



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)

Demonstrationsanlage einer geothermischen Weichenheizung

BAV Projekt-Nr. 083

Schlussbericht

Matthias Rücker, SBB Schweizerische Bundesbahnen AG

Industriestrasse 1, 3052 Zollikofen, matthias.ruecker@sbb.ch, www.sbb.ch

Sarah Signorelli, Geowatt AG

Regina-Kägi-Strasse 11, 8050 Zürich, signorelli@geowatt.ch, www.geowatt.ch

Carina Sagerschnig, Synergy BTC AG

Laupenstrasse 20, 3008 Bern, carina.sagerschnig@synergy.ch, www.synergy.ch

Projektleitung

Matthias Rücker, SBB

Projektteam

Fritz Wechsler, SBB

Daniel Föhn, SBB

Hans-Peter Bättig, SBB

Monitoring

Sarah Signorelli, Geowatt AG

Carina Sagerschnig, Synergy BTC AG

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 83

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern,

den

10.10.2019

Inhalt

Zusammenfassung	2
Résumé	3
Executive Summary	4
1. Ausgangslage	5
2. Ziel der Arbeit	6
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand	7
4. Ergebnisse.....	7
4.1. Vorprojekt	7
4.2. Bauprojekt und Ausführung.....	8
4.3. Betrieb	11
4.4. Unterhalt	13
4.5. Monitoring	14
4.6. Wirtschaftlichkeit.....	25
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	25
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	27
Literaturverzeichnis	27

Zusammenfassung

Schienenweichen müssen beheizt werden, um im Winter bei Schnee und Eis funktionsfähig zu sein. Bisher werden in der Schweiz Schienenweichen elektrisch oder mit Gas beheizt. Relativ neu am Markt verfügbar ist die Technologie der geothermischen Weichenheizung. Da Erfahrung und Wissen rund um diese Technologie in der Schweiz nahezu nicht vorhanden waren, wurde im Projekt in Eschenbach (LU) die erste Pilotanlage in der Schweiz in Betrieb genommen.

Es wurde ein auf dem Markt vorhandenes Produkt verbaut. Durch eine Umwälzpumpe wird eine Sole im Erdreich zirkuliert und erwärmt. Die Wärmepumpe erhöht die Temperatur auf das für die Beheizung der Schienen notwendige Temperaturniveau. Über die Wärmetauscher, die an der Backen- und Zungenschiene angebracht sind, gelangt die Wärme letztendlich zur Schiene. Mit dem Pilotprojekt sollten erste Erfahrungen gesammelt, die Praxistauglichkeit überprüft und das Energiesparpotenzial ermittelt werden.

Der Bau der geothermischen Weichenheizanlage in Eschenbach gestaltete sich anspruchsvoll. Vor allem der aufwendige Genehmigungsprozess und die umfangreichen Erdarbeiten sind ein Zeit- und Kostentreiber. Die dauerhafte Verfügbarkeit der Anlage nach Inbetriebnahme konnte in den ersten Wochen nicht erreicht werden. Leckagen im Rohrleitungssystem verursachten Stör- und Fehlermeldungen. Die neuartige, ungewohnte Technologie war herausfordernd für das Betriebs- und Instandhaltungspersonal.

Die erhofften Energieeinsparungen konnten nach Beendigung der zweijährigen Pilotphase nicht erreicht werden. Im ersten Betriebsjahr stand die Anlagenverfügbarkeit im Fokus; die Energieeffizienz der Anlage wurde bewusst vernachlässigt. In dieser Phase war ein Vergleich der Energieverbräuche nicht repräsentativ und wurde nicht durchgeführt.

Im zweiten Betriebsjahr konnten im Vergleich zu zwei elektrischen Weichenheizanlagen in Hochdorf und Waldibrücke keine Einsparungen im Elektroverbrauch erzielt werden. Der Elektroverbrauch der geothermischen Weichenheizung entsprach ungefähr der elektrischen Weichenheizung in Waldibrücke. Gegenüber Hochdorf trat ein Mehrverbrauch von rund 25% auf. Die vom Hersteller propagierten Energieeinsparungen von bis zu 50% wurden deutlich nicht erreicht. Insbesondere der Energieverbrauch der Anlage im Standby-Betrieb war sehr hoch. Der Betrieb der Pilotanlage zeigt aber auch, dass es beim Anlagebetrieb und der Art der Wärmeübertragung noch deutliches Optimierungspotenzial gibt.

Der Energieverbrauch der Anlage wird auch in den kommenden Jahren weiterhin beobachtet und mit benachbarten Anlagen verglichen. Kontinuierliche Verbesserungen zur Steigerung der Energieeffizienz müssen erarbeitet werden und in den Betrieb einfließen. Die Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt sind noch nicht umfassend genug, um eine Aussage zu einem weiter verbreiteten Einsatz von geothermischen Weichenheizanlagen zu machen. Die Verfügbarkeit der Weichen bei strengen Winterverhältnissen ist vermutlich nicht gewährleistet.

Erst nach weiteren Betriebsjahren kann über den Bau von weiteren geothermischen Anlagen entschieden werden. Einerseits müssen kontinuierliche Weiterentwicklungen der Hersteller an den Wärmetauschern sowie Überlegungen zur Reduktion des Energieverbrauchs erfolgen, um das System konkurrenzfähiger zu machen. Andererseits hält das System einer Life Cycle Cost Betrachtung gegenüber einer Elektroweichenheizung noch nicht stand.

Résumé

Il est nécessaire de chauffer les appareils de voie afin qu'ils restent opérationnels en hiver, même lorsqu'il neige et qu'il gèle. Les chauffages d'aiguilles utilisés jusqu'à maintenant en Suisse fonctionnent à l'électricité ou au gaz. Le chauffage géothermique des aiguilles est une technologie relativement nouvelle sur le marché. La Suisse ne disposant pratiquement d'aucune expérience, ni connaissance en la matière, une installation pilote a été mise en service à Eschenbach (LU).

Dans le cadre de ce projet pilote, premier du genre en Suisse, on a opté pour un produit existant sur le marché. Une pompe à circulation fait circuler de la saumure dans le sol afin de la réchauffer. La pompe à chaleur augmente la température de la saumure jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau suffisant pour chauffer les rails. Les échangeurs de chaleur situés sur le sommier et sur la lame se chargent d'amener la chaleur jusqu'au rail. L'objectif du projet était de recueillir de premières expériences, de vérifier la faisabilité et d'étudier les économies potentielles.

La construction du système géothermique de chauffage des aiguilles utilisé à Eschenbach s'est avérée complexe. La procédure d'autorisation et les nombreux travaux de terrassement représentent en particulier un facteur coût et temps considérable. Les premières semaines qui ont suivi la mise en service ont été marquées par des problèmes de fiabilité. Des fuites dans le système de conduites ont entraîné des dérangements et des messages d'erreur. Pour le personnel chargé de l'exploitation et de l'entretien, il s'agit d'une technologie totalement nouvelle.

À l'issue de la phase pilote de deux ans, on constate que les économies d'énergie réalisées restent inférieures aux prévisions. Durant la première année, l'accent a été mis sur la fiabilité de fonctionnement de l'installation, en laissant sciemment de côté les questions d'efficacité énergétique. On s'est donc abstenu de se livrer à une analyse comparative de la consommation pour cette phase initiale, car les données ne seraient pas représentatives.

Durant la deuxième année, aucune diminution de la consommation d'électricité n'a été observée par rapport à deux chauffages électriques situés à Hochdorf et Waldibrücke. Le chauffage géothermique consomme à peu près autant que le chauffage électrique de Waldibrücke. Si on compare avec l'installation de Hochdorf, la consommation est même supérieure de 25%. Les économies d'énergie vantées par le constructeur, pouvant atteindre soi-disant 50%, n'ont clairement pas été atteintes. Le système consomme notamment beaucoup d'énergie en veille. Les expériences recueillies dans le cadre du projet pilote montrent cependant qu'il existe des possibilités importantes d'optimisation au niveau de l'exploitation du système et du mode de transmission de la chaleur.

Au cours des prochaines années, la consommation d'énergie va continuer à être observée et comparée avec celle d'installations voisines. Il est nécessaire de se livrer à un travail d'amélioration continue pour identifier des mesures susceptibles d'accroître l'efficacité énergétique et les tester dans la pratique. Les enseignements livrés par le projet pilote sont encore insuffisants pour se prononcer quant à une utilisation plus large des systèmes géothermiques de chauffage des aiguilles. La disponibilité des appareils de voie dans des conditions météorologiques très rudes n'est sans doute pas garantie.

Il va falloir attendre encore plusieurs années avant qu'une décision puisse être prise concernant la construction d'autres installations de ce type. D'une part, les fabricants doivent apporter des améliorations aux échangeurs de chaleur et s'efforcer de réduire en continu la consommation d'énergie afin de rendre le système plus compétitif. D'autre part, cette technologie ne peut encore soutenir la comparaison avec les systèmes électriques de chauffage des aiguilles pour ce qui est du coût du cycle de vie.

Executive Summary

Track switches have to be heated in order to be functional in snow and ice in winter. Up to now, rail switches (points) in Switzerland have been heated electrically or with gas. A relatively new technology available on the market is geothermal point heating. As experience and knowledge of this technology were almost non-existent in Switzerland, the first pilot plant in Switzerland was commissioned in the Eschenbach (Canton Lucerne) project.

A product available on the market was used. A circulating pump circulates and heats a brine in the ground. The heat pump raises the temperature to the level necessary for heating the rails. The heat is finally transferred to the rail via the heat exchangers attached to the stock and tongue rails. The pilot project was intended to gather initial experience, test feasibility in practice and determine the energy-saving potential.

The construction of the geothermal point heating system in Eschenbach was challenging. Above all, the complex approval process and the extensive earthworks are a time and cost driver. Permanent availability of the plant after commissioning could not be achieved in the first weeks. Leaks in the piping system caused malfunction and error messages. The new, unfamiliar technology was challenging for the operating and maintenance personnel.

The hoped-for energy savings could not be achieved after the end of the two-year pilot phase. In the first year of operation, the focus was on plant availability; the energy efficiency of the plant was deliberately neglected. In this phase, a comparison of energy consumption was not representative and was not carried out.

In the second year of operation, no savings in electrical consumption could be achieved compared to two electrical points heating systems in Hochdorf and Waldibrücke. The electrical consumption of the geothermal points heating was approximately the same as the electrical points heating in Waldibrücke. Compared to Hochdorf, there was an increase in consumption of around 25%. The energy savings of up to 50% propagated by the manufacturer were clearly not achieved. In particular, the energy consumption of the plant in standby mode was very high. However, the operation of the pilot plant also shows that there is still considerable potential for optimisation in terms of plant operation and the type of heat transfer.

The energy consumption of the plant will continue to be monitored in the coming years and compared with neighbouring plants. Continuous improvements to increase energy efficiency must be developed and incorporated into operations. The findings from the pilot project are not yet comprehensive enough to make a statement on the widespread use of geothermal point heating systems. The availability of the switches under severe winter conditions is probably not certain.

Only after further years of operation can a decision be made on the construction of further geothermal installations. On the one hand, manufacturers must continuously develop their heat exchangers further and consider reducing energy consumption in order to make the system more competitive. On the other hand, the system does not yet equal an electric points heater in terms of life-cycle costs.

1. Ausgangslage

Schienenweichen müssen beheizt werden, um ihre Funktionsfähigkeit auch bei winterlichen Verhältnissen mit Schnee und Eis zuverlässig und dauerhaft zu gewährleisten. Bei Elektroweichenheizungen werden die Schienenelemente durch Heizstäbe an den neuralgischen Stellen erwärmt. Bei Gasweichenheizungen geschieht dies durch an der Backenschiene befestigte Brennerrohre.

Die Beheizung der Weichen mit Strom oder Gas trägt zu einem signifikanten Energieverbrauch im Bahnnetz bei. Im Netz der SBB werden etwa 7'300 Weichen mit einer installierten Gesamtleistung von rund 130 MW mit einer Weichenheizung betrieben. Die Weichenheizung fristet im Gegensatz zu Heizsystemen in der Gebäudetechnik ein Nischendasein. Neuentwicklungen werden in diesem Bereich eher vernachlässigt, da kaum kommerzielles Interesse besteht. Da Betriebsstörungen zu hohen Folgekosten für die SBB und andere Bahnunternehmen führen, müssen Neuentwicklungen einen hohen Ausreifegrad vorweisen, um dauerhaft eine hohe Funktionsfähigkeit zu erreichen.

Den hohen Erwartungen der geothermischen Systeme stehen die bislang fehlenden Praxiserfahrungen in der Schweiz entgegen: Bislang wurden wenige Systeme dieser Art in anderen europäischen



Abbildung 1: Bahnhof Eschenbach mit Propangasbehältern und alter Weichenheizung

Ländern implementiert. In der Schweiz war keine derartige Anlage bisher in Betrieb.

Der Bahnhof Eschenbach im Kanton Luzern befindet sich am Kilometer 8.4 – 8.7 auf der Linie 651 zwischen Luzern und Lenzburg. Die Strecke ist eine Nebenstrecke im Netz der SBB und wird hauptsächlich von Zügen des Nahverkehrs befahren. Der Bahnhof Eschenbach liegt rund 496m über Meereshöhe. Die beiden Weichen am Bahnhof Eschenbach wurden in der Vergangenheit mit Propan beheizt. Im Rahmen der unterirdischen Tankverlegung der Propangasbehälter und Erneuerung von Anlagenkomponenten wurde der Entscheid getroffen, die Weichenheizanlage neu als geothermisches System auszuführen.

Zum Zeitpunkt der Evaluation im Jahr 2015 waren am Markt zwei Technologien von geothermischen Weichenheizungen verfügbar. Die deutschen Firmen Triple-S Systeme und ESA Grimma sowie die niederländische Firma VolkerRail bieten aktive geothermische Anlagen an. Deren Systeme bestehen im Wesentlichen aus drei Komponenten: Erdwärmesonde, Wärmepumpe und Wärmeübertragern an der Schiene. Durch eine Umwälzpumpe wird eine Sole im Erdreich zirkuliert und durch das Erdreich erwärmt. Die Wärmepumpe erhöht das Temperaturniveau der Wärmeenergie bis maximal 50°C. Über die Wärmetauscher, die an der Backen- und Zungenschiene angebracht sind, gelangt die Wärme letztendlich zur Schiene. Die Wärmeabgabe an die Schiene erfolgt mittels formangepasster Alumi-

umplatten und Wärmeleitpaste. Die Verbindungsschläuche zur Wärmepumpe sind mit Schnellkupplungen versehen.

Ein weiterer Anbieter eines alternativen geothermischen Weichenheizungssystems ist die Firma Pinch Aben. Dieses System unterscheidet sich von den anderen oben genannten Herstellern in der Art der Erdwärmesonde. Die Anlage funktioniert nach dem Prinzip eines Thermosiphons: 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 am Ende der Erdwärmesonde und strömt nach oben zu den Wärmeübertragern in den Gleitstühlen an der Schiene. 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. Das System kommt gänzlich ohne zugeführte Energie aus und läuft autark. Das System arbeitet kontinuierlich aber mit niedrigen Temperaturen (8°C bis 12°C). Die Leistungsfähigkeit der Anlage wurde daher als sehr gering beurteilt.

2. Ziel der Arbeit

Das Ziel des Projektes gliedert sich in zwei Projektteile: Erfahrungen sammeln betreffend der Planung, Installation und Inbetriebnahme der ersten geothermischen Weichenheizung (GTWH) in der Schweiz sowie das Monitoring zur Beobachtung und Analyse dieser Anlage während eines Testbetriebes von zwei Jahren.

I. Projektteil: Bauprojekt

Für die Erstellung der ersten GTWH der SBB wurde der Bahnhof Eschenbach ausgewählt. Teile der Weichenheizanlage erreichten ihr Lebensende und eine Erneuerung musste erfolgen. Die Flächen, die von Schnee und Eis freigehalten werden müssen, wurden definiert. Sie beinhalten die Gleitstühle, den Zwischenraum zwischen Backen- und Zungenschiene sowie den Verschlusskasten. Die zu beheizende Länge der Weiche hat für die GTWH mindestens analog einer SBB Gasweichenheizung (GWH) zu erfolgen. Bei den beiden Weichen an den beiden Enden des Bahnhofs Eschenbach handelt es sich um eine einfache Weiche des Typs EW I – 185 - 1:9 F/H und eine einfache Weiche des Typs EW IV – 185 – 1:9 F/H. Ein Jüdelverschluss ist bei beiden Weichen im Einsatz.

Für die Beschaffung der geothermischen Weichenheizung sollte eine auf am Markt verfügbare Technologien zurückgegriffen werden. Im Rahmen der Ausschreibung und ersten Inbetriebnahme sollten keine Eigenentwicklungen der SBB einfließen. Vorabrecherchen hatten ergeben, dass drei Anbieter am Markt verfügbar sind und teilweise über mehrere Jahre an Betriebserfahrungen von GTWH verfügen.

II. Projektteil: Monitoring

Ein umfassendes Monitoring der GTWH ist Kernteil des 2. Projektteils. In einem ersten Schritt wurde die Zielsetzung des Monitorings festgelegt. Folgende Fragestellungen sollen mit dem Monitoring bearbeitet werden können:

- erste Betriebserfahrungen einer derartigen Anlage in der Schweiz zu sammeln.
- Unsicherheiten bezüglich der dauerhaften Verfügbarkeit dieser Technologie zu analysieren und auszuräumen.
- die Einsparpotenziale bei den Energie- und Betriebskosten beziffern zu können.
- Bereitstellen von Messdaten, um zukünftig die langfristige Regeneration der Erdwärmesonden und die Effekte einer aktiven Regeneration der Sonden bewerten zu können.

Für die Erarbeitung des Messkonzeptes und professionelle Datenaufnahme und Datenauswertung wurde als Projektpartner die Firma Uniseo AG einbezogen.

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

In der Schweiz werden derzeit ausschliesslich Elektro- oder Gasweichenheizungen eingesetzt. Die Technologien sind etabliert und wurden sowie werden konstant weiterentwickelt. Die Weichenheizung an sich ist ein Nischenprodukt, weswegen es wenig Anbieter am Markt gibt. Eisenbahnunternehmen sind oftmals selbst gefordert, Weiterentwicklungen und Innovation voranzutreiben.

Entwicklungen in der Vergangenheit bezogen sich zumeist auf die kontinuierliche Verbesserung der bestehenden Systeme. In der Schweiz und im europäischen Umfeld wurde u.a. mittels optimierter Regelungen, neuartigen Materialien oder auch alternativen Heizorten versucht, das Leistungsvermögen und die Energieeffizienz der Weichenheizungen zu steigern. Bei den SBB wurde hierbei an der Form der Energieart festgehalten: entweder Strom mit Frequenzen von 50 Hz oder 16.7 Hz oder Gase wie Erdgas und Propan.

Kommerziell vertriebene GTWH sind erst seit einigen Jahren im Einsatz und fristen ein Nischendasein unter den Weichenheizungen. In Holland und Deutschland sind seit mehreren Jahren vereinzelte Anlagen in Betrieb. Gebaut wurden diese von der holländischen Firma VolkerRail und der deutschen Firma Triple-S Systeme. Die Systeme wurden kontinuierlich weiterentwickelt und haben den Status von Prototypen überschritten.

Die BAV Studie «Potenzial geothermischer Weichenheizungen in der Schweiz» zeigt umfassend den möglichen Einsatzbereich geothermischer Weichenheizungen in der Schweiz auf. Die Studie kommt zum Schluss, dass bis zu 58% der Weichenheizungen in der Schweiz geothermisch betreiben werden könnten. Der Nachweis der Praxistauglichkeit derartiger Anlagen in der Schweiz ist jedoch noch nachzuweisen [1].

4. Ergebnisse

Die Gliederung der Ergebnisse im Projekt richtet sich nach den wichtigsten Meilensteinen und der Relevanz für die Verfügbarkeit der Weichenheizungen und deren Energieeffizienz.

4.1. Vorprojekt

Der Technikvergleich im Vorfeld des Projektes hatte ergeben, dass der Einsatz eines aktiven Systems mit Wärmepumpe zu bevorzugen ist. Die Kriterien Anlagenverfügbarkeit, Leistungsvermögen, Technologiereife, Wettbewerb und Lebenszykluskosten waren ausschlaggebend.

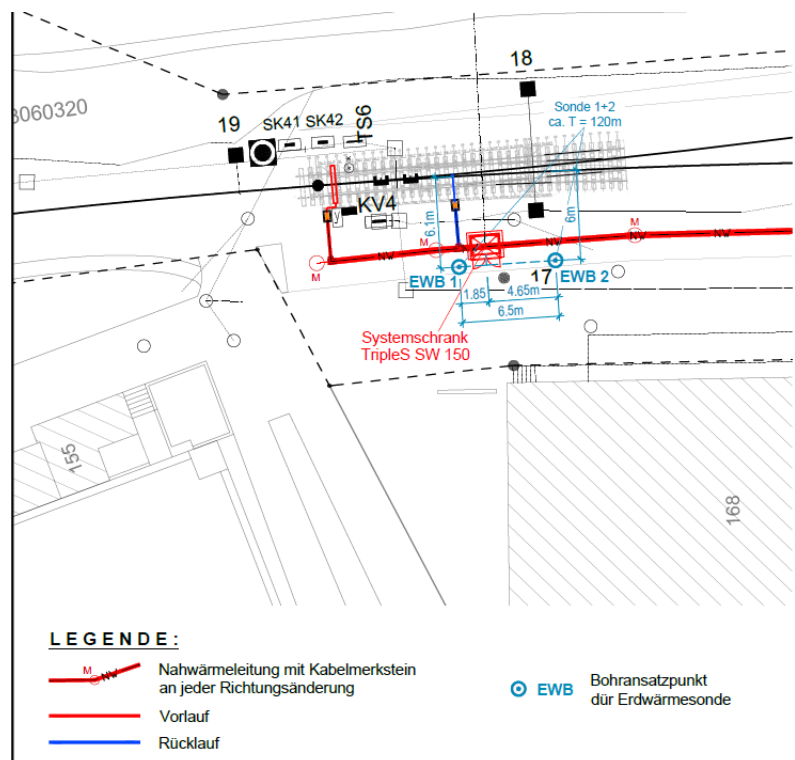


Abbildung 2: Ausschnitt Ausführungsplanung der Weiche 6 und des Systemschranks.

Da sich die Ansätze für den Aufbau und die Funktion einer geothermischen Weichenheizung zwischen den drei Herstellern unterscheiden, wurde festgelegt, dass ein am Markt verfügbares System beschafft werden soll. Die Ausschreibung erfolgte in einer Form, dass es allen drei Herstellern möglich machte ein Angebot abzugeben. Festgelegt wurde im Pflichtenheft, dass als Technologie für die Beheizung der beiden Weichen ausschliesslich warmwassergeführte Leitungen eingesetzt werden sollen. Die Beheizung des Wasser-Glykol-Gemisches erfolgt durch Erdwärme und eine Wärmepumpe. Zusätzliche Heizkomponenten wie Elektroheizstäbe mit Pufferspeicher oder die Beheizung des Verschlussfaches mit Elektroheizstäben wurden explizit ausgeschlossen. Eine rein geothermische Anlage soll im Pilotprojekt erstellt und analysiert werden. Auch sollte ein System mit einer einzigen Wärmepumpe mit Nahwärmeleitungen beschafft werden. Dies um Erfahrungen beim Verlegen einer Nahwärmeleitung in Gleisnähe zu sammeln. Die Alternative wäre es gewesen, ein je unabhängiges System pro zu beheizende Weiche zu beschaffen.

4.2. Bauprojekt und Ausführung

Die Vergabe der Leistungen wurde in drei Teile aufgeteilt:

I. Der **Rückbau der bestehenden Propangasweichenheizung** erfolgte durch die Firma Vanoli.

II. Die Errichtung und Inbetriebnahme der geothermischen Weichenheizung.

Durch das Vorhandensein von drei Anbietern am europäischen Markt erfolgte die Ausschreibung im Einladungsverfahren mit Eignungs- und Zuschlagkriterien. Die Ausschreibung gewonnen hat die Firma Triple S-GmbH. Der Werkvertrag wurde 05.01.2017 final unterzeichnet. Die Firma VolkerRail verzichtete auf die Einreichung eines Angebotes. Als Hauptgrund wurde die grosse räumliche Distanz genannt.

III. Die Erarbeitung eines Mess- und Monitoringkonzepts einschliesslich Beobachtung und Auswertungen.

Massgebende Ziele des Mess- und Monitoringkonzepts beinhalteten die Überwachung der Betriebsführung, die saisonalen Temperaturverläufe der Bohrlöcher und die Sicherstellung der Messdaten, um allenfalls später Simulationen der langfristigen Temperaturverteilung der Erdwärmesonden durchführen zu können.

Den Auftrag für die Ausführung der Arbeiten hat die Firma Uniseo AG erhalten. Die Uniseo wurde von den eng miteinander kooperierenden Firmen Geowatt AG, Synergy BTC AG und Asenta AG gegründet.

Die Bewilligungen für Bau und Betrieb der Anlage erfolgten durch den Kanton Luzern und das Bundesamt für Verkehr BAV. Die Genehmigung der Erdwärmesonden fällt in die kantonale Verantwortlichkeit und wurde mit dem Schreiben vom 10. März 2017 durch den Kanton Luzern erteilt.

Die Plangenehmigung beim BAV betreffend der Erstellung einer Demonstrationsanlage für eine geothermische Weichenheizung in Eschenbach, Kanton Luzern, km 8.4 – km 8.7 der Linie 651 Luzern Lenzburg wurde am 13. Februar 2017 eingereicht. Es handelte sich um ein vereinfachtes technisches Plangenehmigungsverfahren nach Art. 18i Eisenbahngesetz. Unter Auflagen hat das BAV die Plangenehmigung am 29. Juni 2017 erteilt.

Das Genehmigungsverfahren gestaltete sich durch die neuartige Technologie länger als geplant. Ebenso war der Genehmigungsprozess deutlich länger als bei der Installation einer EWH oder GWH. Derartige Weichenheizanlagen benötigen keine kantonale Genehmigung und in der Regel auch kein Plangenehmigungsverfahren.

4.2.1. Ausführungsarbeiten

Die Ausführungsarbeiten erfolgten im Sommer 2017. Zwei Erdwärmesonden mit einer Tiefe von jeweils 120 m wurden rechts und links des Systemschranks gebohrt. Die Nahwärmeleitung wurde im Erdreich in einer Tiefe von rund einem Meter mit einer Gesamtlänge von rund 200 Meter verlegt. Die von der Firma Triple-S Systeme geplanten und dimensionierten Wärmetauscher wurden an der Backenschiene und Zungenschiene der beiden Weichen angebracht. Da die beiden Weichen über unterschiedliche Schienenprofile verfügen, mussten für jede Weiche die Wärmetauscherelemente entsprechend entwickelt werden.

Aufgrund des geringen Streckenverkehrs auf der Linie 651 konnten die Arbeiten während des normalen Betriebs realisiert werden. Einschränkungen bei der Benutzung des Bahnzugangs ergaben sich im Bereich des Perrons und des beschränkten Bahnübergangs durch die Verlegung der Nahwärmeleitung im offenen Erdgraben.



Abbildung 3: Verlegen der Nahwärmeleitung im Erdreich.

Zusammenfassend waren die Ausführungsarbeiten deutlich aufwändiger als bei herkömmlichen Weichenheizanlagen. Bei den Erdverlegearbeiten kam es zu unvorhergesehenen, grossen Mehraufwänden, die zu hohen Kosten führten. Diese sind auch bei zukünftigen Projekten möglich. Ohne ausreichende Erfahrung gestaltet sich die Planbarkeit dieser Kosten schwierig und es besteht die Gefahr der Überschreitung finanzieller und personeller Ressourcen.



Abbildung 4: Systemschrunk mit Wetterstation.

4.2.1. QS-Massnahmen bei der Erstellung der Erdwärmesonden

Die Geowatt AG war von den SBB mit der Qualitätssicherung bei der Erstellung der beiden Erdwärmesonden beauftragt. Dies umfasste folgende Punkte:

- I. elektronische Überwachung des Hinterfüllungsvorgangs der Erdwärmesondenrohre
- II. Kontrolle der Durchfluss- und Dichtigkeitsprüfung

Der Hinterfüllungsvorgang wurde mit dem elektronischen Hinterfüllungsmessgerät HMG-S der Geowatt AG digital aufgezeichnet. Damit werden die Temperatur, der Verpressdruck und das injizierte Volumen an Hinterfüllung laufend gemessen und abgespeichert. Die Messresultate zeigen, dass die beiden Bohrungen vollständig hinterfüllt wurden.

Nach dem Hinterfüllen der Sondenrohre wurden die Durchfluss- und Dichtigkeitsprüfung durchgeführt. Dazu wurde das vollautomatische Druck- und Durchflussprüfgerät DPG-C3 der Geowatt AG verwendet. Die Sonden werden damit zuerst nach SIA 384/6 gespült und anschliessend auf Durchfluss und Dichtheit geprüft. Der Durchfluss in beiden Sonden entspricht den Vorgaben der SIA 384/6 und beide Sonden sind dicht.

Eine detaillierte Beschreibung der Massnahmen und Resultate ist im Bericht „QS Messungen bei Erdwärmesonden, Messung der Bodentemperatur und Standard Thermischer Response Test“ vom 18. September 2017 zu Händen der SBB zu finden.

4.2.2. Messung der Bodentemperatur und Standard Thermischer Response Test

Etwa eine Woche nach dem Einbringen der Hinterfüllung der Erdwärmesonden wurden in einer der beiden Sonden die ungestörte Bodentemperatur sowie die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Diese beiden Werte sind Schlüsselparameter bei der Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen. Entsprechend sind diese Werte auch für die angestrebte Analyse des saisonalen Temperaturverlaufes in den Bohrungen wichtig. Für die getestete 120 m tiefe Sonde ergaben sich eine mittlere Temperatur von 12.65 °C und eine mittlere gemessene Wärmeleitfähigkeit von 2.80 W m⁻¹ K⁻¹. Die Messwerte und die Auswertung sind ebenfalls im Bericht vom 18. September 2017 beschrieben.

In beiden Erdwärmesonden wurde ein Messrohr auf 70 m eingezogen und ein Temperaturmessfühler auf diese Tiefe für das Monitoring eingebaut. Die ungestörte Temperatur auf 70 m Tiefe betrug bei Betriebsbeginn gemäss telefonischer Mitteilung der Triple-S GmbH 12.3 °C, was leicht unter dem gemessenen Temperaturprofil liegt, welches auf dieser Tiefe einen Wert von 12.54°C zeigt.

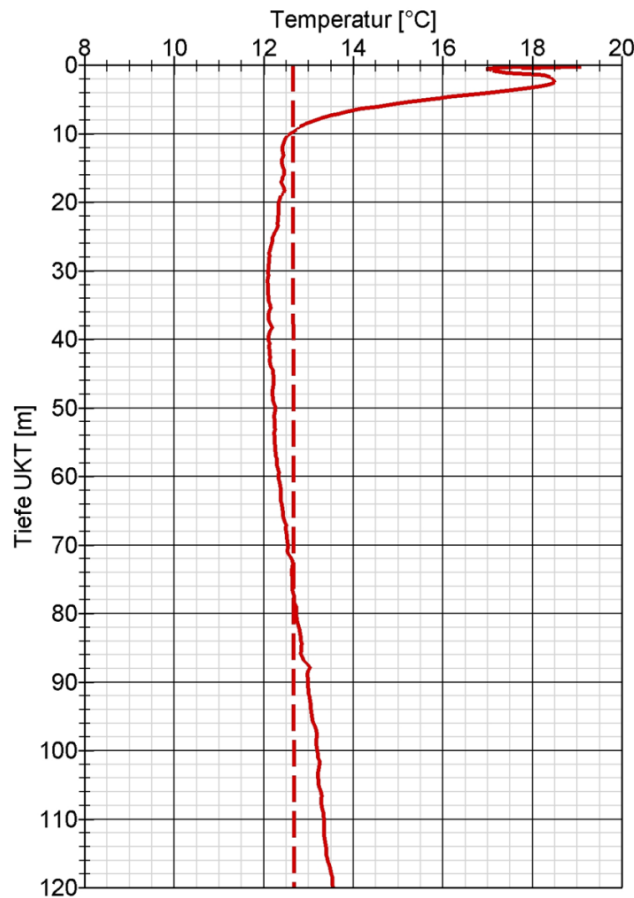


Abbildung 5: Temperaturprofil des ungestörten Untergrunds über 120 m Tiefe (gestrichelt die mittlere Bodentemperatur von 12.65 °C).

Die Temperatursimulationen in Kapitel 4.5.4 ergeben den Temperaturverlauf auf der mittleren Sondentiefe, also auf 60 m. Das Temperaturprofil zeigt in dieser Tiefe ein Wert von 12.32 °C, was gut mit der Fühlertemperatur vor Betriebsstart übereinstimmt.

4.2.3. Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte im Oktober 2017. Vor allem in den ersten Monaten traten mehrfach Probleme auf, die die Verfügbarkeit der Anlage einschränkten. Dies betraf hauptsächlich kleine Leckagen im mit Wasser-Glykol gefüllten Rohrleitungssystem. Die daraus resultierenden Druckverluste im System sorgten für einen Stillstand der GTWH und bedingten eine Ursachensuche und Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft.

Beginnend ab Januar 2018 konnten die Fehler ausgemerzt werden und die Anlage war nahezu dauerhaft einsatzbereit.

4.3. Betrieb

Der im Projekt definierte Pilotbetrieb dauert vom Winter 2017 bis zum August 2019. Generell kann gesagt werden, dass die Witterungsverhältnisse in den beiden Winterperioden im SBB Kontext als mild eingestuft wurden. Sowohl bei der Häufigkeit und Intensität der kalten Temperaturen und Niederschlagsmengen traten keine extremen Tage respektive Wochen auf. Nach den anfänglich beschriebenen Startschwierigkeiten war die Anlage dauerhaft einsatzbereit. Der Fokus im ersten Betriebsjahr im Winter 2017/2018 lag auf der Anlagenvorfügbarkeit. Die Systemparameter in der Steuerung wurden bewusst grosszügig gewählt, um die Verfügbarkeit der Weichen sicherzustellen. Der energieeffiziente

Betrieb wurde zu Beginn bewusst zweitrangig behandelt. Das Betriebs- und Instandhaltungspersonal musste Vertrauen in das neue System gewinnen.



Abbildung 6: Wärmetauscher an der Zungenschiene mit Rücklaufleitungen zur Wärmepumpe.

Im zweiten Betriebsjahr im Winter 2018/2019 wurden die Systemparameter angepasst entsprechend den Standardparametern der Firma Triple-S Systeme. Diese Betriebsparameter entsprechen den Empfehlungen der Firma und werden in dieser Form auch in den Anlagen in Deutschland angewendet.

Bei moderaten Witterungsanforderungen lief die GTWH stabil. Analog zu den Elektro- und Gasweichenheizungen wird die Regelung unter Berücksichtigung einer lokalen Wetterstation gesteuert. Hierbei werden Aussentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlagsdetektion und das Vorhandensein von Flugschnee berücksichtigt. Gibt die Steuerlogik die Freigabe zum Heizen, läuft die Anlage für einen vordefinierten Zeitraum.

Die höhere Trägheit von Fluiden bei der Wärmeübergabe wird durch eine zweistufige Betriebsweise ausgeglichen: Die «Vorerwärmung» der Schienen erfolgt durch eine passive Betriebsweise. Hierbei wird die Wärme im Erdreich mittels Umwälzpumpe direkt an die Schiene transportiert. Die Vorlauftemperatur im Solekreis ist hierbei identisch mit der Vorlauftemperatur im Wärmetauscherkreis und liegt zwischen 10°C bis 12°C.

Bei der aktiven Betriebsweise schaltet sich die Wärmepumpe zu und hebt die Vorlauftemperatur auf eine Temperatur von circa 50°C an. Für einen energieeffizienteren Betrieb und damit einhergehen besseren COP der Wärmepumpe könnte die Anlage auch mit niedrigeren Vorlauftemperaturen betrieben werden. Die bisherigen Betriebserfahrungen haben jedoch gezeigt, dass bei niedrigeren Vorlauftemperaturen die Leistungsfähigkeit der Anlage nicht ausreichend wäre. Geplante Testversuche wurden daher nicht durchgeführt.

In beiden Winterzeiträumen wurden die Grenzen des geothermischen Systems aufgezeigt: Bei zügig fallenden Temperaturen unter 0°C und stärker einsetzendem Schneefall reagierte die Anlage zu träge. Das Zuschalten der Wärmepumpe und das Aufheizen des Vorlaufs bis zum Maximalwert von 50°C dauerte einige Minuten. Elektro- und vor allem Gasweichenheizungen haben hier einen deutlichen Vorteil durch ihr reaktiveres Verhalten.

Abbildung 7 zeigt den Zustand der Weiche Nr. 6 in den Morgenstunden des 03. Februar 2019. Die Leistungsfähigkeit der geothermischen Anlage war zu diesem Zeitpunkt zu gering, um den starken Schneefall in kurzer Zeit zu beherrschen. Zum Zeitpunkt des Fotos wurde die Weiche seit längerer Zeit nicht gestellt und verursachte daher keine Störmeldung. Eine manuelle Reinigung der Weichen durch das Instandhaltungspersonal musste durchgeführt werden.



Abbildung 7: Weiche 6 am 3. Februar 2019; aufgenommen vom SBB Instandhaltungspersonal.

Zur kontinuierlichen Regeneration der Erdwärmesonden wurde ein Regenerationsbetrieb implementiert. Dadurch wird dem Untergrund ein Teil der im Winter entzogenen Wärme zurückgeführt und die Effizienz der Anlage erhöht. Der Regenerationsmodus wurde so definiert, dass primär eine sommerliche Regeneration stattfindet. Im Gegensatz zu Elektro- und Gasweichenheizanlagen verbleibt die GTWH daher auch in den Sommermonaten in Betrieb und hat somit höhere Laufzeiten.

Bei der Regeneration läuft die Umwälzpumpe reversibel und transportiert die an den warmen Schienen aufgenommene Wärme im Wasser-Glykol-Gemisch des Wärmetauscherkreises zurück in das Erdreich. Die Wärmepumpe ist im Regenerationsmodus nicht aktiv. Die Steuerungsparameter werden konstant überprüft und sollen während den kommenden Betriebsjahren weiter optimiert werden.

Die Regeneration war ab Mai 2019 in Betrieb. Die Ergebnisse bis zum Zeitpunkt des Berichtes sind im Kapitel 4.5 beschrieben.

4.4. Unterhalt

Herausforderungen im Unterhalt der GTWH stellten sich hauptsächlich durch die neuartige Technologie in der Systemlandschaft Weichenheizungen bei den SBB. Die Anforderungen an das Instandhaltungspersonal für eine GTWH unterscheiden sich stark vom Unterhalt von EWH und GWH. Das Warten und Instandhalten von Wärmetauscherelementen, Kupplungen, Umwälzpumpen und einer Wärmepumpe entspricht nicht der standardmässigen Ausbildung des Instandhaltungspersonals der Weichenheizungen. Trotz gezielter Schulungen von Mitarbeitenden bleibt die Anlage ein Fremdkörper in der SBB Systemlandschaft Weichenheizung. Bei zukünftig weiteren GTWH müsste die Stellenbeschreibung für den Unterhalt von geothermischen Systemen explizit aufgenommen und geschult werden.

Das Knowhow der Herstellerfirma Triple S-Systeme ist daher unabdingbar. Die Service- und Pikettzeiten sind bedingt durch den Anfahrtsweg aus Deutschland jedoch sehr lange und entsprechen nicht den Anforderungen der SBB. Sollte sich die Technologie der GTWH im Schweizer Marktumfeld etablieren, sind Servicestellen von Lieferanten in der Schweiz unabdingbar.

Der zeitliche Aufwand für Schienenschleifen und Stopfen der Weichen verhält sich analog zu GWH. Beim Schienenschleifen müssen die Wärmetauschelemente an den Zungenschienen demontiert werden, beim Stopfen der Weichen müssen alle Wärmetauscherelemente inklusive Zuleitungen aus dem Gleisbett entfernt werden. Herausfordernd ist die Störanfälligkeit durch die Verbindungsstellen: unsaubere Installationen können zu Leckagen und Betriebsstörungen der Anlage führen.



Abbildung 8: Schleifzug beim Schienenschleifen der Weiche 6 am 04. Oktober 2017.

4.5. Monitoring

4.5.1. Mess- und Monitoringkonzept

Das Mess- und Monitoringkonzept für die geothermische Weichenheizung wurde im Rahmen einer Studie der Uniseo AG entwickelt. Das Monitoringkonzept wurde ausführlich im Bericht «Mess- und Monitoringkonzept Erdwärmespeicher» der Uniseo AG vom 06. April 2017 zu Händen SBB dokumentiert.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts wird das Monitoringkonzept in seinen Grundzügen beschrieben.

Folgende massgebliche Ziele liegen dem Mess- und Monitoringkonzept für den Erdwärmespeicher zugrunde:

- Überwachung der Betriebsführung (Sicherstellung einer hohen Anlageverfügbarkeit und einer energieeffizienten Betriebsführung)
- Bereitstellung von relevanten Messdaten für die Analyse der saisonalen Temperaturverläufe im Bohrloch
- Bereitstellung von relevanten Messdaten für zukünftige Analysen

Um diese Ziele erreichen zu können, wurde das Anlageschema der Triple S-GmbH mit zusätzlicher Messtechnik ergänzt. Abbildung 9 zeigt das Schema mit der zusätzlich benötigten Messinstallation.

Die Messinstallationen für das Monitoring wurden nach dem ersten Betriebswinter eingebaut. Ab dem 26.11.2018 wurden Daten für das Monitoring erfasst. Damit konnte der Betrieb der geothermischen Weichenheizung ab dem zweiten Betriebsjahr dokumentiert werden.

Eine kontinuierliche Datenerfassung erfolgte für die in Tabelle 1 aufgeführten Messpunkte. Alle Messwerte wurden bei einer Statusänderung von digitalen Signalen (Ein/Aus von Pumpe, Niederschlag oder Flugschnee) bzw. bei einer Überschreitung der festgelegten Schwellwerte (Temperaturänderung Sole Ein-/Austritt 0.1 K, Energie Eintrag/Austrag 1 kWh, Elektro 0.1 kWh) aufgezeichnet. Das Mindestintervall der Messwertaufzeichnung betrug 1 Minute, d.h. auch ohne Änderung der vorgenannten Messwerte wurden alle Messwerte in regelmässigen Abständen aufgezeichnet. Die Messwerte wurden synchron erfasst, d.h. bei der Änderung eines Wertes wurden zum gleichen Zeitpunkt alle anderen Werte ebenfalls aufgezeichnet.

Die in Tabelle 2 aufgeführten Variablen wurden aus den erfassten Messungen abgeleitet. Die Energiebilanz der Erdwärmesonden ergibt sich aus der Differenz des Energieaustauschs der Wärmepumpe und des Energieeintrags der Regeneration.

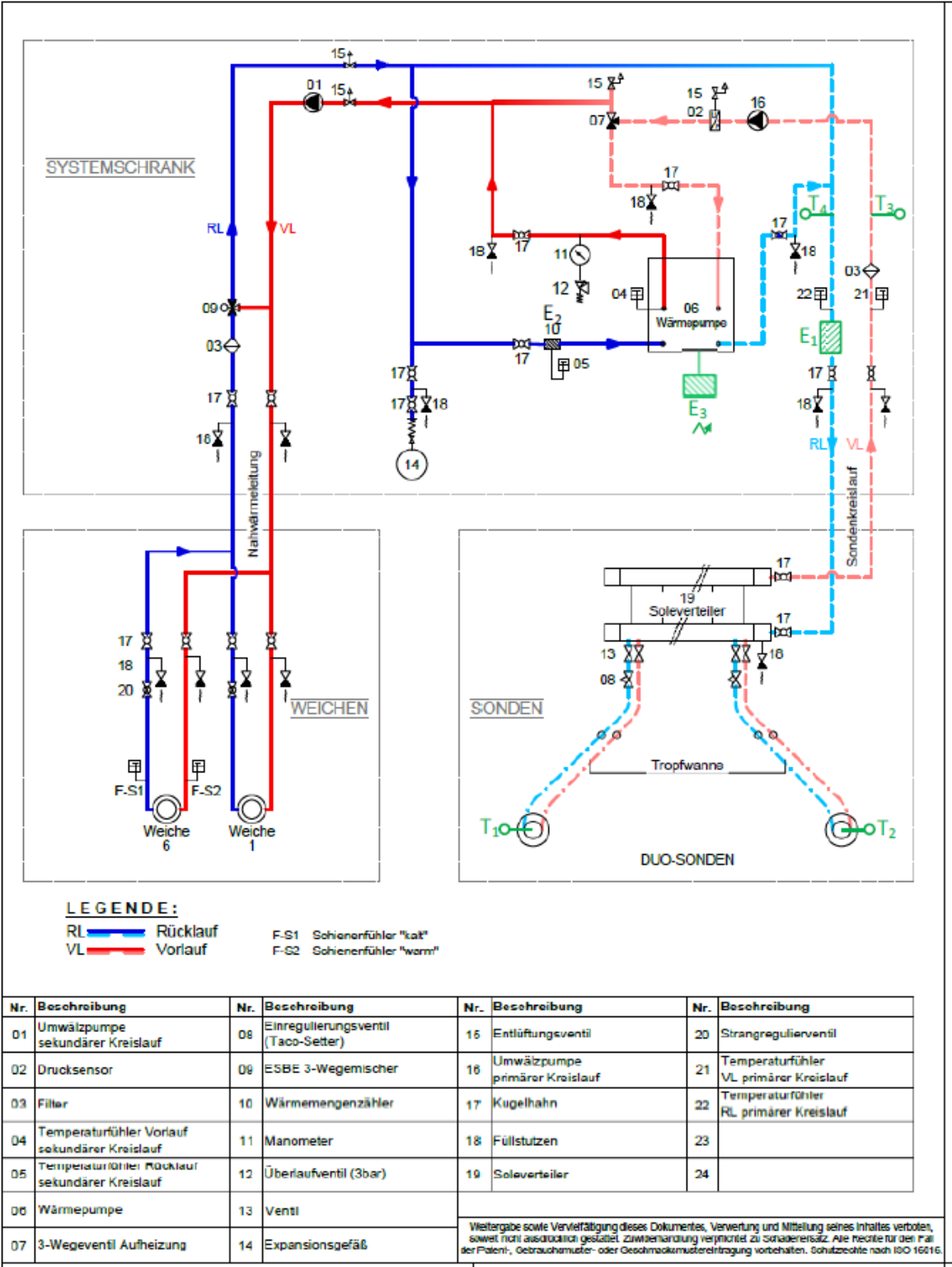


Abbildung 9: Anlagenschema der Triple S-GmbH mit der eingezeichneten zusätzlichen Messtechnik. Grün ist die zusätzlich benötigte Messinstallation dargestellt.

Die Mittlere Bohrlochtemperatur «Messung» ergibt sich als arithmetisches Mittel der gemessenen Bohrlochtemperaturen T1 und T2. Die Mittlere Bohrlochtemperatur «Simulation» wurde anhand einer Simulation der Erdwärmesonden basierend auf dem gemessenen Energieeintrag und -austrag aus den Erdwärmesonden und der gemessenen Bodenparameter (siehe Kapitel 4.2.2) ermittelt.

Variable	Anlage	Typ	Subtyp	Einheit
T0_Aussentemperatur	Umwelt	Temperatur		°C
M1_Niederschlag	Umwelt	Niederschlag		0/1
M2_Flugschnee	Umwelt	Flugschnee		0/1
BZ1_Betriebszustand UWP16	EWS	Umwälzpumpe		0/1
T1_Bohrlochtemperatur 1	EWS	Bohrloch		°C
T2_Bohrlochtemperatur 2	EWS	Bohrloch		°C
T3_Soletemperatur Austritt	EWS	Sole	Austritt	°C
T4_Soletemperatur Eintritt	EWS	Sole	Eintritt	°C
T10a_Schientemperatur kalt	Schienen	Schienen	ohne EWS-Beheizung	°C
T10b_Schientemperatur warm	Schienen	Schienen	mit EWS-Beheizung	°C
E1a_Energieaustrag EWS	EWS	EWS	Austrag	kWh
E1b_Energieeintrag EWS	EWS	EWS	Eintrag	kWh
E3_Energie Elektro WP	WP	Wärmepumpe	Elektro	kWh

Tabelle 1: Übersicht Monitoring: Messstellen

Variable	Anlage	Typ	Subtyp	Einheit
Energiebilanz EWS	EWS	EWS	Bilanz	kWh
Mittlere Bohrlochtemperatur	EWS	Bohrloch	Messung	°C
Mittlere Bohrlochtemperatur	EWS	Bohrloch	Simulation	°C

Tabelle 2: Übersicht Monitoring: Berechnete Variablen

4.5.2. Auswertung der Messungen

I. Temperaturen

Abbildung 10 zeigt den Temperaturverlauf der Luft, im Bohrloch auf halber Sondentiefe und an den Schienen im beheizten Bereich (warm) und im nicht beheizten Bereich (kalt) seit Messbeginn im November 2018 bis Projektende im August 2019.

Während der Heizperiode im Winter entsprach die Temperatur an der unbeheizten Schiene (T10a) der Lufttemperatur. Durch den Wärmepumpenbetrieb lag die Temperatur der beheizten Schiene (T10b) deutlich höher. Ende Mai 2019 wurde die Regeneration aktiviert. Ab dann wurde die Schiene in dem Bereich, welcher im Winter beheizt wird, durch die Regeneration abgekühlt und dadurch Energie in den Boden eingetragen. Aufgrund der Regeneration liegt die Temperatur im Bereich der Beheizungs-vorrichtung in den Sommermonaten unter der des übrigen Schienenbereiches.

Die Temperatur im Bohrloch nimmt zu Beginn des Winters leicht ab und bleibt dann im Tagesmittel relativ konstant. Gegen Ende der Heizperiode und mit sinkendem Energiebedarf der Weichenheizung erholt sich die Temperatur leicht, um dann mit Beginn der Regeneration deutlich anzusteigen.

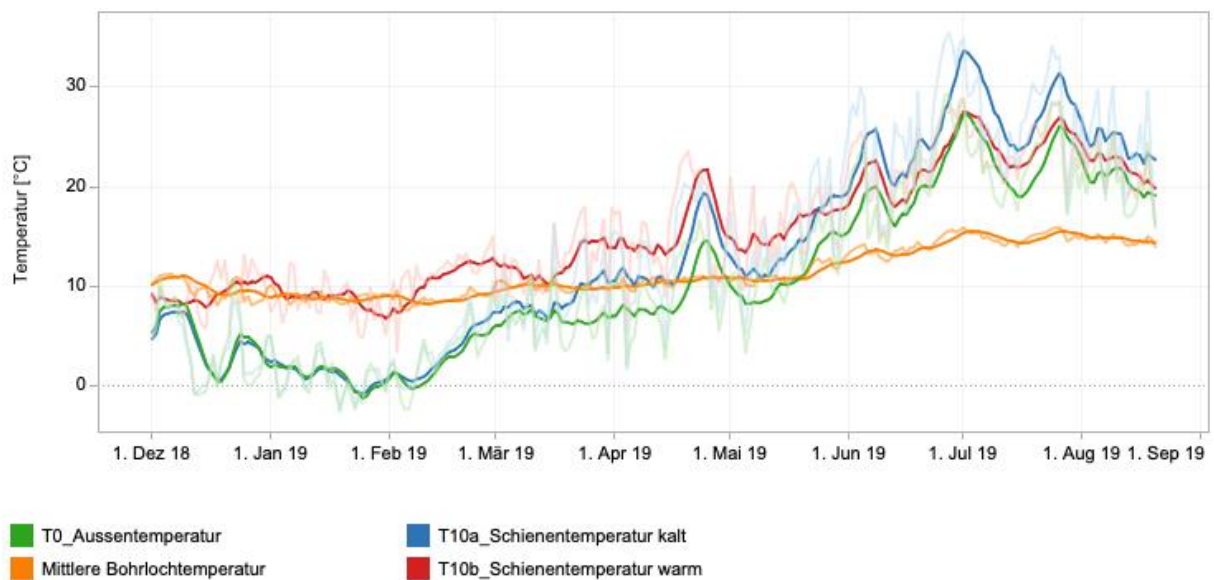


Abbildung 10: Temperaturverlauf über die gesamte Messperiode 26.11.2018 – 19.08.2019: Tagesmittelwerte (helle Kurven) und gleitendes Mittel über 7 Tage (dunkle Kurven)

Abbildung 11 zeigt den Tagesverlauf der Temperaturen in der Messperiode mit der tiefsten Schientemperatur im Messzeitraum (21.01. – 26.01.2019). Die Schientemperatur im Bereich ohne E-Beheizung (T10a) sinkt in der Nacht auf $-8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und entspricht dann ungefähr der Lufttemperatur. Am Tag steigt die Schientemperatur durch die Sonneneinstrahlung über die Lufttemperatur. Die minimale Schientemperatur im Bereich mit geothermischer Weichenbeheizung (T10b) lag in diesem Zeitraum bei $+3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durch den Betrieb der geothermischen Weichenbeheizung konnte die Schientemperatur über $+3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ gehalten werden. Die minimale Temperatur im Bohrloch auf mittlerer Sondentiefe lag den ganzen Winter über $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

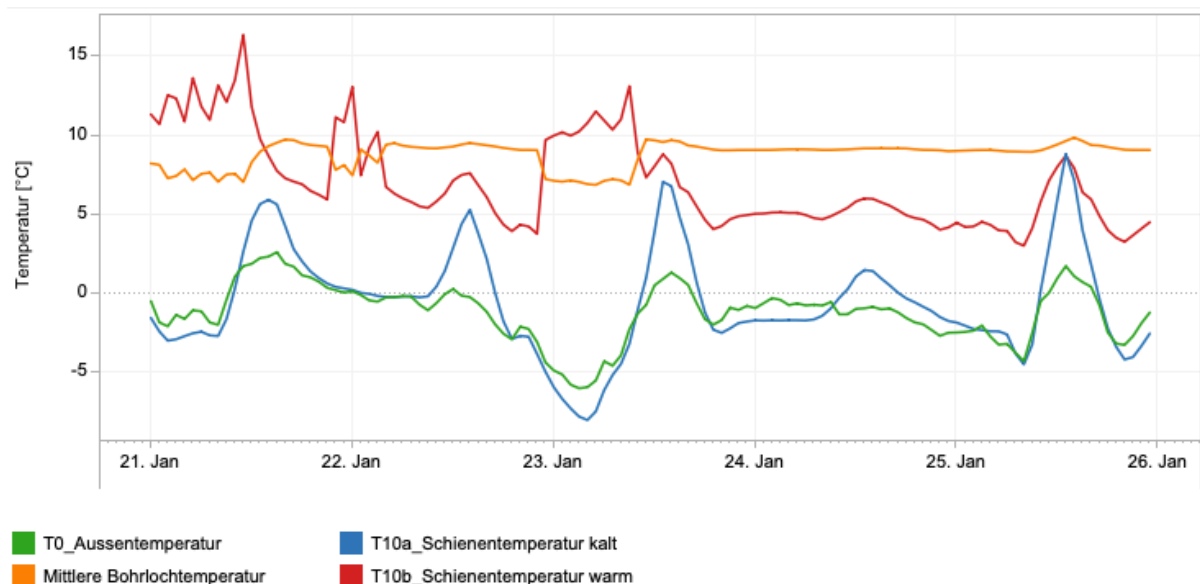


Abbildung 11: Temperaturverlauf in der Messperiode mit der tiefsten Schientemperatur (Stundenmittel); die Schientemperatur ohne EWS-Beheizung (T10a) erreicht $-8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$; min. Schientemperatur mit EWS-Beheizung in diesem Zeitraum: $+3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$; die EWS-Beheizung ist in Betrieb.

Abbildung 12 zeigt die Temperaturen derjenigen Messperiode mit den höchsten Schientemperaturen. Ende Mai 2019 wurde die Regeneration aktiviert. Durch die Regeneration konnte die Temperatur an der Schiene auf das Niveau der Lufttemperatur gesenkt werden. Im vom Regenerationsbetrieb nicht erschlossenen Bereich (Fühler T10a) lag die Schientemperatur am Tag bis zu ca. $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher. Durch die Regeneration der Sonden erhöhte sich die mittlere Temperatur im Bohrloch deutlich. Diese

lag im Juli 2019 um 15 °C. Dies sind ca. 2.5 K über der gemessenen, ursprünglichen Temperatur in dieser Messtiefe (siehe Kapitel 4.2.2).

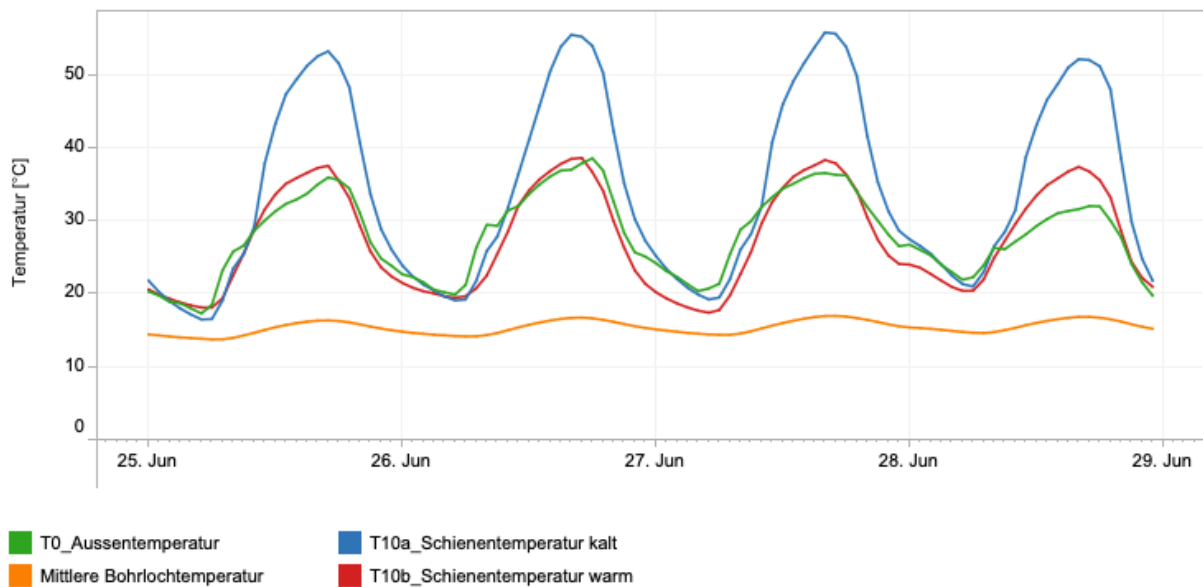


Abbildung 12: Temperaturverlauf in der Messperiode mit der höchsten Schientemperatur (Stundenmittel); die Schientemperatur ohne EWS-Beheizung (T10a) erreicht 55.8 °C; max. Schientemperatur mit EWS-Beheizung in diesem Zeitraum: 38.6°C; die Regeneration ist in Betrieb.

II. Betrieb und Energie

Die geothermische Weichenheizung wurde im Herbst 2017 in Betrieb genommen. Im ersten Betriebsjahr konnten keine zuverlässigen Energiedaten aufgezeichnet werden. Der Fokus stand im ersten Betriebsjahr wie im Kapitel 4.3 beschrieben in der Verfügbarkeit der Anlage und nicht dessen Energieeffizienz. Ab November 2018 konnten Betriebsdaten der Anlage aufgezeichnet werden. Die Angaben zur Energieeffizienz beziehen sich ausschliesslich auf das zweite Betriebsjahr ab November 2018. Die Erfahrungen und Ergebnisse beziehen sich daher nur auf ein Betriebsjahr und sind nur bedingt aussagekräftig. Weiter handelt es sich um spezifische Erfahrungen für den Standort Eschenbach, die keine 1:1 Extrapolation auf andere Standorte in der Schweiz zulassen. Eine generelle Aussagekraft zur Beurteilung der Energieeffizienz einer geothermischen Weichenheizung muss über einen längeren Betriebszeitraum erfolgen.

Abbildung 13 zeigt den Tagesverlauf der Energieflüsse der Anlage. In den Wintermonaten war die Anlage primär im Heizbetrieb. Systembedingt fand auch in den Wintermonaten keine Regeneration der Erdwärmesonden statt (Rückführung von Überschusswärme aus der Anlage in die Sonden). Ab Ende Mai 2019 war die Anlage ausschliesslich im Regenerationsbetrieb.

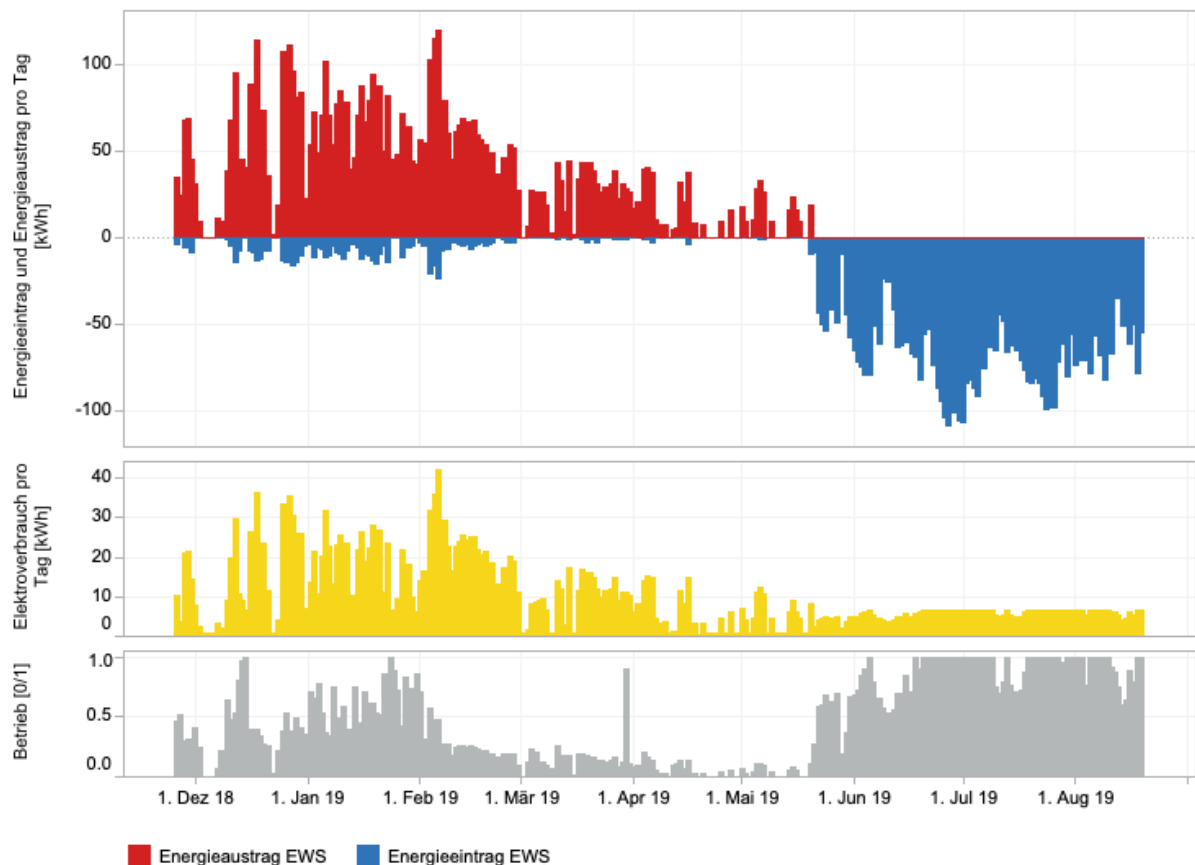


Abbildung 13: Tagesverlauf der Energieflüsse und des Betriebs während der Messperiode 26.11.2018 – 19.08.2019; Energie: Tagessumme kWh/d; Betrieb: mittlerer Betriebsstatus pro Tag (0 = kein Betrieb, 1 = 24h Dauerbetrieb)

In den Wintermonaten war die Anlage beinahe täglich in Betrieb. Dies vor allem um eine hohe Bereitschaft der Heizung und einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Es trat jedoch kein Dauerbetrieb der Anlage auf. Der Energieentzug aus dem Erdreich war im Januar und Februar 2019 am höchsten. Dementsprechend trat in diesen Monaten auch der höchste Elektroverbrauch auf.

4.5.3. Regenerationsbetrieb

Ab Ende Mai 2019 war die Anlage im Regenerationsbetrieb. Aufgrund der Witterungsbedingungen waren die Voraussetzungen für eine Regeneration sehr häufig gegeben, wodurch es teilweise zu einem Dauerbetrieb der Anlage kam. Dadurch entstand in den Sommermonaten eine durchgehende Elektrolast, die jedoch deutlich geringer war als in den Wintermonaten (Dauerbetrieb der Umwälzpumpe während der Regeneration; die Wärmepumpe ist während der Regeneration nicht in Betrieb).

Die Gesamtbetrachtung der Energieflüsse in Abbildung 14 zeigt, dass die Energiebilanz des Erdreichs während der Messperiode beinahe ausgeglichen ist, d.h. Energieeintrag und -entzug aus dem Erdreich sind im Gleichgewicht. Zu bemerken ist, dass während der Messperiode ca. sechs Monate lang hauptsächlich Energie entzogen wurde (Heizbetrieb) und anschliessend während drei Monaten Energie in das Erdreich eingetragen wurde (Regeneration).

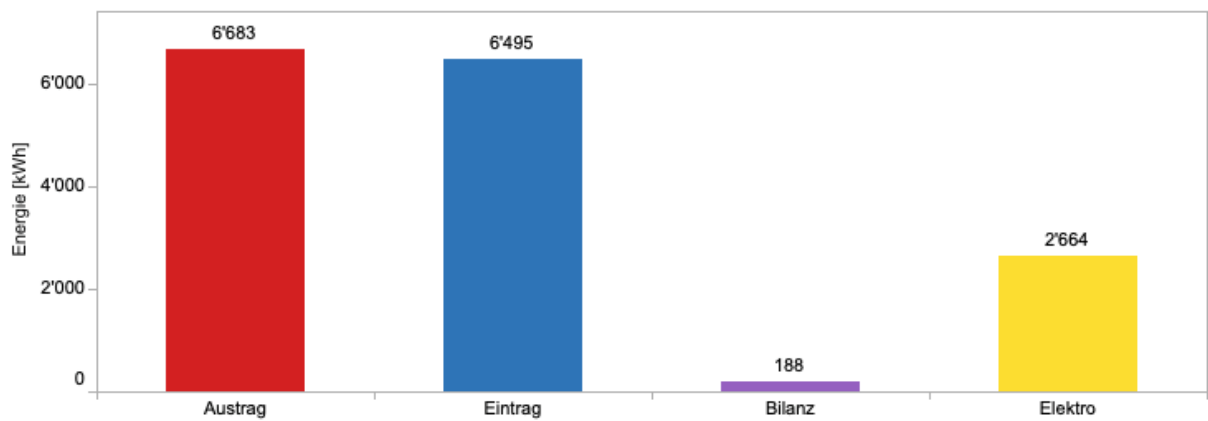
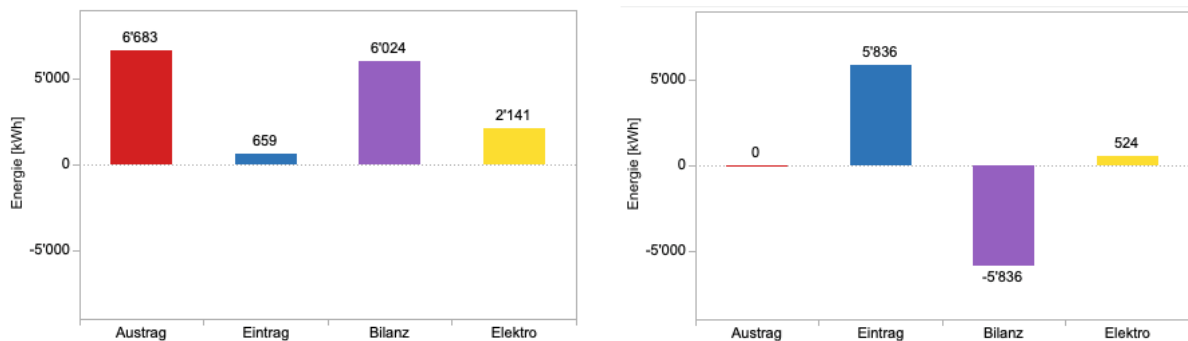


Abbildung 14: Energiebilanz während der Messperiode 26.11.2018 – 19.08.2019; Die Energiebilanz ist fast ausgeglichen. Die positive Energiebilanz (Energieaustrag – Energieeintrag) bedeutet, dass dem Erdreich geringfügig mehr Energie über die Wärmepumpe entzogen wurde als über die Regeneration wieder in das Erdreich eingetragen wurde (Achtung: im Messzeitraum ca. 6 Monate Heizperiode und ca. 3 Monate Regeneration)



Heizperiode: 26.11.2018 – 20.05.2019

Regeneration: 21.05.2019 – 19.08.2019

Abbildung 15: Vergleich der Energiebilanzen während der Heizperiode (links) und der Regenerationsphase (rechts)

Abbildung 15 teilt die Gesamtenergiebilanz auf die Heizperiode und der Regenerationsphase auf. In Tabelle 3 sind die Betriebskennzahlen dieser beiden Perioden gegenübergestellt.

Während in der Heizperiode die Anlage weniger Betriebsstunden aufweist, ist jedoch der Elektroverbrauch aufgrund des Einsatzes der Wärmepumpe deutlich höher (kurze Betriebszeit, hoher Energieeinsatz). In der Regenerationsphase ist die Betriebszeit länger, allerdings läuft nur die Umwälzpumpe (lange Betriebszeit, geringer Energieeinsatz). Dies spiegelt sich auch in der Effizienz der Anlage wieder.

Hauptbetriebsmodus		Heizung	Regeneration
Messperiode		26.11.2018 - 20.05.2019	21.05.2019 - 19.08.2019
Stunden in dieser Periode (total)	h	4'224	2'184
Betriebsstunden	h	1'093	1'823
Elektroverbrauch	kWh	2'141	524
Energieentzug	kWh	6'683	-
Energieeintrag	kWh	659	5'836
Abschätzung Effizienz (Energie/Elektro)	-	3.4	11.1
Dauerleistung (Elektro/Betriebsstunden)	kW	2.0	0.3

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Betriebskennzahlen für Heizperiode und Regenerationsphase

Die Regeneration des Erdsreichs führt gegenüber EWH zu einem zusätzlichen Elektroverbrauch in den Sommermonaten. Gleichzeitig können die daraus resultierenden höheren Erdsreichtemperaturen die Effizienz der Wärmepumpe im Winter erhöhen. Wie gross dieser Effekt für die geothermische Weichenheizung ist und inwiefern die Anlageneffizienz durch die Regeneration langfristig erhöht werden kann, ist aufgrund der eingeschränkten Messdauer noch nicht abschätzbar.

4.5.4. Analyse der saisonalen Temperaturverläufe im Bohrloch

Im Gegensatz zu herkömmlichen geothermischen Weichenheizungen wird die Anlage Eschenbach im Sommer regeneriert (siehe Kapitel 4.5.2). Durch die Abkühlung der Schiene über den Sondenkreis wird dem Untergrund Energie zugeführt und die Untergrundtemperatur steigt an. Um den Einfluss des regenerativen Modus zu analysieren, wurde wöchentlich der Temperaturverlauf in der Bohrung mit und ohne Regeneration mit dem EWSPcore der Geowatt AG in Stundenschritten berechnet. Die Resultate werden als Stunden-, Tages- und Monatswerte ausgewertet.

Die Simulationen basieren auf den gemessenen Energieflüssen in die Erdwärmesonden und aus den Erdwärmesonden. Weiter sind in den Simulationen die gemessenen Temperatur- und Wärmeleitfähigkeiten aus Kapitel 4.2.2 berücksichtigt. Abbildung 16 zeigt den Vergleich der simulierten und der gemessenen Temperaturen des Betriebes. Die Simulation stimmt sehr gut mit den Messwerten überein. Die Simulation repräsentiert somit die thermischen Verhältnisse im Untergrund hinreichend genau.

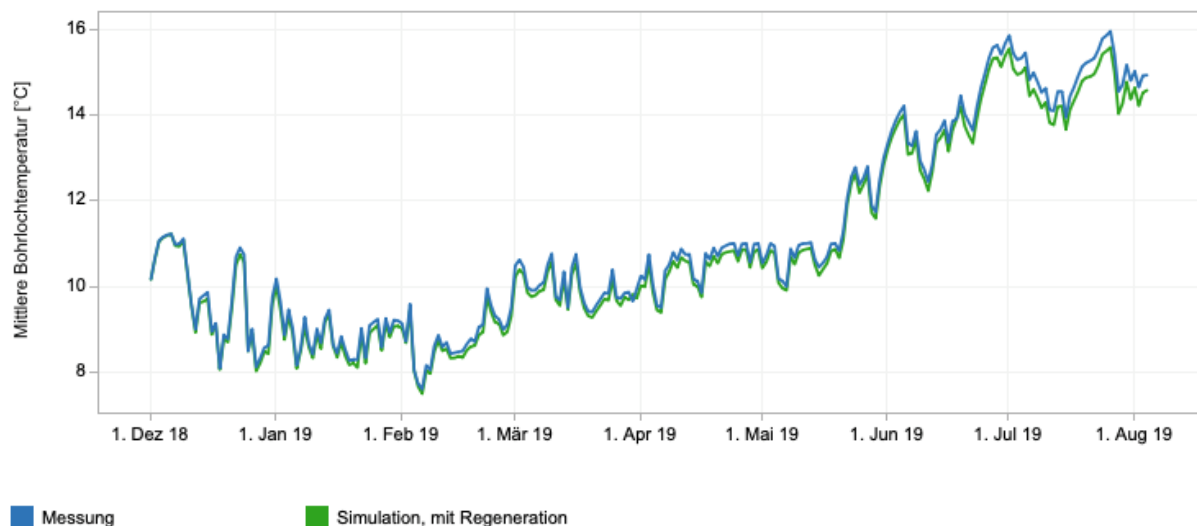


Abbildung 16: Vergleich der Messdaten und Simulationsergebnisse für die mittlere Bohrlochtemperatur (Tagesmittelwerte)

Für die Simulation des Temperaturverlaufes mit Regeneration wurden alle Energieströme in die Sonden und aus den Sonden berücksichtigt. Für die Simulation ohne Regeneration wurden nur die Energieflüsse aus den Sonden verwendet. Abbildung 17 zeigt die beiden Temperaturverläufe über die ganze Messperiode. Bereits kleinere Regenerationsphasen im Winter heben die Bodentemperatur an. Insbesondere die Minimaltemperatur kann im Regenerationsbetrieb höher gehalten werden.

Deutlich ist der Unterschied ab Ende Mai 2019, wenn die Anlage ausschliesslich im Regenerationsmodus läuft. Die Untergrundtemperatur im Fall ohne Regeneration hat sich zwar ebenfalls gegenüber den Tiefstwerten im Winter erholt, der Wert bleibt aber bei ca. 11°C stehen und liegt damit 1.5 K unter der ungestörten Temperatur vor Beginn des Heizbetriebes. Dies zeigt, dass sich eine geothermische Weichenheizung alleine durch die Betriebspause im Sommer nicht vollständig regenerieren kann, analog zu Erdwärmesondenanlagen zur Beheizung von Gebäuden.

Im Regenerationsbetrieb liegt die Temperatur ab Ende Mai 2019 deutlich über der Variante ohne Regeneration. Im Juli und August liegt die Temperatur im Mittel bei ca. 15°C. Dies sind ca. 2.5 K über der gemessenen ungestörten Untergrundtemperatur.

Aufgrund der kurzen Messperiode sind belastbare Aussagen zum Effekt der Regeneration auf die nachfolgende Heizsaison noch nicht möglich. Es ist zu vermuten, dass sich eine vollständig regenerierte geothermische Weichenheizung ähnlich wie eine Anlage zur Gebäudebeheizung verhält. Somit sollten bei vollständiger Regeneration über die Sommermonate die Erdreichtemperatur und die Effizienz der Wärmepumpe langfristig auf hohem Niveau gehalten werden können. Ohne Regeneration nimmt die Temperatur im Sondenfeld über die Betriebszeit ab und dadurch auch die Effizienz der Anlage.

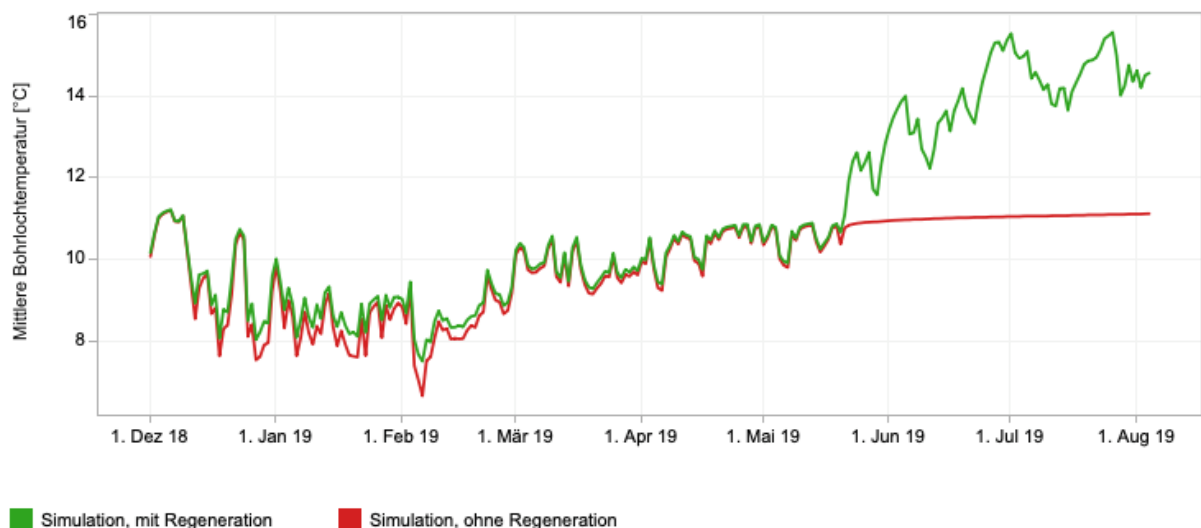


Abbildung 17: Vergleich der mittleren Bohrlochtemperatur mit und ohne Regeneration auf halber Sondentiefe (Simulation; Tagesmittelwerte)

4.5.5. EWH als Vergleichsanlagen

Zur Beurteilung der Energieeffizienz der geothermischen Anlage wurden die Betriebsstunden von zwei Vergleichskabinen aufgezeichnet. Die beiden Kabinen in Waldibrücke und Hochdorf befinden sich in unmittelbarer Nähe zur Anlage in Eschenbach auf derselben Bahnlinie 651. Beide Weichenheizkabinen haben die gleichen Weichentypen wie die Anlage in Eschenbach. Die Beheizung der Weichen erfolgt mit Bahnstrom 16.7 Hz. Damit die Vergleichbarkeit gegeben ist, wurden pro Standort jeweils nur zwei Weichenheizungen mit einer elektrisch installierten Leistung von jeweils 5.05 kW als Referenz verwendet.

I. Waldibrücke (Betriebspunkt WAB, Energieform: 16.7Hz)

In Waldibrücke ist eine Weichenheizkabine mit drei beheizten Weichen und jeweils Verschlussheizung:

Weichentyp	Elektrisch installierte Leistung
EW IV – 185c – G – 1:8 – F/H,L (T)	5.05 kW
EW IV – 185c – B – 1:8 – F/Be,L (T)	5.05 kW
EW IV – 185c – G – 1:8 – F/Be,R (T)	5.05 kW

Tabelle 4: Weichentypen und Leistungsangaben der Weichenheizanlage am Standort Waldibrücke

II. Hochdorf (Betriebspunkt HO, Energieform: 16.7 Hz)

In Hochdorf ist eine Weichenheizkabine mit vier beheizten Weichen und jeweils Verschlussheizung:

Weichentyp	Elektrisch installierte Leistung
EW IV – 185c – G – 1:8 – F/H,L (T)	5.05 kW
EW IV – 185 – B – 1:7 – F/H,L (T)	5.05 kW
EW I – 185c – B – 1:8 – F/H,L	5.05 kW
EW I – 300 – B – 1:12 – F/H,L	7.45 kW

Tabelle 5: Weichentypen und Leistungsangaben der Weichenheizanlage am Standort Hochdorf

Für die Berechnung des Energieverbrauchs der Weichenheizkabinen wurde der Standby-Verbrauch der Kabinen mit Wetterstation sowie der Stromverbrauch im effektiven Heizmodus aufsummiert. Die Daten wurden vom 15.10.2018 bis zum 30.04.2019 aufgezeichnet. Dies entspricht dem Zeitraum des Winterbetriebs bei den SBB.

Die Aufzeichnung der Energieverbräuche der GTWH konnte erst zum 26.11.2018 gestartet werden. Technische Probleme bei der Übermittlung der Daten verhinderten eine frühere Aufzeichnung der Daten. Nachfolgend werden daher die Energieverbräuche für den Zeitraum 26.11.2018 bis 30.04.2019 ausgewertet.

Standort	Energieträger	Energieverbrauch Elektro	Abweichung zu Eschenbach absolut	Abweichung zu Eschenbach relativ
Eschenbach	Geothermie	2'046 kWh		
Waldibrücke	Strom 16.7 Hz	2'001 kWh	- 45 kWh	- 2%
Hochdorf	Strom 16.7 Hz	1'527 kWh	- 519 kWh	- 25%

Tabelle 6: Vergleich der Elektroverbräuche im Zeitraum 26.11.2018 bis 30.04.2019

Tabelle 6 zeigt den Vergleich der Elektroverbräuche im Betrachtungszeitraum. Die Referenzanlage Waldibrücke hatte einen nahezu identischen Stromverbrauch wie die GWTH. Gegenüber dem Standort Hochdorf war der Stromverbrauch jedoch um 25% höher. Die angestrebten und vom Hersteller propagierten Energieeinsparungen von bis zu 50% konnten im Messzeitraum deutlich nicht erreicht werden.

Die Analyse der Ursachen hat gezeigt, dass die GTWH deutlich öfter in Betrieb war (Abbildung 18). Zwischen dem 26.11.2018 und 30.04.2019 war an 39 Tagen mindestens eine der beiden Kabinen in Waldibrücke oder Hochdorf in Betrieb. Die GTWH war im gleichen Zeitraum an 134 Tagen (von insgesamt 156 Tagen) in Betrieb. Der in Kapitel 4.3 beschriebene Regenerationsmodus war im ausgewerteten Zeitraum noch nicht aktiviert und hatte somit keinen Einfluss auf die Betriebsstunden.

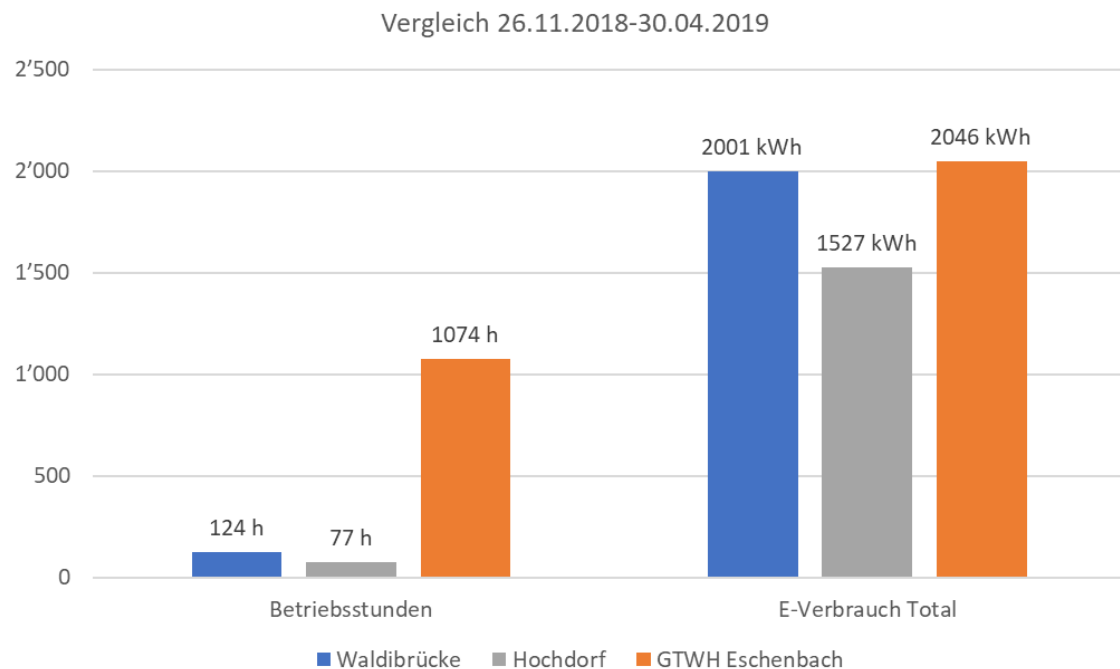


Abbildung 18: Vergleich der Betriebsstunden und Elektroverbräuche im Zeitraum 26.11.2018 bis 30.04.2019

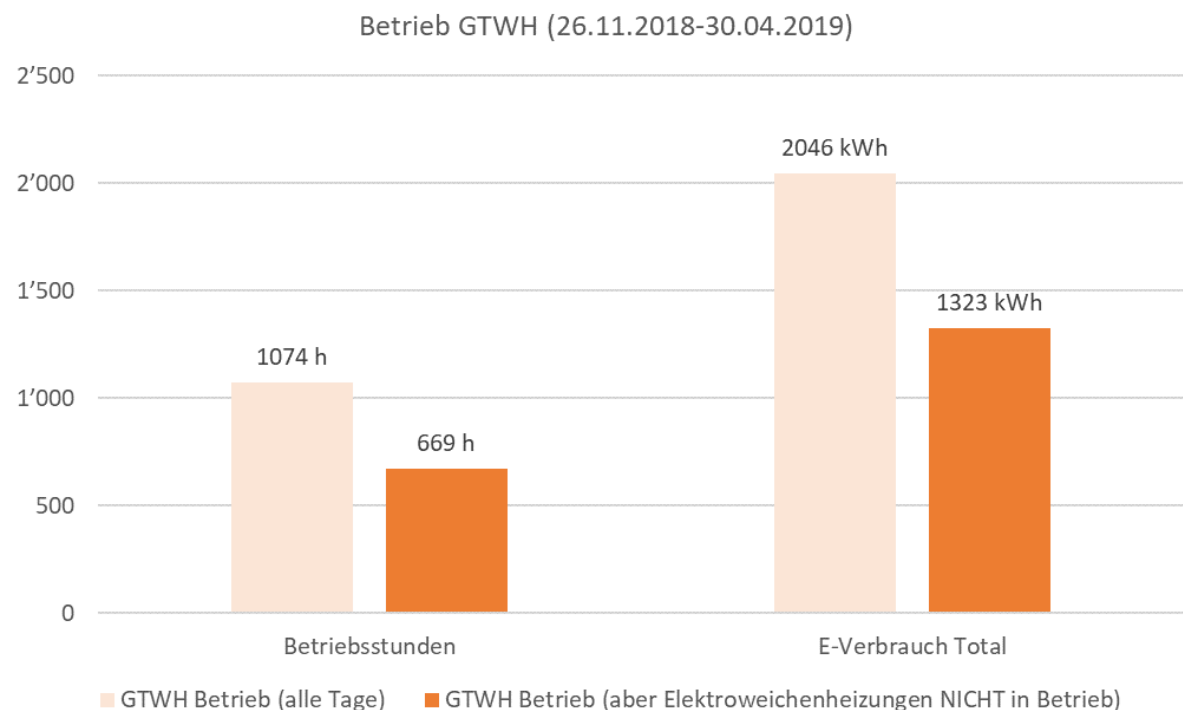


Abbildung 19: Vergleich der Betriebsstunden und Elektroenergieverbräuche im Zeitraum 26.11.2018 bis 30.04.2019 in Abhängigkeit des Betriebs der EWH-Referenzanlagen

Somit war die geothermische Weichenheizung an 95 Tagen in Betrieb, an denen die Elektroweichenheizungen sich nur im Standby befanden. In diesen 95 Tagen sind ca. 65% des gesamten Elektroverbrauchs der geothermischen Anlage angefallen (Abbildung 19). Da ein Energieentzug aus dem Erdreich stattgefunden hat, konnte nachgewiesen werden, dass die geothermische Anlage an diesen Tagen tatsächlich in Betrieb und nicht im Standby war.

Rückfragen zu den hohen Laufzeiten beim Hersteller Triple S-Systeme ergaben, dass der Hersteller Betriebsstunden von 600 bis 800 Stunden seit Inbetriebnahme erwartet hätte.

Die EWH der SBB wurden in den letzten Jahren kontinuierlich energetisch optimiert und effizienter betrieben. Die verbesserte Mess- und Steuertechnik ermöglicht einen exakteren Betrieb, wenn Wärme effektiv benötigt wird. Die GTWH hingegen ist erst seit einigen Jahren am Markt verfügbar und verfügt über erhebliches Entwicklungs- und Effizienzpotenzial. Es muss aber zuerst eine stabile Betriebsweise und Verfügbarkeit nachgewiesen werden, bevor die Effizienz optimiert werden kann. Mit dem aktuellen Entwicklungsstand konnten keine Energieeinsparungen respektive Kosteneinsparungen bei den Betriebskosten erzielt werden.

4.6. Wirtschaftlichkeit

Die Kosten der GTWH in Eschenbach wurden mit einem durchschnittlichen Erneuerungsprojekt einer elektrischen Weichenheizung verglichen. Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit werden die Lebenszykluskosten herangezogen. Da es sich um ein Pilotprojekt mit Investitionsprojekt und zweijähriger Betriebsphase handelte, werden nachfolgend keine effektiven Kostenangaben gemacht.

I. Investitionen:

Massgebend für die höheren Investitionen der GTWH sind die aufwendigen Erdarbeiten. Die Kosten für das Bohren der Erdwärmesonden und die Kabelverlegung im Erdkanal sind zudem schwerer kalkulierbar. Je nach örtlichen Zugänglichkeiten können die Kosten unterschiedlich ausfallen.

II. Energiekosten:

Mit den Messaufzeichnungen aus dem zweiten Betriebsjahr konnten keine Einsparungen bei den Elektroenergiekosten belegt werden. Die GTWH hat deutlich längere Laufzeiten, die für einen hohen Elektroverbrauch trotz erhoffter Effizienzsteigerung durch den Einsatz der Wärmepumpe sorgen.

III. Instandhaltungskosten:

Die Instandhaltungskosten setzen sich aus internen und externen Aufwänden durch die Firma Triple S-Systeme zusammen. Für die sachgerechte Instandhaltung ist die externe Unterstützung im Rahmen eines Wartungsvertrages notwendig. Lange Transportwege und Lieferzeiten aus Deutschland bedingen, dass ein kleines Ersatzteillager in der Niederlassung Luzern aufgebaut werden musste.

Gesamthaft ergibt sich aus den Erfahrungen des Demonstrationsprojekts keine wirtschaftliche Begründung für den Einsatz von GTWH. Die Kosten müssen sowohl bei den Investitionen als auch den Betriebskosten reduziert werden, um konkurrenzfähig zu werden.

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Trotz zweier Betriebsjahre können keine abschliessenden Aussagen getroffen werden. Bei der Interpretation der Messdaten ist zu beachten, dass nur Messdaten des zweiten Betriebsjahres vorliegen. Es werden daher auch zukünftig die Betriebsdaten im Leit- und Störmeldesystem der SBB aufgezeichnet und ausgewertet.

Der Testbetrieb der Anlage muss weiter beobachtet werden und kontinuierliche Verbesserungen müssen vorgenommen werden. Die vorliegenden Messdaten lassen vermuten, dass erhebliches Optimierungspotential in der Anlagenregelung vorhanden ist (z.B. Betriebszeiten Regeneration, Vergleich mit Elektro-Weichenheizungen in Kapitel 4.5). Eine Optimierung der Anlagensteuerung vor Ort könnte durch vertiefende Simulationsstudien gezielt vorbereitet werden.

Herausfordernd ist der Zielkonflikt zwischen Anlagenverfügbarkeit und Energieeffizienz. Erst wenn mehrere Jahre Betriebserfahrungen vorhanden sind, können die Auswirkungen von Veränderungen der Anlagensteuerung und Beheizung der Schienen beurteilt werden. Im Rahmen der ESöV 2050 wird auch das Projekt «037 Weichenheizung Sim-Tool» realisiert. Das im Projekt 037 erarbeitete Simulationsmodul der TU Dresden wird zukünftig weitere Rückschlüsse liefern können.

Durch die Regeneration in den Sommermonaten konnte die Anlage vollständig regeneriert werden. Die dem Erdreich im Heizbetrieb entzogene Wärme wurde durch Abkühlen der Schienen im Sommerhalbjahr zurück gespiesen. Dadurch ist ein positiver Effekt auf den Betrieb im nächsten Winter zu erwarten. Mit einer wiederholten Betriebsanalyse in den kommenden Betriebsjahren könnte dieser Effekt quantifiziert werden.

Die Lebenszykluskosten einer GTWH liegen deutlich über jenen eines elektrischen Weichenheizsystems. Sowohl in der Investition als auch im Betrieb der Anlage. Die von den Herstellern propagierten Energieeinsparungen konnten in Eschenbach nicht erreicht werden. Beobachtungen und Analysen werden zeigen, ob die Energieeffizienz der Anlage gesteigert werden kann. Die vom Hersteller versprochenen Energieeinsparungen scheinen mittel- bis langfristig nicht realistisch. Die Steuerung und Regelung der EWH und GWH bei den SBB ist weit optimiert, so dass aus heutiger Sicht der Effekt des Einsatzes einer Wärmepumpe nicht mehr stark ins Gewicht fällt.

Der Pilotbetrieb der GTWH in Eschenbach muss ausgedehnt und auch in den nächsten Jahren weiter beobachtet werden. Kontinuierliche Verbesserungen zur Steigerung der Energieeffizienz müssen erarbeitet werden und in den Betrieb einfließen. Die Aussagekraft des Pilotbetriebs zur Praxistauglichkeit dieser Technologie ist noch nicht umfassend genug. Erst nach weiteren Betriebsjahren kann über den Bau von weiteren geothermischen Anlagen abschliessend entschieden werden. Kontinuierliche Weiterentwicklungen der Hersteller müssen erfolgen, um das System konkurrenzfähiger zu machen. Mit den bisherigen Ergebnissen ist der Einsatz von weiteren GTWH Systemen wirtschaftlich nicht ratsam.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

GTWH	Geothermische Weichenheizung
GWH	Gasweichenheizanlage
EWH	Elektroweichenheizanlage
EWS	Erdwärmesonde

Literaturverzeichnis

- [1] Grüniger, A., Signorelli, S., *Potenzial geothermischer Weichenheizungen in der Schweiz*. 2016, Bundesamt für Verkehr BAV
