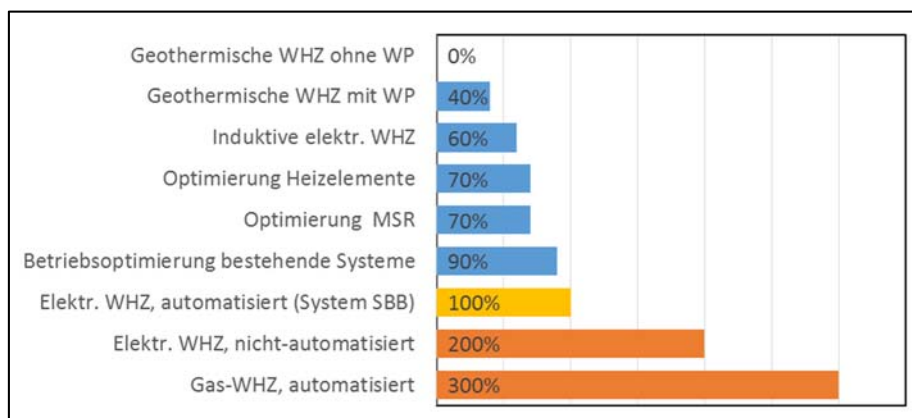


Abb. 1 Abschätzung des relativen Energieverbrauchs von verschiedenen Technologien bzw. Wirkung verschiedener Massnahmen im Vergleich zu einer elektrischen Weichenheizung, Stand 2014 [1].

Grundsätzlich eignet sich die Geothermie hervorragend für die energieeffiziente Gewinnung von Wärme, da sie unabhängig von Wind, Wetter und Sonneneinstrahlung jederzeit zur Verfügung steht. Vor allem Erdwärmesondensysteme bis 300 m Bohrtiefe haben sich in der Schweiz auch für Grossüberbauungen als Standardtechnik durchgesetzt. Wie Abb. 2 zeigt, werden zurzeit in der Schweiz jährlich gegen 2.5 Millionen Meter Erdwärmesonden gebohrt. Erdwärmesondenbohrungen können daher als ein weit verbreiteter Standard der Wärmetechnik (und zunehmend auch der Kältetechnik) angesehen werden.

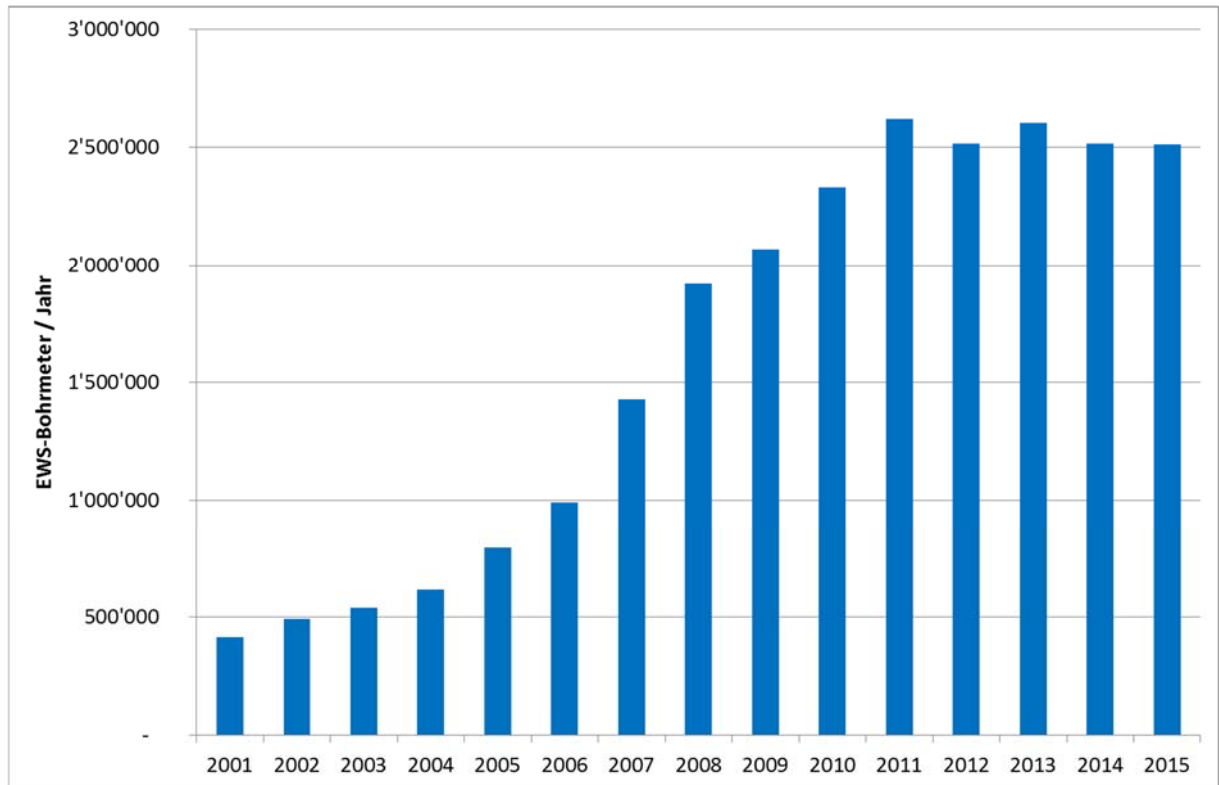


Abb. 2 Jährliche Bohrmeter an Erdwärmesonden in der Schweiz, nach [2]

Hinsichtlich des Energieverbrauchs bieten die geothermischen Weichenheizungen offensichtliche Vorteile. Allerdings ist das Potenzial dieser Technologie beim Schweizerischen Schienennetz eine offene Frage, da einige Standortbedingungen berücksichtigt werden müssen. So müssen die Standorte zum Beispiel innerhalb einer Bewilligungszone für Erdwärmesondenbohrungen liegen. Dazu kommen Faktoren wie der Abstand von Gewässern oder die Platzverhältnisse vor Ort, die berücksichtigt werden müssen. In der Schweiz herrscht momentan noch Unklarheit darüber, welcher Anteil der WHZ-Standorte für eine geothermische Beheizung überhaupt in Frage kommt. Sinnvollerweise muss diese Frage zuerst geklärt werden, bevor entschieden werden kann, ob und in welchem Ausmass geothermische Pilotprojekte finanziell gefördert werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, das Potenzial der geothermischen WHZ für die Schweiz abzuschätzen. In einem ersten Schritt soll definiert werden, welche Kriterien darüber entscheiden, ob an einem bestimmten Standort der Einsatz einer geothermischen Weichenheizung grundsätzlich möglich ist. Der so erarbeitete Katalog von Kriterien soll in einem zweiten Schritt auf die konkreten WHZ-Standorte angewendet werden. So wird bestimmt, wie gross der maximale Anteil der WHZ ist, der mit geothermischen Weichenheizungen ausgerüstet werden könnte.

Die Weichenheizungsstandorte in der Schweiz müssen in repräsentativer Anzahl erfasst werden, um so die Grundlagen für eine quantitative Analyse zu schaffen. Ebenso müssen weitere Informationen zu

den WHZ-Standorten erfasst werden, die aufgrund der erarbeiteten Kriterienliste relevant sind, um einen Standort auf grundsätzliche Eignung hin zu überprüfen.

Diese Überprüfung muss aufgrund der hohen Anzahl an Standorten automatisiert erfolgen, d.h. es kann keine Einzelstandortbetrachtung durchgeführt werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems (ArcGIS). Daraus ergibt sich schliesslich eine fundierte Aussage, für wie viele Weichenheizungen eine geothermische Lösung grundsätzlich in Frage kommen kann. Damit kann das Potenzial dieser Technologie in der Schweiz bestimmt werden.

1.3 Abgrenzung der Arbeit

Die technologischen Aspekte der geothermischen WHZ werden nur insofern berücksichtigt, als sie einen Einfluss auf die Standorteignung haben. Ansonsten werden die grundsätzliche Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der geothermischen WHZ als gegeben betrachtet und sind nicht Gegenstand dieses Projekts. Ebenso werden keine Einzelstandortanalysen und keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt. Auch Angaben zur technischen Umsetzung werden in dieser Studie nicht behandelt. Die bei einer Umsetzung zu berücksichtigenden Aspekte werden aber aufgelistet.

2 Aktueller Wissensstand

2.1 Weichenheizungen in der Schweiz

Gestützt auf die Befragung von sechs repräsentativen Bahnunternehmen ergaben Hochrechnungen, dass in der Schweiz zwischen 10'000 und 11'000 Weichenheizungen im Einsatz sind. Nicht mitgerechnet sind Weichenheizungen für Tramstrecken und Spezialbahnen, wie zum Beispiel Zahnradbahnen.

Der überwiegende Anteil der Weichen (ca. 70%) wird elektrisch beheizt. Dabei liegt das Verhältnis zwischen Bahnstrom (16,7 Hz) und Strom ab Ortsnetz (50 Hz) ungefähr bei 2:1. Die restlichen 30% der Weichenheizungen werden mit Gas betrieben, entweder mit Erdgas oder mit Propan. Von den grossen Bahnunternehmen in der Schweiz setzt nur die SBB Gas-WHZ ein. Die Wahl des Energieträgers ist abhängig vom Standort, von der Grösse der Anlage, von der Versorgungsfrage und vom Knowhow innerhalb des Unternehmens.

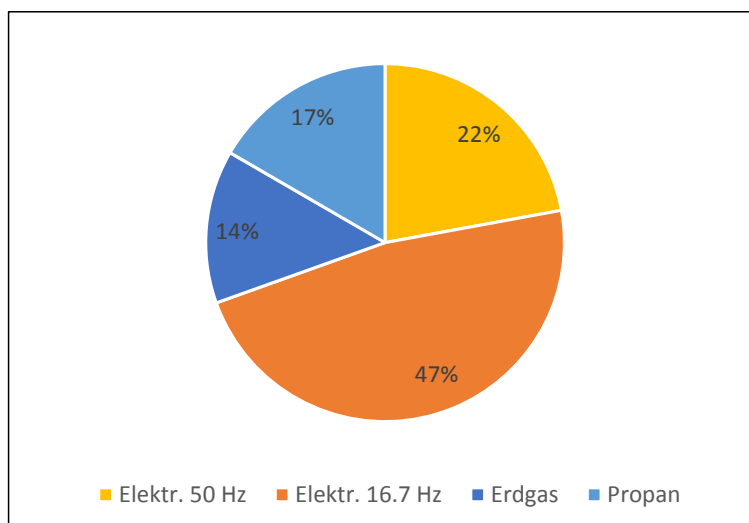


Abb. 3 Anteile (Anzahlverteilung) der verwendeten Energiequellen am Gesamtbestand der Schweizer Weichenheizungen, Stand 2014 [1].

Die in der Umfrage erfassten Gas-WHZ, entfallen alle auf die SBB. SBB-intern macht ihr Anteil 38% aller Weichenheizungen aus. Es gibt mehrere Gründe für die Dominanz der elektrischen Weichenheizungen bei den kleineren Bahnunternehmen: Der Aufbau einer Gasversorgung ist meist kostenintensiver als die Stromversorgung, welche in den meisten Fällen bereits vorhanden ist. Damit sich die Investition lohnt, müssen die Anlagen eine Mindestgrösse aufweisen, was vor allem bei grösseren städtischen Bahnhöfen oder Rangierbahnhöfen der Fall ist. Zudem muss innerhalb des Unternehmens Knowhow im Umgang mit Gassystemen aufgebaut werden. Es gibt jedoch auch aus Sicht der Verfügbarkeit Gründe, welche für die Gasweichenheizungen sprechen. So ist die Leistungsdichte der eingesetzten Brennerrohre ungefähr dreimal höher als bei den standardmässig eingesetzten elektrischen Heizelementen. Das heisst, es kann „mehr Leistung an die Schiene gebracht werden“, was vornehmlich in höheren Lagen mit härteren Wetterbedingungen vorteilhaft sein kann. Ausserdem ist Gas speicherbar. Bei grossen Bahnhöfen ist es aus Gründen des Lastmanagements zum Teil nicht möglich, die geforderte elektrische Leistung bereit zu stellen. Aus Sicht der Energieeffizienz schneiden die Gasweichenheizungen bei vergleichbaren Bedingungen jedoch deutlich schlechter ab als die elektrischen Weichenheizungen. Für den gleichen Weichentyp ist die installierte Leistung rund dreimal höher, die Betriebsstunden sind jedoch nicht signifikant tiefer. Daher macht der Energieverbrauch der Gas-WHZ in der Studie von 2014 ca. 55% des Gesamtverbrauchs der WHZ in der Schweiz aus, obwohl sie gemessen an der Anzahl nur mit einem Anteil von rund 30% vertreten sind. Mittlerweile wurden SBB-intern Massnahmen ergriffen, um den Energieverbrauch von Gas-WHZ zu reduzieren. Daher dürfte sich der Gesamtenergieverbrauch und der Anteil der Gas-WHZ daran in der Zwischenzeit reduziert haben. Das quantitative Ausmass dieser Veränderungen kann momentan jedoch nicht beziffert werden.

Eine Weichenheizungsanlage besteht aus drei Hauptkomponenten: Den Heizelementen an der Schiene, der Energieversorgung und dem Mess-, Steuer- und Regelsystem. Die Heizelemente werden entlang der neuralgischen Stellen an der Schiene angebracht. Kritisch sind hauptsächlich die Flächen zwischen Backenschiene und Zunge. Schnee oder Eisklumpen in diesem Bereich können dazu führen, dass die Zunge beim Stellen die Endlage nicht erreichen kann oder es kann zum Anfrieren der Zunge an der Backenschiene kommen. Häufig wird auch der Verschlusskasten beheizt, wo das Gestänge durch eingepressten Schnee blockiert werden kann. Teilweise wird auch die bewegliche Zunge beheizt. Die bei den elektrischen Weichenheizungen eingesetzten Flachheizstäbe können innen an der Backenschiene angebracht werden. Die Brennerrohre für Gas-WHZ müssen aus Platzgründen aussen angebracht werden. Die installierte Leistung pro Weiche ist abhängig vom Weichentyp und kann bei elektrischen Weichenheizungen von 2 kW bis 60 kW variieren. Der Durchschnitt liegt je nach Bahnunternehmen zwischen 4 und 10 kW, bei Gasweichenheizungen um Faktor 3 höher.

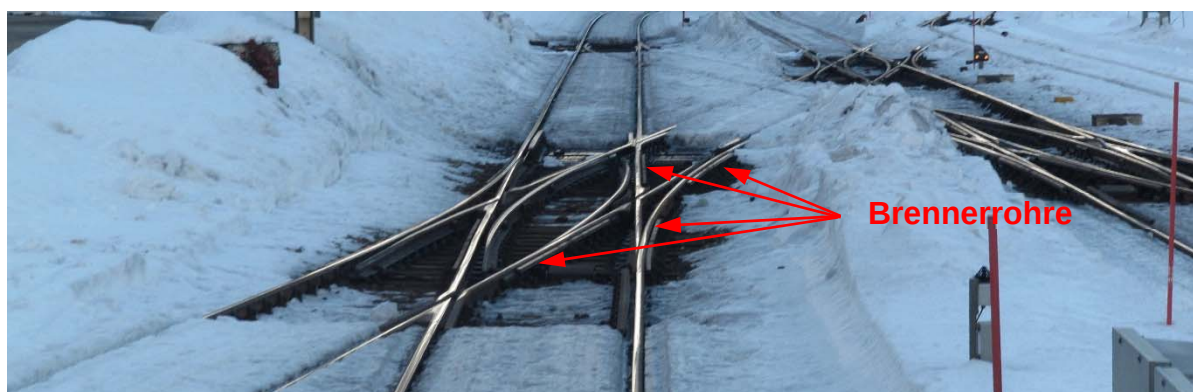


Abb. 4 Gasbeheizte Doppelkreuzungsweiche (Bild: D. Föhn, SBB)

95% der WHZ-Anlagen in der Schweiz sind automatisiert. Mit Hilfe einer Wetterstation, welche in der Nähe der Gleise steht, wird die Lufttemperatur gemessen und Niederschlag detektiert. Aufgrund dieser Parameter wird die Anlage automatisch ein- oder ausgeschaltet. Die Regelung erfolgt üblicherweise mit einer einfachen Zweipunkt-Regelung (Ein/Aus) anhand eines Schienentemperaturfühlers. Der Energieverbrauch ist direkt proportional zu den Betriebsstunden (Einschaltzeit) der Heizelemente. Durch die Einführung der automatisierten Anlagen in den letzten zwei Jahrzehnten, konnte der Energieverbrauch deutlich gesenkt werden. Vergleichsdaten der Rhätischen Bahn (RhB) zeigen zum Beispiel, dass die Betriebsstunden von nicht-automatisierten Weichenheizungen mindestens doppelt so hoch sind, wie diejenigen der automatisierten Anlagen in ähnlicher Höhenlage.

Trotz der Automatisierung hat der Mensch nach wie vor einen grossen Einfluss auf den Betrieb der Weichenheizungsanlagen. Der zuständige Fahrdienstleiter hat verschiedene Möglichkeiten, die Automatisierung zu umgehen, indem er den Modus auf Fahrdienstbetrieb oder Dauerbetrieb wechselt. Das Personal steht dabei im Spannungsfeld zwischen dem Aufrechterhalten der Verfügbarkeit und der Vorgabe zum Energiesparen. Ein Störfall bei einer Weiche zieht hohe Folgekosten mit sich und ist daher mit allen Mitteln zu vermeiden. Daher erstaunt es nicht, dass verschiedene Auswertungen von Betriebsstundendaten zeigen, dass diejenigen Anlagen, welche den höchsten Energieverbrauch haben, meist überdurchschnittlich lange im nicht-automatisierten Betrieb laufen. Dies kann zum Beispiel vorkommen, wenn die Anlagen vor einem angekündigten Wetterereignis zur Sicherheit auf „Dauerbetrieb“ eingestellt werden und nach diesem Ereignis lange nicht wieder umgestellt werden. Es wird geschätzt, dass sich durch Betriebsoptimierung der bestehenden Anlagen, durch Schulung des Personals und Optimierung der Schaltparameter ca. 10% an Energie sparen liessen.

In der Schweiz verfügt einzig die SBB über ein eigenes Kompetenzzentrum für Weichenheizungen. Bei den kleineren Bahnen ist meist eine Person neben anderen Bereichen auch für die Weichenheizungen zuständig, sodass oft die personellen Ressourcen fehlen, um Projekte durchzuführen, welche keine hohe Priorität haben. Auf der anderen Seite sind die Entscheidungswege bei den kleineren Bahnen kürzer und Projekte können schneller realisiert werden, wenn die Geschäftsleitung davon überzeugt ist. Gegenwärtig sind einige Schweizer Bahnunternehmen daran, eine geothermische Weichenheizungslösung zu evaluieren. Bisher wurde jedoch noch keine Anlage realisiert.

2.2 Geothermie in der Schweiz

Geothermie ist die Nutzung der im Untergrund vorhandenen Wärme. Die in der Erde gespeicherte Energie lässt sich auf verschiedene Arten gewinnen. Wie Abb. 5 zeigt, wurden im Jahr 2015 in der Schweiz 3'408.33 GWh an Heizenergie durch geothermische Anlagen produziert. Dabei kommen in den weitaus meisten Fällen Erdwärmesonden in Kombination mit Wärmepumpen zum Einsatz. Ihr Anteil an der gesamten Produktion beträgt 79.9 %. Der Anteil der Anlagen mit Grundwassernutzung liegt bei 11.9 % und derjenige von Thermalbädern bei 6.2 %. Die restlichen Anwendungen, wie Energiepfähle, Tiefe Aquifer Nutzung, Tunnelwasser oder Tiefe Erdwärmesonde, produzieren zusammen 2 % der Energie.

Die Erdwärmesondensysteme haben sich in der Schweiz gegenüber den anderen geothermischen Anwendungen deutlich durchgesetzt, was auch die 2.5 Millionen Bohrmeter pro Jahr in Abb. 2 unterstreichen. In der vorliegenden Studie werden deshalb nur Weichenheizungen mit Erdwärmesondensystemen betrachtet, da das System Erdwärmesonde ein weit verbreiteter Stand der Wärmetechnik und die planbarste geothermische Nutzungsart ist. Grundwasser oder Tunnelwasser könnten zwar auch für WHZ genutzt werden. Aufgrund ihres geringen Anteils an der gesamten Produktion (wie oben aufgezeigt) und aufgrund der schlechten Planbarkeit stellen sie aber einen Sonderfall dar und werden daher nicht in die quantitative Analyse einbezogen.

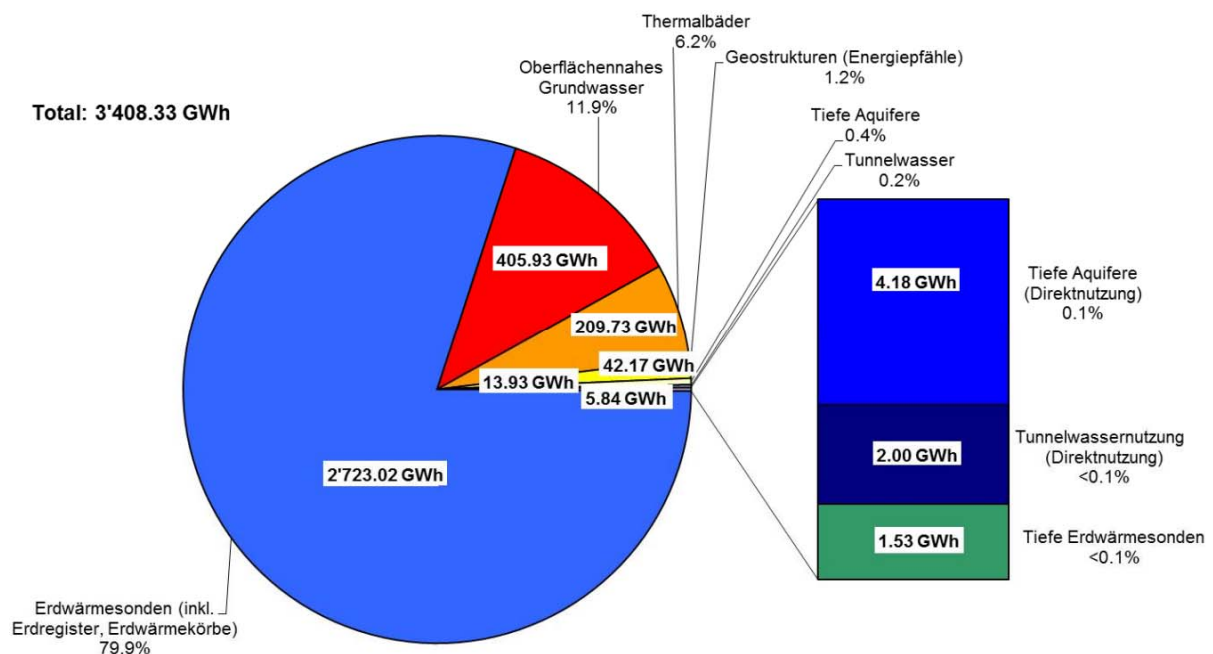


Abb. 5 Geothermisch produzierte Heizenergie im Jahr 2015 in der Schweiz, unterteilt in die Anteile der einzelnen Nutzungsarten [3]

2.3 Geothermische Weichenheizungen

2.3.1 Funktionsweise

Bei einer geothermischen Weichenheizung wird die Wärmeenergie zur Weichenbeheizung dem Erdreich entzogen. Dies kann durch eine Erdwärmesonde, durch Erdkollektoren oder durch einen Grundwasserbrunnen erfolgen. Wie bereits in Abschnitt 2.2 erläutert, stellt die Erdwärmesonde den Standardfall dar. Die Erdwärmesonde ist ein Wärmetauscher, der die in der Erde gespeicherte Energie zu Heizungszwecken nutzbar macht. Ab einer Tiefe von ca. 10 – 20 m unter der Erdoberfläche ist die vorherrschende Erdreichtemperatur nahezu unabhängig von jahreszeitlichen Schwankungen, sofern keine starke Grundwasserzirkulation vorliegt. Im Schweizer Mittelland liegt die Bodentemperatur dort bei 10 bis 13°C [4]. Mit zunehmender Tiefe steigt die Temperatur mit einem Gradienten von ca. 2 – 4 K pro 100 m an.

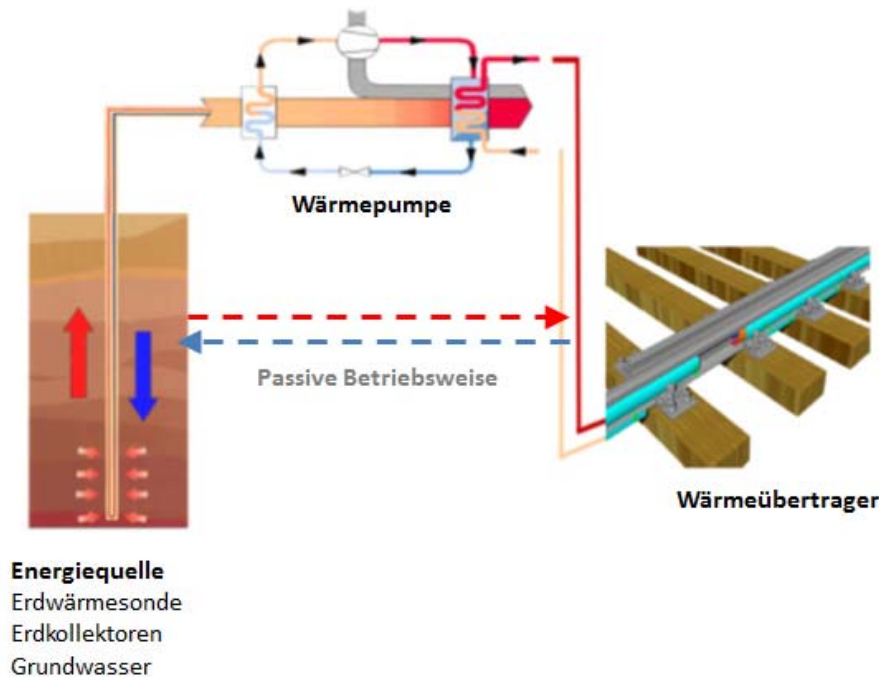


Abb. 6 Hauptbestandteile einer geothermischen Weichenheizung (© Triple-S GmbH)

Konventionelle **Erdwärmesonden** bestehen in der Regel aus einem Doppel-U-Rohr, durch welches mit Hilfe einer Umwälzpumpe Flüssigkeit, meist ein Wasser/Frostschutz-Gemisch (Sole), zirkuliert wird. Die Sole erwärmt sich unter Aufnahme von Erdwärme und gibt diese Wärme an der Oberfläche, in der Regel über eine Wärmepumpe, an die Weiche ab. Neben den klassischen Doppel-U-Rohr-Sonden gibt es auch andere Bauformen, z.B. Koaxialrohre oder Gravitationswärmerohre. Letztere arbeiten nicht mit Sole, sondern mit einem verflüssigten Gas, wie z.B. CO₂, welches aufgrund des Temperaturgradienten in der Erde ohne zusätzlichen Antrieb selbständig zirkuliert (siehe Abschnitt 2.3.3). Nach SIA 384/6 [5] muss eine Erdwärmesonde so dimensioniert werden, dass ihre Sondenaustrittstemperatur 0°C beim Einsatz einer geeigneten Sole nicht unterschreitet.

Durch den Einsatz einer **Wärmepumpe** wird dieses Temperaturniveau erhöht, jedoch ist dazu elektrische Energie notwendig. Bisher werden für die Weichenheizungen Temperaturen zwischen 40 und 70°C eingesetzt. Dieses Temperaturniveau liegt im ähnlichen Bereich wie für die Gebäudeheizung. Daher können auch dieselben Wärmepumpen verwendet werden. Da für die Weichenbeheizung nicht zwingend ein solch hohes Temperaturniveau gefordert ist, sondern es vielmehr darum geht, die notwendige Wärmeleistung an die Schienen zu bringen, um Schnee oder Eis zu schmelzen, ist es theoretisch auch möglich, auf die Wärmepumpe zu verzichten und die Energie direkt an die Weiche abzugeben. Dies wird „passiver Betrieb“ genannt. Solche Systeme werden z.B. bereits zur Eisfreihaltung von Verkehrsflächen eingesetzt.

Entscheidend für die Energieeffizienz der Wärmepumpe ist, wieviel elektrische Energie im Vergleich zur Nutzenergie (gelieferte Heizenergie) benötigt wird. Der Coefficient of Performance (COP) bezeichnet den Quotienten zwischen der von der Wärmepumpe im Kondensator abgegebenen Heizleistung und der aufgewendeten elektrischen Leistung (Kompressor). Der COP-Wert ist nur eine Momentaufnahme, er sinkt z.B. mit steigender Vorlauftemperatur des Heizmediums. Man betrachtet deshalb eine sogenannte Jahresarbeitszahl (JAZ). Sie ist analog zum COP definiert. Die Leistungen und Wärmeströme werden jedoch über ein Jahr aufintegriert und auch der Verbrauch der Hilfsbetriebe (Umwälzpumpe) einbezogen.

Sole/Wasserwärmepumpen, die für die Gebäudeheizung eingesetzt werden, erreichen in der Schweiz im Durchschnitt eine JAZ von ca. 4 [6]. Das bedeutet, dass mit 25% Strom 100% Heizenergie erzeugt werden. Im Vergleich zu einer rein elektrischen Heizung entspricht dies somit einer Einsparung von 75%. Auf der Erzeugerseite dürften auch die Systeme für Weichenheizungen diese Werte erreichen, wobei dies stark von der Vorlauftemperatur abhängt. In den Leitungen von der Wärmepumpe bis zur

Schiene und bei der Wärmeübertragung an die Schiene muss mit höheren Wärmeverlusten an die Umgebung gerechnet werden, als bei einer Heizungsanwendung in einem Gebäude, wo die Leitungen im Gebäude verlaufen und allfällige Verluste auch innerhalb des Gebäudes bleiben. Es existieren zurzeit keine belastbaren Vergleichszahlen zur Energieeinsparung gegenüber einer konventionellen WHZ. Sie wird von den Autoren für die Systeme mit Wärmepumpe auf 50-75% geschätzt.

Die beiden Elemente Erdwärmesonde und Wärmepumpe sind Standardelemente, die für die Weichenheizung keiner speziellen Anpassung bedürfen. Die grosse Herausforderung stellt sich bei der Frage, wie die gewonnene Wärmeenergie mittels Flüssigkeit an die Schiene gebracht werden soll. Es braucht dazu isolierte Rohrleitungen und Verbindungen sowie einen **Wärmeübertrager**, welcher die Wärmeenergie möglichst effizient vom Arbeitsfluid auf die Schiene überträgt. Der Wärmeübertrager muss an die Geometrie der Schiene angepasst sein. Gl. 1 zeigt die grundlegenden Zusammenhänge bei der Wärmeübertragung im stationären eindimensionalen Fall auf. Die übertragene Wärmeleistung $\dot{Q}$ ist proportional zur Übertragungsfläche A und der Temperaturdifferenz ΔT , welche in unserem Fall die Temperaturdifferenz zwischen Übertragungsmedium (Sole) und Schiene darstellt. Der Proportionalitätsfaktor k ist abhängig von den Materialeigenschaften sowie von der Strömungsform der Flüssigkeit.

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Gl. 1}$$

Das bedeutet, dass durch Erhöhung der Wärmeübertragerfläche oder durch Erhöhung der Soletemperatur die Wärmeleistung erhöht wird. Im passiven Betrieb ist die Soletemperatur tief bzw. die Temperaturdifferenz zur Schiene klein. Daher braucht ein solches Konzept eine deutlich höhere Übertragerfläche. Bei Systemen mit Wärmepumpe kann die Wärmeleistung durch Variation der Soletemperatur bis zu einem gewissen Grad reguliert werden. Zu beachten ist dabei, dass mit steigender Vorlauftemperatur (steigender Temperaturhub der Wärmepumpe) der COP und somit die Energieeffizienz sinkt.

2.3.2 Systeme mit Wärmepumpe

Bei den Systemen mit Wärmepumpe gibt es gegenwärtig drei Anbieter: Die niederländische Firma VolkerRail, sowie die beiden deutschen Firmen Triple-S GmbH und ESA Grimma. VolkerRail baute ab 2003 in den Niederlanden für ProRail die ersten geothermische WHZ in Europa; nach eigenen Angaben insgesamt 18 Anlagen mit gegen 90 einzelnen WHZ. ProRail entschied sich jedoch unter anderem aus ökonomischen Überlegungen gegen einen weiteren Ausbau der geothermischen Anlagen. Das System wurde dann von der Firma Triple-S weiterentwickelt und in Deutschland eingeführt. Nach eigenen Angaben gingen in den letzten 7 Jahren in Deutschland rund 30 geothermische WHZ der Firma Triple-S an 7 unterschiedlichen Standorten in Betrieb (Anhang Tab. A 1).

Die Wärmeübertrager des Triple-S Systems bestehen aus einem Vor- und einem Rücklaufrohr, welche in Isolationsschaum eingebettet, aussen an der Stockschiene angebracht sind. Neu ist auch eine Gleitstuhlplatten-Beheizung zur Erprobung in Deutschland zugelassen. Die Wärmepumpe ist zusammen mit dem Steuerschrank in einer Kabine neben den Gleisen untergebracht (Abb. 7). Eine Wärmepumpe kann idealerweise mehrere Weichenheizungen versorgen. Schliesslich ist es eine standortabhängige Optimierungsaufgabe, die Anzahl und Leistung der Wärmepumpen festzulegen, die von der Anzahl Weichenheizungen und der erforderlichen Leistung abhängt. Die Wärmepumpe wird nur bei Bedarf zugeschaltet. Messungen in Heimbach an der Nahe (D) über die Winter 14/15 und 15/16 haben ergeben, dass die Anlagen im Durchschnitt nur während rund 20% der Laufzeit im aktiven Betrieb und sonst passiv gelaufen sind, d.h. ohne Wärmepumpe. Im Gegensatz zu den elektrischen Weichenheizungen, bei welchen nach aktuellem Standard, zumindest in der Schweiz, keine Leistungsregelung möglich ist (nur Ein/Aus) besteht bei diesem System die Möglichkeit, die Leistung einerseits durch Variation der Vorlauftemperatur und Massenstrom der Sole, sowie durch den aktiven und passiven Betrieb zu variieren. Die Leistung kann bis maximal 250 W/m erhöht werden. Dieser Wert liegt ca. 25% tiefer als bei den elektrischen WHZ in der Schweiz (330 W/m).

Triple-S besitzt seit 2011 die technische Zulassung der Deutschen Bahn. Gegenwärtig sind gemäss eigenen Angaben 30 Triple-S Weichenheizungsanlagen in Betrieb (Anhang Tab. A 1) und ungefähr dieselbe Anzahl in Planung. Seit August 2015 ist ihr System bei der DB als Regelbauweise aufgenommen und muss somit bei der Planung von neuen Anlagen in Life Cycle Cost-Analyse einbezogen werden.



Abb. 7 System Triple-S: Wärmeübertrager an der Stockschiene und Kabine mit Wärmepumpe und Steuerschrank (© Triple-S GmbH)

Während sich Triple-S bereits auf dem Markt für geothermische Weichenheizungen etabliert hat, ist die ESA Elektroschaltanlagen Grimma GmbH (ESA Grimma), ebenfalls eine deutsche Firma, mit ihrem System im Bereich Geothermie neu dabei. ESA Grimma ist aber im Bereich der elektrischen Weichenheizungen und Stromversorgung für Bahnen etabliert. ESA Grimma hat eigene Wärmetauscher für die Beheizung der Backenschiene und Zunge, wie auch für Beheizung des Verschlussfachs entwickelt. Die Wärmepumpe wird direkt über der Sondenbohrung in einem Schacht untergebracht. Die entwickelte Steuerung basiert auf der optimierten Steuerung für elektrische Weichenheizungen. Eine Testanlage wird seit drei Jahren auf dem Firmengelände erprobt. Mehrere Anlagen sind nun zusammen mit der Deutschen Bahn in Planung. Um die technische Zulassung der DB zu erhalten, muss aber erst die dreijährige Erprobungsphase bestanden werden. Diesem zeitlichen Nachteil gegenüber dem Mitbewerber steht der Vorteil gegenüber, bereits im Markt für (elektrische) Weichenheizungen präsent zu sein.

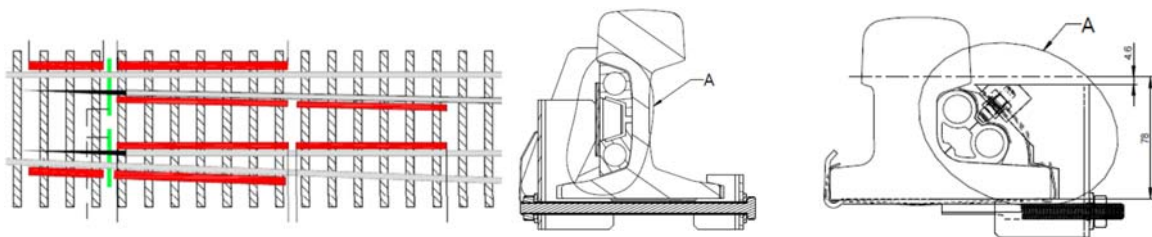


Abb. 8 Schematische Darstellung der Weichenbestückung und Querschnitt durch Backen- und Zungenheizkörper (© ESA Grimma GmbH)

2.3.3 Systeme ohne Wärmepumpe

Bisher existiert nur ein rein passives System der deutschen Firma **Pintsch Aben Geotherm** auf dem Markt. Bei diesem System wird gänzlich auf eine Wärmepumpe verzichtet und auch die Erdwärmsonde unterscheidet sich von den übrigen Systemen. Sie funktioniert nach dem Prinzip eines Gravitationswärmerohrs (Abb. 9). Die Sonde ist dabei ein geschlossenes Rohr, in welchem CO₂ als Arbeitsmedium unter Druck bei ca. 40 bar eingefüllt ist. Durch Aufnahme der Erdwärme verdampft das flüssige CO₂ in der Sonde und strömt nach oben zu den Wärmeübertragern an den Gleitstühlen. Dort kondensiert es und gibt die aufgenommene Energie ab. Das flüssige CO₂ rinnt als Film entlang der Rohrwand wieder nach unten. Es findet somit ein selbsttätiger Umlauf des Arbeitsmediums ohne Umwälzpumpe statt.

Die abgegebene Leistung ist abhängig von der Temperaturdifferenz am Kondensator. So reguliert sich das System selbstständig. Ein Ein- oder Ausschalten des Systems ist nicht möglich bzw. nicht notwendig. Somit entfällt der Aufwand für die Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Einzig der Sondendruck wird aus Sicherheitsgründen und zum Überprüfen der Funktionstüchtigkeit überwacht. Pro Bohrung werden mehrere Rohre versenkt, somit ergibt sich auch eine gewisse Redundanz bei einem allfälligen Ausfall eines Rohres. Die Kondensationstemperatur liegt zwischen 5 und 10°C. Da die Temperaturdifferenz zwischen Arbeitsmedium und Umgebung, welche nötig ist, um die benötigte Leistung zu übertragen, sehr gering ist, wird eine deutlich grössere Wärmeübertragerfläche benötigt, als bei den Systemen mit

Wärmepumpe. Die Kondensatoren sind flächige Wärmeübertrager, die zu beiden Seiten des Gleitstuhls angeordnet sind. Zudem können auch die Schwellenfächer mit speziellen Kondensatoren schneefrei gehalten werden. Damit das Wärmerohrprinzip funktioniert, müssen die Zuleitungen zu den Kondensatoren eine stetige Steigung aufweisen. Daher sollte der Abstand der Sonde zu den Kondensatoren nicht zu gross sein, da sonst zu aufwändige Erdarbeiten notwendig sind.

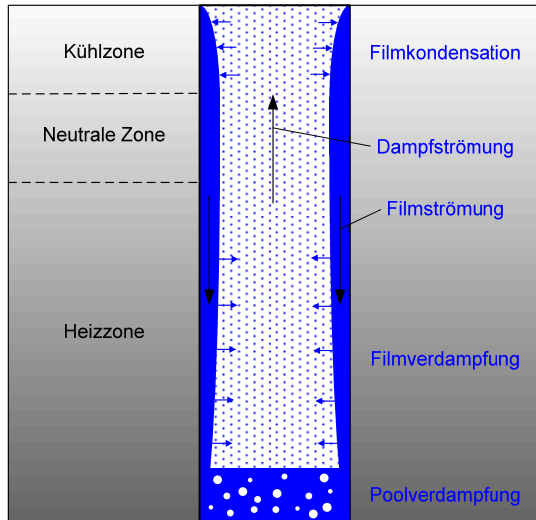


Abb. 9 Schematische Funktionsweise eines Gravitationswärmerohrs [7]

Das grosse Potenzial dieses Systems liegt darin, dass durch das Weglassen der Wärmepumpe kein zusätzlicher Strombedarf und somit überhaupt keine Energiekosten anfallen. Das System wird rein geothermisch beheizt. Pinch Aben hat bisher 3 Pilotanlagen in Deutschland realisiert. Die Betriebsdaten der Anlage im Bahnhof Grünberg (Hessen) für den Winter 2012/2013 wurden publiziert [8] und liefern keine Hinweise auf grössere Probleme. Trotzdem konnte Pinch Aben bisher keine neuen Projekte realisieren. Dies könnte daran liegen, dass sich das System, welches sich autonom regelt, von den traditionellen Beheizungsarten fundamental unterscheidet, und die Skepsis der Betreiber deshalb zu hoch ist. Da bräuchte es mehr Erfahrung und verlässliche Daten, welche zeigen, dass dieses System auch unter Extrembedingungen funktioniert. Allerdings ist dies wiederum zeit- und kostenintensiv. Extremereignisse bezüglich Witterung waren in den letzten Jahren mit den tendenziell milden Wintern rar. Es konnten so auch wenig Erfahrungen gesammelt werden.

Theoretisch sind auch rein passive Systeme mit einer konventionellen Erdwärmesonde möglich. Es bräuchte dazu allerdings eine Umwälzpumpe und eine entsprechende Steuerung.

3 Methodik

3.1 Erarbeitung der Beurteilungskriterien

In der ersten Phase dieses Projekts wurden die relevanten Kriterien erarbeitet, welche es erlauben zu beurteilen, ob an einem Standort eine geothermische Weichenheizung grundsätzlich realisierbar ist. Zu diesen Kriterien einer Standorteignung gehören Platz- und Landbesitzverhältnisse, Einschränkungen aufgrund einer Störung des Bahnbetriebs durch das Bauprojekt, Zugänglichkeit des Standorts etc. Während diese Kriterien nicht alle eindeutig sind, sind gesetzliche Kriterien (wie Gesetze und Verordnungen zum Gewässerschutz) klar vorgegeben.

Am 25.01.2016 wurde ein Workshop mit einem Expertengremium durchgeführt, mit dem Ziel, klar definierte und breit abgestützte Kriterien zu erarbeiten, nach denen die Eignung eines Standorts beurteilt werden kann. Das Expertengremium umfasste Vertreter des BAV und der Bahnen, welche Erfahrung mit Weichenheizungen haben, sowie mit der Abwicklung von Bauprojekten im Gleisbereich vertraut sind (Teilnehmerliste im Anhang Tab. A 2). Der so erarbeitete Kriterienkatalog (siehe Kapitel 4.1) diente als Grundlage für die in der zweiten Phase durchgeführte quantitative Auswertung (siehe Kapitel 4.2).

3.2 Vorgehen für quantitative GIS-Auswertung

Aufgrund der grossen Anzahl an Weichenheizungen in der Schweiz wurde die Potenzialabschätzung für eine geothermische Umrüstung über eine GIS-Analyse durchgeführt. Dabei wurden die definierten Eignungskriterien auf die einzelnen Standorte der heutigen Weichenheizungen angewandt. Die Resultate wurden kartografisch dargestellt und es wurde eine quantitative Aussage darüber gemacht, wie viele Weichenheizungsstandorte überhaupt für eine geothermische Umrüstung in Frage kommen.

In einem ersten Schritt wurde das **Theoretische Potenzial** bestimmt (siehe Kapitel 4.2.1). Darin wurde für jede WHZ bestimmt, ob am Standort gemäss Bewilligungskarte eine Erdwärmesondenbohrung zulässig ist. Dies ist eine Grundvoraussetzung dafür, dass eine geothermische WHZ bewilligungsmässig überhaupt realisiert werden kann. Dazu wurden die Bewilligungskarten für Erdwärmesonden der Kantone mit den Koordinaten der WHZ-Standorte verschnitten.

In einem zweiten Schritt wurde das **Erschliessbare Potenzial** bestimmt (siehe Kapitel 4.2.2). Hier wurden weitere Kriterien miteinbezogen wie der minimale Abstand von der Schienenachse (Kapitel 3.3.4), die Parzellengrenzen (Kapitel 3.3.5), die Gebäudegrundrisse und der minimale Abstand zu Gewässern (Kapitel 3.3.6). Standen nicht alle Daten für die zweite Phase zur Verfügung, mussten Vereinfachungen gemacht werden. Das errechnete Potenzial bezeichnet also alle bewilligungsfähigen und gemäss den weiter definierten Kriterien realisierbare Anlagen. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die dazu nötigen Datenerhebungen.

3.3 Datenerhebung

3.3.1 Involvierte Bahnunternehmen

In Absprache mit den Verantwortlichen des BAV wurden 7 Bahnunternehmen identifiziert und angefragt, ob sie bereit wären, sich an diesem Projekt zu beteiligen und die erforderlichen Daten zur Verfügung zu stellen. Die Bereitschaft zur Zusammenarbeit war erfreulich hoch und die meisten Daten wurden schnell und unkompliziert zur Verfügung gestellt. Zwei Bahnen konnten jedoch keine Daten liefern bzw. waren aus Kapazitätsgründen nicht dazu in der Lage. Schliesslich wurden die Daten der nachstehend aufgeführten 5 Bahnunternehmen verwendet. Diese Unternehmen decken über 80% des ca. 5'100 km langen Schienennetzes in der Schweiz ab (Tab. 1). Neben SBB und BLS, welche zusammen 70% des Schweizer Schienennetzes abdecken, sind auch kleinere Bahnen vertreten. Durch Einbezug von RhB und MGB wurde auch der grösste Teil des alpinen Raumes berücksichtigt.

- Schweizerische Bundesbahnen AG **SBB**
- (Bern-Lötschberg-Simplon) **BLS** AG
- Rhätische Bahn AG **RhB**
- Matterhorn Gotthard Bahn AG **MGB**
- Südostbahn AG **SOB**

3.3.2 Standortkoordinaten der Weichenheizungen

Standortkoordinaten konnten von allen Bahnen, ausser der MGB, im CH1903/LV03 Format geliefert werden. Bei einigen Datensätzen mussten Duplikate entfernt werden. Beispielsweise waren Doppelkreuzungsweichen zum Teil zweimal mit identischen Koordinaten aufgeführt, wurden aber für die Auswertungen als eine Weiche behandelt. Die im SBB Inventar enthaltenen Weichenheizungen, welche einer anderen Streckenverwaltung zugeordnet sind, wurden sofern möglich der betreffenden Bahn zugeordnet. Es ist zu beachten, dass sich die in Tab. 1 aufgeführte Anzahl WHZ auf die für diese Studie durch Koordinaten erfasste Anzahl WHZ bezieht und nicht zwingend mit der Gesamtanzahl WHZ pro Bahn übereinstimmen muss.

Tab. 1 Gleiskilometer und Anzahl erfasster WHZ-Koordinaten der beteiligten Bahnen, sowie deren Anteil in der CH (Gleiskilometer total ca. 5100 km [9], Anzahl WHZ total ca. 10'500 [1])

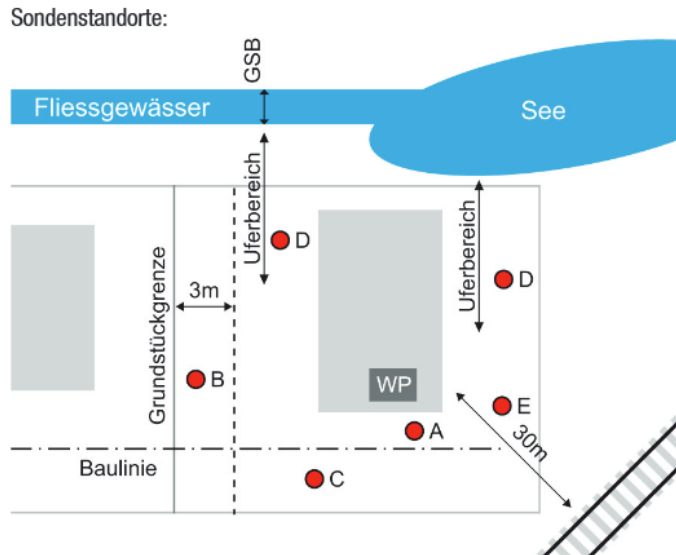
Bahn	Streckennetz / km [1]	Anteil CH	Anzahl erfasste WHZ-Koordinaten	Anteil CH
SBB	3175	62.3%	6683	63.6%
BLS	418	8.2%	949	9.0%
RhB	384	7.5%	548	5.2%
MGB	118	2.3%	225	2.1%
SOB	154	3.0%	194	1.8%
Total	4249	83.3%	8599	81.9%

Die MGB verfügt zwar über ein Inventar der Weichenheizungen, welches die Anzahl und deren Zuordnung zu einer Station enthält, aber nicht die Standortkoordinaten. Deshalb wurde basierend auf dem Datensatz „TLM_EISENBAHN“ aus dem Topografische Landschaftsmodell der Schweiz swissTLM^{3D} [10] die Schnittpunkte der Gleisachsen entlang der MGB-Linie bestimmt. Durch den Vergleich der örtlichen Lage dieser Schnittpunkte und mit dem Inventar konnten 225 der 250 der aufgeführten Weichenheizungen identifiziert werden. Die Koordinaten wurden unter Inkaufnahme einer gewissen Fehlerquote «manuell» per Mausklick kopiert und gespeichert. Ein möglicher Fehler kann bei dieser Methodik durch eine falsche Identifikation entstehen, z.B. wenn eine Gleisverzweigung (Weiche) ohne Heizung als eine mit Heizung identifiziert wird. Da jedoch im alpinen Gebiet die meisten Weichen, welche regelmässig befahren werden, beheizt sind, kann dieser Fehler vor allem bei Bahnhöfen mit Rangier- oder Abstellgleisen entstehen. Da meist das gesamte Bahnhofsareal inklusive Weichen entweder in oder ausserhalb einer Bewilligungszone liegen, erzeugt eine falsch zugeordnete Koordinate aber kaum einen Fehler im Endresultat, solange die Anzahl Weichenheizungen pro Bahnhof korrekt identifiziert wurde. Die zweite mögliche Fehlerquelle liegt darin, dass der Schnittpunkt mit der Maus nicht präzise getroffen werden kann bzw. in der Auflösung der Karte. Die Genauigkeit wird auf ± 1 m geschätzt. Auch dieser kleine Fehler hat praktisch keine Auswirkung auf das Endresultat, da die Grenzen der Bewilligungszone in Bahnhofsnahe kaum je durch den Gleisbereich verlaufen.

Die insgesamt 8599 erfassten Standorte entsprechen über 80% der geschätzten Gesamtzahl der Weichenheizungen in der Schweiz.

3.3.3 Bewilligungszonen

Für die Erstellung einer Erdwärmesonde ist eine Bohrbewilligung erforderlich. Die Bohrbewilligung wird durch den Standortkanton erteilt. Dabei sind insbesondere die Gesetze und Verordnungen zum Gewässerschutz von Bedeutung. Dazu kommen weitere Vorgaben wie Abstände zu Nachbargrundstücken oder zu Gewässern. Eine gute Übersicht über die Vorschriften gibt die Zusammenstellung des Kantons Zürich in Abb. 10.



A: Normalfall

B: Zustimmung des benachbarten Grundeigentümers ist dem Gesuch beizulegen

C: Zustimmung der Gemeinde erforderlich

D: Innerhalb Uferbereich nicht bewilligungsfähig
(weitere Informationen: www.erdsonden.zh.ch)

Fließgewässer (inkl. eingedolte Bäche):

– Gerinnesohlenbreite (GSB) ≤ 12 m: Uferbereich = GSB + 8 m

– Gerinnesohlenbreite (GSB) > 12 m: Uferbereich = 20 m

Stehende Gewässer > 0.5 ha: Uferbereich = 20 m

E: Innerhalb 30 m zu einer SBB-Linie bzw. einem SBB-Tunnel: Die Bewilligung der SBB ist vorgängig durch die Bauherrschaft einzuholen und dem Gesuch beizulegen

Abb. 10 Gängige Bewilligungspraxis im Kanton Zürich [11].

Viele Kantone haben online zugängliche Eignungskarten für Erdwärmesonden. Diese Eignungskarten berücksichtigen in der Regel Vorgaben des Grundwasserschutzes und können aber auch weitere Informationen, wie z.B. geologische und hydrogeologische Erkenntnisse, beinhalten. Die meisten Kantone stellten ihre Karten für die Studie digital zur Verfügung, gratis oder gegen einen Unkostenbeitrag. Das verwendete Kartenmaterial datiert vom Februar oder März 2016. Die Karten werden regelmässig aufgrund von neuen Erkenntnissen überarbeitet. Dies betrifft meist nur kleinere, lokale Gebiete. Es ist deshalb nicht davon auszugehen, dass sich das Resultat der Studie deshalb grundlegend ändern wird, auch wenn örtlich Abweichungen von einzelnen Ergebnissen möglich sind.

Die Vergabe von Bohrbewilligungen wird nicht in allen Kantonen gleich gehandhabt. Es gibt Kantone, welche deutlich restriktiver sind bei der Ausscheidung von Verbotszonen als andere. So kann es vorkommen, dass an der Kantonsgrenze das Gebiet die Zulässigkeit ändert. Auch die Zulässigkeitskategorien variieren von Kanton zu Kanton. Deshalb mussten zuerst einheitliche Kategorien geschaffen werden, die die verschiedenen Bewilligungsmöglichkeiten abbilden. Dazu wurden folgende Kategorien gewählt:

Tab. 2 Kategorien und Farbcodierung zur Bewilligungsfähigkeit an einem Standort. Sämtliche digital erhaltenen kantonalen Erdwärmesonden-Eignungskarten wurden nach diesen Kriterien vereinheitlicht.

Kategorien	Beschreibung
zulässig	Erdwärmesondenbohrungen sind grundsätzlich zulässig
zulässig mit Auflagen	Erdwärmesondenbohrungen sind mit zusätzlichen Auflagen zum Schutz des Grundwasserleiters (z.B. Verrohrung, Abdichtung), oder mit zusätzlichen Abklärungen (z.B.: hydrogeologische Abklärungen) zulässig
verboten	Erdwärmesondenbohrungen sind nicht erlaubt.

Jede einzelne kantonale Karte wurde in diese 3 Kategorien überführt und so eine schweizweit einheitliche Karte erstellt. Mit dieser lässt sich über die GIS-Analyse die Bewilligungsfähigkeit am Standort der Weichenheizung und in der Umgebung automatisiert bestimmen.

Die Kantone Basel-Landschaft und Schwyz haben den ganzen Gleisbereich und die Verkehrsflächen der Bahnen als Verbotszonen für Erdwärmesonden ausgewiesen, da davon ausgegangen wird, dass diese Gebiete für die Allgemeinheit ausgeschlossen sind. Dies entspricht aber nicht einem generellen Bohrverbot. Wenn auf den angrenzenden Grundstücken Erdwärmesonden erstellt werden dürfen, ist auch eine Bohrbewilligung auf dem Grundstück der Bahnen zu erhalten. Um auch diese beiden Kantone in eine GIS Analyse einzubeziehen, wurde den WHZ-Standorten über eine Abstandsanalyse das Bewilligungskriterium der umliegenden Grundstücke zugeordnet.

Bei den Kantonen Nidwalden und Obwalden wurde aus Kostengründen auf die digitalen Karten verzichtet und die Bewilligungsfähigkeit am Standort der WHZ über das Onlineportal dieser Kantone bestimmt. Dabei wurde für die Beurteilung jeweils nicht nur die Bewilligungssituation am Standort, sondern auch die Umgebung der WHZ miteinbezogen. Dies erlaubte es, diese Standorte auch in die Abstandsanalyse in Kapitel 4.2 einzubeziehen, in der die Bewilligungsfähigkeit in verschiedenen Abständen zum Weichenstandort untersucht wird.

Die Kantone Jura, Waadt und Uri besitzen momentan noch keine Erdwärmesondeneignungskarten, deshalb wurde in diesen Kantonen auf die Grundwasserschutzkarte zurückgegriffen und die Bewilligungsfähigkeit anhand der Grundwasserschutz-zonen und –areale bestimmt. In Grundwasserschutz-zonen und Grundwasserareale sind keine Erdwärmesondenbohrungen möglich. Diese Zonen wurden als Bohrverbotszonen ausgeschieden. Auch hier wurde die Situation in der Umgebung mitberücksichtigt.

3.3.4 Gleisachsen

Alle 5 Bahnen konnten Datensätze zu den Gleisachsen liefern. Diese liegen entweder als DWG-Format (CAD-Format), oder bereits als Shape-File (als GIS-Standard-Format) vor. Die verschiedenen Datensätze mussten daher homogenisiert werden. Anschliessend wurden sie zu einem Datensatz zusammengefügt. Die Gleisachsen wurden für die Analyse des Erschliessbaren Potenzials benötigt, in welchem der Abstand von der Gleisachse eingerechnet wird (Kapitel 4.2.1).

3.3.5 Parzellengrenzen

Für die Analyse des Erschliessbaren Potenzials sind auch die Parzellengrenzen von Interesse. Damit kann bei der Abstandsanalyse festgestellt werden, ob ein potenzieller Standort für eine Erdwärmesonde auf dem Areal der Bahnen liegt.

Ausser der SOB verfügten alle Bahnen über digitale Datensätze zu ihren Grundstücksparzellen. Die Daten liegen auch hier in unterschiedlichen Formaten und Formen vor. Bei der MGB sind die Parzellen pro Standortgebiet jeweils in einzelnen Files abgelegt, bei den anderen Bahnen sind sie zu einem Datensatz zusammengefügt. Die Vereinheitlichung der verschiedenen Datensätze gestaltete sich zum einen aufgrund der Datenmenge sehr aufwendig, zum anderen waren einzelne Datensätze fehlerhaft, das heisst, die einzelnen Parzellen waren nicht durchgehend mit einem Polygon umrandet. Dies verursachte Schwierigkeiten bei der Umwandlung in einen für die GIS-Analyse geeigneten Datensatz. Die fehlerhaften Parzellen mussten einzeln identifiziert und die Polygone von Hand geschlossen werden.

Die SOB konnte keine digitalen Daten über ihre Grundstücke liefern. Deshalb mussten hier bei der Berechnung des Erschliessbaren Potenzials Vereinfachungen getroffen werden (Kapitel 4.2.1).

3.3.6 Gewässernetz und Gebäude

Weitere Faktoren, die zur Abschätzung der Erschliessbarkeit beigezogen wurden, sind der Abstand von einem fliessenden oder stehenden Gewässer sowie die Lage von Gebäuden. Bei den Gewässern ist aufgrund des Gewässerschutzes ein minimaler Abstand für Bohrungen vorgegeben. Bei den bestehenden Gebäuden ist deren Grundfläche als Bohrstandort ausgeschlossen.

Angaben zu diesen Standortfaktoren sind im swissTLM^{3D} vorhanden. Das swissTLM^{3D} ist das grossmassstäbige topografische Landschaftsmodell der Schweiz. Es entspricht der 3D Version der bekannten Schweizer Landeskarte. Die verschiedenen natürlichen und künstlich errichteten Objekte der Landschaft, wie beispielsweise Wasserläufe oder Strassen, sind darin in Form dreidimensionaler Vektoren dargestellt. Dieses umfassende Landschaftsmodell swissTLM^{3D} Version 1.4 wurde für das vorliegende Projekt vom Bundesamt für Landestopografie swisstopo zur Verfügung gestellt. Es beinhaltet in den Datensätzen „TLM_FLISSGEWAESSER“ und „TLM_STEHENDES_GEWAESSER“ die Angaben zum Gewässernetz der Schweiz. Die Gebäudegrundrisse sind im Datensatz „TLM_GEBAEUDE_FOOT-PRINT“ enthalten.

4 Ergebnisse

4.1 Definition der Beurteilungskriterien

Beim Expertenworkshop vom 25.01.2016 wurde mit Vertretern des BAV und der Bahnen verschiedene Aspekte diskutiert, die für die Realisierbarkeit einer geothermischen Weichenheizung wichtig sind. Die Beschlüsse wurden im Protokoll vom 26.01.2016 festgehalten und sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst. Darin sind auch weitere Kriterien aufgeführt, die sich aus den Vorgaben der kantonalen Bewilligungsbehörden (wie Abstand von Gewässern) oder aus den baulichen Begebenheiten (wie bestehende Bauten) ergeben. Weiter ist in der Tabelle angegeben, ob die Kriterien für die GIS-Analyse berücksichtigt wurden.

Tab. 3 Kategorien zur Eignung eines Weichenstandortes für eine geothermische Umrüstung.

Kriterium	Beschreibung	Berücksichtigt
Bewilligungs-zonen	Der Standort muss gemäss der kantonalen Bewilligungskarte in einer Zone liegen, in welcher Erdwärmesonden zulässig sind.	Ja
Geologische Verhältnisse	Die geologischen Verhältnisse im Untergrund wurden für die GIS-Analyse nicht berücksichtigt. Die geologischen Verhältnisse sind in der Schweiz kein grundsätzliches Ausschlusskriterium für die Erstellung von Erdwärmesonden. Sie können aber eine Kostenunsicherheit darstellen, wenn zum Beispiel die Erdwärmesonde grösser dimensioniert werden muss als erwartet.	Nein
Landbesitz	Die Parzelle, auf welcher die Erdwärmesonde errichtet wird, muss der Bahn gehören.	Ja
Abstand zum Nachbargrundstück	Bei der Erstellung von Bauwerken ist grundsätzlich ein Grenzabstand zum Nachbargrundstück einzuhalten. Bei Erdwärmesonden sind dies in der Regel 3 m. Wird dieser Abstand unterschritten, ist die Zustimmung der Nachbarn einzuholen. Für die vorliegende Studie wurde angenommen, dass von benachbarten Grundstückbesitzern eine Zustimmung für Bohrungen erhalten wird. Somit musste der minimale Grenzabstand nicht berücksichtigt werden. Baulinien sind in der Regel für die Bahnen kein Thema und wurden nicht berücksichtigt.	Nein
Abstand zu Gewässer	Im Uferbereich von Gewässern sind keine Erdwärmesondenbohrungen zulässig. Die Breite des Uferbereiches wird bestimmt durch die Gerinnesohlenbreite (GSB) von Fliessgewässern und ist bei stehenden Gewässern fix vorgegeben (siehe Abb. 10). Es gilt: <i>Fliessgewässer, inkl. eingedolte Bäche</i> GSB $\leq$ 12 m $\Rightarrow$ Uferbereich = GSB + 8 m GSB $>$ 12 m $\Rightarrow$ Uferbereich = 20 m <i>Stehende Gewässer $>$ 0.5 ha</i> $\Rightarrow$ Uferbereich = 20 m Im swissTLM ^{3D} sind die Fliessgewässer in die Kategorien Gerinnesohlenbreite $\leq$ 5 m und $>$ 5 m eingeteilt. Die Bestimmung der GSB wurde deshalb entsprechend angepasst:	Ja

	Für Breiten ≤ 5 m wurde der Uferbereich als GSB + 8 m bestimmt und für Breiten > 5 m gilt einheitlich ein Uferbereich von 20 m. Bei allen Stehenden Gewässern wurde der Uferabstand auf 20 m gesetzt, unabhängig von der Fläche. Somit wird der Uferbereich eher konservativ betrachtet.	
Platzverhältnisse	Es wurde angenommen, dass die Bohrstelle zugänglich ist und dass genügend Platz für die Bohrgerätschaft auf dem Grundstück der Bahnen vorhanden ist. Die Verfügbarkeit von Strom und Wasser für die Bohrarbeiten wurde ebenfalls vorausgesetzt. Der Grundriss von Gebäuden wurde als möglicher Sondenstandort ausgeschlossen. Es wurde aber keine Platzreserve für das Stellen der Bohrgerätschaft um ein Gebäude angenommen, da Bohrungen auch leicht schräg angesetzt werden können. Die jahrelange Erfahrung beim Bau von Erdwärmesonden zeigt, dass es unzählige Möglichkeiten gibt, auch enge Platzverhältnisse zu meistern (Einsatz von Kran etc.). Für Unterhalts- und Wartungsarbeiten muss die Stelle lediglich zugänglich sein.	Teilweise
Bohrarbeiten in Gleisnähe	Die Sonden sind vorzugsweise ausserhalb des Gleisbereichs vorzusehen. Es sollte vermieden werden, das Schotterbett zu durchbrechen. Es ist allerdings nicht grundsätzlich unmöglich, im Gleisbereich zu bohren. Bei einem Abstand von 5 m von der Gleisachse sind die Arbeiten ohne Betriebsunterbruch durchführbar. Bis zu einem Abstand von 3 m sind Bohrarbeiten mit verstärkten Auflagen (z.B.: Sicherheitswärter) möglich. Grundsätzlich sind für Bauarbeiten in Gleisnähe die Richtlinien gemäss Regelwerk RTE 20100 und 20600 massgebend. In der GIS Analyse wird von einem Abstand von 3 m ausgegangen. Eine Analyse mit 5 m Abständen wird zu Vergleichszwecken ebenfalls durchgerechnet.	Ja
Wirtschaftlichkeit	Längerfristig muss eine Technologie auch wirtschaftlich vorteilhaft sein, um Erfolg zu haben. Bei der geothermischen Weichenheizung wird dabei vor allem die Entwicklung der Energiepreise entscheidend sein. Zudem sind diverse standortspezifische Faktoren und technische Aspekte entscheidend, um die Wirtschaftlichkeit zu berechnen.	Nein
Höhenlage / Klima	Mit dem kälteren Klima in höheren Lagen steigen die Betriebsstunden von Weichenheizungen an. Zudem steigt die benötigte Leistung pro Schienenmeter, um die Schiene schneefrei zu halten. Zu diesem Aspekt fehlen allerdings fundierte Untersuchungen. Die Auslegung der aktuellen Systeme basiert hauptsächlich auf Erfahrungswerten. Die geforderte Leistung durch die Erdwärmesonde bereitzustellen ist prinzipiell eine Frage der Dimensionierung (Tiefe, Anzahl). Jedoch sind der Leistungsübertragung insofern Grenzen gesetzt, als die Vorlauftemperatur der Sole und die Übertragerfläche an der Schiene begrenzt sind. Da die Leistungsgrenze heute noch nicht bekannt ist, konnte dieser Aspekt nicht berücksichtigt werden. Siehe auch Diskussion (Kapitel 5).	Nein
Technische Umsetzung	Unter der im obigen Kriterium behandelten Tatsache, dass die überwiegende Mehrheit der WHZ in der Schweiz im Mittelland liegt und die Erfahrungen in Deutschland positiv sind, wurde die technische Machbarkeit und Funktionstüchtigkeit der geothermischen WHZ als gegeben angenommen. Zur Funktionstüchtigkeit in Extremlagen sind weitere Unter-	Nein

	suchungen notwendig. Bei der Umsetzung stehen einerseits verschiedene Systeme zur Auswahl (Kapitel 2.3) und andererseits sind verschiedene Aspekte zu beachten: Lastprofil: Um die Erdwärmesonde korrekt dimensionieren zu können muss ein Lastprofil zur Verfügung stehen, woraus ersichtlich ist, wann welche Leistung gefordert ist. Dimensionierung Sonde: Aus dem Lastprofil kann ein auf Geothermie spezialisiertes Ingenieurbüro die Tiefe und Anzahl der Erdwärmesonden berechnen. Für die Dimensionierung gelten die Vorgaben der SIA 384/6 [5]. So darf die Sondaustrittstemperatur beim Einsatz einer geeigneten Sole nach 50 Jahren Betrieb nicht unter 0°C fallen. Aus bohrtechnischen Gründen wird zudem empfohlen, einen minimalen Sondenabstand von 5 m einzuhalten. Distanz Sonde – WHZ: Bei Systemen mit Gravitationswärmerohr sind der Entfernung von der Sonde zur WHZ enge Grenzen gesetzt (Kapitel 2.3.3). Bei den übrigen Systemen besteht eine gewisse Flexibilität. Jedoch erhöhen sich die Kosten und Wärmeverluste mit der Leitungslänge. Weiter muss bei Sondenfeldern gemäss SIA 384/6 [5] die Hydraulik rechnerisch nachgewiesen werden, wenn die Zuleitungslängen mehr als 50% der Sondentiefe betragen, und es müssen allenfalls Drosselorgane eingebaut werden. Die Leitungen müssen auf alle Fälle wärmeisoliert sein. Wärmepumpe: Es braucht nicht für jede WHZ eine Wärmepumpe. Eine Wärmepumpe kann je nach geforderter Leistung mehrere WHZ versorgen. Über eine Variantenstudie kann die optimale Grösse und Anzahl der Wärmepumpen berechnet werden. Dabei muss auch die Leistungszahl (COP) in die Berechnungen miteinbezogen werden. Steuerung: Eine komplett neue Steuerung zu verwenden ist in den wenigsten Fällen sinnvoll und erwünscht. Die Anforderungen an die Schnittstelle zum bahneigenen System müssen sauber definiert und vom Lieferanten eingefordert werden.	
--	---	--

4.2 Quantitative Auswertung

4.2.1 Theoretisches Potenzial

Das Theoretische Potenzial zeigt auf, ob der Standort in einer Bewilligungszone liegt und damit eine Umrüstung mit einer geothermischen WHZ grundsätzlich möglich ist. Die Grundlagendaten dazu sind die Bewilligungskarten für Erdwärmesonden der Kantone (siehe Kapitel 3.3.3) und die Koordinaten der WHZ-Standorte (siehe Kapitel 3.3.2).

Insbesondere bei den Systemen, bei denen die Erdwärmesonde an eine Wärmepumpe gekoppelt ist, müssen Erdwärmesonden nicht direkt am Standort der Weiche gebohrt werden. Auch die Wärmepumpe muss nicht bei der Weiche stehen. Weiter können einzelne WHZ zusammengefasst werden und über Wärmepumpen mit mehreren Sonden betrieben werden. Dies lässt Spielraum für das Platzieren von Bohrungen. Deshalb wurde auch die Bewilligungsfähigkeit im Umkreis der WHZ analysiert, ohne darauf einzugehen, wie und wo eine Anlage technisch genau umgesetzt würde.

Für diese Abstandsanalyse wurde als erstes die Bewilligungsfähigkeit direkt am Standort bestimmt. Jedem Standort wurde seine jeweilige Eignung aus der Bewilligungskarte zugewiesen. Dazu wurden die Eignungskategorien aus Tab. 2 verwendet (Bohrverbote in rot, zulässige Standorte in grün und solche mit zusätzlichen Auflagen in gelb). Anschliessend wurde in unterschiedlichem Umkreis um die Weichen die höchste Zulässigkeitsstufe bestimmt und dem Standort zugeordnet. Abb. 11 zeigt das

Vorgehen beispielhaft. Im oberen Bild wird die Bewilligungsfähigkeit am Standort dargestellt. Das untere Bild zeigt Kreise im Radius von 50m um die WHZ. Die Farbe dieser Kreise ist durch die höchste darin enthaltene Zulässigkeitsstufe definiert. So ändern Standorte, die am Rande von verschiedenen Bewilligungszonen liegen, ihre Bewilligungsfähigkeit zum Beispiel von rot zu grün. Dies heisst, dass zwar am direkt Standort der WHZ nicht gebohrt werden darf, aber im näheren Umkreis.

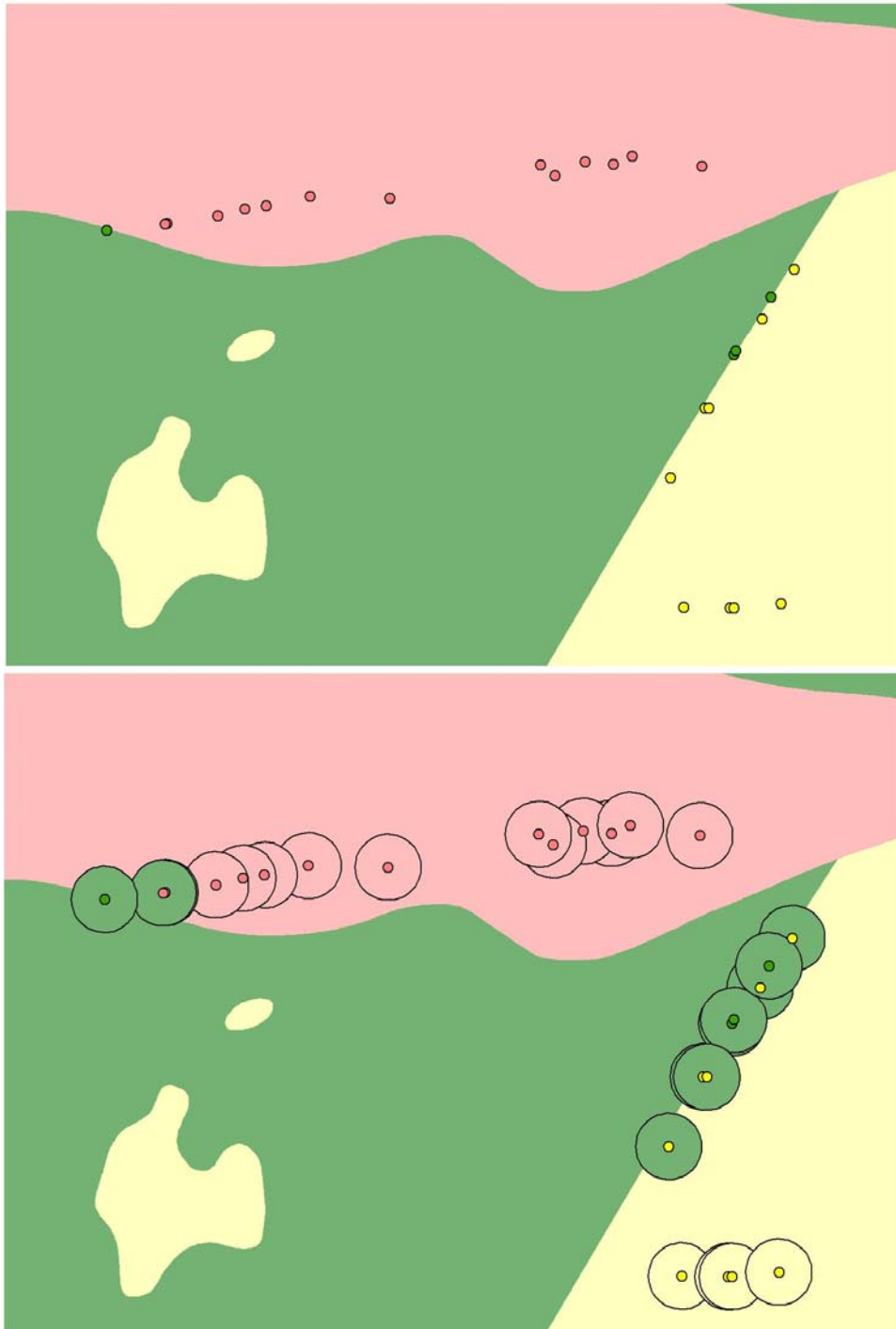


Abb. 11 Abstandsanalyse zur Bestimmung des Theoretischen Potenzials an einem WHZ-Standort. Die Punkte stellen die Position der beheizten Weichen dar. Oben sind Punkte entsprechend der Bewilligungsfähigkeit eingefärbt. Unten sind Kreise mit 50 m Abstand um die Punkte dargestellt. Die Einfärbung entspricht der höchsten darin enthaltene Zulässigkeitsstufe. Grün= zulässig, Gelb= mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen, Rot= verboten

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, sind nicht für alle Kantone Erdwärmesondenbewilligungskarten vorhanden oder es wurde aus Kostengründen auf die digitalen Karten verzichtet. Das heisst, in 5 Kantonen war eine automatisierte Abstandsanalyse nicht möglich. Für die Standorte in diesen Kantonen wurde entweder über die Grundwasserschutzkarte oder über die online vorhandene Erdwärmesondenkarte manuell die Erdwärmesondeneignung bestimmt. Dabei wurde jeweils auch der Umkreis der Standorte betrachtet. So konnten diese Standorte ebenfalls in die Bestimmung des Theoretischen Potenzials einbezogen werden. Bei der überwiegenden Mehrheit der Standorte entspricht die Eignung im Umkreis auch der Eignung am Standort.

Die Analyse wurde für den Standort selbst sowie für die Umkreise von 10 m, 30 m und 50 m durchgeführt. Die Verteilung der WHZ in die verschiedenen Bewilligungskategorien ist in Tab. 4 zusammengefasst. Direkt am Standort liegen 40% der Weiche in einer Zone, in der Erdwärmesonden erlaubt sind. Für 16% weitere Standorte könnte eine Bohrbewilligung mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen erhalten werden. In 44% der Fälle dürfen keine Erdwärmesonden erstellt werden. Je grösser der Radius gewählt wird, desto mehr Standorte fallen in den für Erdwärmesonden zulässigen Bereich. Im Umkreis von 50 m findet sich bei 46% der Weichen ein Bereich, in der Erdwärmesonden zulässig sind. Der Anteil an Standorten mit Bohrverboten sinkt auf 39%. Wird davon ausgegangen, dass jeweils auch für die Kategorie „mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen“ eine Bewilligung erhalten wird, liegt der Anteil von Anlagen die theoretisch umgerüstet werden können, zwischen 56% am Standort und 61%, wenn ein Gebiet von 50 m um die Weiche einbezogen wird.

Das Theoretische Potenzial für geothermische Weichenheizungen in die Schweiz ist nachfolgend als Karten dargestellt: Jeder Weiche ist die Eignung am Standort (Abb. 12) und im Umkreis von 50 m (Abb. 13) zugeordnet.

Tab. 4 Bestimmung des Theoretischen Potenzials: Verteilung der WHZ in die verschiedenen Bewilligungskategorien für Erdwärmesondenbohrungen in Abhängigkeit vom Abstand zur Weiche.

	zulässig	mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen	verboten
Am Standort	3'414 40%	1'360 16%	3'825 44%
In Umkreis von 10m	3'556 41%	1'347 16%	3'696 43%
In Umkreis von 30m	3'771 44%	1'317 15%	3'511 41%
In Umkreis von 50m	3'969 46%	1'277 15%	3'353 39%

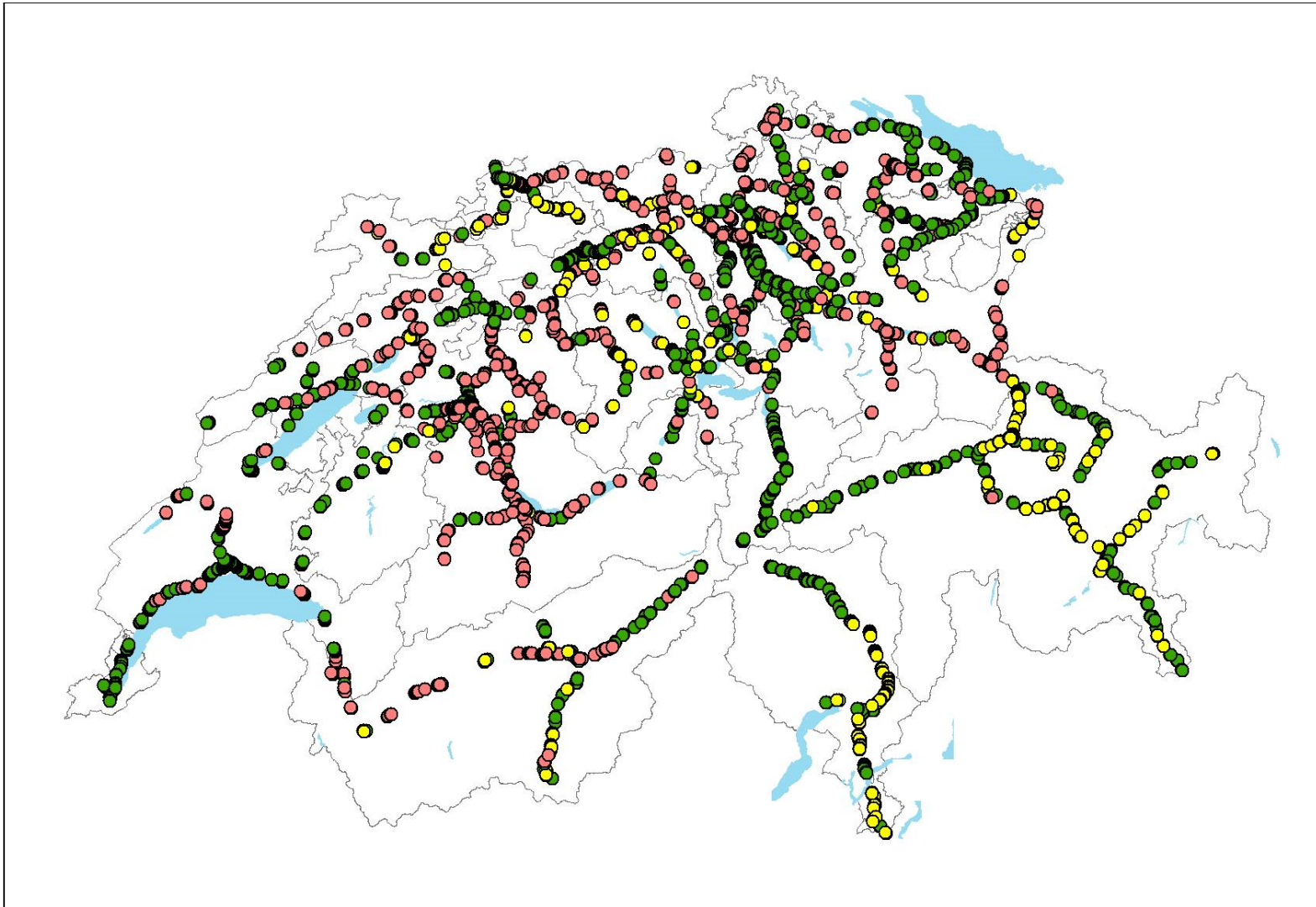


Abb. 12 Bestimmung des Theoretischen Potenzials: Bewilligungsfähigkeit für Erdwärmesondenbohrungen am Standort einer WHZ. Grün= zulässig, Gelb= mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen, Rot= verboten.

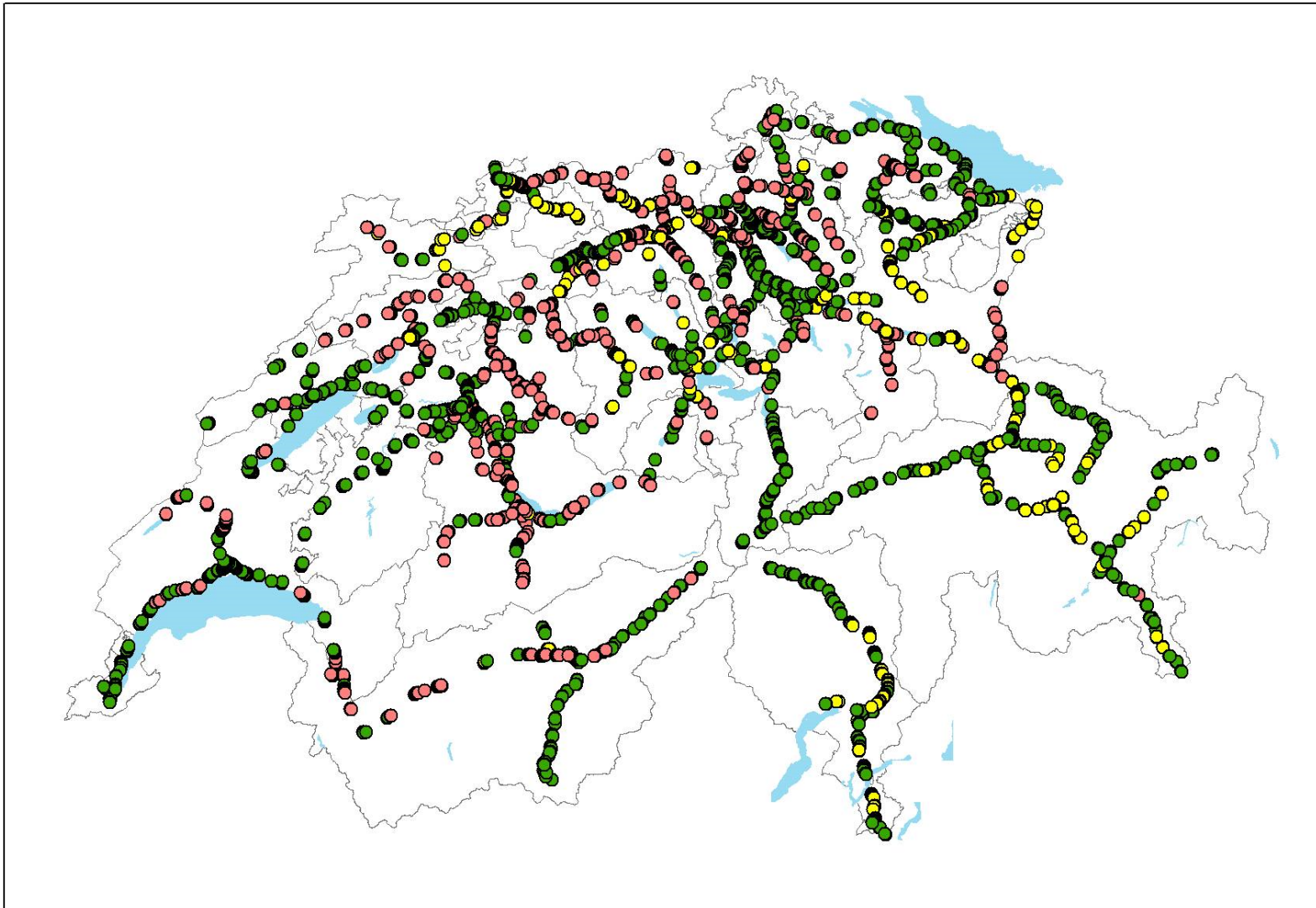


Abb. 13 Bestimmung des Theoretischen Potenzials: Bewilligungsfähigkeit für Erdwärmesondenbohrungen im Umkreis von 50 m um eine WHZ. Grün= zulässig, Gelb= mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen, Rot= verboten.

4.2.2 Erschliessbares Potenzial

Für das Erschliessbare Potenzial wurden neben kantonalen, geothermischen Eignungskarten zusätzlich auch der Abstand zu Gewässern, die Gebäudegrundrisse, die Parzellengrenzen und der Abstand von der Schienenachse berücksichtigt. Gegenüber dem Theoretischen Potenzial wurden dadurch zusätzlich Standorte ausgeschlossen, die zum Beispiel zu nah an Gewässer sind oder im Schienenbereich liegen.

Abb. 14 zeigt das angewandte Vorgehen. Das Gewässernetz wurde einbezogen, indem gemäss Tab. 3 ein Uferbereich um die Gewässer berechnet wurde, in welchem wegen des Gewässerschutzes ein Bohrverbot besteht. Weiter wurde 3 m links und rechts der Gleisachsen eine Verbotzone vorgesehen. In diesem Bereich sind aufgrund der Vorgaben der Bahnen keine Bohrarbeiten erlaubt. Analog dazu wurde auch für 5 m beidseitigen Gleisabstand vorgegangen. Auch die Gebäudegrundrisse wurden einbezogen. Unter den bestehenden Gebäuden sind ebenfalls keine Bohrungen möglich. Diese 3 Kriterien wurden zu einer Ausschlusszone zusammengefasst und in die kantonalen Eignungskarten integriert. Diese Ausschlusszonen sind in Abb. 14 nachstehend grau eingefärbt. Anschliessend wurden diese Eignungskarten auf die Parzellen der Bahnen zugeschnitten.

Danach wurde mit dieser verfeinerten Karte analog zu Kapitel 4.2.1 eine Abstandsanalyse durchgeführt. Abb. 15 zeigt ein Beispiel. Im oberen Bild wird die Situation am Standort dargestellt. Die Weichen befinden sich im Gleisbereich, welcher gemäss den Vorgaben für Bauarbeiten ausgeschlossen wurde. Das erschliessbare Potenzial ist daher bei 0 m Abstand vom Weichenstandort gleich Null. Das untere Bild zeigt die Zulässigkeit im Radius von 50 m um die WHZ. Die Kreise sind in der Farbe der höchsten darin enthaltenen Zulässigkeitsstufe eingefärbt.

Die SOB konnte keine digitalen Daten zu ihren Grundstückspartellen zur Verfügung stellen (siehe Kapitel 3.3.5). Die Analyse der Daten der anderen Daten zeigte aber, dass nur 3% der Weichen nicht auf einem bahneigenen Grundstück liegen und sogar nur 1% der Standorte weiter als 50 m von einem Grundstück entfernt sind (siehe Tab. 5). Es wurde also angenommen, dass sich die Weichen der SOB ausschliesslich auf den eigenen Grundstücken befinden. Im Gebiet der SOB wurden auch die Gleisbereiche, die Grundrisse und die Uferbereiche ausgeschieden und die Abstandsanalyse analog zur Beschreibung im vorherigen Absatz durchgeführt.

Für die 5 Kantone ohne Erdwärmesondeneignungskarten wurde weiter angenommen, dass das Theoretische Potenzial auf den Parzellen auch dem Erschliessbaren entspricht und die Werte aus dem Theoretischen Potenzial in die Auswertung übernommen. Weichenheizungen, die nicht auf einer Bahnparzelle liegen wurden aber ausgeschieden und es wurde berücksichtigt, ob eine Weiche im Gleisbereich liegt und somit nicht erschliessbar ist.



Abb. 14 **Oben** sind alle für die Bestimmung des Erschliessbaren Potenzials berücksichtigen Ausschlusskriterien dargestellt: rot= Gleisachsen (Bahn und Tram) mit 3 m Verbotszone, Blau= Gewässer mit Uferbereich, Grau= Gebäudegrundriss, Transparent= Parzelle der Bahnen. Für die Abstandsanalyse werden diese Daten **unten** auf die Parzellen zurechtgeschnitten. Alle Ausschlussgebiete sind **unten** grau dargestellt. (Quelle swissTLM3D: Bundesamt für Landestopografie)

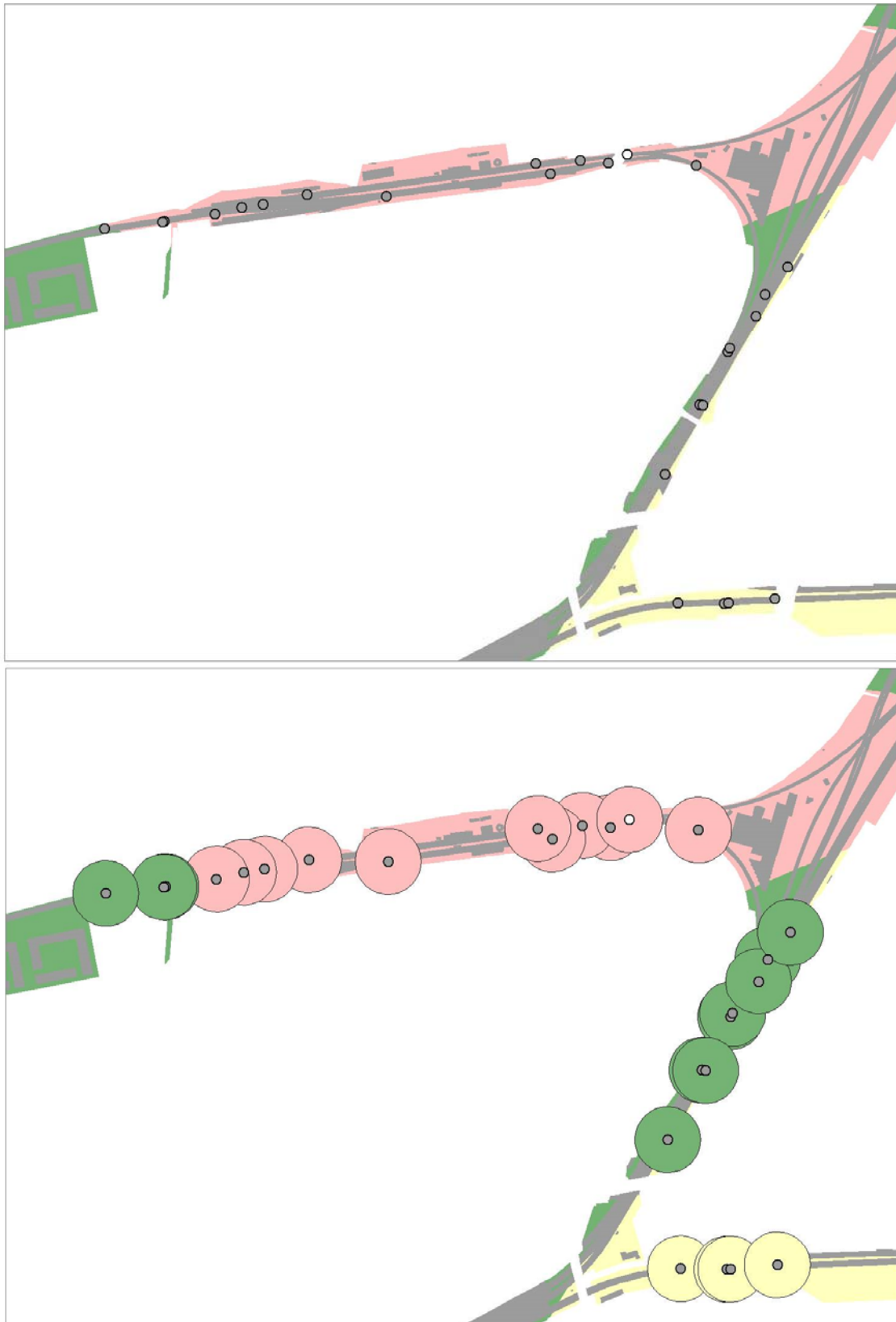


Abb. 15 Abstandsanalyse zur Bestimmung des Erschliessbaren Potenzials: Die Punkte stellen die Position der beheizten Weichen dar. Sämtliche WHZ liegen im Gleisbereich, welcher für Bauarbeiten ausgeschlossen ist (**oben**). **Unten** sind Umkreise mit 50 m Abstand um die Punkte dargestellt. Die Einfärbung entspricht der höchsten darin enthaltenen Zulässigkeitsstufe. Grün= zulässig, Gelb= mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen, Rot= verboten, Grau= Bereiche, die aufgrund der in Abb. 14 beschriebenen Kriterien ausgeschlossen sind. (Quelle swissTLM3D: Bundesamt für Landestopografie)

Das Erschliessbare Potenzial wurde ebenfalls für die Umkreise von 10 m, 30 m und 50 m bestimmt. Tab. 5 fasst die Resultate für einen Bohrverbotsbereich von 3 m ab Gleisachse zusammen. 97% der Weiche liegen auf den Parzellen der Bahnen. Da die Weichen selbst im Gleisbereich liegen, kann direkt am Standort (0 m Abstand) kein Potenzial ausgewiesen werden. In einem Abstand von 10 m sind für 35% der Standorte Erdwärmesondenbohrungen zulässig. Bei 12% weiterer Standorte könnte eine Bohrbewilligung mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen erhalten werden. In einem Umkreis von 50 m liegt der Anteil bei 43% bzw. 15%. Werden die Kategorien „zulässig“ und „mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen“ zusammengefasst, können im Umkreis von 10 m 47% und in einem Umkreis von 50 m 57% der Weichen mit einer geothermischen Weichenheizung erschlossen werden.

Tab. 5 Bestimmung des Erschliessbaren Potenzials bei einem minimalen Abstand von 3 m zur Gleisachse: Verteilung der WHZ in die verschiedenen Bewilligungskategorien für Erdwärmesonden, in Abhängigkeit vom Abstand zur Weiche.

	ausserhalb Parzelle	zulässig	mit Auflagen	verboten	im Gleis- oder Uferbereich
Am Standort	239 3%	0 0%	0 0%	0 0%	8'360 97%
In Umkreis von 10m	110 1%	3'030 35%	1'042 12%	3'394 39%	1'023 12%
In Umkreis von 30m	68 1%	3'541 41%	1'234 14%	3'658 43%	98 1%
In Umkreis von 50m	62 <1%	3'672 43%	1'253 15%	3'577 42%	35 <1%

Tab. 6 Bestimmung des Erschliessbaren Potenzials bei einem minimalen Abstand von 5 m zur Gleisachse: Verteilung der WHZ in die verschiedenen Bewilligungskategorien für Erdwärmesonden, in Abhängigkeit vom Abstand zur Weiche.

	ausserhalb Parzelle	zulässig	mit Auflagen	verboten	im Gleis- oder Uferbereich
Am Standort	239 3%	0 0%	0 0%	0 0%	8'360 97%
In Umkreis von 10m	110 1%	2'206 26%	726 8%	2'190 25%	3'367 39%
In Umkreis von 30m	68 1%	3'198 37%	1'160 13%	3'239 38%	934 11%
In Umkreis von 50m	62 1%	3'475 40%	1'201 14%	3'398 40%	463 5%

Tab. 6 zeigt die analogen Ergebnisse, wenn ein minimaler Abstand für Bohrarbeiten von 5 m ab Gleisachse angenommen wird. Hier erhöht sich die Anzahl der WHZ die im Gleisbereich liegen deutlich gegenüber dem Fall mit 3 m Gleisabstand. Im Umkreis von 10 m sind in 26% der Fälle Bohrbewilligungen zu erhalten. Im Umkreis von 50 m sind es mit 40% aber schon fast so vielen wie bei 3 m Abstand in Tab. 5. Werden die Kategorien „zulässig“ und „mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen“ zusammengezählt, sind es im Umkreis von 10 m 34% und bei 50 m Abstand 54% der WHZ, die geothermisch umgerüstet werden könnte.

Abb. 17 und Abb. 18 zeigen das Erschliessbare Potenzial über die Schweiz im Umkreis von 50 m um eine Weichenheizung unter Berücksichtigung von 3 m Abstand respektive 5 m von der Gleisachse. Anhand dieser grafischen Übersicht zeigen sich deutliche regionale Unterschiede, die hauptsächlich auf unterschiedliche Handhabung der Bewilligungspraxis in den verschiedenen Kantonen zurückzuführen ist. Sehr restriktiv in der Bewilligungspraxis ist insbesondere der Kanton Bern. Diese regionalen Unterschiede zeigen sich auch, wenn das erschliessbare Potenzial der einzelnen Bahnen ausgewiesen wird (Abb. 16 sowie Anhang Tab. A 3 bis Tab. A 5). Bei der hauptsächlich im Kanton Bern operierenden BLS liegt das erschliessbare Potenzial nur bei rund 30%. 65% der Standorte liegen in einer Verbotszone. Tendenziell liegen im Mittelland mehr Standorte in Verbotszonen als in den Alpengebieten. Dies zeigt sich sowohl anhand der grafischen Übersicht über die Schweiz, als auch im Erschliessbaren Potenzial. Die hauptsächlich im alpinen Raum operierenden MGB und RhB weisen hohe Potenziale auf. Die SBB liegt etwa im Durchschnitt, den sie durch ihre grosse Anzahl WHZ auch massgeblich mitbestimmt.

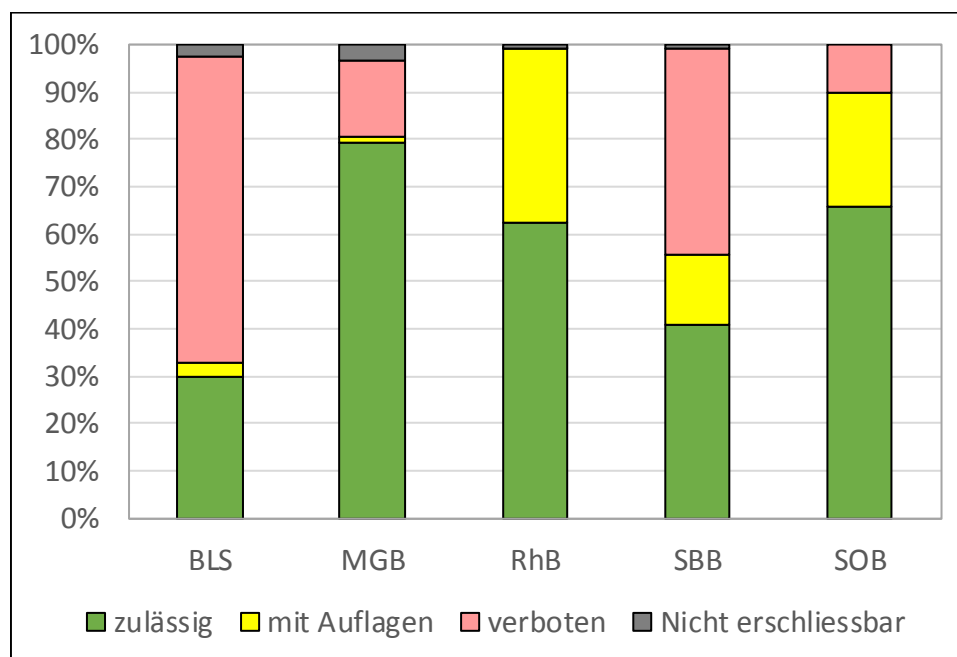


Abb. 16 Erschliessbares Potenzial für verschiedene Bahnen (3 m Gleisabstand, Umkreis 50 m)

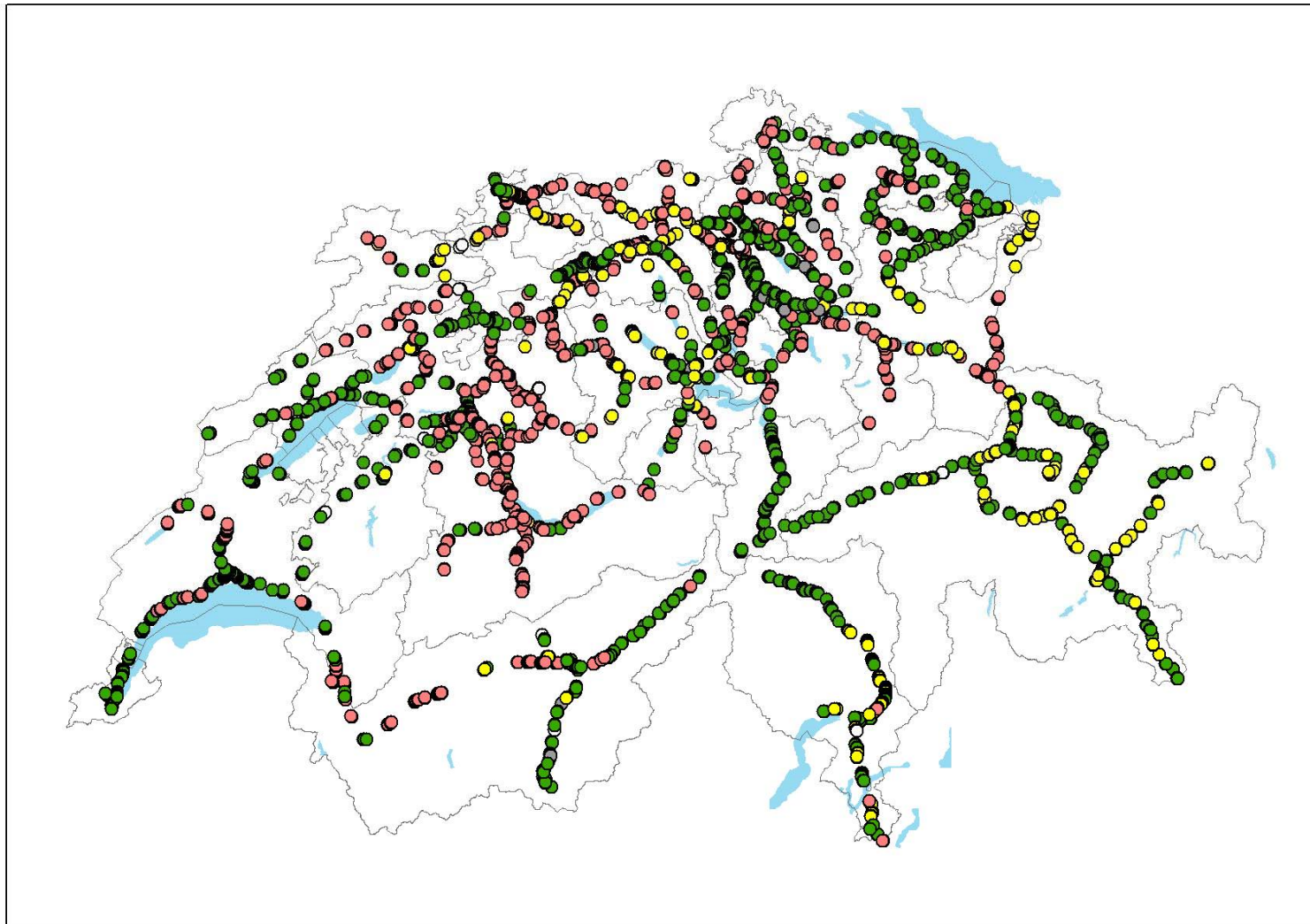


Abb. 17 Bestimmung des Erschliessbaren Potenzials bei einem minimalen Abstand von 3 m zur Gleisachse: Bewilligungsfähigkeit für Erdwärmesondenbohrungen im Umkreis von 50m um eine WHZ. Grün= zulässig, Gelb= mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen, Rot= verboten, Grau= im Gleisbereich, Weiss= Ausserhalb der bahneignen Parzelle.

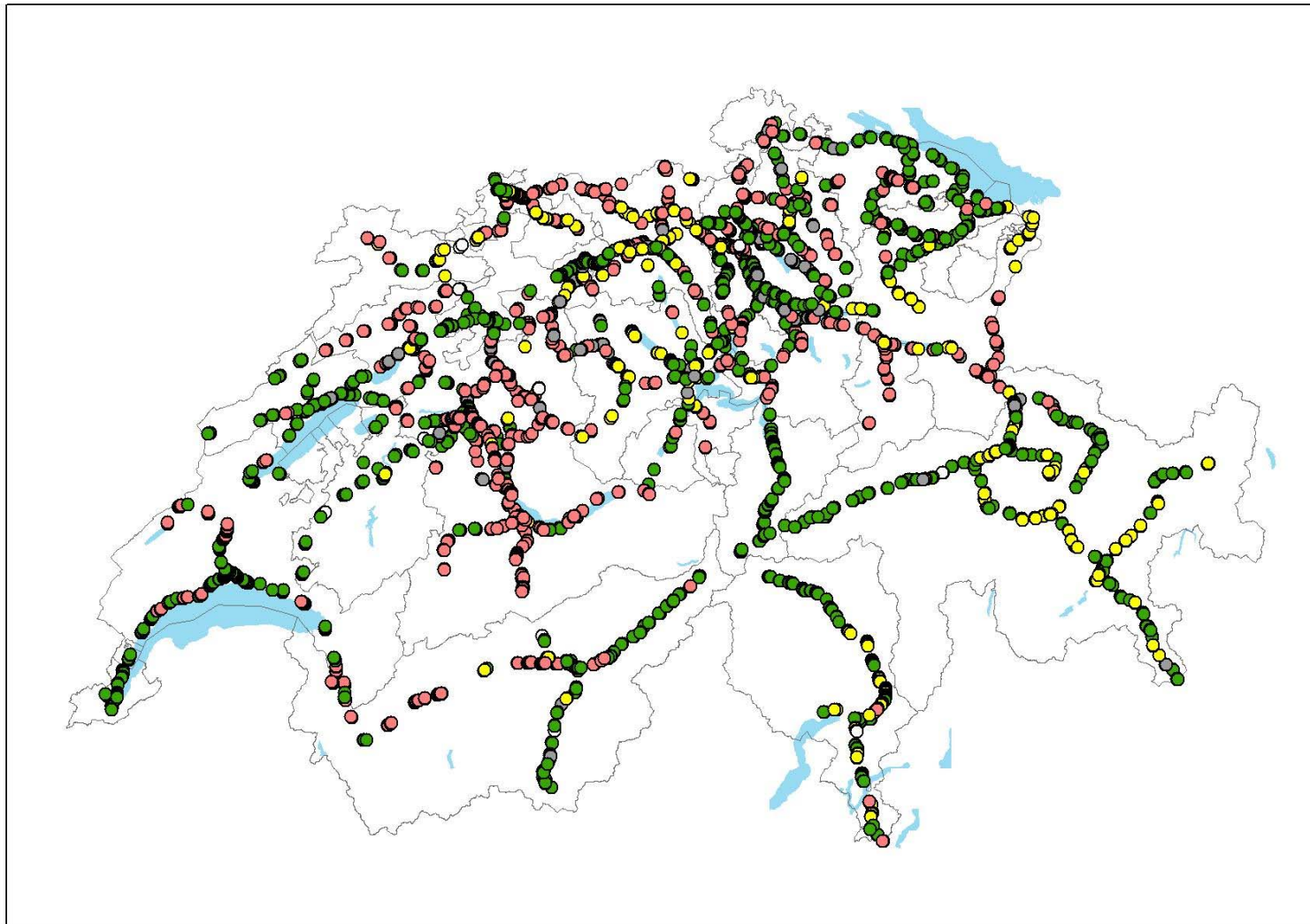


Abb. 18 Bestimmung des Erschliessbaren Potenzials bei einem minimalen Abstand von 5 m zur Gleisachse: Bewilligungsfähigkeit für Erdwärmesondenbohrungen im Umkreis von 50m um eine WHZ. Grün= zulässig, Gelb= mit Auflagen oder nach weiteren Abklärungen, Rot= verboten, Grau= im Gleisbereich, Weiss= Ausserhalb der bahneignen Parzelle.

5 Diskussion

In Abb. 19 sind die verschiedenen Potenziale grafisch zusammengefasst, je einmal nur für die WHZ in einer Bewilligungszone ohne Auflagen (links) und je einmal inklusive der Standorte in einer Zone mit zusätzlichen Auflagen aber ohne Verbot (rechts). Die Bedeutung des erschliessbaren Potenzials kann wie folgt interpretiert werden: Z.B. kann bei 41% der WHZ in einem Umkreis von 30m ein Bohrplatz gefunden werden, der in einer Bewilligungszone liegt, der zu einer Bahnparzelle gehört, der mindestens 3 m vom Gleisbereich entfernt ist, nicht überbaut ist und den geforderten Abstand von Gewässern aufweist (linke Grafik, Punkt 30 m / 41%). Wenn auch die Zonen einbezogen werden, wo Auflagen bestehen, aber kein Bohrverbot, so erhöht sich der Anteil nochmals auf 56% aller WHZ (rechte Grafik, Punkt 30 m / 56%).

Am Standort selber ist das erschliessbare Potenzial Null, da die Weiche im Gleisbereich liegt und dieser per Definition inklusive einem Abstand von 3 m bzw. 5 m für Bohrungen ausgeschlossen ist. Mit zunehmendem Umkreis nähert sich das Erschliessbare Potenzial dem Theoretischen Potenzial an. Ab einem Radius von 30 m macht der Unterschied weniger als 5%-Punkte aus. Dies bedeutet, dass das Kriterium «Bewilligungszone» die grösste Einschränkung darstellt und die übrigen Erschliessbarkeits-Kriterien demgegenüber wenig ins Gewicht fallen. Wenn die WHZ in einer Bewilligungszone liegt, findet sich in den meisten Fällen ein Platz für die Sonde, vorausgesetzt es besteht eine gewisse Toleranz bezüglich Abstand von der WHZ zur Sonde. Dies setzt entsprechend lange Leitungen voraus.

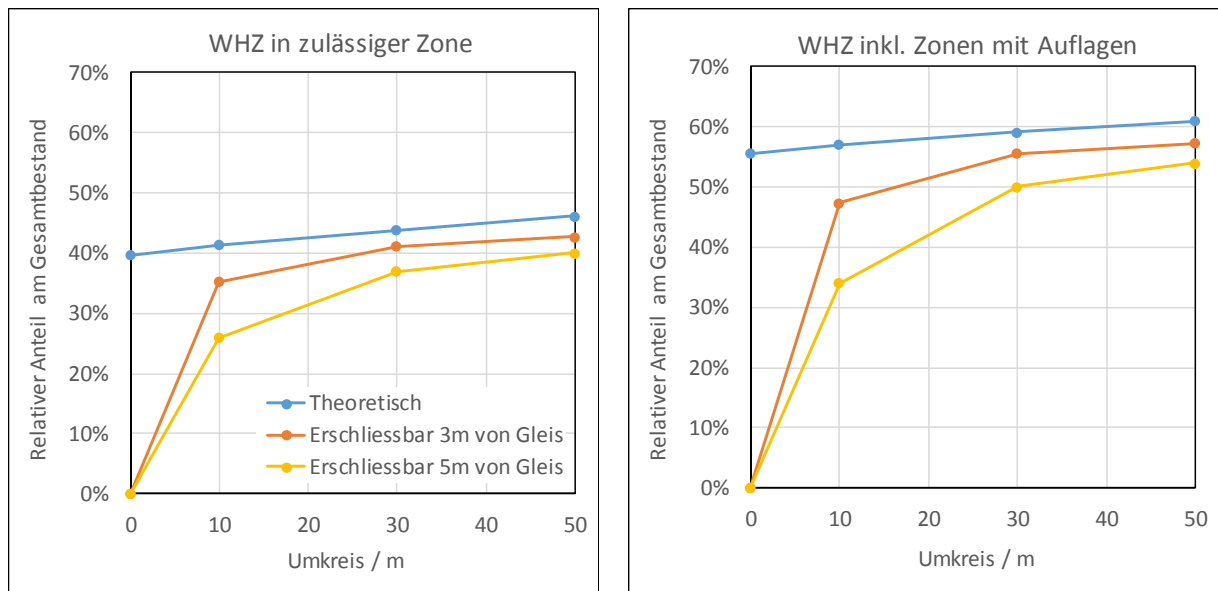


Abb. 19 Zusammenfassung der Theoretischen und Erschliessbaren Potenziale mit variablem Umkreisradius

In der praktischen Umsetzung ist der tolerierbare Maximalabstand von der WHZ abhängig von der gewählten Technologie. Bei passiven Systemen mit einem Gravitationswärmerohr (Kapitel 2.3.3) ist der tolerierbare Abstand deutlich kürzer als bei Systemen mit einer Umwälzpumpe, da dieses Prinzip nur mit stetiger Steigung hin zur Weiche funktioniert. Es wird daher vom Hersteller ein Abstand von maximal 6 m empfohlen, da ansonsten zu hohe Kosten für Erdarbeiten entstehen. Auch wenn dieses Problem bei Verwendung einer klassischen Sonde mit Umwälzpumpe weniger gross ist, so stellt zusätzliche Leitungslänge doch immer ein Kostenfaktor dar und die Wärmeverluste steigen.

In einigen Kantonen gilt auch für Sonden in zugelassenen Zonen eine Tiefenbeschränkung. Beispielsweise gibt es im Kanton Zürich überall eine Tiefenbeschränkung (zwischen 50 m und 500 m). Dies wurde in der Analyse nicht berücksichtigt. Grundsätzlich kann die beschränkte Tiefe durch Erhöhung der Anzahl Sonden kompensiert werden. Es sind je nach Kanton auch zusätzliche Auflagen möglich, die in den Bewilligungskarten nicht berücksichtigt sind.

Da in dieser Studie nur Erdwärmesonden berücksichtigt wurden, ist das Potenzial eher konservativ geschätzt. Insbesondere oberflächennahes Grundwasser wäre eine weitere Möglichkeit, Geothermie für Weichenheizungen zu nutzen. Die Grundwassernutzung trägt momentan ca. 12% zur geothermischen Wärmeproduktion in der Schweiz bei (vgl. Kapitel 2.2). Zur Nutzung von Grundwasser gelten andere Bewilligungsgrundlagen. Diese sind sehr vom Standort und der Geologie abhängig. Oft werden zudem Vorgaben zur Grösse der Anlage gemacht. So werden im Kanton Zürich nur Anlagen über 100 kW installierte Leistung bewilligt. Grundsätzlich ist mit einem erhöhten Aufwand für die Erkundung sowie für den Unterhalt des Grundwasserbrunnens zu rechnen. Für Weichenbeheizung kommt Grundwasser aus diesen Gründen nur bei grösseren Anlagen in Frage.

Die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit einer geothermischen WHZ wurde in dieser Studie unabhängig von der Höhenlage als gegeben angenommen. Diese Annahme stützt sich auf die Erfahrungen in Deutschland, wo mittlerweile über 30 geothermische WHZ in Betrieb sind (Kapitel 2.3). Die Referenztafel von Triple-S, welche bisher am meisten Anlagen realisiert hat, ist im Anhang aufgeführt (Tab. A 1). Die Erhebung im Jahr 2013 bei den 6 grössten Bahnen der Schweiz [1] ergab, dass 65% der WHZ unter 500 m.ü.M. liegen und 80% unter 800 m.ü.M. Die Mehrheit liegt im Mittelland. Das Klima ist hier durchaus vergleichbar mit den deutschen Verhältnissen. Eine der ersten Anlagen von Triple-S wurde im bayrischen Farchant auf 670 m.ü.M. in Betrieb genommen. Wie Abb. 20 zeigt, verläuft die Durchschnittstemperatur in den Wintermonaten praktisch identisch zu St. Gallen, aber deutlich tiefer als in Bern und Luzern. Die Niederschlagsmenge ist im Januar und Februar etwas tiefer als in den Schweizer Städten, liegt aber ansonsten in derselben Grössenordnung. Gemäss der Betreiberin der Anlage in Farchant, der DB Netz AG, wurde die Verfügbarkeit bisher bei keiner geothermischen Anlage beeinträchtigt, weil nicht genügend Leistung an die Weiche abgegeben wurde. Die grössten Probleme traten bisher wegen Leckagen bei den gleisnahen Leitungen/Verbindungen auf, u.a. auch wegen Vandalismus.

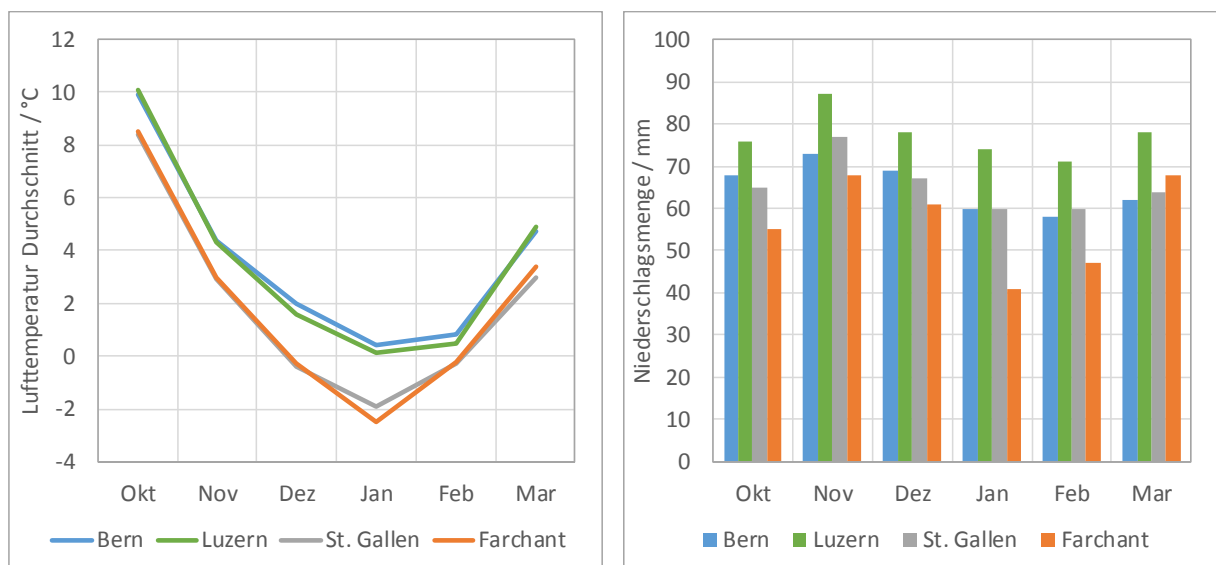


Abb. 20 Vergleich der Durchschnittstemperatur und Niederschlagsmenge von drei Schweizer Städten mit Farchant (D) in den Heizmonaten. Software Meteonorm, Version 5.1.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Potenzial der Standorte

Aufgrund der in den vorangegangenen Kapiteln präsentierten Zahlen zum Potenzial von geothermischen Weichenheizungen lässt sich folgern, dass je nach Voraussetzungen und Flexibilität am Standort rund die Hälfte der bisherigen WHZ Standorte für eine geothermische Beheizung in Frage kommen. Die grösste Einschränkung entsteht durch die kantonal geregelten Verbotszonen für Erdwärmesonden. Ca. 40% der Standorte liegen in solchen Verbotszonen. Diese werden vor allem auf Grund von Kriterien zum Schutz des Grundwassers erlassen. Wenn eine WHZ in einer Zone liegt, wo es grundsätzlich erlaubt ist, Erdwärmesonden zu errichten, sind die weiteren einschränkenden Kriterien, wie Minimalabstand vom Gleisbereich, Abstand zu Gewässern, Landeigentum etc. meist kein Hindernis. Voraussetzung dafür ist eine gewisse Flexibilität bezüglich Abstand von der Erdwärmesonde zur WHZ. Es wurde in dieser Studie von einem Maximalabstand von 50 m ausgegangen. Dies ist allerdings nur möglich bei Systemen mit Umwälzpumpe. Wenn eine Sonde nach dem Gravitationswärmerohrprinzip verwendet wird, ist der tolerierbare Abstand deutlich geringer, da die Zuleitungen eine stetige Steigung aufweisen müssen.

Die Befürchtungen zu Beginn der Studie, dass der Grossteil der WHZ im Bereich von Grundwasserschutz-zonen liegen, und daher für geothermische WHZ nicht geeignet sind, wurden nicht bestätigt. Aufgrund der Studienresultate gibt es keine Hinweise dafür, dass geothermische WHZ in der Schweiz wegen der geografischen Lage nicht geeignet wären. Klar ist andererseits jedoch auch, dass sie keine flächendeckende Lösung darstellen, sondern als energieeffiziente und umweltschonende Ergänzung zu den bisher verwendeten Technologien zu sehen sind.

Im Potenzial nicht berücksichtigt wurden weitere geothermische Nutzungsmöglichkeiten wie zum Beispiel Grundwasser oder Tunnelwasser. Ferner könnte theoretisch auch Fernwärme oder Abluft, z.B. aus einem Tunnel genutzt werden. Diese Varianten können im Einzelfall durchaus eine mögliche Ressource darstellen, werden sich aber wie auch im Bereich der Gebäudeheizung kaum als Standard etablieren (vgl. Kapitel 2.2). Der Planungsaufwand ist bei solchen Sondersystemen deutlich höher und sie würden zudem dem Bedürfnis der Bahnen nach standardisierten Systemen entgegenlaufen.

6.2 Energiesparpotenzial

Im Bereich der Gebäudeheizung machen Sole/Wasser-Wärmepumpen, d.h. Systeme, die Erdwärme mittels Sonden oder Erdregistern nutzen, ca. einen Drittel der neu verkauften Wärmepumpen aus. Die Wärmepumpen insgesamt haben im Schweizer Neubaumarkt einen Anteil von ca. 80% [2], was sehr hoch ist im Vergleich zum Ausland. Das bedeutet, dass bei ca. einem Viertel der Schweizer Neubauten Erdwärme zu Heizzwecken genutzt wird. Diese Tatsachen sprechen ebenfalls dafür, dass die Möglichkeiten und das Know How in der Schweiz vorhanden sind, um Geothermie auch für Weichenheizung zu nutzen.

In der Schweiz ist gegenwärtig noch keine geothermische WHZ in Betrieb. Die Entwicklung dieser Technologie und deren Verbreitung in der Schweiz in den nächsten Jahrzehnten zu prognostizieren ist schwierig. Sie wird hauptsächlich von der Entwicklung der Energiepreise und vom politischen Willen, die Energieziele der Energiestrategie 2050 zu verfolgen, abhängen. Entsprechend ist es auch schwierig, das Sparpotenzial zu quantifizieren. Wenn in Anlehnung an den Neubaumarkt im Gebäudebereich längerfristig ca. 25% aller bestehenden WHZ in der Schweiz durch geothermische WHZ ersetzt werden würden, könnten unter verschiedenen Annahmen pro Jahr rund 12.6 GWh eingespart werden (Anhang Tab. A 6). Dies sind 21% der gemäss Stand 2014 durchschnittlich verbrauchten Energie (60 GWh/a) für den WHZ-Bereich. Bei den aktuellen Energietarifen entspricht dies rund 1.1 Mio CHF. Die damit einhergehende Reduktion von ca. 2000 t CO₂ gehen bei diesen Berechnungen zu 98% auf das Konto der Gas-WHZ, welche ersetzt werden würden. Auch hier muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass bei diesen Zahlen die Verbesserungen bei den Gas-WHZ seit 2014 nicht berücksichtigt wurden. Wegen des hohen Anteils an Wasserkraft beim Bahnstrom, fällt die CO₂-Einsparung bei Ersatz der elektrischen WHZ deutlich geringer aus. Bei diesen Zahlen ist zu bedenken, dass es sich um Durchschnittswerte

handelt. Der Energieverbrauch der WHZ hängt stark vom klimatischen Verlauf des Winters ab und kann daher jährlich stark variieren.

6.3 Einsatzgrenzen geothermischer WHZ

Um geothermische WHZ zu fördern ist es von grosser Bedeutung, dass auch ihre Einsatzgrenzen untersucht und bekannt sind. Ansonsten wird der Anteil an Skeptikern gross bleiben. Bisher gibt es dazu keine fundierten und öffentlich zugänglichen Untersuchungen. Der Frage kann sich momentan nur über Erfahrungen mit Referenzanlagen angenähert werden. Die Höhenlagenstatistik der Schweizer WHZ zeigt, dass die überwiegende Mehrheit im Mittelland liegt. 80% der WHZ liegen unterhalb 800 m.ü.M. Aufgrund der bisherigen Erfahrung mit Referenzanlagen in ähnlichem Klima in Deutschland gibt es keine Hinweise darauf, dass die durch die geothermische WHZ bereitgestellte Leistung ungenügend ist. Die oft geäusserten Bedenken, dass «zu wenig Leistung an die Schiene gebracht werden kann», hat ihren Ursprung im Endeffekt darin, dass unabhängig von der Art der Beheizung überhaupt nicht bekannt ist, welche Leistung es in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen denn wirklich braucht. Die bestehenden Systeme wie elektrische WHZ oder Gas-WHZ wurden ohne wissenschaftliche Grundlage über die Jahrzehnte in kleinen Schritten weiterentwickelt und haben sich aufgrund von Erfahrung bewährt. Das Wissen um die qualitativen und quantitativen physikalischen Vorgänge sind aber Voraussetzung dafür, dass die Frage nach der Einsatzgrenze der geothermischen WHZ beantwortet werden kann. In einem von Europäischen Bahnen gemeinsam finanzierten Forschungsprojekt («Europoint»), welches gegenwärtig an der Universität Dresden durchgeführt wird, soll die Basis zu einem fundierteren physikalischen Wissen über die Vorgänge an der Weiche, unabhängig von der Heiztechnologie, gelegt werden. Es wäre zu begrüssen, wenn die dort erarbeiteten Modelle weiterverwendet werden könnten, um unter anderem auch die Frage nach der Einsatzgrenze von verschiedenen Technologien beantworten zu können.

6.4 Förderung geothermischer WHZ in der Schweiz

6.4.1 Hemmnisse

Die Potenzialanalyse in dieser Studie hat gezeigt, dass die Standortbedingungen für geothermische Weichenheizungen in der Schweiz gut sind. Aufgrund des hohen Energiesparpotenzials im Vergleich zu herkömmlichen Elektrischen- oder Gas-WHZ von geschätzt 60-100%, ist diese Technologie förderenswert und passt in diesem Sinne gut in die Energiestrategie ESÖV 2050. Allerdings wird es dazu verschiedene Hemmnisse zu überwinden geben. Die Hauptprobleme sind die folgenden:

- Für die Elektrotechnik-geprägte Bahnwelt sind hydraulische Systeme weitgehend fremd. Es muss neues Know How aufgebaut und Berührungsängste abgebaut werden.
- Die Einsatzgrenzen der geothermischen WHZ sind zu wenig bekannt. Dies gilt zwar für andere WHZ-Technologien auch, aber bei einer neuen Technologie ist die Skepsis besonders hoch, da es noch wenige Referenzanlagen gibt.
- Das wirtschaftliche Umfeld ist momentan schwierig für Energieeffizienzprojekte. Die Investitionskosten für geothermische WHZ sind höher als für vergleichbare elektrische WHZ. Die Mehrkosten lassen sich aufgrund der aktuellen tiefen Energiepreise kaum amortisieren.

Insgesamt ist der Markt für Weichenheizungen klein und kommerziell nicht sehr interessant für private Investoren. Daher wird sich ohne Fördergelder wenig bewegen. Die wichtigsten Förderansätze werden in den folgenden Abschnitten dargelegt.

6.4.2 Förderung von F&E-Projekten

Das Erreichen eines besseren physikalischen Verständnisses für die Vorgänge an der Weiche ist nicht nur für die geothermischen WHZ wünschenswert, sondern auch für die Weiterentwicklung der WHZ im Allgemeinen. Für die geothermischen WHZ ist es von grosser Wichtigkeit, dass die physikalischen An-

forderungen einerseits klarer definiert werden und andererseits die Grenzen dieser Technologie aufgezeigt werden können. Damit kann auch die häufig auftauchende Frage zur Einsatzgrenze beantwortet werden. Bei den geothermischen WHZ wird diese Grenze vor allem durch die Limitierung der Vorlauftemperatur der Sole und der zur Verfügung stehenden Wärmeübertragerfläche an der Schiene gegeben sein und weniger durch die geothermische Leistung der Sonde. Das Projekt «Europoint» (vgl. Abschnitt 6.3), bei welchem die SBB beteiligt ist, wird dazu eine gute Basis liefern. Allerdings wird es wichtig sein, die Modelle weiter zu entwickeln und auf die spezifischen Fragestellungen für geothermische Weichenheizung anzupassen. Es sollte Wert gelegt werden auf einen pragmatischen, ingenieurmässigen Ansatz und auf einen klar definierten, verständlichen Output, welcher für den «Praktiker» verwertbar ist. Dieser anwendungsorientierte Forschungsansatz ist am ehesten an einer Fachhochschule gegeben.

Einem systematischen Vorgehen folgend würde sich nach der theoretischen Betrachtung eine experimentelle Untersuchung aufdrängen, um die Modelle zu verifizieren. Dabei geht es vor allem darum, die Wärmeübertragungsvorgänge unter verschiedenen simulierten Klimabedingungen zu untersuchen. Solche experimentellen Untersuchungen werden zum Teil von den Herstellern der WHZ Systeme durchgeführt, werden aber nicht publiziert bzw. sind ohne unabhängige Begleitung der Projekte nur bedingt glaubwürdig. Allenfalls liesse sich über eine Zusammenarbeit mit einem Hersteller hier ansetzen, da ein erhöhtes Vertrauen schlussendlich der Verbreitung der Technologie und somit auch dem Hersteller dient. Aus finanzieller Sicht sind Erkenntnisgewinne aus einer Pilotanlage im Labormassstab sicher weniger teuer als solche aus einer Anlage, welche direkt im Bahnbetrieb zum Einsatz kommt.

6.4.3 Förderung von Demonstrationsanlagen

Die Skepsis gegenüber der geothermischen WHZ wird sich aber am ehesten durch funktionierende Anlagen in der Schweiz aus dem Weg räumen lassen. Die Finanzierung der nicht-amortisierbaren Mehrkosten gegenüber einer konventionellen WHZ wäre ein gutes Mittel zur Förderung. Weiter sollte bei geförderten Projekten sichergestellt werden, dass ein maximaler Erkenntnisgewinn aus dem Betrieb gezogen werden kann. Dies bedingt ein entsprechendes Begleitprojekt mit sauberem Messkonzept. Die generierten Daten sollten mit einer geeigneten Referenz verglichen werden können, um das Einsparpotenzial gegenüber konventionellen Technologien zu beziffern. Für geförderte Projekte ist eine Veröffentlichung der Daten und Erfahrungen anzustreben.

6.4.4 Förderung von Erfahrungsaustausch

Weiterhin sollte das bereits zu einem Teil aufgebaute «Netzwerk Weichenheizung» gepflegt und das Thema Weichenheizung allgemein und geothermische Weichenheizungen im Speziellen bei den verschiedenen Akteuren im Bewusstsein gehalten werden. Die Erkenntnisse aus Studien und geförderten Projekten sollten, wenn immer möglich, öffentlich zugänglich sein und über Präsentationen an Fachtagungen und Publikationen in Fachzeitschriften bekannt gemacht werden.

Wichtig ist es ausserdem, bei der Planung von geothermischen WHZ-Projekten frühzeitig das Fachwissen eines auf Geothermie spezialisierten Ingenieurbüros beizuziehen. Das Fachwissen dazu ist in der Schweiz reichlich vorhanden und muss nicht von Bahnseite her gänzlich neu aufgebaut werden. Diesem Aspekt sollte auch bei der Vergabe von Fördergeldern im Sinne der effizienten Verwendung der Geldmittel Beachtung geschenkt werden. Es wäre ausserdem denkbar, das Erstellen von Planungshilfen für geothermische WHZ zu finanzieren. So könnte den Bahnunternehmern ein Handbuch zur Verfügung gestellt werden, welches sie bei der Planung und Ausführung von Projekten unterstützt.

7 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

BAV	Bundesamt für Verkehr
BLS	(Bern-Lötschberg-Simplon) BLS AG
COP	Coefficient of performance, Kennwert für Wärmepumpen
ESÖV 2050	Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr
GIS	Geografisches Informationssystem
JAZ	Jahresarbeitszahl
MGB	Matterhorn Gotthard Bahn AG
RhB	Rhätische Bahn AG
SBB	Schweizerische Bundesbahnen AG
SOB	Südostbahn AG
WHZ	Weichenheizung

8 Literaturverzeichnis

- [1] Grüniger, A., Hoffmann, S., und Wellig, B., *Übersichtsstudie Energieeffiziente Weichenheizung*. 2014, Bundesamt für Verkehr BAV.
- [2] *Wärmepumpen-Statistiken*. Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS; URL: <http://www.fws.ch/statistiken.html>, [Abrufdatum 22/08/16].
- [3] Link, K., Blum, A., und Wyss, R., *Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz - Ausgabe 2015*. 2015, Schweizerische Vereinigung für Geothermie.
- [4] Schärli, U., Rohner, E., Signorelli, S., und Wagner, R., *Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ Messungen (d.h. „kabellose Temperatursonde“) mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kanton ZH und der umliegenden Kantone*. 2007, Bundesamt für Energie.
- [5] *SIA 384/6 - Erdwärmesonden*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband. 2010.
- [6] Hubacher, P. und Bernal, C., *QS-WP/QP: FORTSETZUNG FELDMONITORING VON WP-ANLAGEN (2011-2013)*. 2014, Bundesamt für Energie BFE.
- [7] Grüniger, A. und Wellig, B., *CO2-Erdwärmesonde, Phase 2*. 2009, Bundesamt für Energie BFE.
- [8] Schink, D., *Geothermische Weichenheizung - eine Anwendung mit Zukunft*, in *Signal + Draht*. 2014. p. 2-5.
- [9] *Infrastruktur und Streckenlänge*. Bundesamt für Statistik; URL: <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/03/blank/01.html>, [Abrufdatum 22/04/16].
- [10] *Schweizerische Landeskarte*. Schweizerische Eidgenossenschaft; URL: <https://map.geo.admin.ch>, [Abrufdatum 29/02/16].
- [11] *Erdwärmesonden (BVV-Ziffer 5.5.1)*. AWEL Kanton Zürich; URL: http://www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/energie_radioaktive_abfaelle/waermenutzung_ausuntergrundwasser/ews.html, [Abrufdatum 18/01/2016].

9 Anhang

Tab. A 1 Referenzliste der Firma Triple-S GmbH mit den realisierten geothermischen Weichenheizungen.

Ort	Region	m.ü.M.	Auftraggeber	Energiequelle	Baujahr	Anzahl WHZ
Vilseck (D)	Mittelgebirge	401	DB Netz AG	Duplexsonden / Erdwärmekörbe	2009	9
Farchant (D)	Alpenraum	672	DB Netz AG	Geokoaxsonden	2009	2
Sulzbach am Inn (D)	Mittelgebirge	325	Südostbayernbahn GmbH	Grundwasserbrunnen	2011	2
St. Petersburg (Ru)	Ostsee	3	Russische Staatsbahnen	Energiekörbe	2011	2
Oldenburg (D)	Nordsee	5	DB Netz AG	Duplexsonden	2014	3
Heimbach (D)	Mittelgebirge	330	DB Netz AG	Duplexsonden	2014	10
Oberstaufen (D)	Alpenraum	791	DB Netz AG	Duplexsonden	2016	2

Tab. A 2 Teilnehmer am Expertenworkshop vom 25.01.2016 in Ittigen.

Teilnehmer	Institution / Firma
Stefan Schnell	BAV
Hermann Willi	BAV
Rolf Guldenfels	BAV
Matthias Rücker	SBB
Daniel Föhn	SBB
Urs Guggisberg	BLS
Markus Bauhofer	RhB
Peter Güldenapfel	KPZ Fahrbahn
Thomas Mégel	Geowatt AG
Sarah Signorelli	Geowatt AG
Andrea Grüniger	Grüniger PLUS GmbH

Tab. A 3 Theoretisches Potenzial für verschiedene Bahnen: Verteilung der WHZ in die verschiedenen Bewilligungskategorien für Erdwärmesonden in max. 50 m Abstand zur Weiche.

Bahn	zulässig	mit Auflagen	verboten
BLS	307 32%	26 3%	616 65%
MGB	190 84%	0 0%	35 16%
RhB	346 63%	201 37%	1 <1%
SBB	2995 45%	1004 15%	2684 40%
SOB	131 68%	46 24%	17 9%

Tab. A 4 Erschliessbares Potenzial für verschiedene Bahnen bei einem minimalen Abstand von 3 m zur Gleisachse: Verteilung der WHZ in die verschiedenen Bewilligungskategorien für Erdwärmesonden, in max. 50 m Abstand zur Weiche.

	ausserhalb Parzelle	zulässig	mit Auflagen	verboten	im Gleis- oder Uferbereich
BLS	22 2%	282 30%	28 3%	614 65%	3 <0%
MGB	6 3%	178 79%	3 1%	35 16%	2 1%
RhB	4 1%	341 62%	202 37%	1 0%	0 0%
SBB	30 <1%	2'743 41%	974 15%	2'907 43%	29 <1%
SOB	0 0%	128 66%	46 24%	20 10%	0 0%

Tab. A 5 Erschliessbaren Potenzials für verschiedene Bahnen bei einem minimalen Abstand von 5 m zur Gleisachse: Verteilung der WHZ in die verschiedenen Bewilligungskategorien für Erdwärmesonden, in max. 50 m Abstand zur Weiche.

	ausserhalb Parzelle	zulässig	mit Auflagen	verboten	im Gleis- oder Uferbereich
BLS	22 2%	246 26%	25 3%	563 59%	93 10%
MGB	6 3%	176 78%	3 1%	33 15%	7 3%
RhB	4 1%	335 61%	199 36%	3 1%	7 1%
SBB	30 <1%	2'592 39%	927 14%	2'778 42%	356 5%
SOB	0 <1%	126 65%	47 24%	21 11%	0 0%

Tab. A 6 Quantitative Abschätzung des Einsparpotenzials in der Schweiz mit Hilfe von geothermischen Weichenheizungen

		Elektr. 50 Hz	Elektr. 16.7 Hz	Erdgas	Propan
Preis	CHF/kWh	0.173	0.11	0.0717	0.0717
CO ₂ -Emissionsfaktor	kg/MWh	15	5.9	254	254

Situation heute						Total
Anteil	%	11.8%	32.4%	25.4%	30.4%	
Energieverbrauch	MWh/a	7'093	19'419	15'219	18'270	60'000
Energiekosten	CHF/a	1'227'035	2'136'051	1'091'189	1'309'948	5'764'223
Ersetzter Anteil						
Anteil ersetzt (25%)	MWh/a	1'773	4'855	3'805	4'567	15'000
Energiekosten alt	CHF/a	306'759	534'013	272'797	327'487	1'441'056
Rel. Energieeinsparung	%	75%	75%	92%	92%	84%
Energieverbrauch neu	MWh/a	443	1214	317	381	2'355
Energiekosten neu*	CHF/a	76'690	133'503	41'535	49'861	301'589
Einsparung						
Energieeinsparung	MWh/a	1'330	3'641	3'488	4'187	12'645
Rel. Energieeinsparung	%	19%	19%	23%	23%	21%
Kosteneinsparung	CHF/a	230'069	400'510	231'263	277'626	1'139'467
CO ₂ -Reduktion	t/a	20	21	886	1'063	1'991

Annahmen:

- Preise und CO₂-Emissionsfaktoren für verschiedene Energieträger gemäss momentanen SBB Kalkulationstarifen (2016).
- Situation heute: Anteil Energieträger und Energieverbrauch gemäss Erhebung 2014 [1]
- Ersetzter Anteil: Anlehnung an Situation im Gebäudeheizungsbereich: Bei Neubauten machen Sole/Wasser-Wärmepumpen einen Anteil von 25% aus.
- Energiekosten bei Verwendung einer Wärmepumpe: Bei Ersatz von Elektrischen WHZ wird derselbe Energieträger verwendet. Bei Ersatz von Gas-WHZ wird Mischtarif (50 Hz, 16.7 Hz) eingesetzt.