



Schlussbericht vom 02.12.2025

AsphaltReg

Demonstration und Optimierung eines rezyklierbaren Asphaltkollektors zur Regeneration von Erdwärmesonden





INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK



Datum: 18.12.2024

Ort: Rapperswil SG

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

SPF Institut für Solartechnik
Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

EW Wald AG
Jonastrasse 12
8636 Wald
<https://www.ew-wald.ch/>

Kriesi Energie GmbH
Meierhofrain 42
8820 Wädenswil
<https://www.kriesi-energie.ch/>

Autoren:

Alexander Schmitt, SPF, alexander.schmitt@ost.ch
Florian Ruesch, SPF, florian.ruesch@ost.ch
Kevin Meili, SPF, kevin.meili@spf.ch

BFE-Projektbegleitung: Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI502561-01

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



Zusammenfassung

Das Projekt AsphaltReg ist eine Begleitung zu dem Projekt «Asphaltkollektor EW Wald AG, Neubau Betriebsgebäude», durchgeführt von der Kriesi Energie GmbH, der Flückiger & Bosshard AG und der EW-Wald AG. Hierbei wurde erstmals in der Schweiz ein rezyklierbarer Asphaltkollektor erfolgreich in einer Betonschicht etwa 14 cm unterhalb der Oberfläche des Asphalts in Betrieb genommen. Durch diese Bauweise bleibt die vollständige Recyclingfähigkeit des Asphalts erhalten und die Kollektoren werden mechanisch geschützt. AsphaltReg beschäftigt sich vor allem mit der thermischen Analyse und Modellentwicklung. Projektentwicklung, Systemintegration, Kollektorbetrieb und Konstruktion sind Teil der Kriesi Energie GmbH und deren Partner.

Erste Auswertungen konnten aufzeigen, dass diese Kollektoren sich sehr gut für die Regeneration von Erdwärmesonden (EWS) eignen. Dies kann einen wichtigen Beitrag zur langfristigen Stabilität und Effizienz von Wärmepumpensystemen darstellen, aber auch Einsparungen in der Erdsondenlänge bedeuten, oder geringere Abstände von Sonden ermöglichen, was vor allem in dichtbesiedelten Gebieten wichtig sein kann.

Das Demonstrationsprojekt beim EW Wald umfasst 17 Kollektormodule mit insgesamt 262 m² Fläche, die an ein Erdsondenfeld mit sechs Sonden angeschlossen wurden. Die Messungen in den ersten beiden Betriebsjahren bestätigen die Funktionstüchtigkeit des Konzepts und weisen einen spezifischen Ertrag von über 200 kWh/m²·a nach, was vergleichbar mit Regenerationsleistung von PVT-Modulen oder unverglasten thermischen Kollektoren ist. Damit konnte das Erdsondenfeld im Jahr 2024 zu über 100 % regeneriert werden, wodurch die Temperatur im Erdreich stabilisiert, und die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe konstant hochgehalten wird. Eine Modellerstellung und Analyse mit Polysun haben ergeben, dass die JAZ auch über einen Zeitraum von 50 Jahren 4.5 beträgt. Thermische transiente Analysen zeigten zudem, dass insbesondere der Rohrabstand ein Optimierungspotenzial birgt, um die Leistung pro Fläche weiter zu steigern. Des Weiteren konnte aufgezeigt werden, dass die Leistung des Kollektors mit fast 30 kW/K sehr stark von dem Temperaturunterschied Erdreich – Wärmeträgerfluid abhängt. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass für den effizienten Betrieb von Asphaltkollektoren niedrige Erdsondentemperaturen wichtig sind, da die Effizienz mit zunehmender Fluidtemperatur stark abfällt.

Ein weiterer Aspekt des Projekts war die Kostenbewertung. Die erste Realisierung führte aufgrund der Prototypfertigung mit geschweissten Rahmen und hochwertigen Materialien noch zu relativ hohen spezifischen Kosten ($\approx 415 - 511$ CHF/m²). Im Vergleich mit den Benchmarks aus der RegenOpt-Studie wurde jedoch deutlich, dass der Asphaltkollektor schon heute konkurrenzfähig ist, wenn die Kosten der Asphaltierungsarbeiten selbst nicht berücksichtigt werden. Simulationen und Skaleneffekte deuten darauf hin, dass bei Serienfertigung und optimierten Bauprozessen Kostensenkungen von rund 40 % realistisch sind, wodurch Asphaltkollektoren langfristig zu den kostengünstigsten Regenerationstechnologien zählen könnten.

Die Ergebnisse belegen, dass Asphaltkollektoren nicht nur eine technisch robuste, sondern auch eine wirtschaftlich attraktive Option zur Regeneration von Erdwärmesonden darstellen – insbesondere in dicht bebauten Gebieten, wo Regeneration gemäss SIA 384/6 verpflichtend ist. Durch die einfache Integration bieten sie ein grosses Multiplikationspotenzial für die Wärmewende im Gebäudebereich, vor allem wenn keine 100%-ige Regeneration angestrebt wird, da diese sich negativ auf Kosten und Effizienz der Regeneration auswirkt.



Résumé

Le projet AsphaltReg accompagne le projet «Asphaltnollektor EW Wald AG, Neubau Betriebsgebäude», réalisé par Kriesi Energie GmbH, Flückiger & Bosshard AG et EW-Wald AG. C'est la première fois en Suisse qu'un collecteur d'asphalte recyclable est mis en service avec succès dans une couche de béton située à environ 14 cm sous la surface de l'asphalte. Cette méthode de construction préserve la recyclabilité complète de l'asphalte et assure une protection mécanique des collecteurs. AsphaltReg s'occupe principalement de l'analyse thermique et du développement de modèles. Le développement du projet, l'intégration du système, l'exploitation des collecteurs et la construction sont du ressort de Kriesi Energie GmbH et de ses partenaires. Les deux études se complètent donc mutuellement.

Les premières évaluations ont montré que ces capteurs sont très bien adaptés à la régénération des sondes géothermiques (EWS). Cela peut contribuer de manière importante à la stabilité et à l'efficacité à long terme des systèmes de pompes à chaleur, mais aussi permettre de réduire la longueur des sondes géothermiques ou d'espacer davantage les sondes, ce qui peut être particulièrement important dans les zones densément peuplées.

Le projet de démonstration à EW Wald comprend 17 modules de capteurs d'une superficie totale de 262 m², qui ont été raccordés à un champ de sondes géothermiques comprenant six sondes. Les mesures effectuées au cours des deux premières années de fonctionnement confirment la fonctionnalité du concept et démontrent un rendement spécifique de plus de 200 kWh/m²·a, ce qui est comparable à la capacité de régénération des modules PV-T ou des capteurs thermiques non vitrés. Cela signifie que le champ de sondes géothermiques pourrait être régénéré à plus de 100 % en 2024, stabilisant ainsi la température dans le sol et maintenant le coefficient de performance saisonnier (SCOP) de la pompe à chaleur à un niveau élevé constant. La modélisation et l'analyse avec Polysun ont montré que le SCOP est de 4,5, même sur une période de 50 ans. Les analyses thermiques transitoires ont également montré que l'espacement des tuyaux, en particulier, offre un potentiel d'optimisation afin d'augmenter encore le rendement par surface. En outre, il a été démontré que le rendement du collecteur, qui atteint près de 30 kW/K, dépend fortement de la différence de température entre le sol et le fluide caloporteur. À l'inverse, cela signifie que de faibles températures des sondes géothermiques sont importantes pour le fonctionnement efficace des collecteurs en asphalte, car le rendement diminue fortement lorsque la température du fluide augmente.

Un autre aspect du projet était l'évaluation des coûts. La première mise en œuvre a entraîné des coûts spécifiques relativement élevés (≈ 415-511 CHF/m²) en raison de la production de prototypes avec des cadres soudés et des matériaux de haute qualité. Cependant, une comparaison avec les références de l'étude RegenOpt a montré que le collecteur d'asphalte est déjà compétitif aujourd'hui, même sans tenir compte des coûts des travaux d'asphaltage eux-mêmes. Les simulations et les économies d'échelle suggèrent que des réductions de coûts d'environ 40 % sont réalistes avec une production en série et des processus de construction optimisés, ce qui pourrait faire des collecteurs d'asphalte l'une des technologies de régénération les plus rentables à long terme.

Les résultats montrent que les collecteurs d'asphalte constituent non seulement une option techniquement robuste, mais aussi économiquement intéressante pour la régénération des sondes géothermiques, en particulier dans les zones densément construites où la régénération est obligatoire selon la norme SIA 384/6.

Grâce à leur intégration facile, ils offrent un grand potentiel pour la transition thermique dans le secteur du bâtiment, en particulier si l'objectif n'est pas une régénération à 100 %, car cela a un impact négatif sur le coût et l'efficacité de la régénération.



Summary

The AsphaltReg project accompanies the project 'Asphaltkollektor EW Wald AG, Neubau Betriebsgebäude, carried out by Kriesi Energie GmbH, Flückiger & Bosshard AG and EW-Wald AG. This is the first time in Switzerland that a recyclable asphalt collector has been successfully put into operation in a concrete layer approximately 14 cm below the surface of the asphalt. This construction method preserves the complete recyclability of the asphalt and provides mechanical protection for the collectors. AsphaltReg is primarily concerned with thermal analysis and model development. Project development, system integration, collector operation and construction are the responsibility of Kriesi Energie GmbH and its partners. The two studies therefore complement each other.

Initial evaluations have shown that these collectors are very well suited for the regeneration of geothermal probes (EWS). This can make an important contribution to the long-term stability and efficiency of heat pump systems, but also mean savings in the length of geothermal probes or enable smaller distances between probes, which can be particularly important in densely populated areas.

The demonstration project at EW Wald comprises 17 collector modules with a total area of 262 m², which were connected to a geothermal probe field with six probes. Measurements taken during the first two years of operation confirm the functionality of the concept and demonstrate a specific yield of over 200 kWh/m²·a, which is comparable to the regeneration capacity of PVT modules or unglazed thermal collectors. This means that the geothermal probe field could be regenerated by over 100% in 2024, stabilising the temperature in the ground and keeping the seasonal performance factor (SPF) of the heat pump consistently high. Modelling and analysis with Polysun have shown that the SPF is 4.5 even over a period of 50 years. Thermal transient analyses also showed that the pipe spacing in particular offers potential for optimisation in order to further increase the output per area. Furthermore, it was shown that the output of the collector, at almost 30 kW/K, is highly dependent on the temperature difference between the ground and the heat transfer fluid. Conversely, this means that low ground probe temperatures are important for the efficient operation of asphalt collectors, as efficiency drops sharply with increasing fluid temperature.

Another aspect of the project was cost evaluation. The first implementation resulted in relatively high specific costs ($\approx 415\text{--}511$ CHF/m²) due to the prototype production with welded frames and high-quality materials. However, a comparison with the benchmarks from the RegenOpt study showed that the asphalt collector is already competitive today, even without taking into account the costs of the asphaltting work itself. Simulations and economies of scale suggest that cost reductions of around 40% are realistic with series production and optimised construction processes, which could make asphalt collectors one of the most cost-effective regeneration technologies in the long term.

The results show that asphalt collectors are not only a technically robust but also an economically attractive option for regenerating geothermal probes – especially in densely built-up areas where regeneration is mandatory according to SIA 384/6.

Thanks to their easy integration, they offer great potential for the heat transition in the building sector, especially if 100% regeneration is not the goal, as this has a negative impact on the cost and efficiency of regeneration.



Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

- Asphaltkollektoren, die in einer Zementschicht unterhalb des Asphalts installiert werden, liefern mit $\sim 200 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ vergleichbar hohe spezifische Erträge wie PVT- oder unabgedeckte solarthermische Kollektoren zur Regeneration von Erdsonden. Sie nutzen bereits versiegelte Flächen zur Energiegewinnung und erhalten die Recyclierbarkeit des Asphalts.
- Der Asphaltkollektor konnte in Polysun mithilfe des Modells für einen unabgedeckten Kollektor abgebildet werden und steht somit für weitere Analysen und Planungstätigkeiten zur Verfügung. Die verwendeten Parameter könne Kapitel 5.4.1 entnommen werden. Mit zunehmendem Regenerationsgrad sinkt die Wirtschaftlichkeit von Asphaltkollektoren, da die Temperaturdifferenz zwischen Asphaltoberfläche und Sole abnimmt. Asphaltkollektoren arbeiten mit den niedrigsten Vorlauftemperaturen aller Regenerationsmethoden und sind damit besonders für moderate Regeneration geeignet.
- Die Betriebstemperatur hat einen sehr starken Einfluss auf die Effizienz von Asphaltkollektoren: Je niedriger die Temperatur, desto höher die Effizienz. Idealerweise sollte die Kollektortemperatur unter der Temperatur des umgebenden Erdreichs liegen. Dadurch kann auch nachts oder bei bewölkten Bedingungen weiterhin Wärme aus dem Boden aufgenommen werden, sodass der Kollektor über seinen Betriebszeitraum möglichst lange und konstant betrieben werden kann.
- Das wirtschaftliche Potenzial bietet noch viel Spielraum für günstigere Asphaltkollektoren: Durch Serienfertigung, optimierte Bauprozesse, günstigere Materialien und Designoptimierungen können die Kosten deutlich reduziert werden. Asphaltkollektoren können dann zu den wirtschaftlichsten Regenerationstechnologien gehören.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	4
Summary	5
Kernbotschaften («Take-Home Messages»)	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	11
1.1 Ausgangslage und Motivation	11
1.2 Stand der Technik	11
1.3 Regeneration von Erdsonden.....	12
1.4 Projektziele	13
2 Vorgehen und Methode	14
3 Anlagenbeschrieb	15
3.1 Kollektoreinbau	17
4 Monitoring	20
5 Analyse	22
5.1 Verschattung	22
5.2 Messdaten Analyse	26
5.2.1 Temperaturen	26
5.3 Thermische Analyse	30
5.3.1 Fitting der Asphaltkollektorparameter.....	31
5.3.2 Ertragsanalyse bei unterschiedlicher Fluidtemperatur.....	37
5.3.3 Analyse Rohrabstand	39
5.3.4 Analyse Kiesschicht.....	42
5.4 Polysun-Simulation.....	45
5.4.1 Asphaltkollektor in Polysun.....	45
5.4.2 Abschätzung Langzeitverhalten in Wald	49
5.4.3 Vergleich mit anderen Regenerationstechnologien	52
5.5 Kosten-Analyse	54
5.5.1 Kostenoptimierungspotential	56
6 Bewertung Ergebnisse und Diskussion	58
6.1 Ergebnisse paralleles P&D-Projekt	58
6.2 Bewertung Projektverlauf	59
6.3 Bewertung Simulation Ansys.....	59



6.4	Bewertung Regeneration Asphaltkollektor	61
6.5	Bewertung vgl. andere Regenerationstechnologien (RegenOpt), Kosten, Performance	61
6.5.1	Wo ist Regeneration unumgänglich?	62
6.6	Kostenbewertung.....	63
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	64
7.1	Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz von Asphaltkollektoren.....	64
7.2	Preisbestimmende Restriktionen.....	65
7.3	Schlussfolgerungen für Planung und Auslegung.	65
7.4	Multiplikationspotential	66
7.5	Ausblick	66
8	Literaturverzeichnis	68
9	Anhang	69
9.1	Simulationsergebnisse	69
9.1.1	Bilder Thermische Analyse.....	69
9.2	Bilder Installation Asphaltkollektor.....	78
9.3	Datenblätter	81



Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich
BFE	Bundesamt für Energie
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl der Wärmepumpe)
EFH	Einfamilienhaus
EW	Elektrizitätswerk
EWS	Erdwärmesonde
FEM	Finite-Elemente-Methode
GIS	Geoinformationssystem
GlobHrz	Globale Horizontalstrahlung
LoRaWan	Long Range Wide Area Network
MFH	Mehrfamilienhaus
PVT	Photovoltaisch-thermischer Sonnenkollektor
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SPF	Institut für Solartechnik, OST
TTN	The Things Network (offenes LoRaWan-Netz)
V1	Ventil 1 im Kollektorkreis
WZ-Koll	Wärmezähler im Kollektorkreis
WZ-WP	Wärmezähler Wärmepumpe

Symbol / Abkürzung	Bedeutung	Kontext im Projekt
b_1, b_2, b_u	Wärmeverlustkoeffizienten (Kollektorparameter)	Polysun-Analyse, Modellierung nach EN 12975
ΔT	Temperaturdifferenz	Steuerung, Messung Kollektor (Vor- /Rücklauf), Ertragsberechnung
EL	Langwellige Einstrahlung	Strahlungsbilanz im Kollektormodell
G	Einstrahlung (W/m^2)	Eingangsgrösse für Kollektorertrag, Monitoring und Simulation
$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$	Spezifischer jährlicher Energieertrag	Ertragskennzahl für Kollektor



Symbol / Abkürzung	Bedeutung	Kontext im Projekt
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	Thermische Analyse
Q	Wärmemenge (kWh, MWh)	Ertragsbewertung, Vergleich mit Bedarf,
T_a	Umgebungstemperatur	Einflussgrösse auf Kollektorleistung,
T_m	Mittlere Fluidtemperatur	Berechnungsgrösse im Kollektormodell
T_{sky}	Effektive Himmelstemperatur	Langwellige Strahlungsbilanz im Modell
U	Wärmedurchgangskoeffizient	Thermische Analyse des Kollektors
η, η_0	Wirkungsgrad	Kollektorparameter (Polysun-Analyse, FEM-Modell)



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

In der Schweiz sind Gebäude für über 40 % des Endenergieverbrauchs und rund einen Drittel der CO₂-Emissionen verantwortlich. Wärmepumpen mit Erdwärmesonden (EWS) gehören zu den effizientesten erneuerbaren Wärmeerzeugungsanlagen und spielen daher eine entscheidende Rolle zur Senkung der CO₂-Emissionen des zukünftigen Gebäudeparks. So rechnet die Stadt Zürich beispielsweise, dass in Zukunft ca. 20 % des Wärmebedarfs für Gebäude mit geothermischen Wärmepumpen erzeugt werden soll. Auf die gesamte Schweiz hochgerechnet, könnte man also mit einer forcierten Nutzung von geothermischen Wärmepumpen fossile Brennstoffe in der Grössenordnung von 25'000 TJ und CO₂-Emissionen von ca. 1.2 Mio t einsparen. Für Quartiere, in denen die Erdwärmenutzung erlaubt ist, bedeutet dies allerdings Entzugsdichten von ca. 20-100 kWh/m². Die Studie "Strategische Planung von Erdwärmesonden" [1] hat gezeigt, dass EWS bereits ab einer Entzugsdichte von 8 kWh/m² entweder regeneriert oder länger dimensioniert werden müssen, und ab einer Entzugsdichte von 34 kWh/m² die Regeneration unumgänglich ist. Dies wird seit Frühjahr 2021 auch in der SIA 384/6 gefordert. Somit werden nicht nur grössere Überbauungen, sondern auch schon kleinere MFH und EFH mit wenig Grundstücksfläche oder erhöhtem Bedarf Massnahmen gegen die Langzeitauskühlung vorsehen müssen. Neue, günstige Lösungen zur Regeneration (oft reicht auch eine Teilregeneration) sind daher für die weitere Verbreitung der sehr effizienten Erdwärme-Wärmepumpen essenziell.

Weil weltweit schon einige Projekte zur thermischen Aktivierung von Strassen bestehen, wurde im Kanton Zürich ein Postulat zur Abklärung der Nutzung von asphaltierten Flächen eingereicht. Die darauf durchgeführte Studie hat ergeben, dass Asphaltkollektoren zur Regeneration von EWS deutlich günstiger als herkömmliche Solarkollektoren sein könnten [1]. In dieser Studie wurde ebenfalls ein neues Design vorgeschlagen, bei dem die Rohre nicht im Asphalt, sondern in der darunterliegenden Sauberkeitsschicht untergebracht werden. Mit diesem Ansatz werden zwar etwas weniger hohe Temperaturen erreicht, es bestehen aber folgende wesentlichen Vorteile:

- Die Umsetzung ist einfach, beruht auf Standardprodukten und kann von jedem Tiefbauunternehmen umgesetzt werden.
- Die Mehrkosten gegenüber einer Belagserneuerung ohne thermische Aktivierung sind gering.
- Die Rezyklierbarkeit des Asphaltes ist vollumfänglich gegeben.
- Es bestehen keine hohen Ansprüche an die Belastbarkeit der Rohre.
- Das Prinzip kann auch auf andere Deckschichten übertragen werden.

Weil das AWEL dem Konzept ein hohes Potenzial zuschreibt, wurde aktiv nach einer ersten Umsetzung in einer Pilotanlage gesucht. Mit dem Asphaltkollektor des EW Wald ist dieses Konzept nun erstmals umgesetzt und in diesem Projekt genauer untersucht und optimiert worden.

1.2 Stand der Technik

Wie oben erwähnt, gibt es bereits einige Studien zur Aktivierung von Asphaltsschichten. Bei den meisten Projekten ging es darum, durch thermische Aktivierung Strassen zu enteisen oder deren Oberflächentemperatur zu senken, um die Lebensdauer zu steigern und Wärmeinseleffekte zu vermeiden. Die erzeugte Energie wurde nur zum Teil für andere Anwendungen genutzt. In einer kürzlich



erschienenen Übersichtsstudie [2] wird in 23 von 24 Studien die Enteisung als einer von mehreren Zwecken eines Asphaltkollektors erwähnt.

Zwei Studien lassen sich gut mit den hier durchgeführten Untersuchungen vergleichen. Zum einen die Studie vom Westschweizer Ingenieurbüro B. Matthey, Monteillon, für die Salle Polyvalente de Cortaillod [3]. Mit im Asphalt verlegten Kupferrohren konnten dabei Erträge von 330 kWh/m² für den Betrieb der Wärmepumpe und die Regeneration von sieben EWS erreicht werden. Zum anderen gibt es die laufende Studie «Sozial100%Erneuerbar: 100% erneuerbare Wärme- und Kälteversorgung im sozialen Wohnbau - das Demonstrationsprojekt Käthe-Dorsch-Gasse». Hier wird ein unter anderem ein Erdsondenfeld durch Asphaltkollektoren, unverglaste thermische Kollektoren und durch Abwärme aus der Wohnkühlung regeneriert, um die Temperatur des Untergrundes im Sommer anzuheben und dadurch die Effizienz und Nachhaltigkeit der geothermischen Anlage langfristig zu sichern. Bei Minustemperaturen soll die aktivierte Asphaltfläche einen Winterdienst überflüssig machen. Das Energiesystem versorgt dabei 300 Wohneinheiten [4]. Ergebnisse zu diesem Bericht sind noch keine bekannt.

Bei allen bisher bekannten Projekten wurden Leitungen direkt in der Asphaltsschicht verlegt und können daher nicht mehr einfach getrennt werden. Weil das Recycling von Asphalt bereits heute Standard ist, wird dies als Hindernis für die bestehenden Ansätze angesehen. Ein weiterer Nachteil bei der Verlegung in der Asphaltsschicht ist die kürzere Lebensdauer von Asphalt. Die bestehende Deckschicht (befahrbar) beträgt 20 – 25 Jahre [5]. Die Lebensdauer eines Alu-Verbundrohres und somit des Asphaltkollektors liegt mit 50 Jahren somit über der Lebensdauer von Asphaltsschicht. Beim hier vorgestellten Ansatz kann die Asphaltsschicht aufgefräst und entfernt werden. Somit können Unterhaltsarbeiten an der Belagsoberseite ohne grossen Mehraufwand und ohne Zerstörung des Kollektors durchgeführt werden. In allen bekannten Projekten wurde die Verrohrung in der Asphaltsschicht mit einer Einbautiefe von 5-12 cm eingebracht um höhere Temperaturen zu erreichen. Hier erfolgt der Einbau in der darunterliegenden Sauberkeitsschicht, in einer Tiefe von ca. 15-20 cm. Es wird erwartet, dass dadurch zwar etwas weniger hohe Temperaturen, dafür aber längere Betriebszeiten erreicht werden können. Und da für die Regeneration von EWS bereits geringe Temperaturen genügen, ist auch kein grosser Effizienzverlust zu erwarten.

1.3 Regeneration von Erdsonden

Die Regeneration von Erdsonden kann eine zentrale Rolle für den nachhaltigen und effizienten Betrieb geothermischer Anlagen spielen. Bei kontinuierlicher Wärmeentnahme ohne Wärmerückführung kühlt sich der Untergrund über die Jahre zunehmend ab. Diese Absenkung des Temperaturniveaus führt nicht nur zu sinkenden Soletemperaturen, sondern auch zu einer spürbaren Reduktion der Leistungszahl der Wärmepumpe. Dadurch steigt der elektrische Energieverbrauch und somit die Betriebskosten [6]. Eine gezielte Regeneration kann diesen Prozess aufhalten oder sogar umkehren.

Dabei lassen sich verschiedene Ziele unterscheiden: Wird dem Untergrund exakt die entzogene Energiemenge wieder zugeführt, bleibt die Erdreichtemperatur langfristig stabil (100 % Regeneration). Dies ermöglicht eine unbegrenzte Nutzung der Sonden bei gleichbleibender Effizienz. Wird mehr Energie zugeführt als entnommen, steigt das Temperaturniveau im Sondenumfeld, wodurch die Austrittstemperatur der Sole höher liegt und die Wärmepumpe mit verbesserter Effizienz betrieben werden kann (> 100 % Regeneration).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Vermeidung von gegenseitigen Beeinflussungen: Werden mehrere Sonden auf engem Raum installiert, kann es ohne Regeneration zu einem beschleunigten lokalen Auskühlen kommen [3].



Des Weiteren erlaubt eine ausreichende Regeneration auch eine Reduktion der erforderlichen Sondenmeter, was die Investitionskosten senkt. Dabei müssen die Kosten der Regenerationstechnologie unter den Einsparungen bei der Sondenmeter liegen.

Bewährte Regenerationswärmequellen sind Geo-cooling, solarthermische- und PVT-Kollektoren sowie Luft-Wärmetauscher. Die Nutzung von Asphaltflächen zur Regeneration Erdwärmesonden hingegen wird erst vereinzelt, meist im Zuge von Forschungsanlagen untersucht. Kollektoren, die unterhalb der Asphaltfläche installiert werden, gibt es bis dato unseres Wissens noch keine.

Das EW-Wald stellt sich zur Verfügung, um für Ihren Neubau (2022) ein Wärmesystem mit Erdwärmesonde und eines solchen neuartigen Asphaltkollektors zur Regeneration zu nutzen.

1.4 Projektziele

Das beantragte Projekt soll das hohe Potenzial von rezyklierbaren Asphaltkollektoren zur Regeneration von Erdwärmesonden aufzeigen, den Aufbau optimieren und mit anderen Regenerationstechnologien vergleichen.

Dazu müssen verschiedene Teilaspekte zur Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Funktionsweise und Effizienz abgeklärt werden. Anhand der Messdaten sollen sowohl ein thermisches FEM-Modell als auch ein Polysun-Modell erstellt werden. Mithilfe dieser Modelle sollen Parameterstudien und Simulationen durchgeführt werden, die Aufschluss über folgende Fragestellungen geben sollen.

Ertrag:

- Welche Wärmeerträge liefern rezyklierbare Asphaltkollektoren bei der Regeneration von Erdwärmesonden in der Praxis?
- Inwieweit können Parameter wie Sonneneinstrahlung, Aussentemperatur oder Niederschlag in den Modellierungen berücksichtigt werden?
 - o Kann ein Modell in Polysun den Kollektor über mehrere Jahre simulieren?
- Wie kann der Aufbau optimiert werden, um ein möglichst hohes Kosten/Nutzen Verhältnis zu erreichen?
 - o Wie ändert sich der Ertrag bei Variation des Rohrabstands oder beim Verlegen des Kollektors in die tieferliegende Kiesschicht
 - o welchen Einfluss hat die Temperatur des Wärmeträgerfluid/der Erdsonde

Umsetzung/Wirtschaftlichkeit:

- Zu welchen Kosten sind rezyklierbare Asphaltkollektoren realisierbar?
- Gibt es Schwierigkeiten bei der Planung, dem Bau und dem Betrieb?
- Wie sieht die Wirtschaftlichkeit gegenüber Konkurrenztechnologien aus

Das Ziel der EW-Wald AG ist in erster Linie den Innovations- und Forschungscharakter des Projekts zu unterstützen und helfen die Energiewende durch neue Technologien voranzutreiben. Auch wenn die Regeneration eine Reduktion der Sondenmeter ermöglicht, wurde hier zur Sicherheit konservativ gerechnet, und die Erdsonden ohne Regeneration ausgelegt. Die Regeneration wird sich jedoch positiv auf die Effizienz der Wärmepumpe auswirken.



2 Vorgehen und Methode

Im Projekt AsphaltReg stand die ganzheitliche Untersuchung und Optimierung eines neuartigen Asphaltkollektors im Vordergrund. Nach der detaillierten Planung und Realisierung der Demonstrationsanlage der EW Wald AG in Zusammenarbeit mit der Kriesi Energie GmbH wurde der Kollektor in Betrieb genommen und über zwei vollständiges Betriebsjahre begleitet. Seit April 2024 wurde zusätzlich das Messsystem der OST finalisiert. Dabei wurden meteorologische Daten, Oberflächen- und Bodentemperaturen sowie Energieflüsse kontinuierlich erfasst. Auf dieser Basis konnten die Effizienz des Kollektors sowie der Einfluss von Umgebungsfaktoren wie Sonneneinstrahlung, Verschattung, und Lufttemperatur systematisch ausgewertet werden.

Im nächsten Schritt wurden transiente thermische Simulationen (FEM mit Ansys) durchgeführt, um die gemessenen Erträge nachzubilden und die Parameter des Kollektors zu validieren. Mit diesen Modellen liessen sich folgende Szenarien analysieren: Veränderte Fluidtemperaturen zur Abschätzung der Temperatursensitivität, alternative Rohrabstände, wodurch konkrete Hinweise zur Optimierung des Kollektordesigns gewonnen wurden und eine Verschiebung des Kollektors in die Kiesschicht, was Kostenvorteile mit sich bringt, den Ertrag aber verringert.

Zusätzlich wurden Polysun-Simulationen eingesetzt, um die Wirkung des Asphaltkollektors im Zusammenspiel mit den Erdsonden und der Wärmepumpe abzubilden und mit anderen Regenerationstechnologien zu vergleichen. Dafür wurde ein vereinfachtes Energiesystem erstellt, welches dem der EW-Wald AG ähnelt und über einen Zeitraum von 50 Jahre simuliert. Dadurch lässt sich auch der Einfluss der Regeneration auf die Wärmepumpe über die Jahre quantifizieren und mit einem Szenario ohne Regeneration vergleichen. Ein Modell wurde erstellt, welches als Planungsgrundlage für diesen Typ von Asphaltkollektor herangezogen werden kann.

Schliesslich wurde eine Kostenanalyse vorgenommen, die nicht nur die realen Bau- und Planungskosten der Pilotanlage dokumentierte, sondern auch Benchmark-Vergleiche mit etablierten Technologien zur Erdsondenregeneration wie Solarthermie oder PVT ermöglichte. Auf diese Weise konnte die Wirtschaftlichkeit der Lösung bewertet und ihr Multiplikationspotenzial abgeschätzt werden.



3 Anlagenbeschreibung

Das EW Wald wird mit zwei Ochsner-Wärmepumpen von 40 kW und 14 kW beheizt. Als Wärmequelle dienen sechs Erdwärmesonden mit einer Länge von je 240 m. Aufgrund der hohen erreichbaren Regenerationsraten hat die Technologie das Potenzial, deutlich kleiner dimensionierte Erdwärmesonden zu ermöglichen und damit je nach Sondenfeldgrösse bzw. nachbarschaftlicher Entzugsdichte sogar Kosten einzusparen. Aufgrund der Unsicherheiten wurde in diesem Projekt jedoch auf eine Verkleinerung der Sonden verzichtet und die Sonden so dimensioniert, dass sie auch ohne Regeneration durch den Asphaltkollektor nicht übermässig auskühlen sollten.



Abbildung 1: Links: Zwei Ochsner Wärmepumpen sorgen für genügend Heiz- und Kühlleistung. Rechts: Wärme- und Kältepufferspeicher mit je 1000 l Fassungsvermögen

Die insgesamt 17 Asphaltkollektoren sind auf einer Fläche von insgesamt 260 m² installiert. Abbildung 2 zeigt die Einbauorte rund um das Gebäude. Acht Kollektoren wurden im Norden des Areals verbaut, sechs im Nordosten und drei im Südosten. Ein Kollektor hat eine Rohrlänge von 70 m und einen Rohrabstand von 20 cm. Die Rohre von HakaGerodur haben einen Durchmesser von 25 mm und eine Wandstärke von 2.3 mm. Ein Datenblatt kann dem Anhang, Kapitel 9.3, entnommen werden. Damit die Rohre im Winter nicht gefrieren können, wurde das durchströmende Wasser mit 25% -Ethylen glykol gemischt.

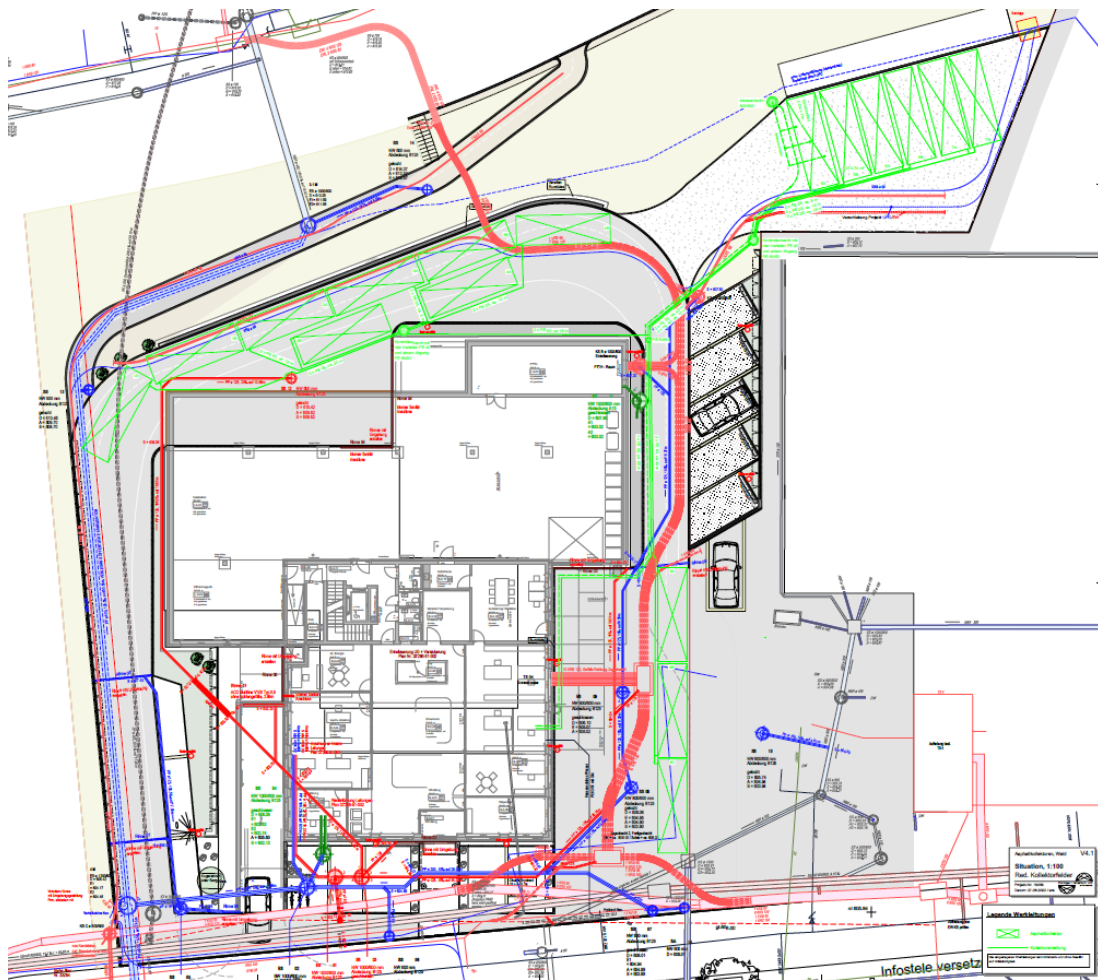


Abbildung 2: Situationsplan der Asphaltkollektoren. Insgesamt 17 Asphaltkollektoren (grün markierte Felder) wurden im Norden, Nordosten und Südosten installiert. [7]

Wie in Abbildung 3 zu sehen, sind die Kollektoren im Rücklauf der Erdwärmesonden angeschlossen und werden durch das Ventil 1 hinzugeschaltet, sobald die Bedingungen zum Regenerieren erfüllt sind. Diese wurden vom Planer wie folgt definiert: Ist die Asphalttemperatur grösser als 2°C , schaltet sich die Pumpe im Kollektorkreis ein und läuft für zehn Minuten. Danach wird geschaut, ob die Kollektorausstrittstemperatur grösser als die Rücklauftemperatur der Wärmepumpe (=Vorlauftemperatur Erdsonde) plus 1 K ist. Ist dies nicht der Fall, schaltet die Pumpe aus. Der Grund für die 10-Min-Regelung liegt darin, dass die Kollektorfelder, wie in Abbildung 2 dargestellt, unterschiedlich positioniert und daher unterschiedlich verschattet sind. Daher gibt es kein eindeutigen Referenzpunkt zum Einschalten des Kollektors. Da in den Jahren 23 und 24 die Regelung noch nicht in Betrieb war wurde dieser manuell über die Monaten April bis November aktiviert, und über die Wintermonate deaktiviert. Im Vergleich zu den in der Literaturübersicht erwähnten Kollektoren, wird dieser im Winter nicht zur Enteisung der Asphaltflächen verwendet.

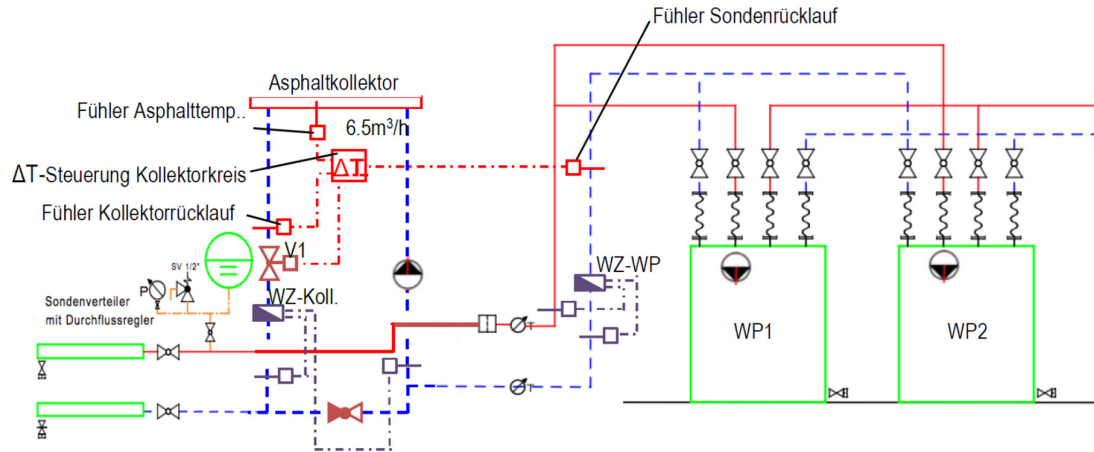


Abbildung 3: Einbindung der Kollektoren in den Kreislauf der Wärmepumpen mit Erdsonden. Die Zuschaltung der Asphaltkollektoren erfolgt über das Ventil V1.[7]

3.1 Kollektoreinbau

Entgegen der ursprünglichen Planung wurden die Kollektoren nicht in eine lose Kiesschicht, sondern in Abbildung 4 zu sehen, in Zementmörtel eingegossen. Dies hat mehrere Vorteile: Zum einen wird die Festigkeit erhöht und die Rohre sind besser geschützt, wenn schwere Maschinen darüber fahren. Zum anderen hat die Zementmörtelschicht eine höhere Wärmeleitfähigkeit, was zu einem besseren Ertrag führt. Eine weitere Änderung bestand darin, dass die Rohre nicht mehr auf handelsüblichen Betonrosten, sondern in geschweissten Rahmen verlegt werden, wie in Abbildung 7 dargestellt. Diese sind notwendig, um ein Auslaufen des Zementmörtels zu verhindern.

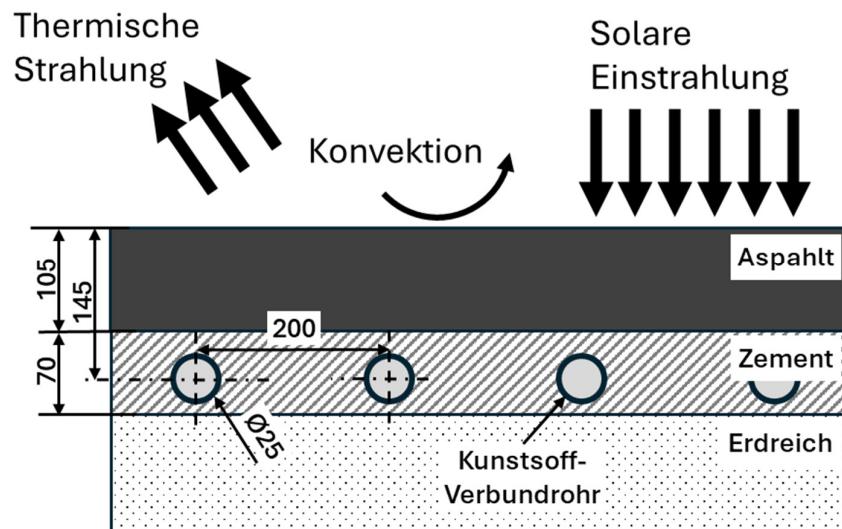


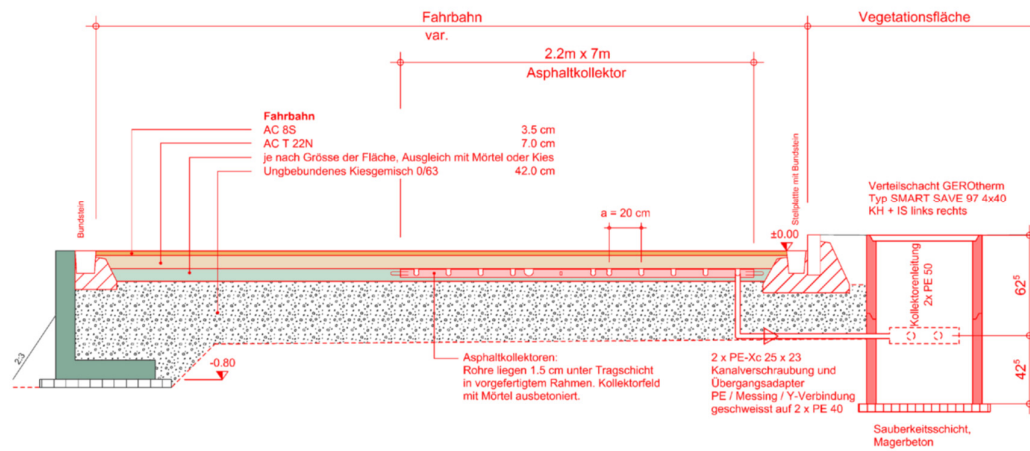
Abbildung 4: Prinzipschema und Schichtdicken Asphaltkollektor

Die Verlegung der Rohre erfolgte vor Ort. Die kalten Temperaturen erschwerten die Verlegung, da sich das Rohr schlechter biegen lässt. Im Winter empfiehlt sich daher der Einbau in einer Montagehalle. Beide Änderungen, die Verlegung in einer Zementmörtelschicht und die Verlegung in vorgeschweissten Rahmen, haben die Kollektorkosten deutlich erhöht, wie aus dem Bericht von Ruedi Kriesi hervorgeht. Statt der geplanten 160 CHF/m² betrugen die Kosten 415 CHF/m². Dies ist aber zum Teil auch auf die anderen verbauten Materialien zurückzuführen, bei denen auf hohe Qualität geachtet wurde und daher entsprechend teurer waren.

Abbildung 6 zeigt einen Querschnitt eines eingebauten Kollektors. Auf dem Untergrund (Kiesgemisch) ist etwa eine



Abbildung 5: Asphaltkollektor-Einbau. Das Rohr wurde in einen Stahlrahmen eingelegt und in Zementmörtel eingegossen, im Anschluss erfolgte die Verbindung zu den restlichen Kollektoren



19/83



4 Monitoring

Die Funktionsweise des Heizsystems mit einer Bilanzierung der Energieflüsse wurde von der Ruedi Kriesi AG anhand der verbauten Wärmemengenzähler erfasst und mit zusätzlichem temporärem Monitoring-Equipment ergänzt und ausgewertet. Diese Ergebnisse sind in einem separaten Bericht zuhanden des AWEL dokumentiert [7]. Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten befassen sich mit der detaillierten Vermessung und Analyse des Kollektors und ergänzen den oben erwähnten Bericht über das Gesamtsystem.

Die Fertigstellung des Monitoringsystems zur detaillierten Kollektorvermessung erfolgte Ende April 2024, nachdem am Standort EW-Wald alles bereit war. Zuvor wurde bei der Verlegung einer Rohrleitung ein Rohr des Asphaltkollektors beschädigt, was jedoch schnell repariert werden konnte und zudem die Möglichkeit bot, den Aufbau der Beton- und Asphaltschicht zu vermessen.

Zu dem Monitoringsystem gehören 6 PT 1000, welche wie in Abbildung 7 zu sehen in dem Erdreich installiert sind. Dies wurden bereits im Jahr 2023 installiert.

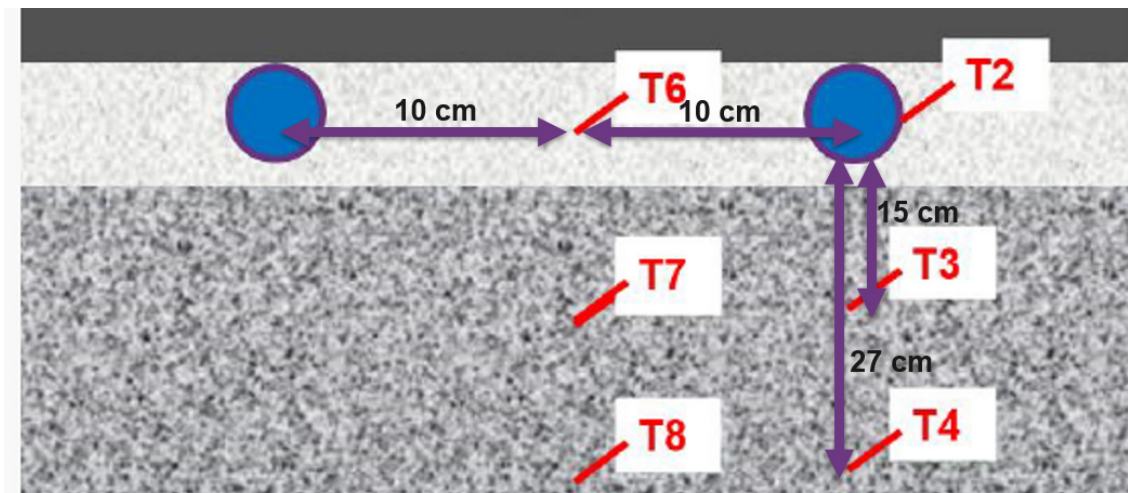


Abbildung 7: Verlegeposition und Abstand der Temperatursensoren in den drei Schichten (von oben nach unten) Asphalt, Zementmörtel und Erdreich/ungebundenen Kiesgemisch

Des Weiteren wurden folgende Geräte von Decentlab Ende 2023 provisorisch installiert und im April 2024 an ihren endgültigen Bestimmungsort gebracht.

Tabelle 1: Verwendete LoRaWan-Geräte zur Messdatenerfassung und Übertragung

Gerät	Anzahl	Gemessene Parameter/Funktion
DL-ATM41 Eleven Parameter Weather Station	1	Einstrahlung, Umgebungstemperatur, Niederschlag, rel. Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit
DL-WRM-002 Winter Road Maintenance Sensor	1	Umgebungstemperatur, Oberflächentemperatur
DL-DLR2-009 Analog PT1000 Sensor	6	Auslesen und Übertragen der Daten der PT-1000 Sensoren via LoRaWan



Abbildung 8: Links Wetterstation, Rechts: Loch im Asphalt zur Installation des Rohrlagers, wobei der Kollektor beschädigt wurde

Kurz nach der Installation des Monitoringsystems 2023 brach die Datenverbindung ab. Als Grund wurde die Abschaltung eines Gateways identifiziert, über welches die Geräte die Messdaten über *The Things Network (TTN)* in eine Cloud sendeten. TTN ist ein Betreiber eines kostenlosen und öffentlichen LoRaWan-Netzes, das darauf basiert, dass Nutzer selbst Gateways installieren, über die die Daten versendet werden können, oder Gateways von anderen Nutzern genutzt werden. Da auf dem Gelände des EW-Wald kein öffentlicher Internetzugang zur Verfügung steht, wurde die Swisscom als Provider gewählt, welche eine fast flächendeckende Abdeckung in der Schweiz anbietet, jedoch kostenpflichtig ist. Die Daten werden in der Cloud des Anbieters *Avelon* dekodiert und gespeichert.

Die Geräte verschicken etwa alle 15 min einen Messwert. Des Weiteren wurde vom EW-Wald der Energiezähler am Asphaltkollektor ausgelesen und die Daten an das SPF geschickt. Dieser kann für einen Monat minütlich Werte Speichern, und für ein Jahr etwa 2 Stündliche Werte.

Tabelle 2:Verfügbarkeit aufgezeichnete Messdaten ab März 2024

Gerät	Auflösung	Verfügbare Daten
Wetterstation, Oberflächentemperatur und Temperatur im Erdreich	15 min	Mrz. 2024 bis Aug. 2025
Energiezähler Asphaltkollektor	2 h	Mrz. 2024 bis heute
Energiezähler Asphaltkollektor	1 min	16.06. bis 16.08, 27.09. bis 27.10., 08.11. bis 08.12



Mit den Sensoren sollen die kollektorspezifischen KPIs, wie spezifische Leistung, spezifische Kosten und Regenerationsgrad genauer untersucht werden. Gleichzeitig sind sie Voraussetzung zur Simulation der Wärmepumpeneffizienz (COP/JAZ) und zur Optimierung des Kollektormodells.

5 Analyse

5.1 Verschattung

Da die 17 Module an verschiedenen Standorten rund um das EW-Wald installiert wurden, ist es für die spätere Simulation wichtig zu verstehen, wie diese verschattet werden. Zu diesem Zweck wurden die Topografie und die Gebäude mit der Software PVsyst nachgebildet und die Verschattung für ein Jahr mit den Wetterdaten von Meteonorm aus dem Jahr 2023 ermittelt.

Insgesamt wurden die Asphaltkollektoren zu 3 Clustern zusammengefasst. Cluster 1 umfasst die drei Module im Süden, Cluster 2 die acht Module im Westen und Cluster 3 die sechs Module im Osten.

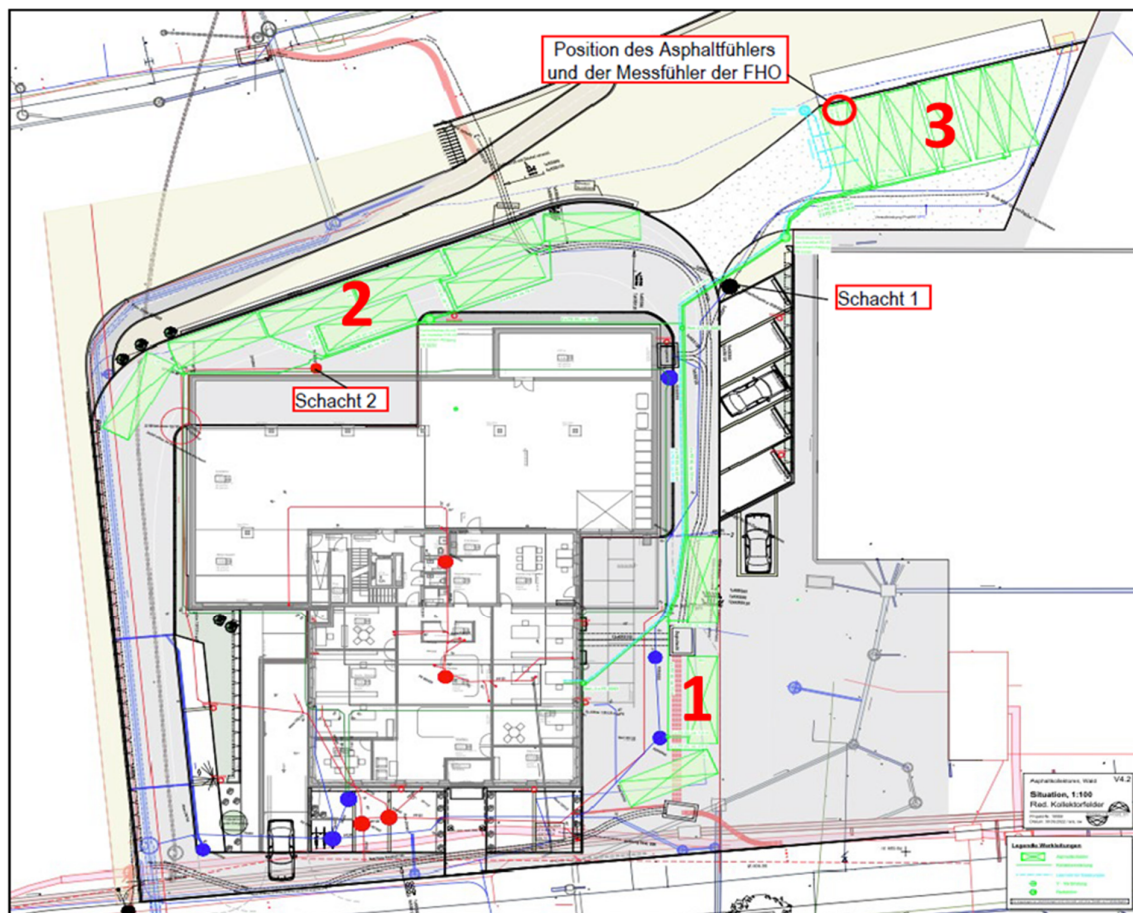


Abbildung 9: Aufteilung der Asphaltkollektoren in 3 Cluster, für welche die Verschattung bestimmt wurde



Abbildung 10: Verschattung der Module am 21. Juni für das Jahr 2023 in PVsyst. Die rot gestrichelte Linie zeigt den Einfallswinkel der Sonnenstrahlen, die blau gestrichelte Linie den Zenit. Abbildung 10 zeigt die Einstrahlung am 21. Juni, Abbildung 11 die Einstrahlung vom 21. Dezember für ein Referenzjahr. Im Sommer sind die Module im Westen und Osten noch durch Gebäude verschattet, während die Module im Süden bereits voll besonnt sind. Um die Mittagszeit sind alle Module besonnt, am Abend sind die Module im Westen und Osten voll besonnt, im Süden grösstenteils verschattet. Im Winter fällt kaum Licht auf die Asphaltkollektoren im EW-Wald. Selbst mittags werden die Kollektoren im Süden durch das gegenüberliegende Gebäude verschattet.

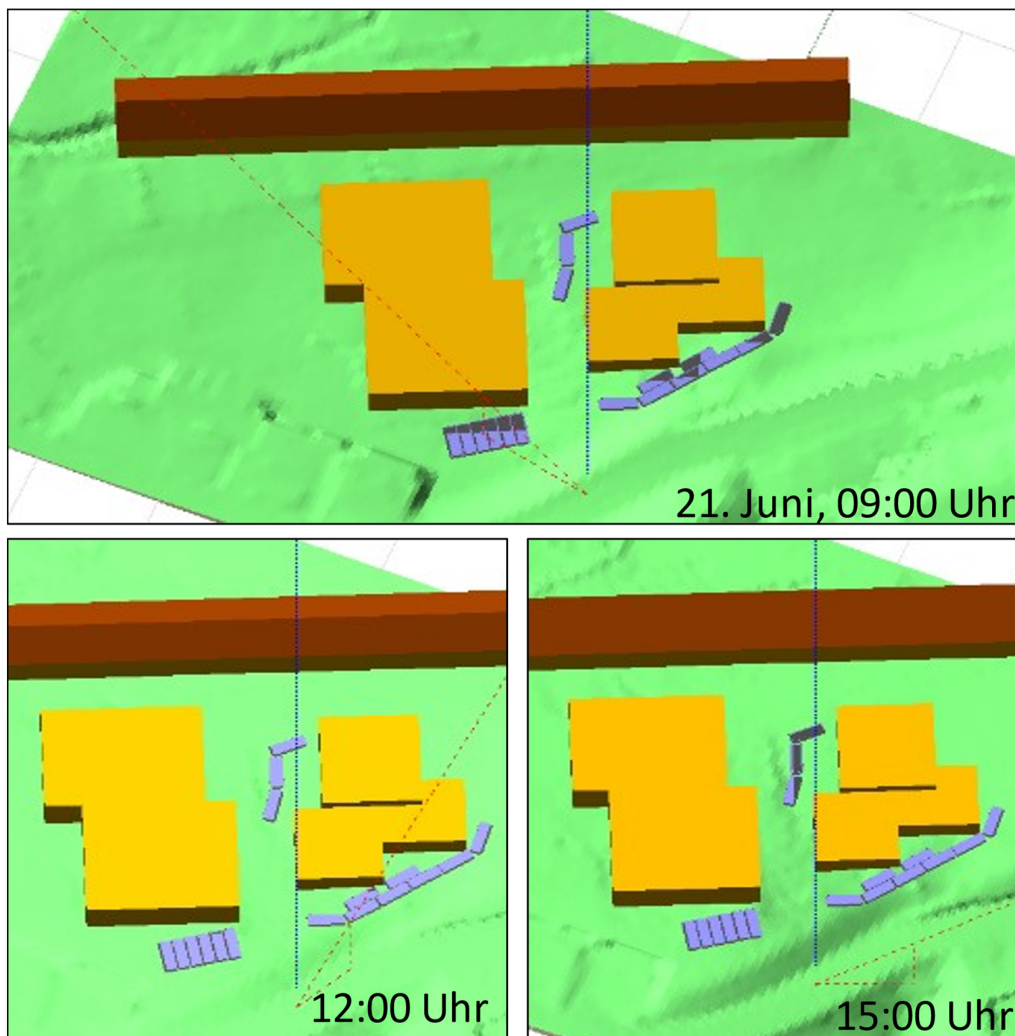


Abbildung 10: Verschattung der Module am 21. Juni für das Jahr 2023 in PVsyst. Die rot gestrichelte Linie zeigt den Einfallswinkel der Sonnenstrahlen, die blau gestrichelte Linie den Zenit

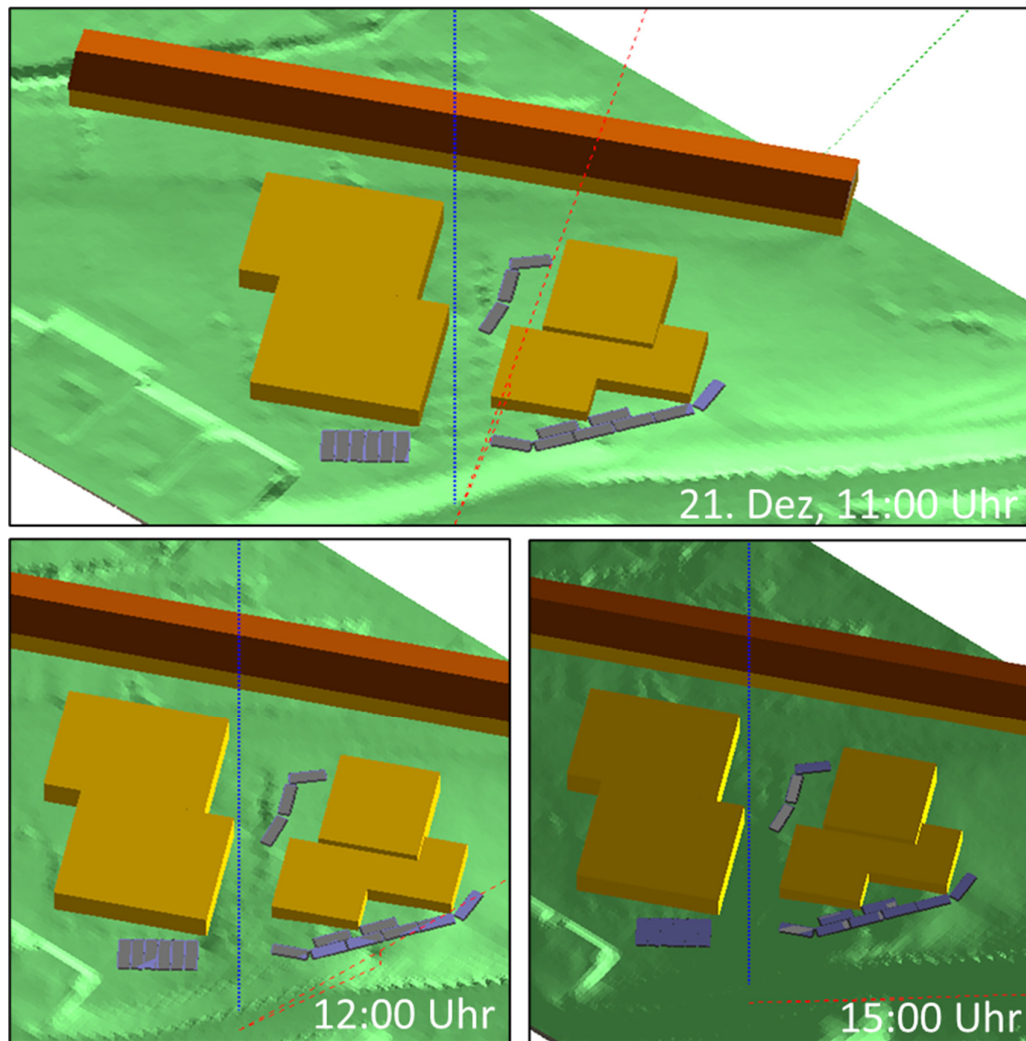


Abbildung 11: Verschattung der Module am 21. Dez für für das Jahr 2023 in PVsyst. Die rot gestrichelte Linie zeigt den Einfallswinkel der Sonnenstrahlen, die blau gestrichelte Linie den Zenit

Die Ergebnisse für ein ganzen Jahr sind in Abbildung 12 und Tabelle 3 in monatlicher Auflösung zusammengefasst. Im Sommer trifft fast 80% der Globalstrahlung auf die Asphaltkollektoren, im Winter ist es nicht ganz die Hälfte der Gesamtstrahlung. Dies liegt zum einen an der hohen Verschattung, zum anderen auch an dem flachen Einstrahlwinkel der Sonne im Winter, wodurch noch weniger auf die Horizontal installierten Kollektoren fällt. In anderen Worten, im Juni ist die eintreffende Strahlung mehr als 10-mal so hoch wie im Winter.

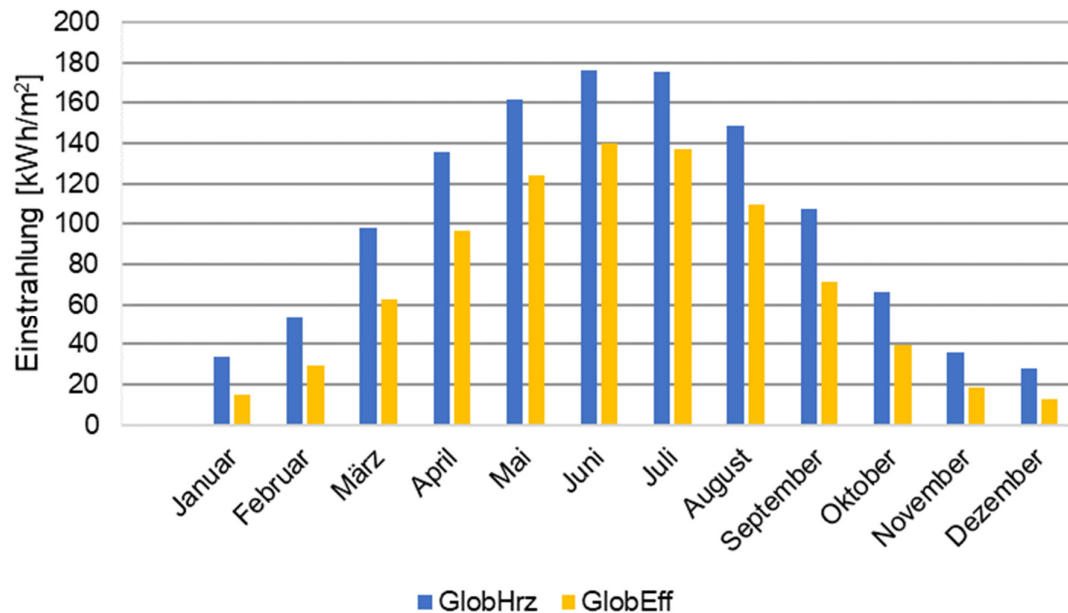


Abbildung 12: Vergleich zwischen der Globalstrahlung (GlobHrz = Global korrigiert um Horizont-/Fernverschattung) in blau und der Globalstrahlung auf die Kollektoroberfläche am EW Wald in gelb (GlobEff = Effektive Globalstrahlung (korrigiert um Einfallswinkel (IAM) und Verschattungen)

Tabelle 3: Zusammenfassung der Verschattungsanalyse: GlobInc = Globalstrahlung auf die Kollektorfläche, GlobHrz = Global korrigiert um Horizont-/Fernverschattung, GlobalShd = Global korrigiert für Verschattung, GlobEff = Effektive Globalstrahlung (IAM und Verschattungen). In der Letzten Spalte ist das Verhältnis aus Tatsächliche Globalstrahlung auf die Kollektorflächen / korrigierte Globalstrahlung.

EFFEKTIVER ENERGIEEINFALL

	GlobInc kWh/m²	GlobHrz kWh/m²	GlobShd kWh/m²	GlobEff kWh/m²	GlobEff / GlobHrz kWh/m²
Januar	33.9	33.6	16.2	15.2	45%
Februar	54	53.5	31.1	29.6	55%
März	99.7	98.3	64.9	62.8	64%
April	137.4	135.5	98.6	96.4	71%
Mai	164.1	161.7	126.1	123.8	77%
Juni	178.8	176.3	142.4	139.8	79%
Juli	177.8	175.3	139.7	137.2	78%
August	150.9	148.4	111.8	109.3	74%
September	108.7	107.2	73.6	71.6	67%
Oktober	67.4	66.6	40.9	39.3	59%
November	36.4	35.9	20	18.9	53%
Dezember	28.4	27.9	13.3	12.5	45%
Jahr	1237.4	1220.1	878.6	856.4	70%



5.2 Messdaten Analyse

5.2.1 Temperaturen

Ein Blick auf die Messdaten gibt Aufschluss über das Verhalten des Kollektors. Abbildung 13 zeigt, dass wie zu erwarten die Oberflächentemperatur sehr stark mit der Einstrahlung korreliert, was auf den hohen Absorptionsgrad des Asphalts zurückzuführen ist. Das Maximum der Umgebungstemperatur und der Temperatur am Kollektorrohr tritt an einem sonnigen Tag etwa zwei Stunden später auf. Die Erdschichten 15 cm und 27 cm unter dem Kollektorrohr erwärmen sich kaum und sind nachts wärmer als der darüber liegende Bereich.

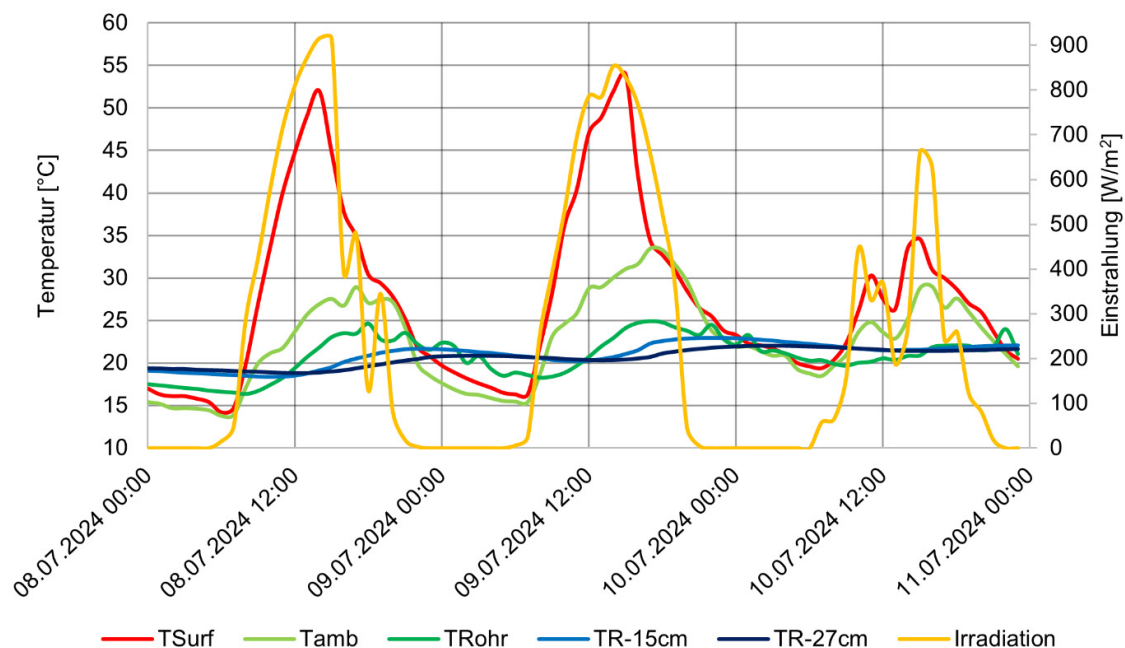


Abbildung 13: Oberflächentemperatur (TSurf), Umgebungstemperatur (Tamb), Temperatur am Kollektorrohr (TRohr), Temperatur 15 und 27 cm unterhalb des Rohrs und Einstrahlung.

Abbildung 14 zeigt über einen Verlauf von drei Tagen alle Temperaturen, welche von den PT1000 Fühlern (vgl. Abbildung 7) aufgezeichnet wurden. Die Temperatur am Kollektorrohr ist an sonnigen Tagen um bis zu 3 K niedriger als die Temperatur zwischen zwei Kollektorrohren, da das Kollektorfluid mit durchschnittlich 15 °C kühlend auf das Erdreich wirkt. Dieser Effekt ist auch 15 cm und 27 cm unter dem Kollektorrohr messbar, wie der Vergleich der Fühler direkt unter dem Rohr mit den Fühlern auf gleicher Höhe zwischen den Rohren zeigt, auch wenn der Unterschied hier nur so gering ist.

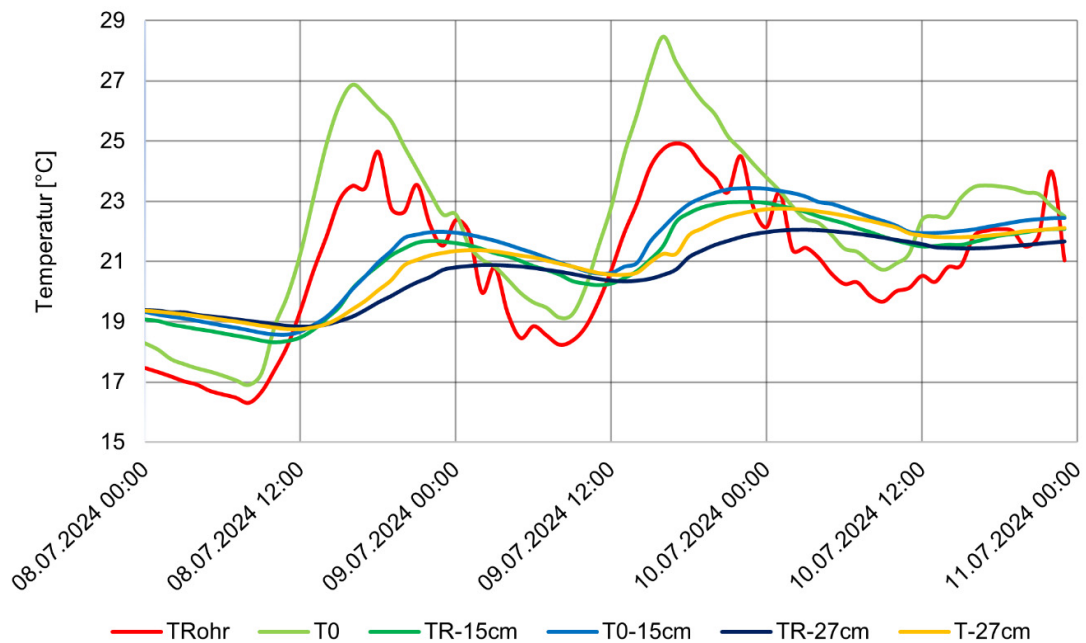


Abbildung 14: Temperaturen am Kollektorrohr, sowie 15 cm und 27 cm darunter sowie Temperatur zwischen zwei Kollektorrohren sowie 15 cm und 27 cm darunter.

In Abbildung 15 sind die Vor- und Rücklauftemperaturen des Asphaltkollektors für den Zeitraum von einer Woche dargestellt. Die Temperaturdifferenz zwischen beiden beträgt in den Sommermonaten durchschnittlich 2,5 K. Auffallend sind die Spitzen, die die Rücklauftemperatur um bis zu 5 K erhöhen, diese sind auch in der Vorlauftemperatur zu sehen, jedoch deutlich schwächer ausgeprägt. Die Peaks nach oben werden durch die Kühlung des Gebäudes verursacht, wodurch die Temperatur am Verdichter der Wärmepumpe ansteigt. Der umgekehrte Effekt ist zu beobachten, wenn die Wärmepumpe Warmwasser liefert. Die Spitzen nach unten sind jedoch deutlich kleiner als die Spitzen nach oben. Zu manchen Zeiten ist der Rücklauf wärmer als der Vorlauf, was bedeutet, dass in diesen Zeiten Wärme über den Kollektor abgegeben wird, anstatt Wärme zu gewinnen. Dies sollte durch die entwickelte Regelung verhindert werden, aber da diese noch nicht implementiert ist, läuft der Kollektor zu den Zeiten, in denen er Energie abgibt.

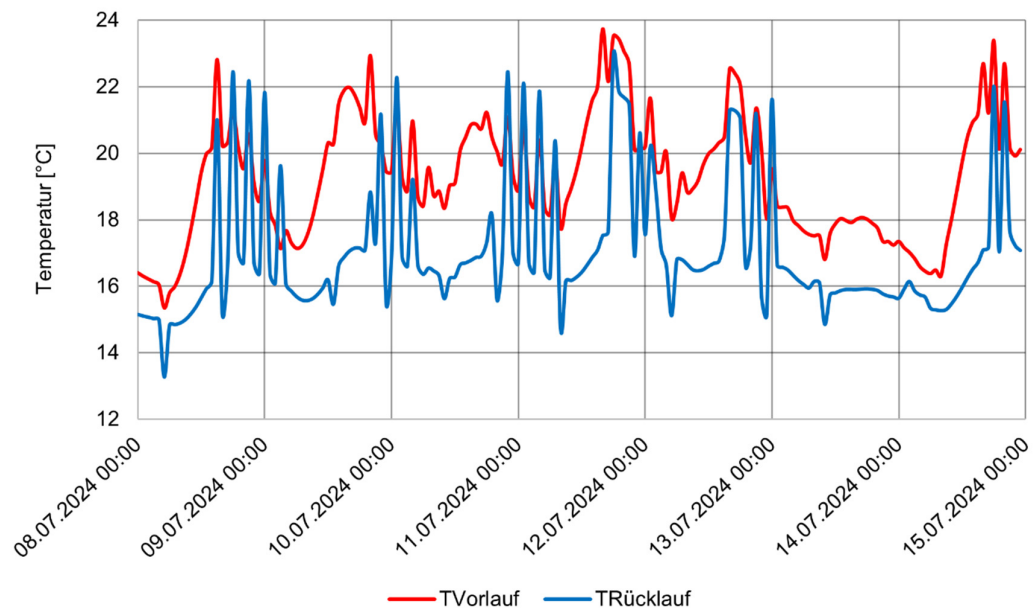


Abbildung 15: Vor- und Rücklauftemperaturen des Asphaltkollektors. Die Peaks nach oben entstehen durch Kühlung, die Peaks nach unten durch Brauchwarmwasserproduktion

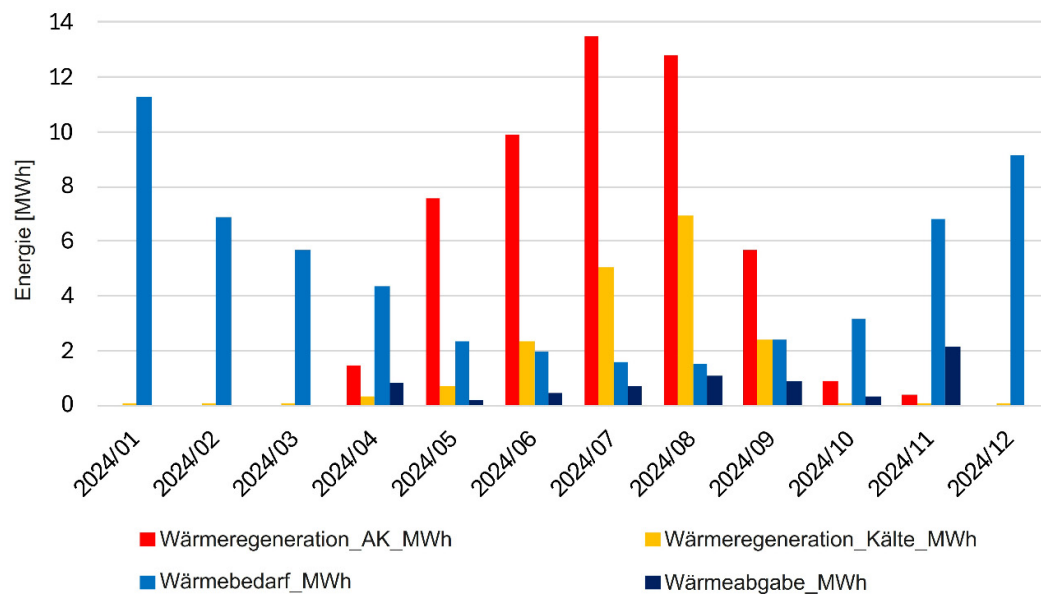


Abbildung 16: Wärmeregeneration der Erdsonden durch den Asphaltkollektor und das aktive Kühlen sowie Wärmeentnahme wegen Heizen, Warmwasserproduktion und fehlender automatischer Regelung. Da der Kollektor noch manuell ein- und ausgeschaltet wird, läuft dieser auch vereinzelt, wenn Energie über den Kollektor abgegeben wird.



Abbildung 16 zeigt für das Jahr 2024 die Energiebilanzen der Erdsonden. Regeneriert werden diese durch des Asphaltkollektor und das aktive Kühlen. Wärme entzogen wird für die Warmwasserproduktion und das Heizen im Winter. Da, wie oben erwähnt, der Kollektor auch dann in Betrieb ist, wenn der Rücklauf wärmer als das umgebende Erdreich ist, also Wärme abgegeben wird, ist in Abbildung 16 zusätzlich die abgegebene Wärme dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese in den Sommermonaten nur einen geringen Anteil ausmacht, durch die Inbetriebnahme der Regelung im Jahr 2025 sollte diese gegen 0 gehen.

Insgesamt wurden im Jahr 2024 den Sonden 58.4 MWh zum Heizen/Warmwasser entzogen, sowie 6.7 MWh durch die fehlende automatische Regelung des Asphaltkollektors. Regeneriert wurden 52.3 MWh durch den Asphaltkollektor, sowie 18.1 MWh durch aktives Kühlen.

Insgesamt wurden also 65.1 MWh Wärme entzogen und 70.4 MWh regeneriert, was einer Regenerationsquote von 108 % entspricht.

Tabelle 4 fasst die wichtigsten Parameter des Asphaltkollektors zusammen. Die Daten stammen von der Wetterstation und dem Belimo-Energiezähler. Der spezifische Wärmegewinn durch den Asphaltkollektor betrug etwa 200 kWh/m²a. Im Jahr 2023 lag der Wert bei rund 220 kWh/m²a was unter anderem auf die fehlende 3.5 cm starke Deckschicht zurückzuführen ist, welche erst Ende August 23 aufgetragen wurde [7].

Tabelle 4: Übersicht Parameter des Asphaltkollektors während der Betriebsmonate April bis Oktober im Jahr 2024.

	<i>Einstrahlung gemessen [kW/m²]</i>	<i>Einstrahlung korrigiert [kWh/m²]</i>	<i>Spez. Wärmegewinn [kWh/m²]</i>	<i>Mittlere Leistung [kW]</i>	<i>Wärme- gewinn [MWh]</i>	<i>Wärme- abgabe [MWh]</i>
<i>April</i>	43	30	6	3.3	1.5	0.9
<i>Mai</i>	132	101	29	10.5	7.6	0.2
<i>Juni</i>	132	104	38	14.4	9.9	0.4
<i>Juli</i>	164	128	51	19.1	13.5	0.7
<i>August</i>	148	109	49	18.7	12.8	1.1
<i>September</i>	82	55	22	9.3	5.7	0.9
<i>Oktober</i>	47	28	3	1.7	0.9	0.3
Summe	747	556	198	77.0	51.9	4.5



5.3 Thermische Analyse

Ein wichtiger Schritt zur Bewertung des Kollektors ist eine transiente thermische Analyse mit Hilfe von FEM- und CFD-Simulationen, die mit dem Programm *Ansys* durchgeführt werden. Für die Simulationen werden eine CAD-Zeichnung und Messdaten benötigt, um die Ergebnisse zu validieren. Die CAD-Zeichnung kann dem Anhang, Kapitel 9.1.1 entnommen werden. Um die Simulation zu vereinfachen, wurden Symmetrien genutzt und auf ein pseudo 2D-Modell zurückgegriffen. Dieses Modell umfasst lediglich zwei Rohrleitungen, welche ein Abstand von 20 cm haben (Abstand zwischen Rohrmittelpunkten). Die Randbedingungen wurden so gewählt (adiabatisch), dass dieser Kollektorabschnitt ein Stück in einem unendlich grossen Kollektor darstellt, der gleich wie der simulierte Abschnitt betrieben wird. Die Situation entspricht näherungsweise dem vermessene Kollektorabschnitt, Randeffekte können mit diesem Modell nicht korrekt dargestellt werden. Der gewählte Abstand bildet den Ist-Zustand am besten ab, es gibt jedoch auch Rohre, die enger oder weiter auseinanderliegen, wie in Abbildung 5 zu sehen. Die Simulationszeit wurde je nach Szenario auf etwa fünf bis zwölf Tage beschränkt. Grössere 3D-Modelle können mit den uns zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht berechnet werden oder die Berechnung würde mehrere Tage in Anspruch nehmen. Zur Bestimmung der Leistung des Kollektors wird der Wärmestrom, der senkrecht auf die Rohrrinnenfläche einwirkt (siehe Abbildung 17), ermittelt und mit der Gesamtfläche der Rohrrinnenseite des gesamten Kollektors (262 m²) multipliziert. Eine Veranschaulichung der Simulation ist in Abbildung 18 zu sehen. Links sieht man den Kollektor um die Mittagszeit im Juni bei voller Einstrahlung. Die Wärme erreicht die Rohre sowohl von oben als auch von den Seiten. Zudem wird auch die Kiesschicht erwärmt. Auf dem Bild rechts, sieht man den Kollektor bei Nacht, bei welcher nun die Wärme aus der Kiesschicht den Kollektor mit Wärme versorgt. Wind, Niederschlag und Wärme, welche aus dem Erdreich kommt, wurden nicht in die FEM-Analyse einbezogen, da diese die Komplexität der Analyse zu stark erhöht hätten. Mit der thermischen Analyse soll vor allem untersucht werden, wie sich der Kollektor verhält, wenn die Temperatur des Wärmeleitmediums verändert wird, und ob sich der Kollektor durch Veränderung des Rohrabstands optimieren lässt.

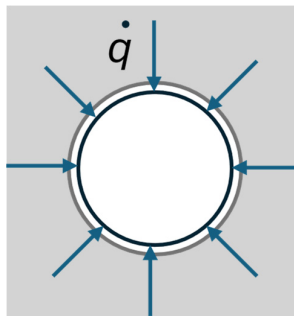


Abbildung 17: Veranschaulichung, wie der Wärmestrom bestimmt wird, welcher in der thermischen Analyse von einem Kollektorrohr aufgenommen wird.

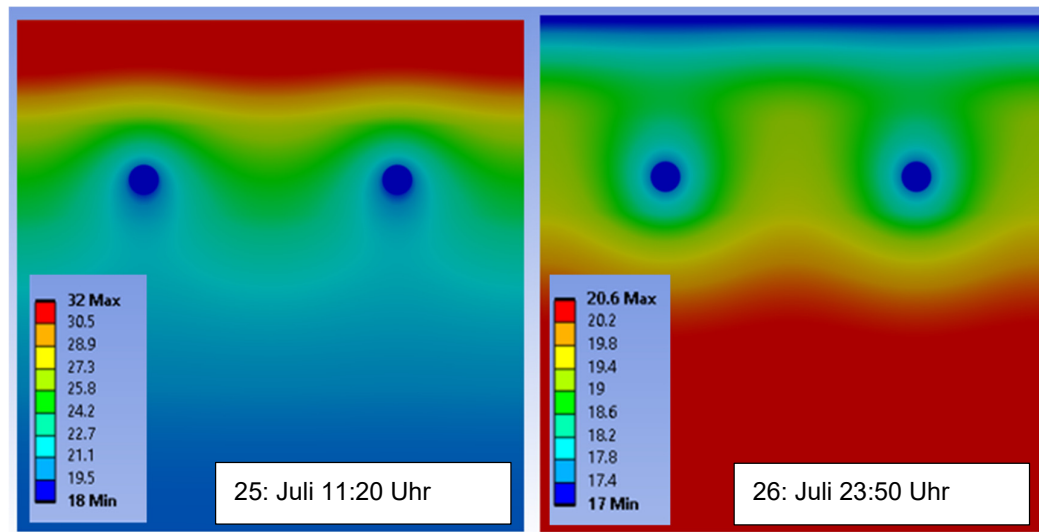


Abbildung 18: Querschnitt des Asphaltkollektors mit Temperaturprofil. Inputparameter sind die Oberflächentemperatur des Asphalts und die mittlere Fluidtemperatur im Kollektor. Links: Mittagszeit bei voller Einstrahlung, Rechts: nachts im Sommer liefert der Kollektor weiterhin Energie.

5.3.1 Fitting der Asphaltkollektorparameter

Um den Asphaltkollektor möglichst genau abzubilden, wurden in einem ersten Schritt die thermischen Parameter Leitfähigkeit der Zementmörtelschicht und der darunterliegenden Kiesschicht gefittet. Dazu wurde ein thermisch-transienter Vorgang implementiert, welcher zuerst nur die Erdschichten mit einer gegebenen Oberflächentemperatur simuliert. Dies ist zur Validierung des Modellaufbaus, wie zum Beispiel der Materialparameter. Vorgegebene Lastfälle beinhalten die Oberflächentemperatur, welche im realen Umfeld mittels Sensors gemessen wurden, wie auch die Fluidtemperatur welche als gemittelt von Ein- und Ausgang aus dem Realsystem definiert wurde. Besonders bei der Kiesschicht hängt der Wärmestrom stark von der Feuchte ab, und kann zwischen 0.7 W/(mK) und 2.3 W/(mK) liegen [8,9]. Die Asphaltparameter wurden gemäss [9] übernommen, da diese klarer definiert sind.

In einem zweiten Schritt ist eine Luftschicht über der Asphaltoberfläche modelliert worden, welche mittels Strahlung (Wärmeübertrag auf die Fläche), Umgebungstemperatur und Konvektion, die realen Verhältnisse besser abbildet. Somit sind Faktoren wie die Rückstrahlung oder Konvektion an der Grenzschicht realistischer abgebildet.

Eine Kopplung mit einem CFD-Modul, welche die Wasserströmung abbildet, wurde nicht durchgeführt, da die Energiebilanz aus Messwerten eingegeben wurde, und eine Modellierung zu einer zusätzlichen Komplexität mit entsprechenden Unsicherheiten führen würde.

Zusammengefasst wurden Eingangsparameter wie Einstrahlung, je nach Szenario die Asphaltoberflächentemperatur, die Umgebungstemperatur und die mittlere Fluidtemperatur im Asphaltkollektor verwendet. Letztere wird aus der Vor- und Rücklauftemperatur ermittelt, die vom Energiezähler im Technikraum gemessen wird. Das Ziel des Fits besteht darin, sowohl die Oberflächentemperatur als auch die im Erdreich gemessenen Temperaturen bestmöglich zu reproduzieren. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst.



Tabelle 5: Parameter für die Simulation in Ansys.

Parameter	Luft	Asphalt	Zement- mörtel	Rohr (PE- Xc)	Ungebundenes Kiesgemisch
Höhe [mm]	2000	140	70	24	420
Dichte [kg/m ³]	1.2	2350	2000	0.94	1700
Therm. Leitfähigkeit [W/(mK)]	0.03	0.7	1.4	0.41	0.9
Spezifische Wärme- kapazität [kJ/(kgK)]	1.0	1.0	1.3	2.1	0.8

In Abbildung 19 kann das Ergebnis der Simulation der Asphalt-Oberflächentemperatur gesehen werden. Dazu wurde dem Modell eine ein Meter hohe Luftschicht hinzugefügt, der die gemessene Umgebungstemperatur zugeordnet wurde. Anhand der gemessenen Einstrahlung und den verwendeten Stoffeigenschaften aus Tabelle 5 kann so die Oberflächentemperatur der Asphaltschicht simuliert werden.

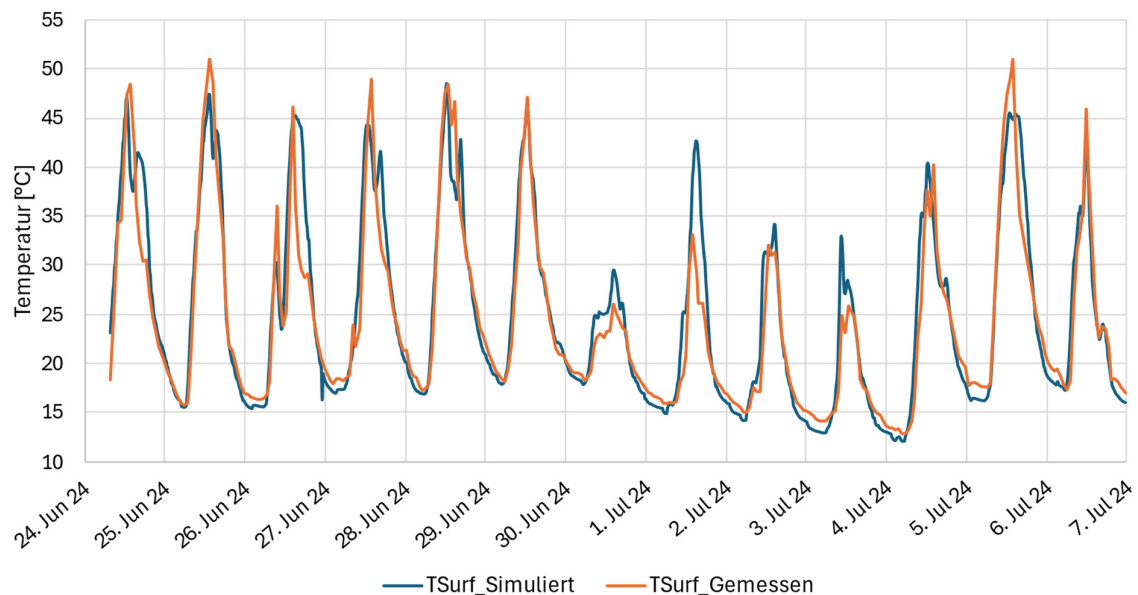


Abbildung 19: Vergleich der gemessenen und simulierten Oberflächentemperatur der Asphaltschicht.

Wie in Abbildung 19 zu sehen, konnte die gemessene Oberflächentemperatur gut nachgebildet werden. Die Temperaturen am 30. Juni, 01. Juli und 4. Juli werden jedoch in der Simulation bis zu 10 °C überschätzt. Dies ist auf Niederschlag an den Tagen zurückzuführen, welcher in der thermischen Analyse nicht berücksichtigt werden konnte. Eine weitere Auffälligkeit, ist das langsamere Abkühlverhalten der simulierten Oberflächentemperatur am 26. Juni. Da die gemessene Einstrahlung



wie in Abbildung 20 zu sehen für diesen Zeitraum keine Auffälligkeit zeigt, wurde hier der Kollektor möglicherweise an der Stelle der Oberflächentemperaturmessung verschattet.

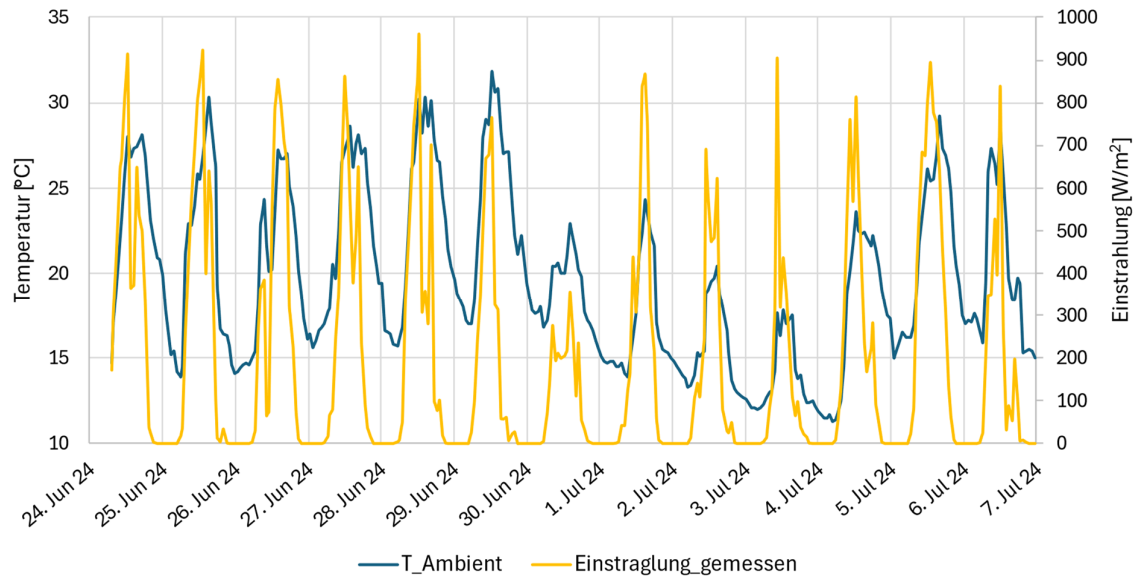


Abbildung 20: Gemessene Umgebungstemperatur und Einstrahlung in dem Simulations-Zeitraum

Als nächstes wurden die simulierten Temperaturen zwischen zwei Kollektorröhren (T6) und die Temperatur 15 cm unterhalb eines Kollektorröhrs (T3) mit dem gemessenen Daten verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 zu sehen.

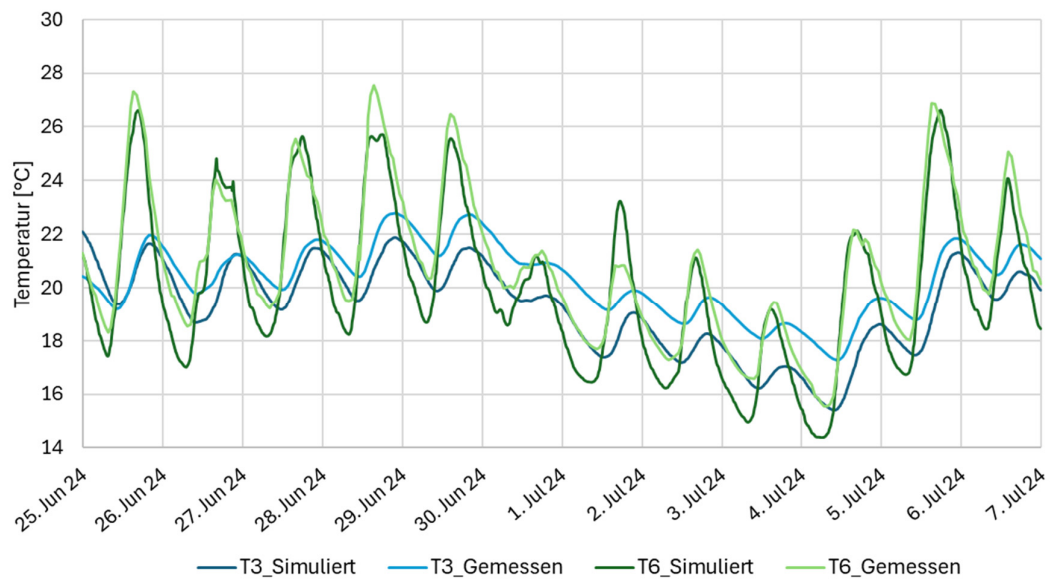


Abbildung 21: Vergleich der simulierten Temperaturen mit den gemessenen Temperaturen. T3 befindet sich 15 cm unter einem Kollektorröhr, T6 befindet sich zwischen zwei Kollektorröhren.



Die simulierte Temperatur zwischen zwei Kollektorröhren, etwa 15 cm unterhalb der Asphaltoberfläche, entspricht den gemessenen Temperaturen der Temperaturspitzen sehr genau. Die minimalen Temperaturen werden jedoch um 1 °C bis 2 °C unterschätzt. Auch bei einer Temperatur 15 cm unterhalb des Kollektorrohrs stimmen die Temperaturmaxima besser als die Minimumtemperaturen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die simulierte Temperatur vor allem bei niedrigeren Temperaturen (bedingt durch niedrige Aussentemperatur und oder Einstrahlung, vgl. Abbildung 20) bis zu 2 °C unter der gemessenen liegt. Als Hauptgrund wird die Art der Simulation für das ungebundene Kiesgemisch vermutet. Dieses wird nur durch die oberen Schichten erwärmt und ist nach allen anderen Seiten hin isoliert. Dadurch wird verhindert, dass nachts, wenn der Kollektor Wärme aus dem Kiesgemisch bezieht, Wärme aus den umgebenden Schichten nachfliessen kann. Auch Unterschiede für die Materialparameter wie Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit können zu solchen Abweichungen führen.

Anschliessend wurde der Kollektorertrag über einen Zeitraum von zwölf Tagen ermittelt und mit den Messdaten verglichen. Wie in Abbildung 22 zu sehen, fällt das Ergebnis der Simulation zu hoch aus. Trotz der relativ guten Übereinstimmungen der modellierten Temperaturen, zeigt sich aber bei der FEM-Simulation eine generelle Überschätzung des Ertrages von ca. 35%, welche in einzelnen Situationen noch deutlich höher ausfallen kann. Um diese Überschätzung besser einordnen zu können, muss der Wärmeübergang im Rohr genauer betrachtet werden. Die thermische Leitfähigkeit λ beträgt 0.41 W/(m·K), die Wandstärke d beträgt 2.3 mm, die gesamte Rohrinnenfläche A für 70 Kollektoren à 70 m entspricht 152.5 m². Somit kann der Gesamtwärmeübertragungskoeffizient (U) zwischen der Zementmörtelschicht und Rohrleitung gemäss folgender Formel berechnet werden:

$$U = \frac{\lambda}{d} \cdot A$$

Setzt man die Werte ein, ergibt sich $U = 27,2$ kW/K. Weicht die Temperatur im Zementmörtel in der Simulation also um 1 K nach oben ab, wird die Leistung um 27,2 kW überschätzt. Vergleicht man beispielsweise den breiten Peak am 28. Juni aus Abbildung 23, so liegt dieser in der Simulation bei 54,5 kW und in den Messdaten bei 32 kW. Der Simulationswert ist also um 70 % zu hoch, was lediglich auf ein zu hohes Delta T von 0.8 K zurückzuführen ist. Eine zu Temperaturdifferenz zwischen Zementmörtel und Wärmeträgerfluid lässt sich bspw. durch die Vernachlässigung des Wärmeübergangswiderstandes des Wärmeträgerfluides auf die Rohrwand, die partielle Verschattung des Kollektors, (Vgl. Kapitel 5.1 «Verschattungsanalyse») oder den nicht berücksichtigten Effekt von Regen auf die Temperaturen erklären. Die Kollektorerträge wurden für diesen Vergleich aus dem ganzen Kollektor gemessen, simuliert wurde aber nur ein Abschnitt in der Mitte eines Kollektors. Randeffekte oder auch Verluste in den Zuleitungen können daher ebenfalls ein Grund sein, warum die gemessenen Werte generell tiefer als die für den Idealfall simulierten Werte ausfallen. Auch Effekte wie unterschiedliche Schichtdicken durch Bauleranzen, mögliche Wärmeverluste und unterschiedliche thermische Leitfähigkeiten bedingt durch unterschiedliche Feuchte wirken sich auf die Temperaturberechnung aus.

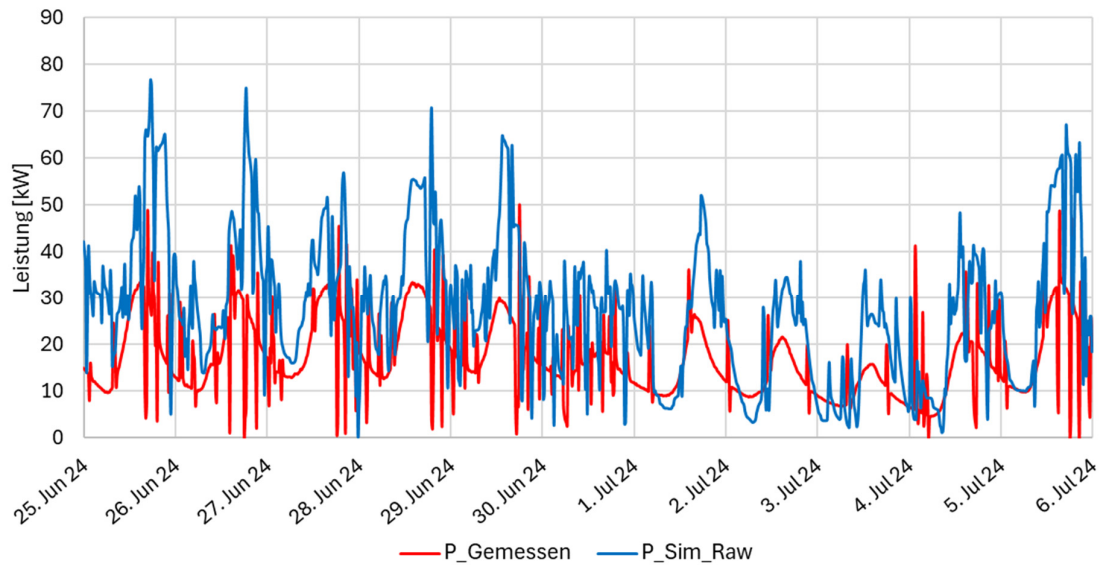


Abbildung 22: Vergleich der simulierten und gemessenen Leistung des gesamten Asphaltkollektors über einen Zeitraum von 12 Tagen.

Da eine Gesamtheit dieser Effekte nicht mit einem verhältnismässigen Aufwand im FEM implementiert und simuliert werden können, musste im Rahmen des Projekts darauf verzichtet werden. Dennoch wurde das idealisierte Modell für Parametervariation hergezogen und die simulierten Resultate wurden für eine bessere Einschätzung um die Differenz zwischen idealer Simulation und Messdaten (35%) nach unten korrigiert. Das Ergebnis dieser Korrektur ist in Abbildung 23 zu sehen. Momentaufnahmen aus der thermischen Simulation sind in Kapitel 9.1.1 zu sehen.

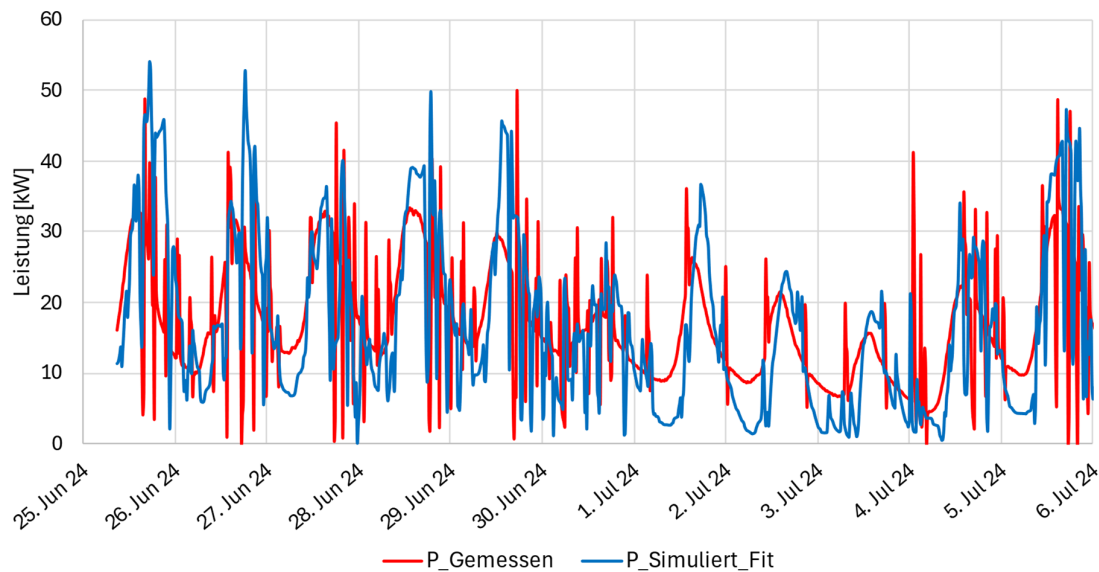


Abbildung 23: Vergleich der simulierten sowie gefitteten Leistung und der gemessenen Leistung des gesamten Asphaltkollektors über einen Zeitraum von 12 Tagen.



Kurzzeit-Peaks in den Messdaten lassen sich durch den Anlagenbetrieb erklären (Vgl. Kapitel 5.2.1):

- Aktives Kühlen führt zu einem raschen Anstieg der Rücklauftemperatur (Peaks nach unten),
- Warmwasserbereitstellung zu einem schnellen Abfall der Rücklauftemperatur (Peaks nach oben).

Weil die Durchlaufzeit des Fluides durch den Kollektor ca. 5 min. beträgt, können bei Lastwechseln während diesem Zeitraum Ausreisser in der gemessenen Leistung vorkommen. In der Simulation sind diese Peaks ebenfalls vorhanden, jedoch weniger ausgeprägt. Das Modell nutzt als Kollektortemperatur den Mittelwert aus gemessenem Vor- und Rücklauf, wodurch sich die plötzlich ändernden Rücklauftemperaturen nicht so stark auf die Leistung auswirken wie bei der Messung. Ein weiterer Grund kann die zeitliche Auflösung der Simulation sein, die vom Programm selbst bestimmt wird. Diese liegt zwischen 100 s und 1000 s (Mittelwert: 315 s).

Analog zum Temperaturvergleich (Abbildung 21), sind auch hier die Werte nachts geringer, da die Kiesschicht nach allen Seiten hin ausser nach oben isoliert ist, und somit keine Wärme von unten oder den Seiten nachfliessen kann. Der Effekt wird umso stärker, je weniger die Kiesschicht durch über den Tag mit Wärme beladen wird.

Trotz verbleibender Differenzen zwischen Mess- und Simulationsdaten wurde – auch aufgrund des engen Zeit- und Ressourcenrahmens – mit dem vorliegenden Modell weitergerechnet. Ausschlaggebend ist, dass die Charakteristik der Temperaturverläufe in Messung und Simulation insgesamt gut übereinstimmt.



5.3.2 Ertragsanalyse bei unterschiedlicher Fluidtemperatur

Mit dem erstellten Referenzmodell wurde in einem weiteren Schritt die mittlere Temperatur im Kollektor variiert, um deren Auswirkungen auf den Kollektorertrag zu untersuchen. Die Temperatur wurde um 2 K und 5 K sowohl erhöht als auch abgesenkt und der Kollektorertrag bestimmt. Die so simulierten Erträge wurden, wie im vorherigen Kapitel, mit 0.65 multipliziert. Die Ergebnisse für die Erhöhung der Temperatur sind in Abbildung 24 zu sehen, die Ergebnisse für die Absenkung der Temperatur in Abbildung 25.

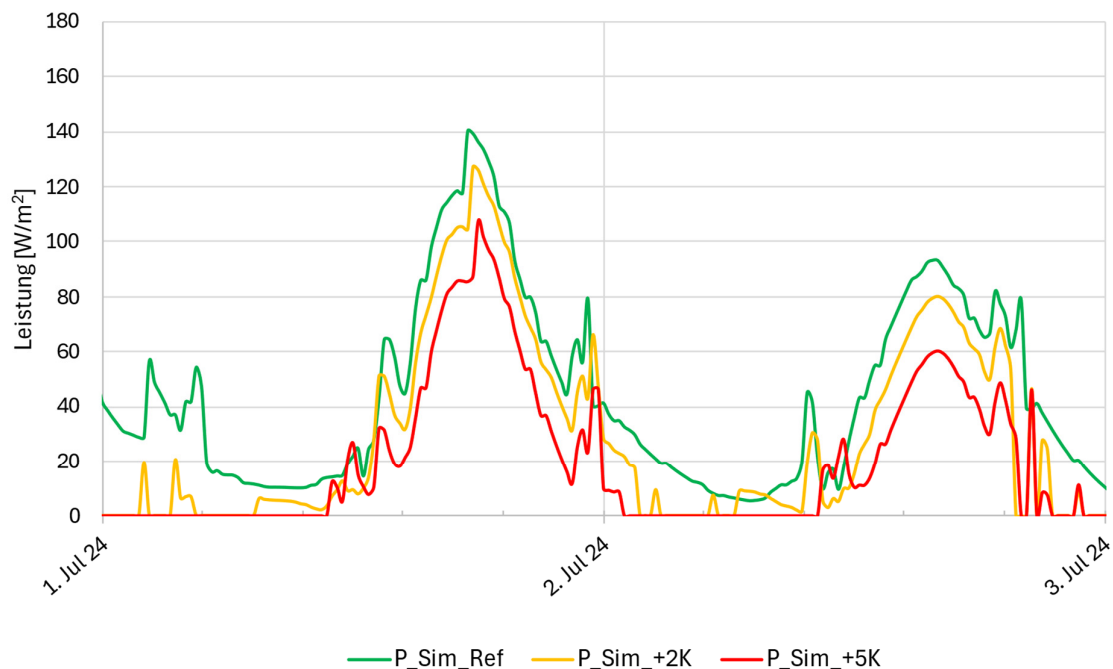


Abbildung 24: Spezifische Leistung des Asphaltkollektors bei Erhöhung der mittleren Fluidtemperatur um 2 K und 5 K und der Vergleich zum Referenzfall mit mittlerer Fluidtemperatur aus den Messdaten.

Bereits bei einer Erhöhung der mittleren Fluidtemperatur um 2 K ist zu erkennen, dass der Kollektor nachts teilweise keine Energie mehr liefert. In diesem Fall ist die Erdoberflächentemperatur kleiner als die Kollektortemperatur. Abgesehen davon ähnelt die Charakteristik den Ergebnissen der Referenzsimulation aus Kapitel 5.3.1. Der Anstieg der Leistung erfolgt etwas zeitversetzt und ist nicht ganz so hoch wie im Referenzfall. Für das Szenario mit einer Erwärmung um 5 K zeigt sich ein ähnliches Bild. Der Kollektor liefert im ausgewählten Zeitraum nachts nun keine Energie mehr, die Peak-Leistung Tagsüber liegt etwa 30% unterhalb der, des Referenzszenarios.

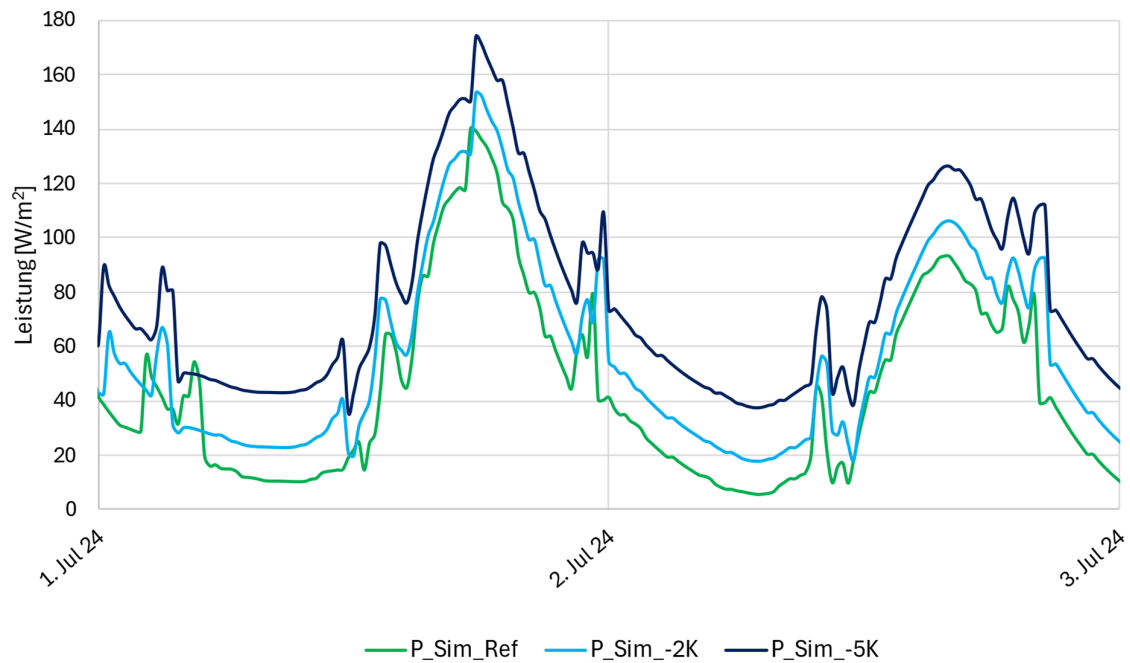


Abbildung 25: Absenkung der mittleren Fluidtemperatur um 2 K und 5 K und der Vergleich zum Referenzfall mit mittlerer Fluidtemperatur aus den Messdaten.

Wie in Abbildung 25 zu sehen, steigt der Kollektorertrag bei einer Absenkung der mittleren Fluidtemperatur um 2 K bzw. 5 K. Auffällig ist, dass vor allem nachts eine bis zu fünfmal so hohe Leistung erreicht wird. Tagsüber wird mit dem Kollektor bei einer Absenkung um 2 K etwas mehr Leistung erreicht; bei einer Absenkung um 5 K ist der Effekt deutlich höher. Welche Auswirkungen dies auf die Erträge in dem Zeitraum 24.06.2024 bis 07.07.2024 (12 Tage) hat, ist in Tabelle 6 zu sehen.



Tabelle 6: Vergleich der Kollektorerträge bei unterschiedlichen Fluidtemperaturen mit dem Ertrag des Referenzmodells für den Zeitraum 24.06.2024 bis 07.07.2024. Zur besseren Einordnung wird zudem zwischen dem Ertrag tagsüber und nachts unterschieden. Der prozentuale Unterschied bezieht sich dabei auf das Referenzszenario.

Szenarien	Ø Fluidtemp.	Ertrag (09:00-21:00 Uhr)	Ertrag (21:00-09:00 Uhr)	Ertrag Total	Ø Spezifische Leistung
Referenz	17.3 °C	3.2 MWh (0%)	1.4 MWh (0%)	4.6 MWh (0%)	58 W/m ² (0%)
- 5 K	12.3 °C	4.4 MWh (+38%)	2.4 MWh (+71%)	6.8 MWh (+48%)	86 W/m ² (+48%)
- 2 K	15.3 °C	3.7 MWh (+16%)	1.8 MWh (+29%)	5.5 MWh (+22%)	69 W/m ² (+22%)
+ 2 K	19.3 °C	2.7 MWh (-16%)	0.9 MWh (-36%)	3.6 MWh (-22%)	45 W/m ² (-22%)
+ 5 K	22.3 °C	2.0 MWh (-36%)	0.6 MWh (-55%)	2.6 MWh (-44%)	33 Wh/m ² (-44%)

5.3.3 Analyse Rohrabstand

Zur Analyse des Einflusses des Rohrabstands auf den thermischen Ertrag wurden drei Modelle untersucht: eines mit einem Rohrabstand von 10 cm, eines mit 20 cm (stimmt mit dem Aufbau am Standort EW Wald am besten überein) sowie eines mit 40 cm. Der seitliche Randabstand wurde jeweils mit dem halben Rohrabstand angepasst. Um die Simulation durchführen zu können, konnten nur fünf Tage berechnet werden. Zudem musste die Luftschicht oberhalb der Asphaltoberfläche weggelassen werden. Als Randbedingung diente die gemessene Oberflächentemperatur. Das verfälscht die Ergebnisse jedoch leicht.

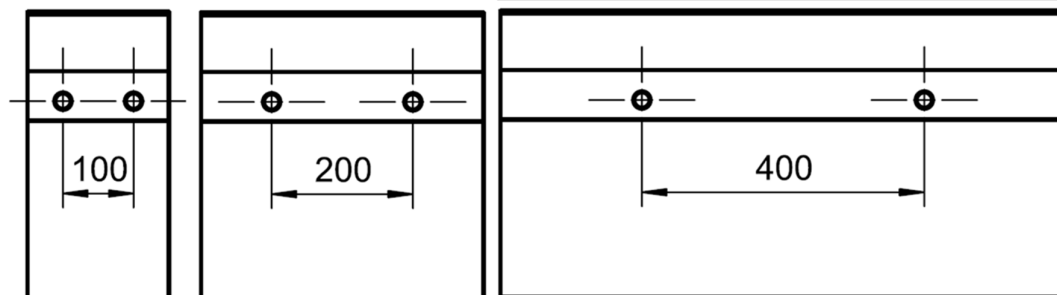


Abbildung 26: Zur Analyse des Ertrags bei verändertem Rohrabstand wurden drei Modelle analysiert, eine mit 10 cm Rohrabstand, eines mit 20 cm (So wie am EW-Wald umgesetzt) und eines mit 40 cm Rohrabstand.

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen eine Momentaufnahme der thermischen Analyse für alle drei untersuchten Rohrabstände während der Aufwärm- und Abkühlphase.

Beim Aufwärmen sind die Temperaturen in den obersten Schichten bei allen Modellen ähnlich. Deutliche Unterschiede zeigen sich jedoch in den mittleren und unteren Schichten. In der Abkühlphase zeigt sich,



dass die Asphalt-Temperaturschichtung deutlich durch den Rohrabstand beeinflusst wird. Beim Modell mit 40 cm Rohrabstand wird weniger Wärme entzogen, sodass sich die oberen, aber auch die tieferen Schichten stärker aufheizen. Bei den Modellen mit 10 cm bzw. 20 cm Rohrabstand bleiben diese Bereiche kühler, da durch die dichtere Belegung mehr Wärme in den Rohren abgeführt wird. Bei einem Abstand von 10 cm gelangt kaum noch Wärme von oben in die tieferen Schichten. Je enger die Belegung, desto mehr Wärme wird also abgeführt. Gleichzeitig zeigt sich, dass sich die Temperatur um die Rohre herum mit geringer werdendem Abstand der Temperatur im Rohr annähert, wodurch die Leistung eines Kollektorrohrs sinkt. Weitere Bilder der Simulation können dem Anhang, Kapitel 9.1.1 entnommen werden.

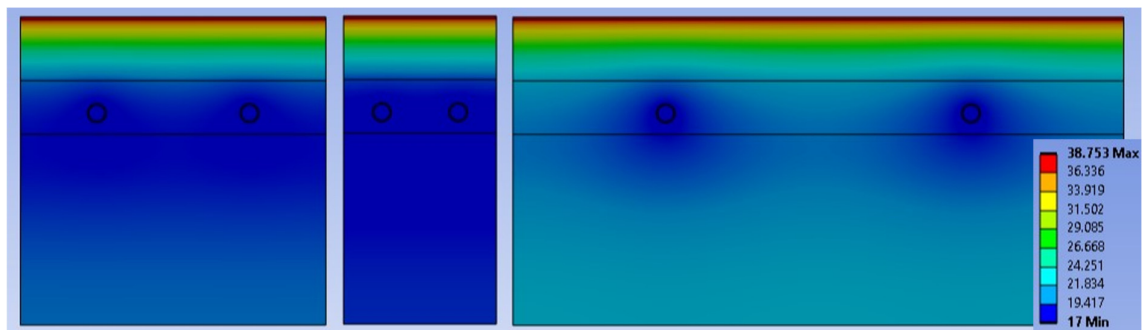


Abbildung 27: Vergleich der Aufwärmphase: Während die Temperaturen in den oberen Schichten bei allen Modellen ähnlich sind, sind die mittleren und unteren Schichten bei den Modellen mit Rohrabstand 10 cm und 20 cm deutlich kühler.

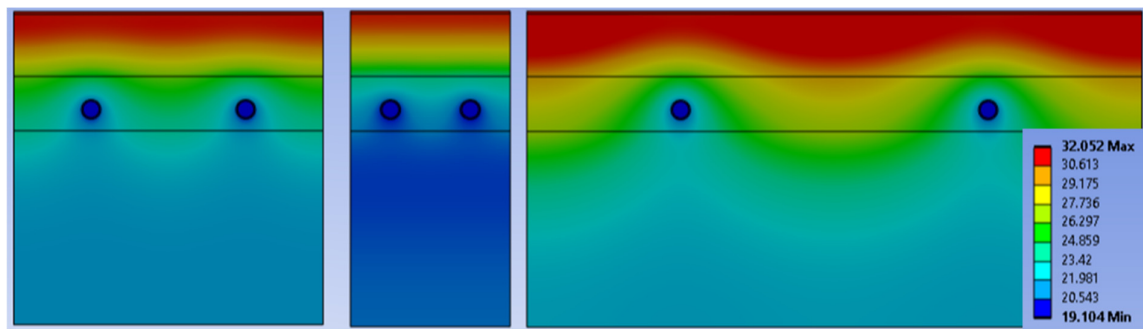


Abbildung 28: Vergleich der Abkühlphase: Beim Kollektormodell mit dem geringsten Rohrabstand wurde deutlich mehr Energie aus den oberen Schichten abgeführt. Dadurch erwärmt sich die untere Schicht weniger stark als bei den beiden anderen Modellen.

Das aus den Bildern der thermischen Analyse abgeleitete Ergebnis wird in Abbildung 29 und Abbildung 30 bestätigt. Leistung und Ertrag sind bei dem Kollektormodell mit weitestem Rohrabstand deutlich am grössten, jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Gesamtlänge des Kollektorrohres gleich ist (Abbildung 29). Das heisst, dass hier die Kollektorfläche bei einem Rohrabstand von 40 cm, viermal so gross ist, wie bei einem Kollektor mit 10 cm Abstand. Betrachtet man jedoch die spezifische Leistung pro Quadratmeter erreicht man bei geringem Rohrabstand, einen deutlich höheren Betrag. Wie zu sehen ist, unterscheiden sich die Erträge nachts weniger als tagsüber, da bei geringem Rohrabstand nachts weniger Energie in den unteren Schichten zur Verfügung steht.

Wie in Tabelle 7 zu sehen, ist der spezifische Kollektorertrag mit 108 W/m^2 bei einem Rohrabstand von 10 cm, doppelt so hoch wie bei einem Rohrabstand von 40 cm (54 W/m^2). Die Werte für den geringeren



Rohrabstand werden aber in Wirklichkeit etwas geringer ausfallen, da hier die Oberflächentemperatur leicht tiefer als im Referenzszenario wäre, gleichzeitig wird die Energie für den Fall mit grösserem Rohrabstand etwas höher liegen, da hier leicht höhere Oberflächentemperaturen erwartet werden können.

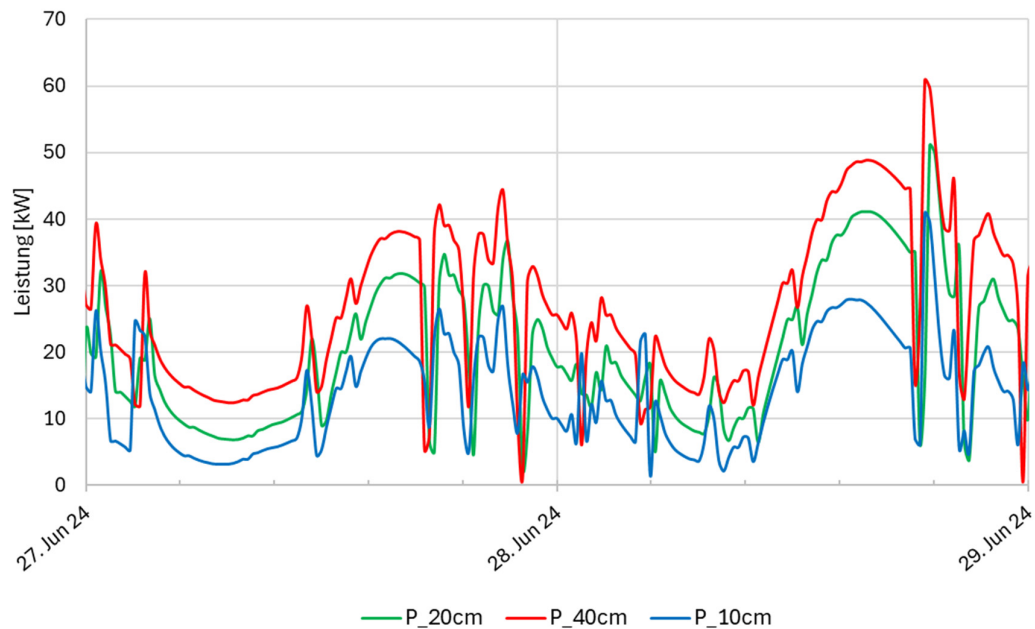


Abbildung 29: Simulierte Kollektorleistung bei unterschiedlichen Rohrabständen aber gleicher Kollektorlänge.

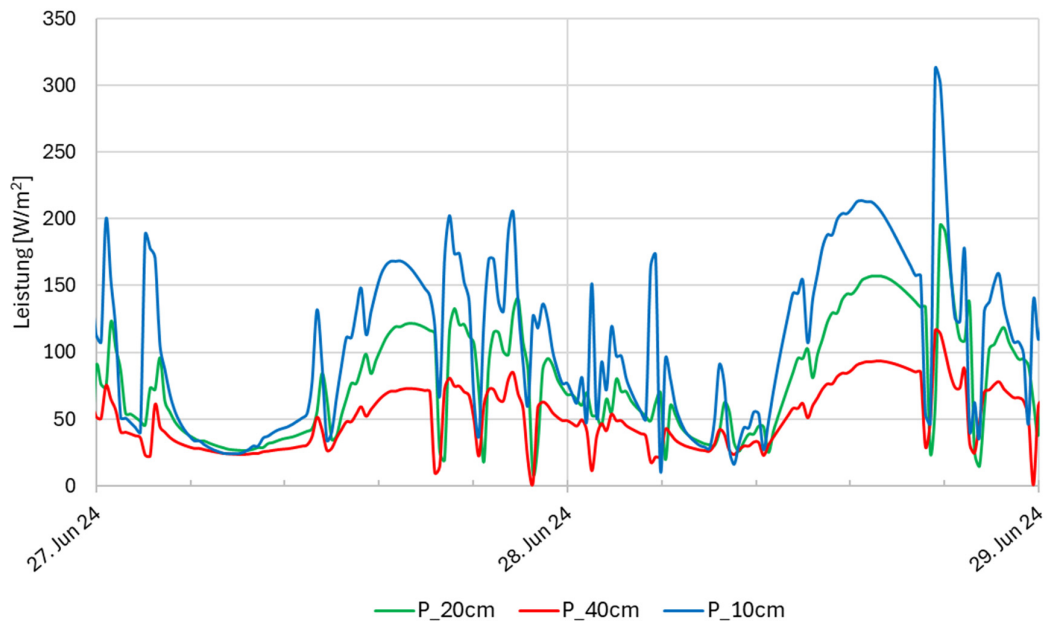


Abbildung 30: Spezifische Kollektorleistung bei unterschiedlichen Rohrabständen



Tabelle 7: Spezifische Leistung und Ertrag des Asphaltkollektors bei unterschiedlichen Rohrabständen anhand der thermischen Simulation für den Zeitraum 24.06.2024 bis 30.06.2024. *Der totale Ertrag ist unter der Annahme berechnet, dass die Länge des Kollektorrohrs in allen Fällen gleich ist.

Rohrabstand	Ertrag Total*	Ø Spezifische Leistung
10 cm	1.35 MWh (-32%)	78 W/m ² (+32%)
20 cm (Referenzfall)	2.00 MWh (0%)	57 W/m ² (0%)
40 cm	2.62 MWh (+32 %)	37 W/m ² (-32%)

5.3.4 Analyse Kiesschicht

Zuletzt wurde untersucht, wie sich das Verhalten des Kollektors ändert, wenn dieser statt in der Zementmörtelschicht in der Kiesschicht verläuft.

Dazu wurden die Kollektorrohre 2 cm unterhalb der Zementschicht bzw. 19.5 cm unterhalb der Oberfläche modelliert, was einer absoluten Absenkung von 6 cm entspricht. Die Ergebnisse wurden, wie beim Referenzfall mit dem Korrekturfaktor 0.65 multipliziert, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den real gemessenen Erträgen zu erreichen. Wie in Abbildung 31 zu sehen ist, reduziert sich die Leistung des Asphaltkollektors tagsüber um etwa die Hälfte. Nachts ähneln sich die Werte jedoch, da hier der grösste Teil der Wärme aus der Kiesschicht kommt. Aufgrund der guten thermischen Leitfähigkeit des Zementmörtels wird diese Wärme gut aufgenommen und gibt daher auch im höherliegenden Kollektor eine ähnliche Temperatur ab.

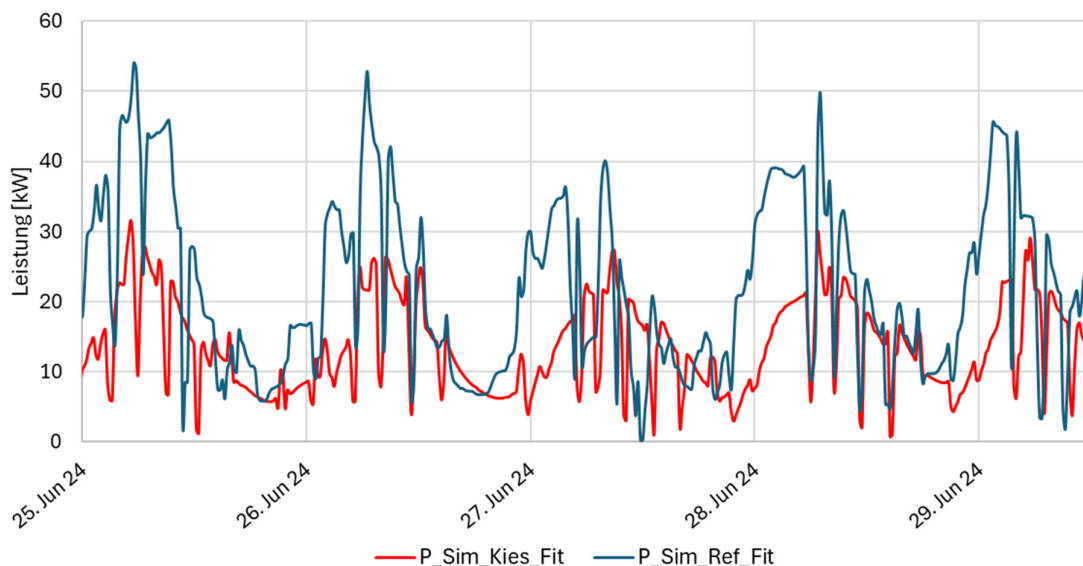


Abbildung 31: Vergleich der simulierten Kollektorleistung für eine Kollektorposition in der Zementmörtelschicht (P_Sim_Ref_Fit) und für eine Kollektorposition in der Kiesschicht (P_Sim_Kies_Fit) über einen Zeitraum von 5 Tagen.



Die Momentaufnahmen in Abbildung 32 und Abbildung 33 (unterschiedlichen Farblegenden) stützen die Messbefunde: Bei Sonneneinstrahlung führt die flachere Lage der Rohre und die höhere Wärmeleitfähigkeit des Zementmörtels zu einem geringeren Wärmewiderstand zwischen heisser Asphaltoberfläche und Rohr. Im Bild zeigt sich das daran, dass die Oberflächentemperatur deutlich niedriger bei Einbettung im Zement ist. Im Kiesfall sind niedrigere Temperaturen lokaler um das Rohr konzentriert; die Oberfläche bleibt weitgehend warm, der Temperaturunterschied zwischen Oberfläche und Rohr „sieht“ einen grösseren Gesamtwiderstand, sodass der resultierende Wärmestrom kleiner ausfällt. Das erklärt, warum der Kollektor im Zement tagsüber deutlich mehr Energie aufnimmt. Nachts entfällt der solarthermische Eintrag von oben und beide Varianten speisen sich dann vor allem aus seitlichen und tieferen Schichten. Zu beachten ist, dass die beiden Teilbilder unterschiedliche Farblegenden nutzen.

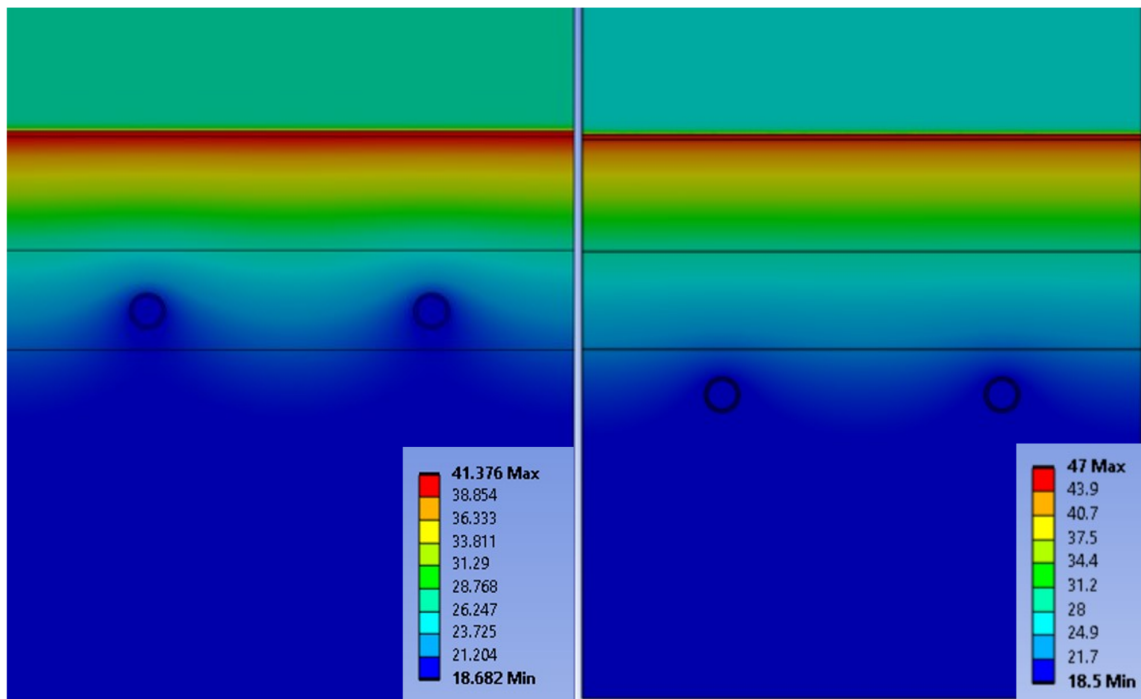


Abbildung 32: Momentaufnahme «Aufgewärmt» (26.05.24, 15:25 Uhr): links Kollektor im Zementmörtel, rechts im ungebundenen Kiesgemisch. Achtung: unterschiedliche Farblegenden. Im Zementfall wird die Oberfläche deutlich stärker abgekühlt als im Kiesfall.

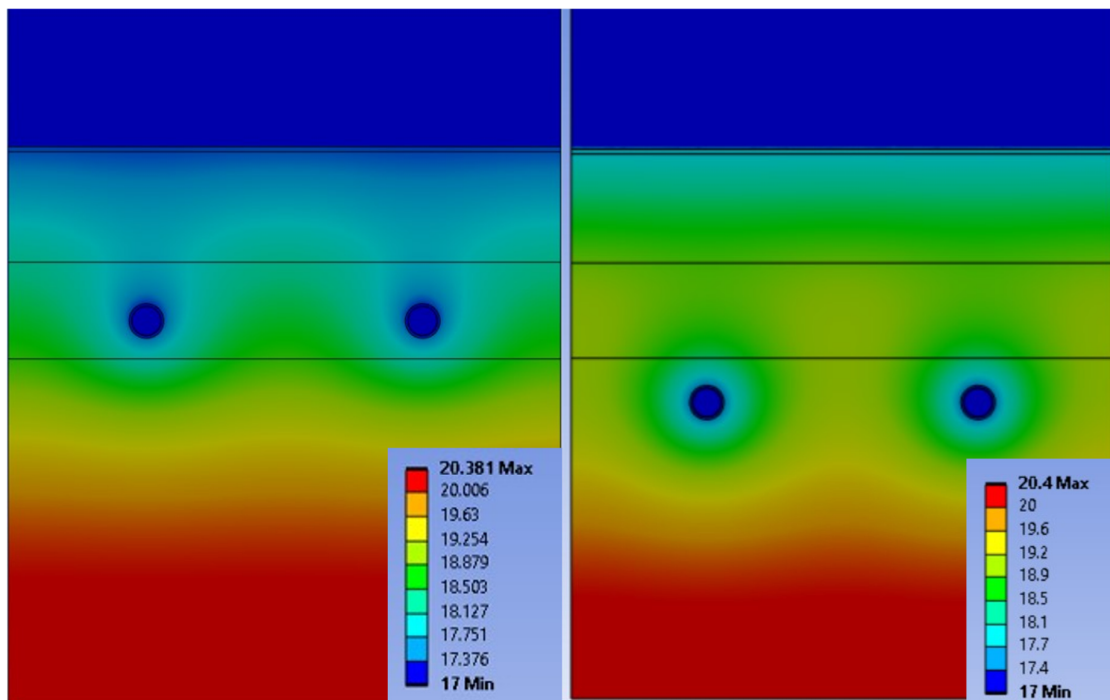


Abbildung 33: Momentaufnahme «Ausgekühlt» 27.06.24, 7:00 Uhr: links Einbettung in Zementmörtel, rechts in Kiesschicht. In Zement koppelt der Kollektor stärker an die Oberfläche (grössere Ausdehnung der kühleren Isothermen), in Kies bleibt die Abkühlung lokaler und die Oberfläche wird weniger beeinflusst.

Der Ertrag im Referenzfall (Kollektor im Zementmörtel) beträgt zwischen dem 25.06.2024 und dem 01.07.2024 2.9 MWh (83 W/m²). Im Fall eines Kollektors in einer Kiesschicht liegt der Ertrag mit 1.6 MWh (46 W/m²) bei etwas über der Hälfte. Auf einen Jahresertrag von 200 kWh/m²a gerechnet würden bei einer Verlegung in die Kiesschicht also noch rund 110 kWh/m²a zu erwarten sein, was im Bereich der Erwartungen der Potentialstudie liegt, für einen Asphaltkollektor in der Kiesschicht [1].



5.4 Polysun-Simulation

5.4.1 Asphaltkollektor in Polysun

Ein Ziel des Projektes ist es, Werkzeuge für die spätere Auslegung von Asphaltkollektoren bei Nachahmerprojekten zur Verfügung zu stellen und deren Erträge besser vorhersagen und planen zu können. Dazu wurden die Messdaten des Asphaltkollektors in Wald verwendet, um einen Asphaltkollektor im Simulationsprogramm Polysun möglichst gut abzubilden. In Polysun werden abgedeckte und nicht abgedeckte Kollektoren unterschiedlich modelliert. Im Polysun Online-Handbuch wird das Modell des ungedeckten Kollektors wie folgt beschrieben

«Nach neuer Messnorm (EN 12975) werden nicht-abgedeckte Kollektoren mit einem zusätzlichen Parameter versehen. Die Funktionskurve des Wirkungsgrades erhält folgende Form:

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 - b_u \cdot u) - \frac{(b_1 + b_2 \cdot u) \cdot (t_m - t_a)}{G''}$$

Die Koeffizienten η_0 , b_u , b_1 und b_2 sind durch Anpassung einer Kurve zu ermitteln. G'' ist die gesamte einfallende Bestrahlungsstärke, die nachfolgender Gleichung bestimmt wird:

$$G'' = G_k + \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right) (E_L - \sigma T_a^4)$$

E_L ist die in der Kollektorebene gemessene lang wellige Bestrahlungsstärke und T_a die Umgebungstemperatur. Für ε/α ist 0.85 zu setzen, falls vom Hersteller nicht anders angegeben.»

Des weiteren kann im Polysun Modell die thermische Kapazität des Kollektors sowie die Rohrführung eingegeben werden.

Parameterfit

Zur Anpassung des Kollektormodells wurden Messwerte aus dem Zeitraum vom 16. Juni bis 17. Juli 2024 verwendet, in dem der Kollektor ununterbrochen in Betrieb war und für den eine lückenlose Aufzeichnung in 15-Minuten-Schritten vorlag. Da die langwellige Bestrahlungsstärke nicht erfasst wurde, wurde eine äquivalente Himmelstemperatur (T_{sky}) von 10 K unter der Umgebungstemperatur angenommen. Der Fit wurde mit einer Bestrahlungsstärke wie folgt durchgeführt:

$$E_L = \sigma T_{sky}^4$$

Das oben beschriebene Kollektormodell wurde nach Excel übertragen und der Excel-eigene Solver zur Anpassung der einzelnen Parameter verwendet. Da viele Parameter angepasst werden können, wurden zunächst typische Parameter für unbedeckte Kollektoren angenommen und dann die einzelnen Parameter iterativ einzeln angepasst. Mit dieser Vorgehensweise konnten folgende Parameter ermittelt werden:

$\eta_0 = 5.4$
 $b_u = 0.045$
 $b_1 = 3.1$
 $b_2 = 3.5$



Als thermische Masse wurde ein Wert von ($m_{th} = 4'550 \text{ kJ}/[m^2K]$) ermittelt. Dies entspricht je nach den angenommenen Materialeigenschaften einer Schichtdicke von 20-30 cm Bitumen bzw. Beton. Natürlich kann das einfache Modell mit einer thermischen Masse als einzelner zusätzlicher Knoten die komplexe Interaktion des Asphaltkollektors mit dem Erdreich nur bedingt wiedergeben. Es ist jedoch nachvollziehbar, dass eine Schichtdicke von etwa 20-30 cm thermisch aktiviert wird.

In Abbildung 34 werden die gemessenen 15-Minuten-Werte der Kollektorleistung mit den in Excel gefitteten Werten verglichen. Dabei zeigt sich, dass zwar eine Korrelation besteht, die hoch aufgelösten und teilweise in einzelnen Zeitschritten zwischen positiver und negativer Leistung fluktuierenden Werte jedoch in ihrer Dynamik nicht genau gefittet werden können.

Abbildung 35 zeigt den dynamischen Verlauf der gefitteten und gemessenen Werte. Hierbei lässt sich ein ähnlicher Verlauf der beiden Kurven erkennen, wobei Ausreisser in beiden Kurven auftreten, jedoch nicht zu denselben Zeitpunkten.

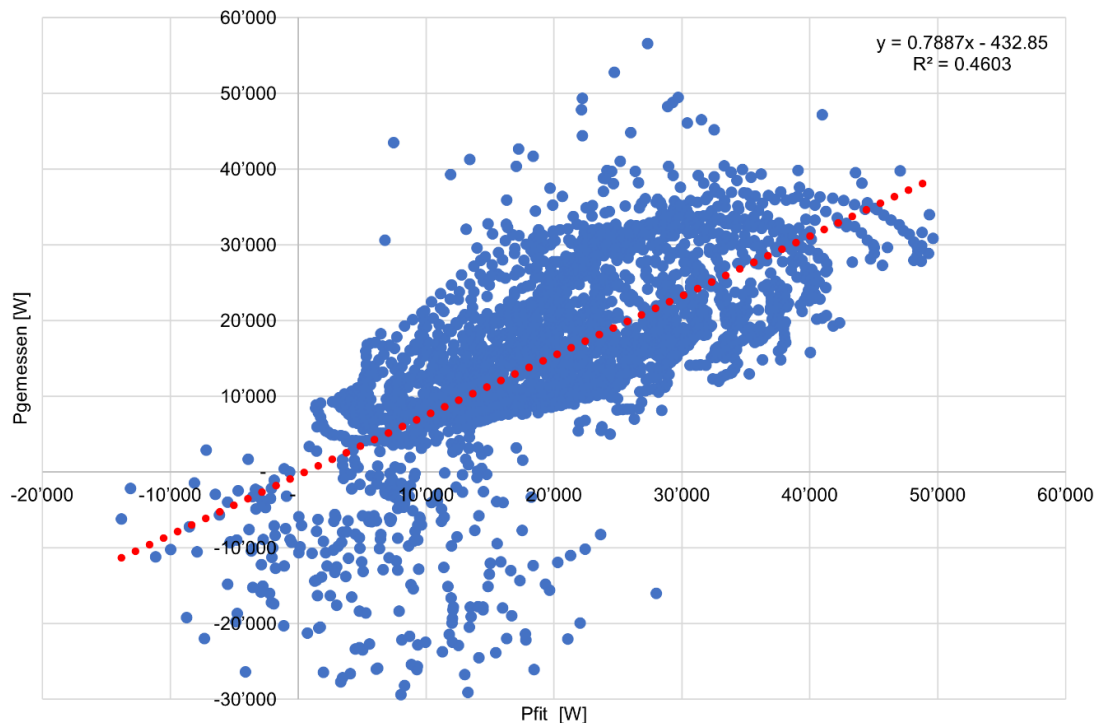


Abbildung 34: Vergleich der 15 Min. Werte der gemessenen und gefitteten Leistung des Asphaltkollektors.

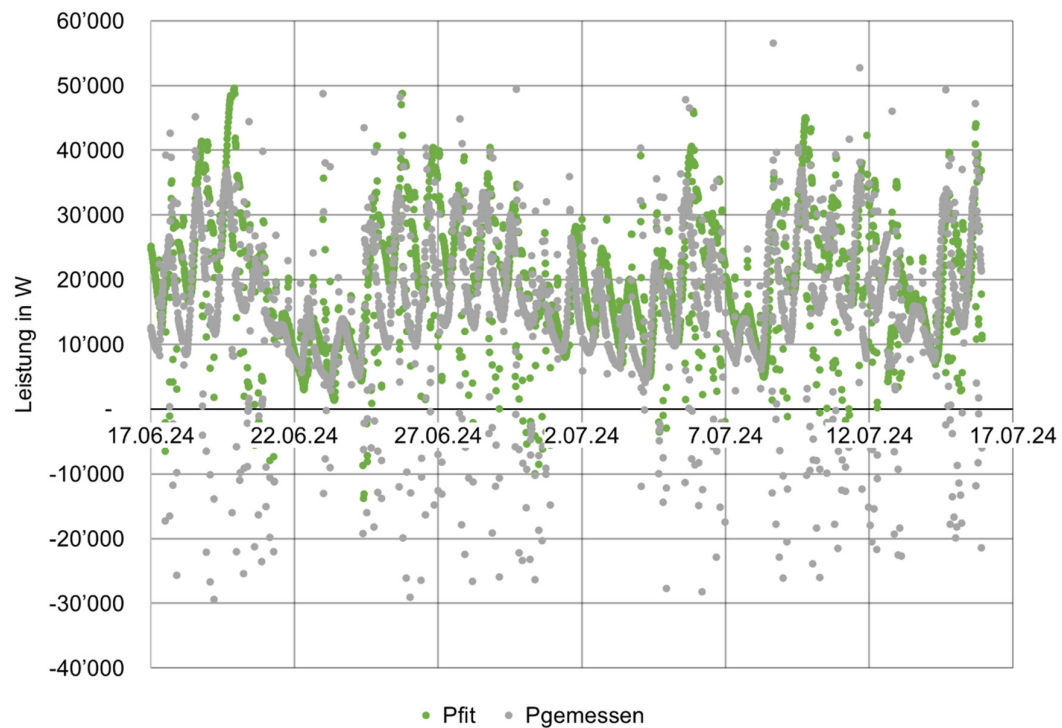


Abbildung 35: Vergleich von gemessener und gefitteter Leistung des Asphaltkollektors.

Vergleich mit Polysun

Die gefitteten Kollektorparameter wurden in Polysun übertragen und ein einfaches Schema zum Einlesen der gemessenen Eintrittstemperaturen und Kollektorzumengenströmen wurde erstellt (siehe Abbildung 36). Ebenfalls wurden die gemessenen Wetterdaten von Wald in Polysun eingelesen.

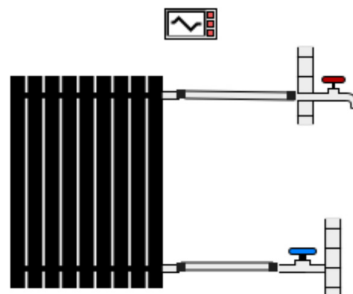


Abbildung 36: Polysun-Schema zum einlesen der Eintrittsbedingungen für einen Vergleich von Simulation und Messdaten.

In Abbildung 37 und Abbildung 38 werden die gemessenen Kollektorleistungen mit den in Polysun simulierten Leistungen verglichen. Auch hier zeigt sich ein tendenziell ähnlicher Verlauf, wobei die hohe Dynamik der 15 Min. Werte nicht genau wiedergegeben wird. Es kann nicht genau identifiziert werden, woran die Abweichungen in den 15 min. Werten liegen. Aufgrund der unterschiedlichen



Position, Besonnung und stark unterschiedlich langer Erschliessungsleitungen der einzelnen Asphaltkollektorelemente ist es aber nicht erstaunlich, dass die kurzzeitigen Schwankungen zwischen positiver und negativer Kollektorleistung in der hohen Dynamik nicht vollständig konsistent sind. Wichtiger ist, dass negative Ausreisser zwar nicht zeitgleich, aber dennoch in derselben Grössenordnung in der Simulation und der Messung auftreten. Ebenfalls ist anzumerken, dass die Grössenordnung der Leistung meist stimmt und dass sich die positiven und negativen Abweichungen relativ gut ausgleichen. So wurde in der aufgezeichneten Periode ein Gesamtertrag von 10.7 MWh gemessen und ein Ertrag von 10.3 MWh simuliert.

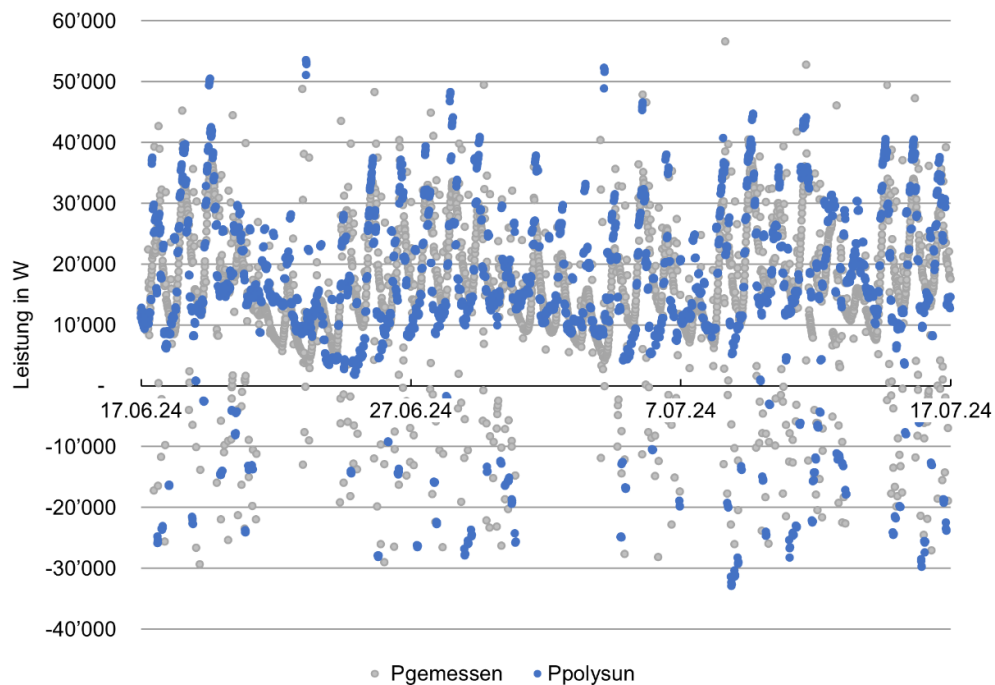


Abbildung 37: Vergleich von gemessener und in Polysun simulierter Leistung des Asphaltkollektors.

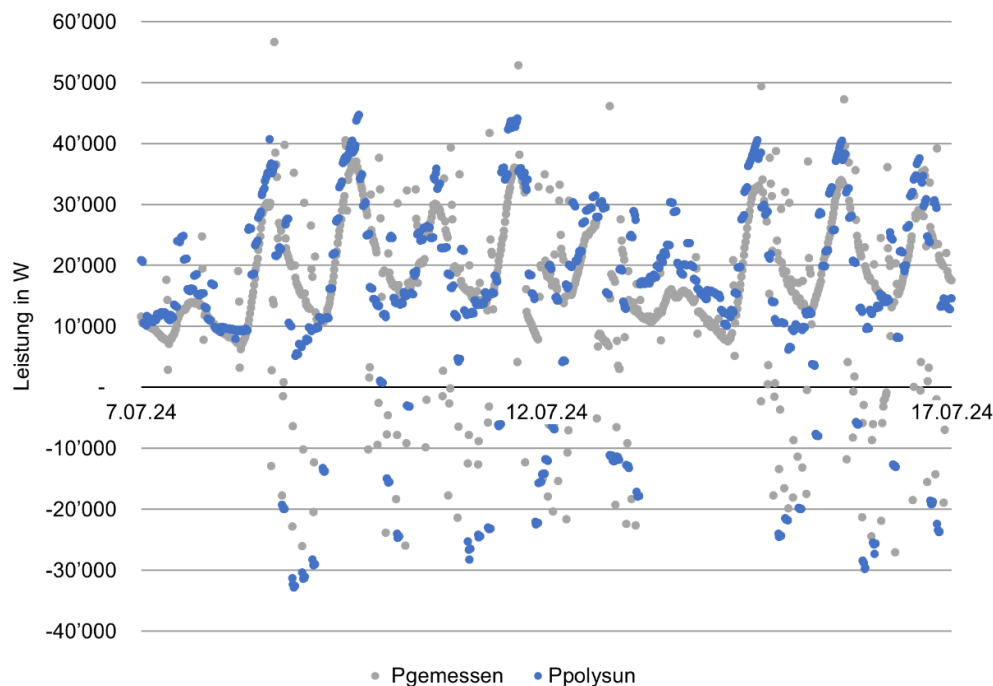


Abbildung 38: Vergleich von gemessener und in Polysun simulierter Leistung des Asphaltkollektors (Zoom).

5.4.2 Abschätzung Langzeitverhalten in Wald

Durch die Regeneration kann einerseits die Sondentemperatur erhöht und damit die Effizienz der Wärmepumpe verbessert werden. Diese Effizienzgewinne liegen bei kleineren Sondenfeldern und einer vollständigen Regeneration in der Grössenordnung von 10 % und können die Mehrkosten der verschiedenen Regenerationsmethoden meist nicht kompensieren. Auch wenn dieser Effekt für die Wirtschaftlichkeit einer Regeneration mit Asphaltkollektor nicht entscheidend ist, soll er für das vorliegende Projekt quantifiziert werden. Am Demonstrationsstandort wurde ein kleines Sondenfeld mit sechs EWS realisiert. Über die Betriebszeit von 50 Jahren wird es zu einer gewissen Beeinflussung und Langzeitauskühlung kommen, die durch die Regeneration mit dem Asphaltkollektor reduziert wird.

Da im Demonstrationsobjekt eine Regeneration stattfindet, kann nicht gemessen werden, wie sich die Temperatur ohne Regeneration entwickeln würde. Daher muss der Effekt durch Simulationen oder Berechnungen abgeschätzt werden. Die Anlage von Wald wurde daher sinngemäss in Polysun abgebildet (Schema siehe Abbildung 39). Dabei wurden aus simulationstechnischen Gründen einige Veränderungen vorgenommen.

- Kälteerzeugung, -Verteilung und -Bedarfsberechnung wurden separat eingebunden.
- Warmwasser- und Heizungserzeugung wurden mit einer Wärmepumpe durchgeführt.
- Der Bedarf von Warmwasser wurde so angepasst, dass der Sommerbedarf mit den Messdaten übereinstimmt (400 l/d a 50 °C)
- Wärme- und Kühlbedarf des Gebäudes wurden so angepasst, dass deren Gesamtbelastung der Sonde mit den Messdaten übereinstimmt (55'000 kWh Wärmeentzug, 18'000 kWh Einspeicherung aus Kühlung)



- Der simulierte Kollektorertrag lag mit 50'600 kWh nur leicht unter dem gemessenen Ertrag 2024 von 52'300 kWh.

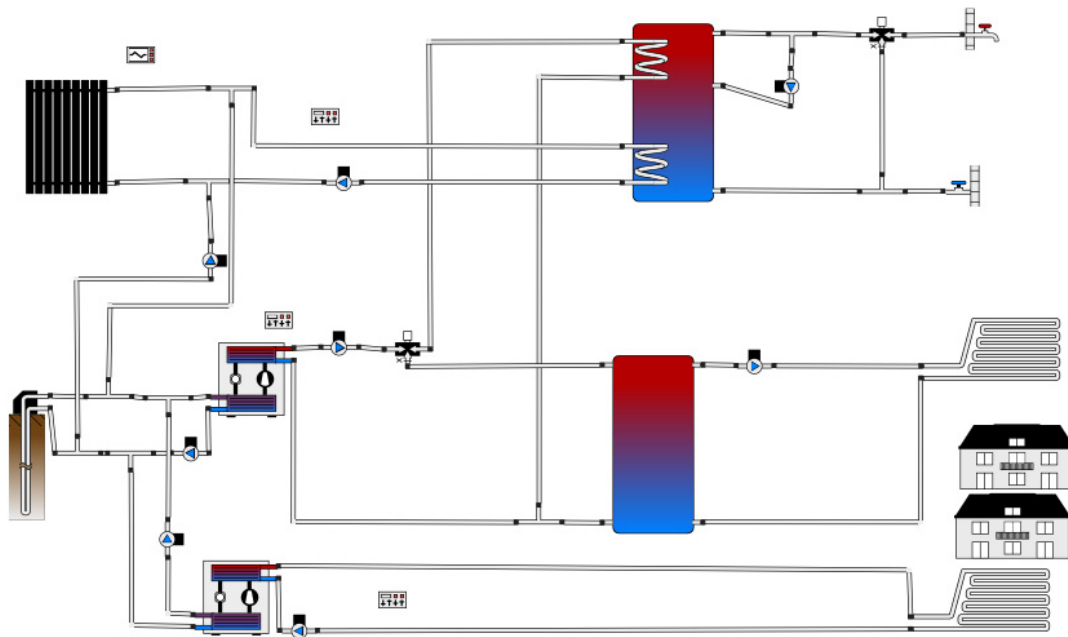


Abbildung 39: Polysun-Schema zur Simulation der Anlage in Wald. Aus Simulationstechnischen Gründen wird die Kühlung mit einer Wärmepumpe und die Raumwärme und Warmwasserbereitstellung mit einer anderen Wärmepumpe erzeugt.

Durch den Vergleich dieser Simulationen kann der Effekt der Regeneration abgeschätzt werden. dazu wurde die Anlage mit und ohne Asphaltkollektor über 50 Betriebsjahre simuliert (Verwendung von typischen Wetterdaten sowohl zwischen erstem und 50. Als auch zwischen der Anlage mit und ohne Kollektor verglichen.

Im realen Betrieb 2024 erreichte die Sonde eine minimale Mitteltemperatur (Durchschnitt zwischen Ein- und Austritt) von 7.7 °C. In Abbildung 40 werden die simulierten Werte dargestellt. Diese liegen 1.4 °C über dem gemessenen Wert, was aber eine geringe Abweichung darstellt und wohl zum Teil auch auf den Simulationsstart am 1. Jan zurückzuführen ist (es wird im ersten Jahr kein durchgehender Winter simuliert). Diese hohen Werte zeigen, dass die Sonden in Wald sehr großzügig dimensioniert wurden. Im 50. Betriebsjahr zeigt sich ein nur leichter Abfall der Minimaltemperatur mit Kollektor und ein Temperaturabfall von ca. 2 K ohne Kollektor. Dieser Abfall wirkt sich ebenfalls auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe aus, welche mit Kollektor quasi konstant bleibt und ohne Kollektor um etwas mehr als 10 % abfällt.

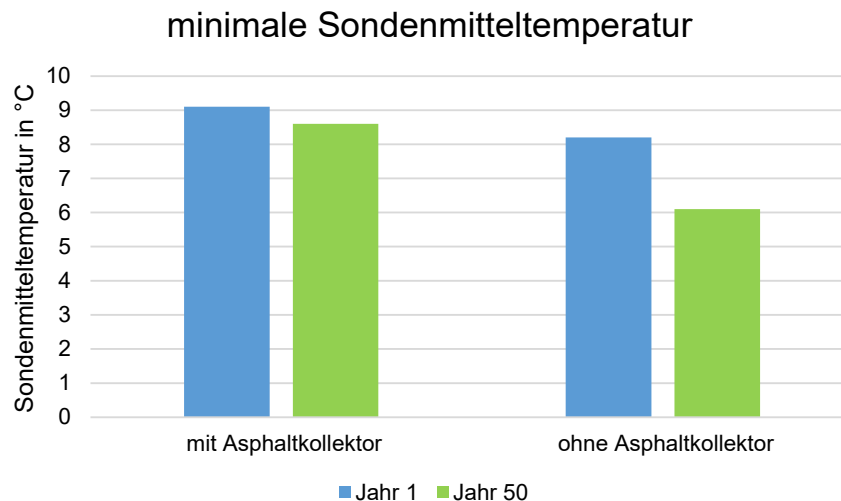


Abbildung 40: Simulierte minimale Sondenmitteltemperaturen.

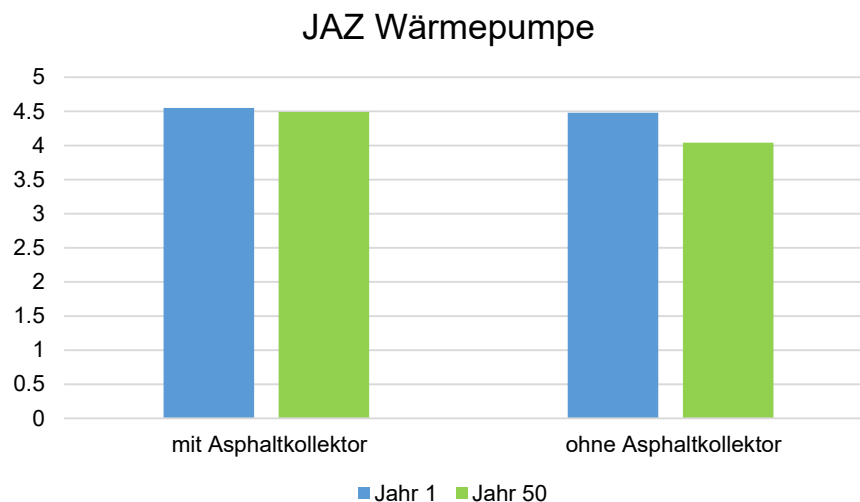


Abbildung 41: Simulierte Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe.

Die Effizienzsteigerung führt also im ersten Jahr zu fast keinen und im 50. Jahr zu Einsparungen im Stromverbrauch von 12 %. Bei einem Stromverbrauch von 15'600 kWh und Stromkosten von 0.3 CHF/kWh sind dies 550 CHF/a. Da diese Effizienzsteigerung nur zu geringen Einsparungen bei den Stromkosten führt, reicht der Effekt nicht aus, um die Kosten des Kollektors zu kompensieren. Dies ist jedoch als spezifisches Ergebnis für das EW-Wald anzusehen, da hier wie in Kapitel 1.4 erwähnt, die Erdsonden überdimensioniert und aktive Kühlung zusätzliche Regenerationsenergie bereitstellt. Durch die Vermeidung der Langzeitauskühlung können die Sonden in der Regel jedoch kürzer ausgelegt werden und somit Kosten eingespart werden. Da die Sonden dann auf die gleiche Grenztemperatur (-1.5°) wie ohne Regeneration ausgelegt werden, wird der Effizienzgewinn durch die Vermeidung der



Langzeitauskühlung wieder aufgehoben. Bei der Auslegung muss also zwischen Effizienzgewinn oder Sondenverkürzung entschieden werden.

5.4.3 Vergleich mit anderen Regenerationstechnologien

In der Studie RegenOpt wurden verschiedene Regenerationstechnologien miteinander verglichen. Dazu wurde ein typisches Mehrfamilienhaus mit 1200 m² EBF und einem Heizenergieverbrauch von 72 MWh/a mit einer Erdsonde, einer Wärmepumpe und verschiedenen Regenerationstechnologien in Polysun abgebildet und in eine Umgebung mit einer hohen Erdwärmennutzung in der Nachbarschaft gesetzt. In Abbildung 42 ist das Simulationsschema für solare Regeneration abgebildet, weitere Details können aus dem Abschlussbericht der RegenOpt Studie [10] entnommen werden. Für eine direkte Vergleichbarkeit mit den anderen Regenerationstechnologien wurde der Solarkollektor durch den neu definierten Asphaltkollektor (siehe oben) ersetzt und das System einmal mit 60 m² und einmal mit 260 m² Kollektorfläche (gleiches Vorgehen wie in der RegenOpt Studie) simuliert. Alle anderen Parameter wurden gleich belassen, die Kollektorneigung wurde allerdings auf 0° verändert, da bei einem Asphaltkollektor immer mit einer sehr flachen Neigung zu rechnen ist.

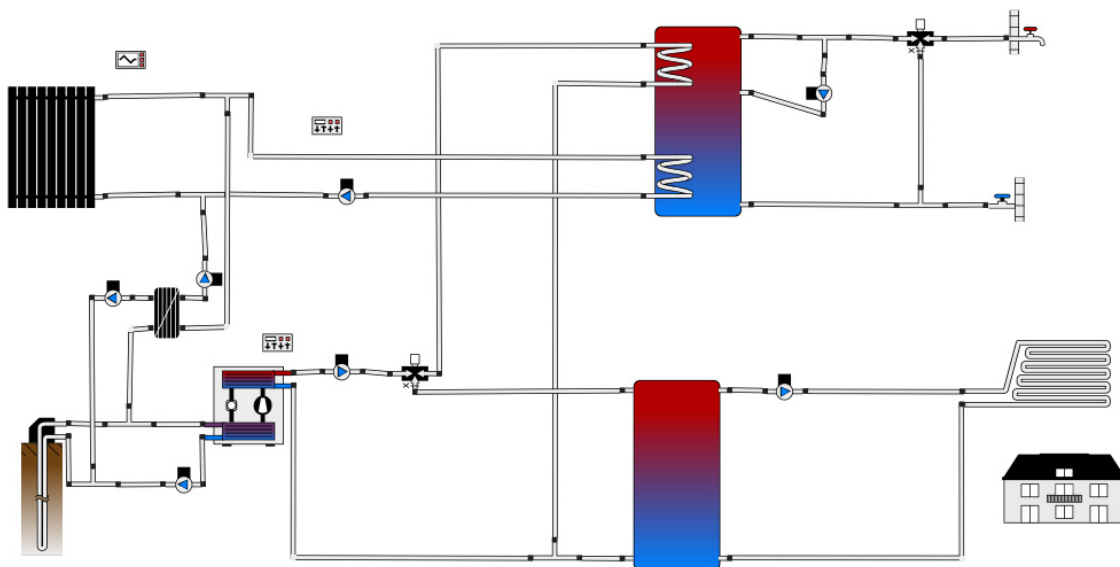


Abbildung 42: Simulationsschema aus der Studie RegenOpt zum Vergleich mit anderen Regenerationstechnologien.

Entscheidende Parameter zur Beurteilung der Regenerationstechnik sind der Regenerationsgrad und die direkt ersetzte Nutzenergie, z.B. durch abgedeckte Kollektoren. Beides entlastet die Sonde und reduziert die Langzeitauskühlung. In der Studie RegenOpt wurde die verbleibende Sonden-Entnahmeenergie für verschiedene Regenerationstechnologien verglichen, um beide Effekte zusammenzufassen. In Abbildung 43 werden die in RegenOpt ermittelten Werte mit zwei unterschiedlich grossen Asphaltkollektoren verglichen. Mit dem 60 m² Asphaltkollektor werden Werte erreicht, die den Werten von 60 m² unbedeckten, unselektiven oder PVT-Kollektoren sehr ähnlich sind. Die simulierten Erträge liegen bei ca. 285 kWh/m², also leicht über den hier gemessenen Werten. Dies liegt an der geringen Kollektorfläche, welche zu einem geringen Regenerationsgrad und somit zu niedrigen Betriebstemperaturen führen.



Beim 260 m² Kollektor ist ein geringerer netto Entzug aus der Sonde bzw. eine höhere Regenerationsenergie durch den Kollektor zu erkennen. Trotz Vergrößerung der Kollektorfläche um mehr als den Faktor vier, nimmt aber die Nettoentzugsenergie aus der Sonde nicht so stark ab, wie bei anderen Kollektortechnologien. Dies und der grosse Unterschied zwischen dem ersten und dem 50. Simulationsjahr weisen auf einen starken Einfluss der Betriebstemperatur auf den Ertrag des Asphaltkollektors hin. Die spezifischen Erträge sinken mit zunehmender Kollektorfläche auf nur noch ca. 135 kWh/m².

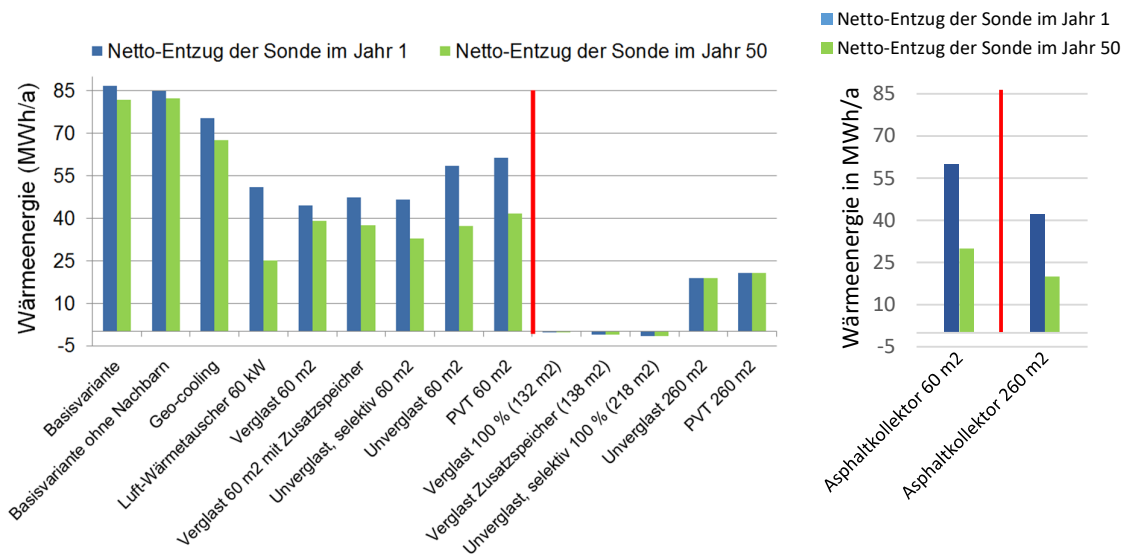


Abbildung 43: Verbleibende Entzugsenergie der Sonde für unterschiedliche Regenerationstechnologien nach RegenOpt [10] (links) und für zwei unterschiedlich grosse Asphaltkollektoren (rechts).

Die Auslegung der benötigten Sondenlängen erfolgte analog zum Projekt RegenOpt:

- Annahme einer Nachbarschaft, die gleichviel regeneriert wie das betrachtete Gebäude.
- Simulation über 50 Betriebsjahre
- Anpassung der Sondenlänge, bis die Sondenmitteltemperatur nicht mehr unter – 1.5 °C sinkt (Kriterium SIA 384/6)

Dadurch ergaben sich Sondenlängen, welche leicht über den Werten von klassischen unabgedeckten Kollektoren liegen (siehe Tabelle 8).



Tabelle 8: Benötigte Sondenlänge für unterschiedliche Regenerationstechnologien aus dem Projekt RegenOpt ergänzt mit den Sondenlängen, welche bei der Regeneration mit einem Asphaltkollektor benötigt werden (fett).

	EWS-Feld	EWS-Abstand	EWS-Tiefe ^{a)}	Gesamt-EWS-Meter
Basisvariante ohne Nachbarn	2 x 3	10 m	185 m	1110 m
Basisvariante	3 x 3	10 m	235 m	2115 m
Geo-cooling	3 x 3	10 m	220 m	1980 m
Luft-Wärmetauscher (60 kW)	2 x 3	6 m	170 m	1020 m
Verglaste Kollektoren (60 m ²)	2 x 3	6 m	200 m	1200 m
Verglaste Kollektoren (60 m ²) inkl. Solarspeicher	2 x 3	6 m	195 m	1170 m
Unverglaste, selektive Kollektoren (60 m ²)	2 x 3	6 m	180 m	1080 m
Unverglaste Kollektoren (60 m ²)	2 x 3	6 m	190 m	1140 m
PVT Kollektoren (60 m ²)	2 x 3	6 m	205 m	1230 m
Asphaltkollektor (60 m²)	2 x 3	6 m	210 m	1260 m
Verglaste Kollektoren 100 % (132 m ²)	2 x 3	6 m	130 m	780 m
Verglaste Kollektoren 100 % inkl Solarspeicher (138 m ²)	2 x 3	6 m	125 m	750 m
Unverglaste, selektive Kollektoren 100 % (218 m ²)	2 x 3	6 m	130 m	780 m
Unverglaste Kollektoren (260 m ²)	2 x 3	6 m	145 m	870 m
PVT-Kollektoren (260 m ²)	2 x 3	6 m	160 m	960 m
Asphaltkollektor (260 m²)	2x3	6m	170 m	1020 m

a) Die EWS-Tiefe ist auf 5 Meter aufgerundet. Die Auslegung basiert auf Stundenwerte der Polysunsimulationen.

5.5 Kosten-Analyse

Die Kosten für den Asphaltkollektor sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Die Ausführungskosten betrugen 134'000 CHF bzw. 511 CHF/m². Die ursprünglich berechneten Kosten betrugen laut Kriesi Energie GmbH 159 CHF/m² bei einer Kollektorgrosse von 430 m². Eine genauere Aufteilung der Kosten kommt in der parallelen Studie für die Ausführung auf 416 CHF/m². Die spezifischen Kosten sind jedoch in beiden Fällen deutlich höher als geplant. Ein Grund hierfür ist die teurere Montagevariante mit geschweissten Metallrahmen, wie in Kapitel 3.1 Kollektormontage beschrieben. Anstatt das Rohr in Kies einzubetten, wurden diese in Zementmörtel eingegossen, was ebenfalls zu einer Erhöhung der Kosten führte. Wie in Tabelle 9 zu sehen, sind zudem die Anschlussleitungen mit Verteilschächten fast gleich teuer wie die Asphaltkollektoren selbst. Vor dem Hintergrund noch begrenzter Betriebserfahrung wurde



die Beschaffung konservativ ausgelegt und es kamen bewusst höherwertige Komponenten zum Einsatz, die gegenüber Standardlösungen zusätzliche Sicherheitsreserven bieten. Für den vorliegenden Anwendungsfall wären voraussichtlich auch kostengünstigere Produkte ausreichend gewesen.

Tabelle 9: Kosten Asphaltkollektor (262 m²), auf tausender gerundet. Das Sparpotential ergibt sich aus Annahmen, welche im nachfolgenden Text genauer erläutert werden, und stellt somit nur eine Indikation dar.

Posten	Kosten alles [CHF]	Kosten Ausführung [CHF]
Asphaltkollektoren	56'000	56'000
Verteilschächte	21'000	21'000
Anschlussleitung	31'000	31'000
Ventile + Wärmezähler	4'000	4'000
Elektroinstallationen	8'000	8'000
Zentrale ink. Dämmung	14'000	14'000
Universal-Web-Plattform	3'000	-
Betriebsoptimierung und Monitoring	20'000	-
Schaden Kollektor	5'000	-
Planung	72'000	-
Gesamt	234'000	134'000

Damit sich die Kosten rechnen, sollten sie idealerweise durch die Kosteneinsparungen der kürzeren Sondenlänge gedeckt werden. In der parallelen Studie rechnet Kriesi vor, dass für eine 100-prozentige Regeneration pro kW Heizleistung eine Asphaltfläche von 8,6 m² benötigt wird. Dadurch kann die Sondenlänge von 42,1 m auf 13,6 m reduziert werden. Die Einsparung von 28,5 m Sondenlänge pro kW Heizleistung entspricht einer Gesamteinsparung von 1 995 CHF (bei Sondenkosten von 70 CHF/m). Das entspräche einem maximalen Asphaltkollektorpreis von 231 CHF/m².

Allerdings spielt nicht nur die Einsparung der Sondenmeter eine Rolle, sondern auch die Kosten anderer Regenerationstechnologien. Ein Vergleich der Investitionskosten mit den Ergebnissen der RegenOpt-Studie zeigt, dass die Kosten für Asphaltkollektoren mit Planung bereits jetzt unter den flächenspezifischen Kosten anderer Kollektortechnologien liegen. Allerdings sind gerade grosse Asphaltkollektoren bei hohen Regenerationsgraden etwas weniger effizient als anderen Technologien. Auch für den Kostenvergleich wurde das Vorgehen der RegenOpt Studie übernommen, wobei eine geringere Effizienz der Kollektortechnologie durch einen Bedarf an Mehrlänge bei den Sonden und den entsprechenden Kosten ausgeglichen werden müssen. Zum Vergleich von Asphaltkollektor mit anderen Technologien wurden für Wärmepumpe, Sonden usw. die Kostenannahmen der anderen Varianten übernommen. Die Kollektorkosten wurden mit den in Wald erreichten Kosten von 134'000 CHF für 260 m² ersetzt. Statt der in Wald aufgetretenen Planungskosten von ca. 70'00 CHF wurde aber wie für alle anderen Technologien auch, ein Ansatz von 15% der Investitionskosten angenommen. Für die Variante mit nur 60 m² Asphaltkollektor wurden die Kosten linear skaliert, was wohl eher einer Unterschätzung von realen Kosten entspricht.



Wie in Abbildung 44 gezeigt wird, erhält man dabei für einen Anlage mit 60 m² Asphaltkollektor Wärmegestehungskosten, welche mit den anderen Technologien vergleichbar sind. Die Wärmegestehungskosten mit Asphaltkollektor liegen etwa im Mittelfeld aller Technologien. Bei Vergleich der Varianten mit grossen Kollektorfeldern liegen die Gestehungskosten der Variante mit Asphaltkollektor am höchsten. Dies liegt daran, dass bei grossen Kollektorfeldern und entsprechend hohen Temperaturen im Sommer die Leistung des Asphaltkollektors deutlich abfällt und daher dennoch rel. lange Sonden benötigt werden und das SIA-Kriterium von -1.5 °C nach 50 Betriebsjahren einzuhalten.

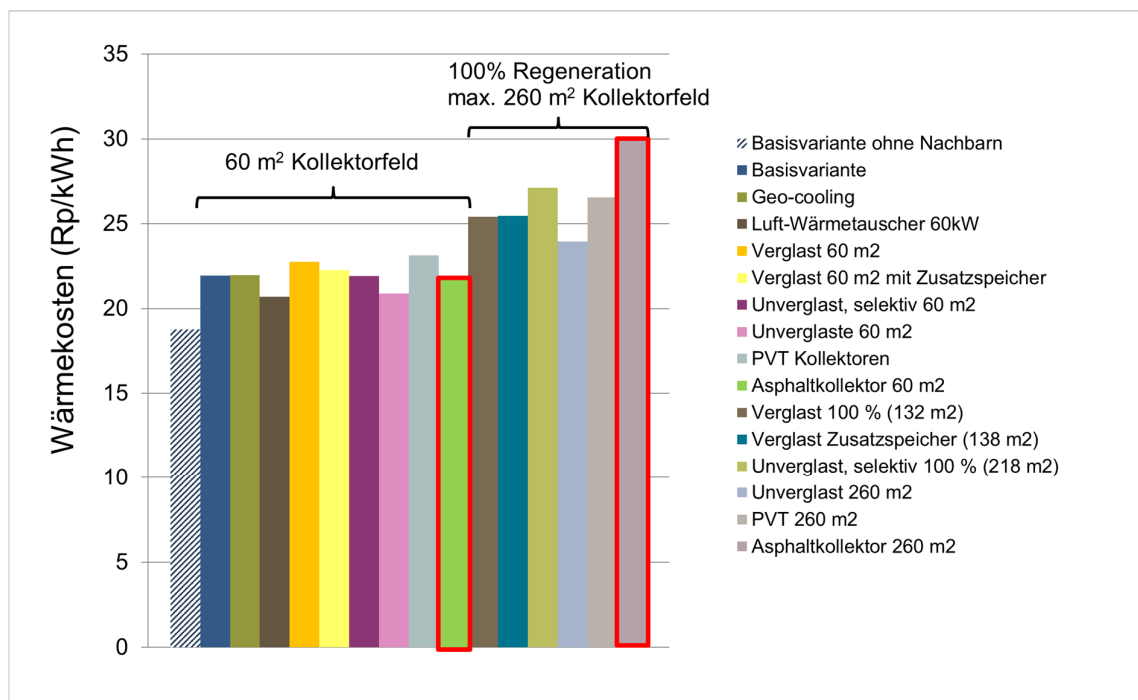


Abbildung 44: Vergleich von Wärmegestehungskosten für Anlagen mit unterschiedlichen Regenerationstechnologien aus RegenOpt ergänzt mit Asphaltkollektor.

5.5.1 Kostenoptimierungspotential

Laut Flückiger + Bosshard AG lassen sich die Positionen eins bis drei aus der unten stehenden Tabelle 10 in einem Folgeprojekt um 40 % reduzieren. Diese Preissenkung wird vor allem durch eine wesentlich einfachere Verlegeart, etwas günstigere Schächte und eine geringere Anzahl an Schächten erreicht. Die Kostenreduktionen sind jedoch stark projektabhängig. Auch Skaleneffekte lassen sich nur schwer beurteilen, da die Projekte sehr unterschiedlich sind. So hat beispielsweise ein grosser Parkplatz ganz andere Anforderungen als ein Kollektor unter einem Gehweg was eine Standardisierung von Kollektorgrossen erschwert.

Die FEM-Analyse hat gezeigt, dass eine Verdoppelung der Rohrleitung pro Fläche zu einer deutlichen Effizienzsteigerung führt. Da eine Verdoppelung der Rohrlänge aufgrund des Biegeradius kritisch ist, wird mit einer realistischen Verlängerung der Rohrleitung um 50 % gerechnet und davon ausgegangen, dass die Effizienzsteigerung ebenfalls nur 50 % beträgt. Bei einem angenommenen Rohrpreis von



5 CHF/m würde sich durch die Reduktion des Verlegeabstandes der Preis pro Kollektor um 175 CHF erhöhen, da nun 105 m statt 70 m Rohr verlegt werden. Die Asphaltkollektorkosten lägen somit statt bei 33'600 CHF (56'000 CHF * 0.6 gleichverteilte Reduktionsannahme von Flückiger und Bosshard) bei 36'575 CHF, was einer Preiserhöhung von 9 % entspricht. Dem gegenüber steht eine Effizienzsteigerung von 15 % (etwa 30 % aus der thermischen Analyse bei Verdoppelung der Rohrmeter). Zusammengefasst heisst das, dass sich die flächenspezifischen Kosten zwar um 9 % erhöhen, der Kollektor bezogen auf den Ertrag aber 6 % günstiger werden könnte und der Flächenbedarf um 15 % sinken würde. Der reduzierte Flächenbedarf führt auch zu einer Reduzierung der Kosten für die Anschlussleitungen. Anstatt 15 % werden jedoch nur 10 % Einsparungen hier angenommen. Die Anzahl und damit die Kosten für die Verteilschächte bleiben unverändert.

Eine Erhöhung der verlegten Rohrmeter pro Fläche spielt ihre Stärke vor allem bei Projekten aus, bei denen nicht genügend Kollektorfläche zur Verfügung steht. Die Kosteneinsparungen fallen, wie Tabelle 10 zeigt, im Vergleich zu den baulichen Optimierungsmöglichkeiten gering aus.

Tabelle 10: Kosten Asphaltkollektor (262 m²). Gemäss Flückiger + Bosshard können die Kosten der ersten drei Positionen durch bauliche Massnahmen um 40 % reduziert werden. Optimierungsmassnahmen aus der thermischen Analyse können zu weiteren Einsparungen führen, (Spalte Flückiger + Bosshard und SPF). Zur Vereinfachung wurden hierfür die Positionen 1 bis 3 um 40 % reduziert und weitere Einsparungen aus der Optimierung berücksichtigt.

Posten	Kosten Ausführung [CHF]	Annahme Kostenoptimiert Flückiger + Bosshard [CHF]	Annahme Kostenoptimiert Flückiger + Bosshard und SPF [CHF]
Asphaltkollektoren	56'000	65'000	31'600
Verteilschächte	21'000		12'600
Anschlussleitung	31'000		16'700
Ventile + Wärmezähler	4'000	4'000	4'000
Elektroinstallationen	8'000	8'000	8'000
Zentrale ink. Dämmung	14'000	11'000	11'000
Gesamt	134'000	88'000	83'900

Unter der Annahme, dass die getroffenen Annahmen und Erwartungen korrekt sind, lassen sich die Gesamtkosten von 510 CHF/m² um rund 37 % auf 320 CHF/m² reduzieren. Die Kollektorkosten (Positionen 1–3 aus Tabelle 10) könnten sogar um 42 % von 410 CHF/m² auf 230 CHF/m² gesenkt werden.



6 Bewertung Ergebnisse und Diskussion

6.1 Ergebnisse paralleles P&D-Projekt

Parallel durch das vom BFE geförderte Projekt, gibt es ein weiteres P&D-Projekt gefördert durch die Baudirektion Kanton Zürich Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Abteilung Energie (AWEL) und durchgeführt von Kriesi Energie GmbH, Wädenswil, Ingenieurbüro für Energiekonzepte. Der Autor Ruedi Kriesi, welcher auch zum grossen Teil den Asphaltkollektor geplant hat, beschäftigt sich darin hauptsächlich mit der energetischen Auswertung des Kollektors, überprüft die Regeneration und analysiert die Kosten.

Die wichtigsten Ergebnisse seiner Arbeit sind [7]:

- Der Asphaltkollektor lieferte deutlich mehr Energie als erwartet. Die Simulationen aus dem Jahr 2019 prognostizierten einen Ertrag von 120 kWh/m², tatsächlich wurden aber 220 kWh/m² im Jahr 2023 und 198 kWh/m² im Jahr 2024 erreicht. Im Jahr 2023 lieferte der Asphaltkollektor 59 MWh, im Jahr 2024 52 MWh.
- Die höhere Energieausbeute liegt primär an der Zementmörtelschicht, in die die Rohre eingebettet wurden. Diese Schicht weist eine bessere Wärmeleitfähigkeit auf als der Kies und Asphalt, die ursprünglich vorgesehen waren. Weitere Gründe sind die geringere Überdeckung der Rohre und die höhere Anzahl Sonnenstunden im Jahr 2023.
- Die Austrittstemperatur der Erdsonde blieb trotz Regeneration und zusätzlicher Wärmezufuhr durch die Raumkühlung in beiden Sommern unter 20 °C. Dies bedeutet, dass die Raumkühlung in diesen Sommern auch passiv über die Flächenheizung hätte erfolgen können.
- Die Kühlwirkung des Asphaltkollektors auf die Umgebung ist spürbar. Messungen haben gezeigt, dass die Strahlungswärme, die von der Asphaltoberfläche auf eine Person abstrahlt, um rund 24% reduziert wird.
- Die Kosten für den Asphaltkollektor lagen mit über 400 CHF/m² deutlich über den Erwartungen. Dies lag vor allem an der Unsicherheit der beteiligten Unternehmen, die zu aufwendigen Abläufen und teuren Komponenten führte. Für zukünftige Projekte wird mit einer deutlichen Kostenreduktion gerechnet.

Zusätzlich zu diesen Ergebnissen wurde festgestellt, dass der Wärmegewinn aus dem Asphaltkollektor und der Raumkühlung den Wärmebedarf des Gebäudes übersteigt. Obwohl der Kollektor kleiner gebaut wurde als geplant, lieferte er mehr Wärme, als erwartet und der Wärmebedarf war geringer als im SIA-Systemnachweis (76 MWh/a) berechnet. Der Wärmebedarf lag im Winter 23/24 bei 55 MWh, im Sommer wurde durch Kühlen und Asphaltkollektor 75 MWh regeneriert. Der daraus resultierende Regenerationsgrad liegt bei 136%.



6.2 Bewertung Projektverlauf

Der zentrale Meilenstein war die erfolgreiche Inbetriebnahme des Asphaltkollektors, der seit April 2023 die Erdsonden des EW Wald regeneriert. Die Inbetriebnahme des Messsystems verzögerte sich, da keine Datenanbindung über das EW realisiert werden konnte. Als Alternativlösung wurde ein LoRaWAN-System eingesetzt; eine unbemerkte Abschaltung eines öffentlichen Gateways führte jedoch zu weiteren Verzögerungen. Erst die Umstellung auf das Swisscom-Netz stellte die Datenübertragung dauerhaft sicher. Die endgültige Positionierung des Messsystems erfolgte nach Fertigstellung eines Rohrlagers im März 2024.

Auf Basis der erfassten Daten wurden die thermische FEM-Analyse durchgeführt. Letztere erwies sich aufgrund hoher Rechenanforderungen als aufwändig; es konnte nur ein kurzer Zeitausschnitt untersucht werden. Längere Simulationszeiträume bzw. eine hohe Zahl an Eingangsparametern führten zu Instabilitäten bis hin zu Systemabstürzen und machten eine komplette Neuinstallation erforderlich. Vor diesem Hintergrund erscheint es für vergleichbare Vorhaben sinnvoll, auf eine transiente thermische Analyse zu verzichten und die Kollektorcharakteristik mit einfacheren, robusteren Werkzeugen bzw. reduzierten Modellansätzen abzubilden. Die erzielten Ergebnisse lassen qualitative, jedoch keine quantitativen Aussagen zu.

Ebenfalls wurden die Messdaten dazu verwendet, das Polysun-Modell für unabgedeckte Kollektoren zu parametrisieren. Ein Vergleich dieses Modells mit den Messdaten ergab deutliche Abweichungen für kurze Zeitschritte, über einen längeren Zeitraum wurden jedoch sehr ähnliche Leistungen erreicht. Auch in der Jahressimulation wurden in Polysun ähnliche Erträge wie in Wald erzielt. Für zukünftige Projekte kann dieses Modell zur genaueren Ertragsschätzung und Dimensionierung verwendet werden. Eine nachträgliche Simulation der Anlage in Wald zeigt, dass das Sondenfeld sehr grosszügig dimensioniert ist. Dadurch und durch den Umstand, dass schon durch die aktive Kühlung eine Teilregeneration erreicht wird, ist der Nutzen des Asphaltkollektors im konkreten Anwendungsfall von Wald gering.

Die Regenerationsleistung und die einfache Regelung des Asphaltkollektors wird vom EW Wald positiv beurteilt. Die Anlage wurde primär mit dem Ziel der Innovationsförderung umgesetzt. Aus Sicherheitsgründen wurde die Dimensionierung des Erdsondenfelds nicht reduziert, um bei ausbleibender Regeneration durch den Asphaltkollektor keine vorzeitige Sondenausköhlung zu riskieren. Die erhöhten Kosten – insbesondere bei den Anschlussleistungen – sind aus betriebswirtschaftlicher Sicht zwar unerfreulich, werden jedoch als projektspezifisches Forschungsrisiko eingeordnet.

6.3 Bewertung Simulation Ansys

Mithilfe der thermischen Analyse wurde der Asphaltkollektor unter sich ändernden Randbedingungen wie Fluidtemperatur und Rohrabstand bewertet. Dazu wurde ein vereinfachtes CAD-Modell mit einer Tiefe von 1 mm erstellt, das den Ist-Parametern des Kollektors am EW-Wald bestmöglich entspricht. Aufgrund der Kollektorlänge von etwa 1.2 km ist eine Hochrechnung anhand des kleinen Simulationsabschnitts zur quantitativen Bestimmung jedoch nicht geeignet. Dies zeigt sich vor allem aufgrund der Sensitivität der Kollektorleistung in Bezug auf die Differenz zwischen Fluidtemperatur und der Temperatur des umgebenden Zementmörtels in Höhe von 27 kW/K. Im Vordergrund stehen jedoch qualitative Aussagen, für die die Charakteristik (physikalische Effekte wie Wärmeleitung und Wärmespeicherung) von besonderer Bedeutung ist.



Berücksichtigt wurden die Materialkennwerte (Leitfähigkeit, Dichte, Wärmekapazität), solare Einstrahlung und je nach Szenario die Oberflächentemperatur von Asphalt. Als Fluidtemperatur wurde der Mittelwert aus Vor- und Rücklaufemperatur angenommen. Nicht bzw. nur pauschal erfasst wurden Wind- und Regenkühlung, Wärmeverluste in Zu-/Ableitungen sowie seitlicher/unterer Wärmenachfluss im Untergrund. Auch die Verschattung konnte nicht in die Analyse mit einfließen, welche in Kapitel 5.1 bestimmt wurden. Um all diese Faktoren zu berücksichtigen, wurden die Simulationsergebnisse für die Leistung des Kollektors um den Korrekturfaktor 35% reduziert. Der Faktor wurde dabei so ausgewählt, dass der gemessene und Simulierte Ertrag in etwa übereinstimmt.

Die wichtigsten Ergebnisse der thermischen Analyse sind:

- Die drei Temperaturstichproben wie Oberflächentemperatur, Temperatur zwischen zwei Kollektorröhren und die Temperatur 15 cm unterhalb eines Kollektorrohrs konnten sehr gut abgebildet werden. Abweichungen konnten durch Regen und fehlenden Wärmefluss im Untergrund erklärt werden.
- Die simulierte Kollektorleistung war Tagsüber teils deutlich zu hoch und wurde in einem Fit mit 0.65 multipliziert, um besser mit den Messdaten übereinzustimmen. Tagsüber ist die simulierte Leistung immer noch etwas über den Messdaten, nachts liegt sie darunter, da das Erdreich wie im vorherigen Punkt erwähnt durch fehlende Wärmeströme von ausserhalb der Systemgrenzen zu stark abkühlt, wenn keine Wärmefluss von oben stattfindet. Ein variabler Reduktionsfaktor, der bspw. Regen, Wind, Tag, Nacht unterscheidet würde der Realität zudem besser entsprechen.
- Für weitere Analysen wird angenommen, dass trotz 35% weniger Leistung in der realen Messung, das FEM-Modell qualitative Aussagen zulässt.
- Wird die mittlere Fluidtemperatur im Kollektor erhöht sinkt der Kollektorertrag deutlich. Bei einer Erhöhung von 2 K sank der Ertrag in einem Untersuchten Zeitraum von fünf Tagen um 22 %, bei einer Erhöhung um 5 K um 44 %. Wenn die Temperatur im Kollektor höher ist als die Temperatur im umgebenden Zementmörtel, fliesst gar keine Energie mehr, was vor allen Nachts bei einer Temperaturerhöhung von 5 K der Fall ist.
- Wird die mittlere Temperatur im Kollektor abgesenkt, steigt der Kollektorertrag, da damit der Wärmefluss in den Kollektor steigt. Bei einer Absenkung um 2 K steigt der Ertrag in dem untersuchten Zeitraum von fünf Tagen um 22 %, bei einer Absenkung um 5 K steigt der Ertrag um 48 %.
- Durch Halbierung des Abstands der Kollektorröhren auf 10 cm steigt der spezifische Kollektorertrag um 32 %, bei einer Verdoppelung fällt der Ertrag um 25 %. Der absolute unterschied wird bei der Halbierung jedoch geringer ausfallen, bei Verdoppelung höher, da in der Simulation die Oberflächentemperatur als Inputparameter gewählt werden musste und somit der Effekt des Kollektors auf die Oberflächentemperatur nicht berücksichtigt wird
- Eine Verlegung des Kollektors in die Kiesschicht hat den Vorteil, dass kein geschweisster Metallrahmen benötigt wird, jedoch sinkt der Ertrag um fast die Hälfte. Damit entspricht der Wert mit rund 110 kWh/m²a den Erwartungen der Studie zur Potentialabschätzung (120 kWh/m²a) bei welcher der Kollektor ebenfalls in der Kiesschicht verläuft [1]



6.4 Bewertung Regeneration Asphaltkollektor

Die Regenerationsleistung ist ein wichtiger Faktor bei der Bewertung des Kollektors. Im Zwischenbericht der Parallelstudie wurde ein Ertrag in Höhe von etwa 220 kWh/m²a ausgewiesen, was um 86 % über dem prognostizierten Wert von 120 kWh/m² liegt. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass der Kollektor nicht in Kies, sondern in einer Zementmörtelschicht installiert wurde, die eine höhere thermische Leitfähigkeit und Wärmekapazität aufweist [7]. Zum anderen ist das EWS-Feld in Wald überdimensioniert und es treten daher weniger Temperaturschwankungen nach unten und oben auf. Aus diesem Grund sind die Temperaturen, welche während der Regeneration auftreten, geringer als bei einem knapp dimensionierten EWS-Feld. Die Messung aus dem Jahr 2024 hat einen Ertrag von 200 kWh/m²a nachgewiesen. Insgesamt wurden im Jahr 2024 den Sonden 58.4 MWh zum Heizen/Warmwasser entzogen, sowie 6.7 MWh durch die fehlende automatische Regelung des Asphaltkollektors. Regeneriert wurden 52.3 MWh durch den Asphaltkollektor, sowie 18.1 MWh durch aktives Kühlen.

Insgesamt wurden also 65.1 MWh Wärme entzogen und 70.4 MWh regeneriert, was einer Regenerationsquote von 108 % entspricht. Da die Temperaturregelung des Asphaltkollektors seit 2025 in Betrieb ist, sollte es keinen ungewollten Wärmeentzug mehr zum Erdreich hin geben, wodurch der Regenerationsgrad weiter steigt.

6.5 Bewertung vgl. andere Regenerationstechnologien (RegenOpt), Kosten, Performance

Mit der Polysun-Simulation wurde geprüft, ob das in der Feldmessung beobachtete Verhalten des Asphaltkollektors systemseitig abgebildet werden kann und welche Aussagen sich für Auslegung und Betrieb ableiten lassen. Zudem erfolgte eine Einordnung mit der RegenOpt-Studie, welche verschiedene Regenerationstechnologien von Erdsondenfeldern für ein Mehrfamilienhaus untersucht.

Verfügbare Messgrößen (Wetter, Volumenströme, Temperaturen) wurden als Randbedingungen genutzt; kurzzeitige Ereignisse werden modellbedingt geglättet. Die Validierung zwischen Polysun-Model und Messdaten zeigt eine gute Übereinstimmung von Leistungsverlauf und Energiewerten. Abweichungen betreffen primär Einzelpeaks, nicht jedoch die energetische Tendenz. Folgende Parameter ergaben die beste Abbildung eines Asphaltkollektors im unabgedeckten Kollektormodell von Polysun, und können zur Modellierung eingesetzt werden:

$$\eta_0 = 5.4$$

$$b_u = 0.045$$

$$b_1 = 3.1$$

$$b_2 = 3.5$$

$$m_{th} = 4'550 \text{ kJ/[m}^2\text{K]}$$

In der Vergleichseinordnung liegen die spezifischen Erträge und Regenerationswirkungen des Asphaltkollektors in derselben Größenordnung wie die von unselektiven oder PVT-Kollektoren. Unter der Voraussetzung, dass die Asphaltfläche nicht zu den Kollektorkosten dazugerechnet wird, liegen die flächenspezifischen Investitionskosten sogar unter denen von anderen Kollektortechnologien. Das heisst, der Kollektor wird nur dann eingebaut, wenn die Asphaltfläche aus anderen Gründen saniert oder neu gebaut wird. Bei hohen Betriebstemperaturen sind Asphaltkollektoren aber deutlich weniger effizient als andere Kollektortechnologien. Sie weisen daher bei niedrigen Regenerationsgraden oder grosszügig dimensionierten Sonden eine hohe Effizienz aus und sind dann auch mit den hier erreichten spezifischen Kosten gegenüber anderen Kollektortechnologien konkurrenzfähig. Treten während der



Regeneration höhere Temperaturen auf, sinkt die Effizienz überproportional und Asphaltkollektoren sind teurer als andere Technologien

Ein zusätzlicher Vorteil von Asphaltkollektoren ist aber, dass bereits versiegelte Flächen ein zusätzliches Nutzen bekommen und keine Konkurrenz zu bspw. PV-Flächen besteht. Zudem wird die Asphaltoberfläche durch den Kollektor leicht gekühlt, was gerade in urbanen Bereichen mit Hitzeinseln einen grossen Mehrwert bieten kann [7].

6.5.1 Wo ist Regeneration unumgänglich?

Regeneration kann eine Langzeitauskühlung bei Erdwärmesondenfeldern oder bei nachbarschaftlicher Beeinflussung verhindern. Dabei gilt: Je grösser das EWS-Feld und je dichter die EWS gebohrt sind, desto stärker ist dieser Effekt. Bei kleinen Feldern oder einer mässigen Nutzung der oberflächennahen Geothermie in der Nachbarschaft kann eine Langzeitauskühlung auch durch eine Sondenverlängerung ausgeglichen werden. Bei sehr grossen Sondenfeldern oder einer sehr dichten Nutzung im Quartier ist eine Regeneration unumgänglich. Gemäss SIA 384/6:2021 muss ab einem flächenspezifischen Wärmeentzug im Quartier von 34 kWh/m² eine vollständige Regeneration erfolgen. Bei Sondenfeldern liegt diese Grenze bei ca. zehn Sonden (dies ist jedoch stark abhängig von der Sondenfeldgeometrie). Grosse Sondenfelder können oft gar nicht ohne Regeneration erstellt werden.

Bei kleinen Anlagen in Quartieren mit einer hohen Wärmebedarfsdichte muss der Nutzen der Regeneration im nachbarschaftlichen Kontext betrachtet werden. Laut SIA 384/6:2021 droht ab einer Wärmeentzugsleistung von 34 kWh/m² und somit ab einer Bedarfsdichte von ca. 56 kWh/m² (die Herleitung ist im Anhang zu finden) eine „nachbarschaftliche Auskühlung von mehr als 5 K“. In diesem Fall sind Regenerationsmassnahmen erforderlich, um das Quartier mehrheitlich mit EWS-Wärmepumpen zu versorgen. Abbildung 45 zeigt, wird diese Grenze auch ländlichen Gemeinden bereits oft überschritten¹. Wenn solche Quartiere hauptsächlich mit EWS versorgt werden sollen, ist eine Grossflächige Umsetzung von Regenerationsmassnahmen unumgänglich.

Die Kosten von Asphaltkollektoren müssen also nicht mehr durch den Effizienzgewinn, oder die Einsparung von Sondenlänge gegengerechnet werden, um eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen. In solchen Gebieten muss ein Asphaltkollektor lediglich günstiger als andere Regenerationsmethoden sein.

¹ Hinweis: Die Grenzen der Kategorisierung von maps.admin.ch ist bei 500 MWh/a, also 50 kWh/m² und nicht bei 56 kWh/m² gewählt

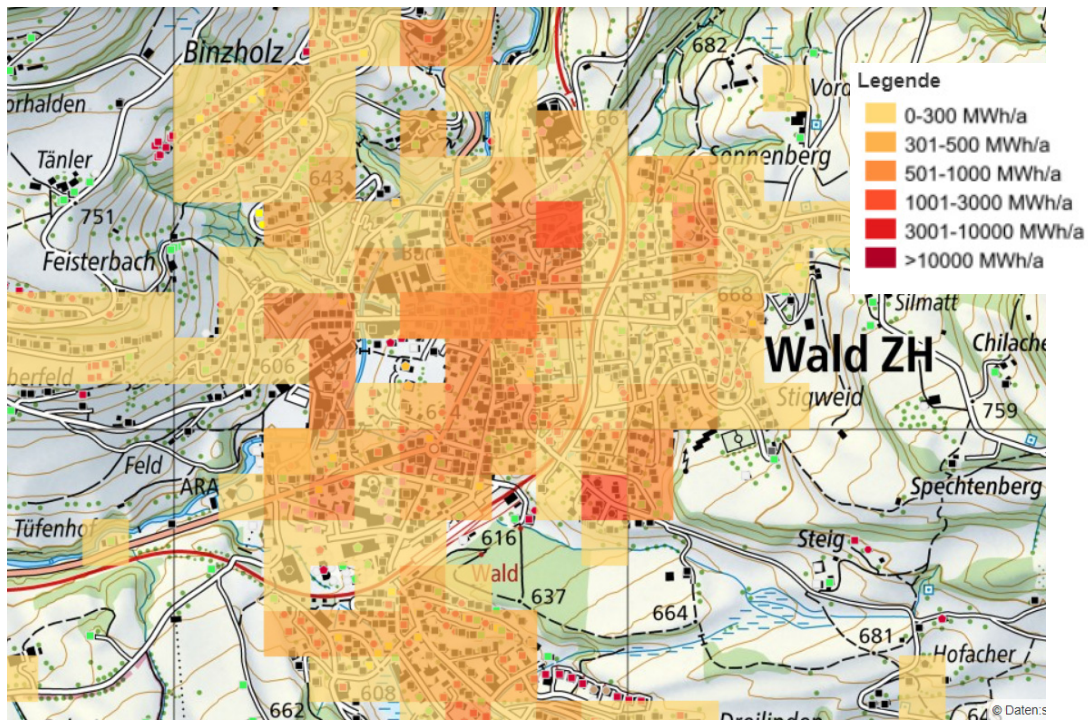


Abbildung 45: Wärmebedarfsdichte am Beispiel von Wald. Quelle: maps.admin.ch

Um einen Benchmark für Kostensenkungen des Asphaltkollektors zu erhalten wurden Kosten von anderen Regenerationsmethoden aus der Studie RegenOpt [10] analysiert und miteinander verglichen.

6.6 Kostenbewertung

Die Kosten des Asphaltkollektors waren in dem Projekt etwa 40% höher als geplant, obwohl der Kollektor 40 % kleiner ausfiel [7]. Die Gründe hierfür liegen im Pilotcharakter des Projekts und werden in Kapitel 5.5 entnommen werden.

Laut Bosshard+Flückiger beträgt das Einsparpotenzial für den Asphaltkollektor, die Verteilleitungen und die Verteilschächte etwa 40 %, wodurch sich die Gesamtkosten (exkl. Planung) um 35 % senken. Durch Optimierungen wie kleiner Rohrabstände können die Kosten ebenfalls noch mal um wenige Prozentpunkte reduziert werden. Damit wäre der Asphaltkollektor bei geeigneten Umständen eine der günstigsten Regenerationstechnologien von Erdwärmesonden. Muss jedoch erst bestehender Asphalt aufgerissen, Strassen oder Trottoirs gesperrt werden kommen hier weitere Kosten hinzu, welche bei alternativen Regenerationstechnologien nicht anfallen, siehe dazu auch Kapitel 7.2.

In Gebieten mit hoher Wärmedichte, in denen gemäss SIA 384/6:2021 eine Regeneration zwingend erforderlich ist, muss die Wirtschaftlichkeit nicht primär über Effizienzgewinne oder Einsparungen bei der Sondenlänge erreicht werden. In diesen Fällen genügt es, wenn Asphaltkollektoren kostengünstiger sind als alternative Regenerationsmethoden, um wirtschaftlich konkurrenzfähig zu sein. Der Vergleich mit der RegenOPT-Studie zeigt, dass der Kollektor vor allem für niedrigere Regenerationsgrade schon jetzt wirtschaftlich konkurrenzfähig ist. Berücksichtigt man das Einsparpotential, könnte diese Art der Regeneration zu den günstigen gehören.



7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass Asphaltkollektoren unter geeigneten Randbedingungen einen sehr guten Beitrag zur Regeneration von Erdsonden leisten können. Die energetische Wirkung ist bei geringen Regenerationsgraden und grosszügiger Sondenauslegung anhand der Polysun-Simulation mit der von unverglasten thermischen Kollektoren vergleichbar. Finanziell gibt es viele Parameter zu beachten. Wird eine Asphaltfläche jedoch unabhängig vom Kollektor saniert oder neu gebaut, kann die Regeneration mit dieser Art von Kollektoren eine bereit in der ausgeführten Version eine konkurrenzfähige Variante darstellen.

Die thermische Analyse wurde in ihrer Komplexität unterschätzt, weshalb nicht alle gewünschten Untersuchungen, vor allem quantitative, durchgeführt werden konnten. Die wichtigsten Erkenntnisse sind jedoch, dass es Optimierungspotenzial beim Verlegeabstand besteht. Die thermischen FEM-Analysen zeigen ebenfalls eine sehr starke Temperaturabhängigkeit. Eine Erhöhung oder Senkung der Betriebstemperatur um 5K ergab Ertragseinbussen von 48 % oder Gewinne von 44%.

Die Kosten des Kollektors waren in diesem Pilot-Projekt höher als erwartet, was durch ein verändertes Design und durch die hohen Sicherheitsfaktoren (bspw. Materialien mit höherer Qualität als nötig) zu Stande kamen. Dies aber auch, weil das Konzept das erste Mal so ungesetzt wurde. Es wird angenommen, dass die Kosten noch deutlich gesenkt werden können.

7.1 Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz von Asphaltkollektoren

- **Flächenlage und Nutzung:** Geeignet sind zusammenhängende, möglichst ganztägig besonnte Asphaltflächen (z. B. Parkplätze, Zufahrten, Hof- und Verkehrsflächen). Die simulierte Verschattung liegt bei dem Kollektor des EW-Wald bei etwa 20 %, die erbrachte Kollektorleistung lag mit 200 kWh/m²/a bis 220 kWh/m²/a immer noch deutlich über den Erwartungen.
- **Kollektoraufbau:** Ein thermisch leitfähiger Zementmörtel führt zu einer Kollektorleistung über den Erwartungen. Dadurch steigen jedoch auch die Kosten. Wenn die Kollektoren in der Kiesschicht verlegt werden, kann das die Kosten senken. Allerdings sinkt dann auch der Ertrag (in der thermischen Analyse über einen Zeitraum von fünf Tagen um etwa die Hälfte). Das bedeutet, dass eine grössere Fläche nötig ist, was wiederum die Kosten für Anschlussleitungen und Verteilschächte in die Höhe treibt
- **Hydraulik und Regelung:** Niedrige Fluidtemperaturen, besonders nachts, erhöhen den Ertrag. Der Verlegabstand sollte möglichst eng gewählt werden, um pro m² Asphalt möglichst viel Energie rauszuholen. Ein einfaches Regelsystem (An/Aus) kann ausreichend sein und reduziert Komplexität und Kosten.
- **Systemintegration mit EWS:** Kurze Wege zwischen Kollektorfläche und Erdsondenfeld sind vorteilhaft, da die Temperatur im Kollektor nur leicht angehoben wird und Wärmeverluste so gut es geht zu vermeiden sind. Auch der Druckabfall resp. Pumpaufwand kann dadurch reduziert werden. Die Polysun-Simulationen zeigen eine umso höhere Regenerationsrate, je stärker die Erdsonde auskühlt. Grosszügig dimensionierte Sonden führen zu einem höheren Ertrag der Asphaltkollektoren, da diese mit steigender Rücklauftemperatur überproportional an Effizienz verlieren.



- **Betrieb & Monitoring:** Ein einfaches Monitoring (Temperaturen, Volumenstrom, Leistungsbilanz) ist wie bei allen hydraulischen Systemen wichtig, um mögliche Fehler und Störgrößen aufzufinden und zu analysieren. Der Betrieb des Kollektors in Wald zeigt im Vergleich zu anderen hydraulischen Energiesystemen jedoch ein sehr robustes und stabiles Verhalten was nicht selbstverständlich ist (vgl P&D Obfelden, wo Erdsonden mit einer Mischung aus PVT und unabgedeckten Kollektoren regeneriert werden [11]).

7.2 Preisbestimmende Restriktionen

Unter der Voraussetzung, dass eine Regeneration der Erdsonden durchgeführt werden soll, sind folgende Aspekte zu beachten:

- **Einbau:** Asphaltkollektoren können wirtschaftlich attraktiv werden, wenn Aufbruch und Erneuerung der Fläche ohnehin anstehen (Unterhalt/End-of-Life, Leitungs- oder Kabelverlegung). Die Lebensdauer der aus Asphalt bestehenden Deckschicht (befahrbar) beträgt 20 – 25 Jahre, die Lebensdauer der sich darunter befindlichen Tragschicht 40 Jahre [5]. Die Lebensdauer eines Alu-Verbundrohres liegt mit 50 Jahren somit über der Lebensdauer von Asphalt und Tragschicht.

Anderenfalls sind zusätzlich Asphaltkosten in Höhe von 95 CHF – 115 CHF hinzuzurechnen. Bei kleineren Flächen liegen die spezifischen Kosten tendenziell höher [5].

- **Betriebskosten:** Hier spielt vor allem die Pumpenergie eine Rolle, welche jedoch für alle Regenerationstechnologien anfällt. Die hier verwendete Pumpe hat eine mittlere Leistungsaufnahme von 212 W. Bei einem Betrieb von 7 Monaten entspricht dies etwa 1'000 kWh/a. Eine Leckageüberwachung mit einem Sicherheitsrohrsystem wäre nicht wirtschaftlich [1]. Eine Überwachung anhand des Drucks wäre denkbar, jedoch kann so der Ort der Leckage nicht auffindig gemacht werden.

7.3 Schlussfolgerungen für Planung und Auslegung.

- **Synergien nutzen:** Projekte priorisieren, bei denen die Asphaltfläche ohnehin erneuert wird.
- **Tiefe Betriebstemperaturen wählen:** Die Effizienz von Asphaltkollektoren ist stark temperaturabhängig. Daher sind Asphaltkollektoren gegenüber anderen Regenerationstechnologien bei sehr tiefen Betriebstemperaturen konkurrenzfähig. Diese treten bei geringen Regenerationsgraden oder grosszügig ausgelegten Sonden auf. Bei knapp ausgelegten Sondenfeldern mit hohen Regenerationsgraden sind Asphaltkollektoren bezogen auf die Gesamt-Wärmegestehungskosten teurer als andere Technologien.
- **Simulation:** in diesem Projekt werden Werte zur Parametrisierung des unabgedeckten Kollektormodells von Polysun gegeben. Diese können zur dynamischen Simulation und Auslegung von neuen Anlagen eingesetzt werden.
- **Möglichst einfach planen:** Ausreichende Kollektorfläche und gute Besonnung reduzieren Komplexität und Regelaufwand. Weitere Regenerationsquellen frühzeitig identifizieren (z. B: aktives Kühlen) für optimale Auslegung.
- **Zielgrösse wählen;** Wirtschaftlich von Vorteil sind in erster Linie reduzierte Sondenmeter bei einer Regeneration. Je nach verfügbarer Asphaltfläche und gewünschtem Regenerationsgrad kann auch eine Verlegung in der Kiesschicht angedacht werden, was die Kosten reduzieren kann. Je nach weiteren verfügbaren Flächen (bspw. Hausdächer) können andere



Regenerationstechnologien günstiger sein. Erhöhte Lebensqualität durch geringer Oberflächentemperaturen lassen sich schwer beziffern

7.4 Multiplikationspotential

Die aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine bessere Einschätzung der Umsetzbarkeit des Asphaltkollektors. Abgesehen von den finanziellen Herausforderungen ist vor allem die verfügbare Asphaltfläche ein entscheidendes Kriterium für Asphaltkollektoren. In der RegenOpt-Studie wurde für den Vergleich von Regenerationstechnologien ein repräsentatives Mehrfamilienhaus (MFH) mit 1.200 m² Wohnfläche und einem spezifischen Heizenergiebedarf von 60 kWh/m²a (Neubau oder energetisch saniert) gewählt, weil die dem typischen Gebäudebestand von Quartieren mit zukünftigem Regenerationsbedarf entspricht. Ein solches MFH wäre auch ein typisches Anwendungsbeispiel für die Regeneration mit Asphaltkollektoren. In Einfamilienhausquartieren ist die Bedarfsdichte gering und es können Erdwärmesonden auch ohne Regeneration grossflächig eingesetzt werden. Die RegenOpt-Studie hat gezeigt, dass aus wirtschaftlicher Sicht ist auch in sehr dicht bebauten Quartieren eine 100-prozentige Regeneration nicht optimal ist. Anlagen mit einer Kollektorfläche von 60 m² und etwas verlängerten Sonden weisen deutlich tiefere Wärmegestehungskosten aus als Anlagen mit grossen Kollektorflächen. Bei dieser geringen Kollektorfläche und dem entsprechend niedrigen Regenerationsgraden und Betriebstemperaturen ist der Asphaltkollektor bereits mit den in Wald erreichten Kosten wirtschaftlich konkurrenzfähig gegenüber anderen Regenerationstechnologien.

In einem urbanen Raum sind vor allem Strassen und Trottoirs potenzielle Asphaltflächen, die für den Einsatz von Kollektoren infrage kommen. Bei einer angenommenen Strassenbreite von 5 m und einer Grundstückslänge von 20 m würden bereits 100 m² Kollektorfläche bereitstehen, bei Verwendung der halben Strassenbreite (die andere Hälfte wird vom gegenüberliegenden Haus genutzt) wären es 50 m². Bei einer Trottoirbreite von 2.0 m stünden bereits 40 m² zur Verfügung. Eine Tiefgarageneinfahrt kann etwa 20 m² bereitstellen. Ein Parkplatz (bspw. ein Besucherparkplatz) bietet etwa 11,5 m² [12]. Es sind also selbst in Städten in der Regel mehr Flächen vorhanden, als benötigt werden (Voraussetzung: Verschattung nicht allzu hoch). Da die Lebensdauer der Kollektoren mit 50 Jahren höher ist als die der Asphaltflächen, kann ein Ein- und Ausbau realisiert werden, ohne dass durch die Asphaltierungsarbeiten Mehrkosten entstehen, sofern Kollektoreinbau und Asphaltsanierung auf den gleichen Zeitraum fallen und für die Tragschicht Zementmörtel verwendet werden kann. Zahlen zu jährlichen Asphalterneuerungen konnten von den Kantonen nicht erhalten werden.

7.5 Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass Asphaltkollektoren, die in den darunterliegenden Schichten installiert werden, in der Lage sind, genügend Energie für eine Regeneration bereitzustellen und auch wirtschaftlich eine gute Alternative zu alternativen Regenerationstechnologien sind. Im Vergleich zu herkömmlichen Asphaltkollektoren bleiben die Asphaltflächen recyclefähig, was mit im Asphalt eingegossen Rohren theoretisch möglich aber wirtschaftlich nicht interessant ist. Bei rezyklierten Asphalt muss der Fremdanteil an sonstige Materialien (Metalle, Holz, Kunststoffe, Gummi, sowie Gips) unter 0.3 Massenprozent liegen [13]. Es gibt zwar keine Pflicht Asphalt zu rezyklieren, mineralische Rückbau- und Abbruchmaterialien (zu denen auch Ausbauasphalt gehört) sollen aber — wenn möglich — als Recyclingbaustoffe wiederverwendet werden, statt deponiert zu werden [14].

Mit zunehmender Felderfahrung lassen sich die Spezifikationen voraussichtlich vereinfachen (Standarddetails, geprüfte Einbauten, typische Abstände) und die Kosten deutlich senken. Interessant wäre beispielsweise eine Umsetzung in einer Quartiersstrasse mit angrenzenden Wohnhäusern, die



durch Wärmepumpensysteme mit Erdsonde beheizt werden, wie in der Potenzialstudie zu Asphaltkollektoren von Kriesi oder in RegenOpt skizziert. Neben klassischen Strassenflächen weisen auch Fusswege, Begegnungszonen, Parkierungsflächen sowie Erschliessungsflächen in Überbauungen ein grosses Potenzial auf und sollten untersucht werden. Das thermische Modell und die Polysun-Simulation des SPF können dazu verwendet werden den Aufbau weiter zu optimieren und die gesamte Anlage genauer zu planen. Bis dato gibt es jedoch keine konkreten Pläne für eine weitere Umsetzung.

Für die Bekanntheit dieser Regenerationstechnologie ist eine gezielte Diffusions- und Informationsarbeit von zentraler Bedeutung. Aufgrund der begrenzten und projektspezifischen Einsatzmöglichkeiten von Asphaltkollektoren ist es entscheidend, dass Gemeinden, Planungsbüros, Energieversorger und Tiefbauämter frühzeitig über die Technologie und ihre Weiterentwicklung informiert werden. Nur wenn das Potenzial bereits in der Phase der Projektierung von Sanierungs- und Neubauvorhaben berücksichtigt wird, können die wenigen Anwendungsfälle, in denen Asphaltflächen entstehen oder saniert werden und in denen eine Regeneration von Erdwärmesonden realisiert werden soll, auch umgesetzt werden. Ein wichtiger Meilenstein hierfür war die Auszeichnung des EW-Wald mit dem Schweizer Solarpreis 2025 (Kategorie Jury Spezial Innovations-Preis) für den Asphaltkollektor [15]. Die Ergebnisse werden bei passenden Konferenzen präsentiert beispielsweise am Brenet-Statusseminar oder der CISBAT, einen konkreten Termin gibt es noch nicht.



8 Literaturverzeichnis

- [1] R. Kriesi, Roher, Ernst, Flückiger, Dieter, Streiff, Michael, Potentialabschätzung Asphaltkollektoren, Massnahme VR4 des Massnahmenplans Verminderung der Treibhausgase, AWEL, Abteilung Energie, www.energie.zh.ch, Zürich, 2019.
https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/energie/pilotprojekte/studie_potenzialabschaetzung_asphaltkollektoren.pdf.
- [2] (PDF) A critical review on large-scale research prototypes and actual projects of hydronic asphalt pavement systems, ResearchGate (n.d.). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.010>.
- [3] Bernard, Matthey, T. Accumulateurs saisonniers souterrains de chaleur., (2011).
- [4] Haslinger, Edith, Sozial100%Erneuerbar, (2024).
https://projekte.ffg.at/projekt/4227269?utm_source=chatgpt.com (accessed August 26, 2025).
- [5] Noger, Philipp, Grobökobilanz von Freiraumelementen, (2022). <https://www.stadt-zuerich.ch/de/aktuell/publikationen/2022/groboekobilanz-freiraumelementen-studie.html> (accessed August 24, 2025).
- [6] P. Persdorf, F. Ruesch, M.Y. Haller, Geothermische Abkühlung in Städten - verschiedene Regenerationsmethoden im Vergleich, in: 26. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, OTTI e.V., Regensburg, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany, 2016. p:\SPF-Publikationen\2016\OTTI TSE\Patrick Persdorf_Erdwärmesonden\Paper\Paper OTTI_2016.pdf.
- [7] Kriesi Energie GmbH, Ruedi Kriesi, Asphaltkollektor EW Wald AG Zwischenbericht zum Stand der Arbeiten Dezember 2023, Baudirektion Kanton Zürich Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Abteilung Energie, Zürich, 2023. https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/energie/pilotprojekte/asphaltkollektor_ew_wald_zwischenbericht_2023_12.pdf.
- [8] DIN 4108-4 | 2020-11, (n.d.).
- [9] Wärmeleitfähigkeit von Baumaterial, (2025). https://www.schweizer-fn.de/stoff/wleit_isolierung/wleit_isolierung.php (accessed June 17, 2025).
- [10] P. Persdorf, F. Ruesch, M. Haller, RegenOpt Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: energetische und ökonomische Analysen, Stadt Zürich Amt für Hochbauten AHB, Zürich, 2015.
- [11] M. Bättschmann, I. Bosshard, S. Crameri, A. Schmitt, N. Dimri, D. Zenhäusern, Pilot- und Demonstrationsprojekt Sentmatt - Emissionsfreie Wärmeerzeugung mit tiefer Erdwärmesonde, effizienter Niederhub-Wärmepumpe und optimierter Wärmeverteilung, Allianz 2SOL, Schlieren, 2022.
- [12] Amt für technische Anlagen und Lufthygiene (ATAL), Wegleitung zur Regelung des Parkplatz-Bedarfs in kommunalen Erlassen, (1997). https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/luft-strahlung/luftschadstoffquellen/verkehr/vermeiden/pp_wegleitung.pdf.
- [13] Re-Center Muttentz AG, Erläuterung und Zusammensetzung von Recyclingbaustoffen, (2025). https://re-center.ch/site/assets/files/1360/erlaeuterung_zusammensetzung_recyclingbaustoffe_re-center_muttentz_ag.pdf.
- [14] David Hiltbrunner, Verwertung mineralischer Rückbaumaterialien, (2023). <https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/PgMRPT6fabPe/verwertung-mineralischer-rueckbaumaterialien.pdf>.
- [15] Solar Agentur, 35. Schweizer Solarpreis Norman Foster Solar Award PlusEnergieBau®-Solarpreis, (2025) 50.



9 Anhang

9.1 Simulationsergebnisse

9.1.1 Bilder Thermische Analyse

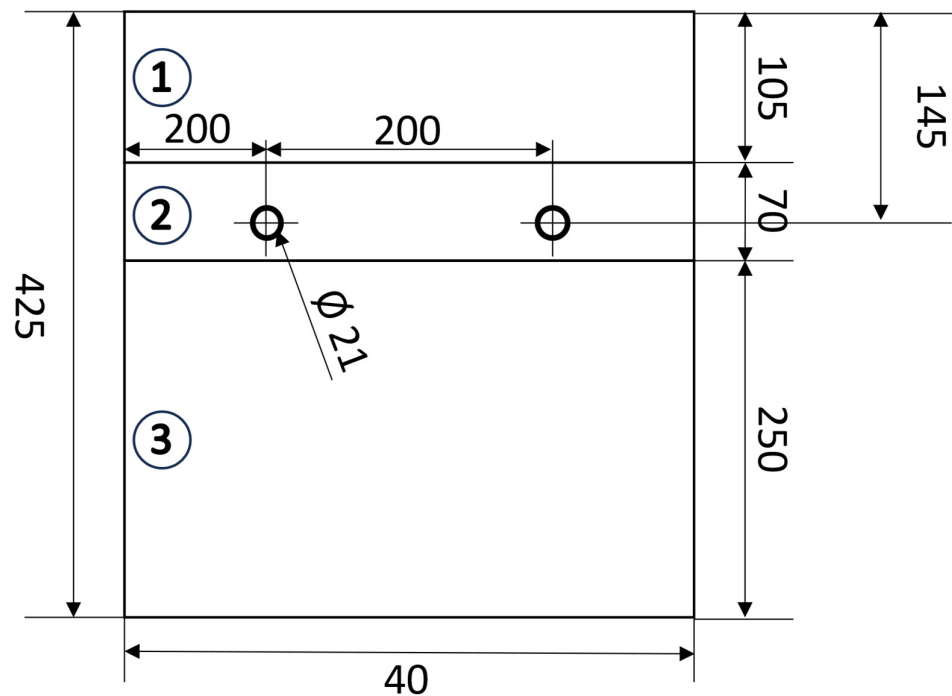


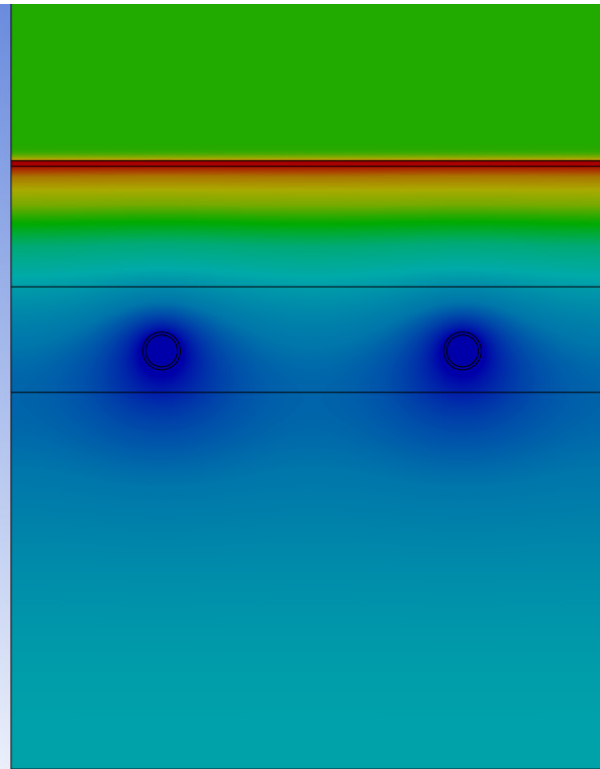
Abbildung 46: CAD-Modell Asphaltkollektor (Front-Ansicht). Schicht 1: Asphalt, Schicht 2: Zementmörtel, Schicht 3: ungebundenes Kiesgemisch



E: Strahlung 12 zyklen
Temperatur Gesamt
Typ: Temperatur
Einheit: °C
Zeit: 2.6803e+005 s

26.41 Max
25.364
24.319
23.273
22.228
21.182
20.137
19.091
18.046
17 Min

Ansys
2023 R2
TEACHING



0.00 150.00 300.00 (mm)
75.00 225.00

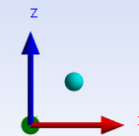


Abbildung 47: Momentaufnahme aus der thermischen Analyse, Asphaltkollektor mit Luftschicht, Aufwärmphase

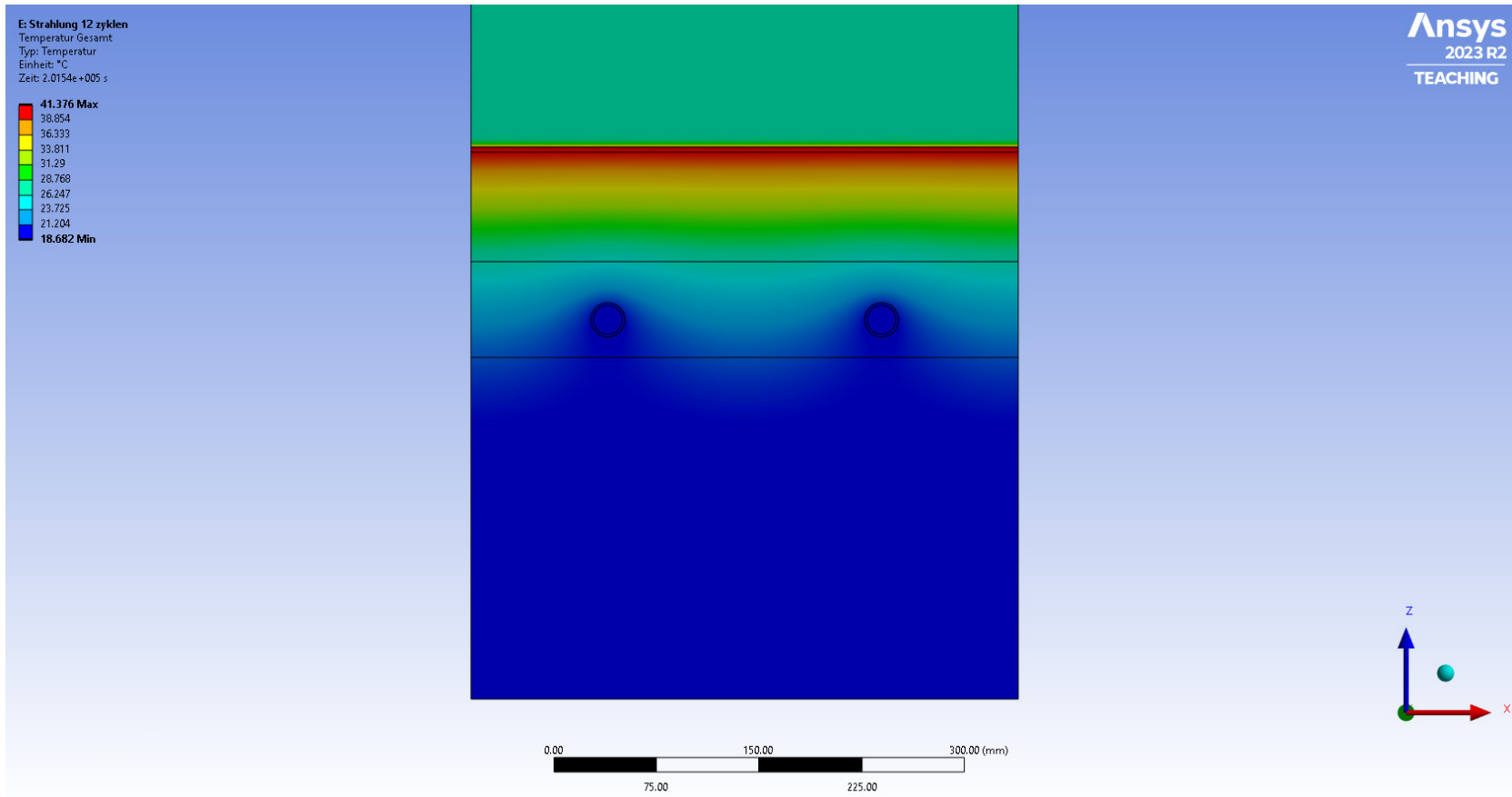


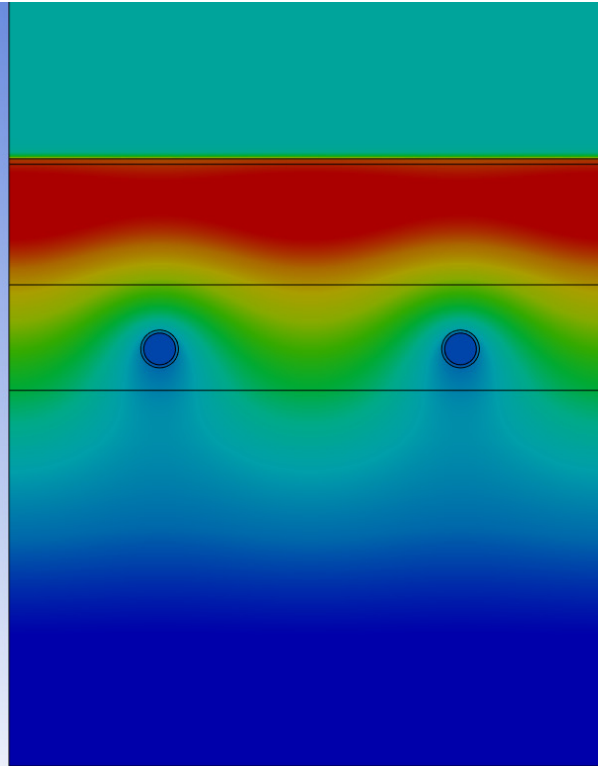
Abbildung 48:Abbildung 39: Momentaufnahme aus der thermischen Analyse, Asphaltkollektor mit Luftschicht, Mittagspeak



E: Strahlung 12 zyklen
Temperatur Gesamt
Typ: Temperatur
Einheit: °C
Zeit: 2.177e+005 s
Benutzerdefiniert

27.8 Max
27
26.2
25.4
24.6
23.7
22.9
22.1
21.3
20.5
19.7 Min

Ansys
2023 R2
TEACHING



0.00 150.00 300.00 (mm)
75.00 225.00

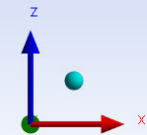


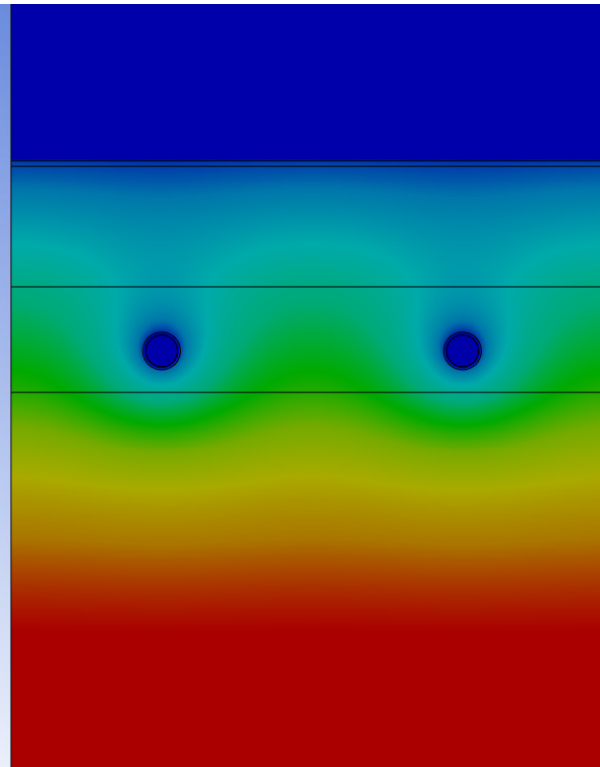
Abbildung 49: Abbildung 50: Momentaufnahme aus der thermischen Analyse, Asphaltkollektor mit Luftschicht, Abkühlphase



E: Strahlung 12 zyklen
Temperatur Gesamt
Typ: Temperatur
Einheit: °C
Zeit: 2.4818e+005 s

20.381 Max
20.006
19.63
19.254
18.879
18.503
18.127
17.751
17.376
17 Min

Ansys
2023 R2
TEACHING



0.00 150.00 300.00 (mm)
75.00 225.00

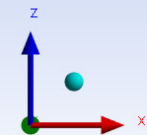


Abbildung 51: Momentaufnahme aus der thermischen Analyse, Asphaltkollektor mit Luftschicht, Asphalt ausgekühlt

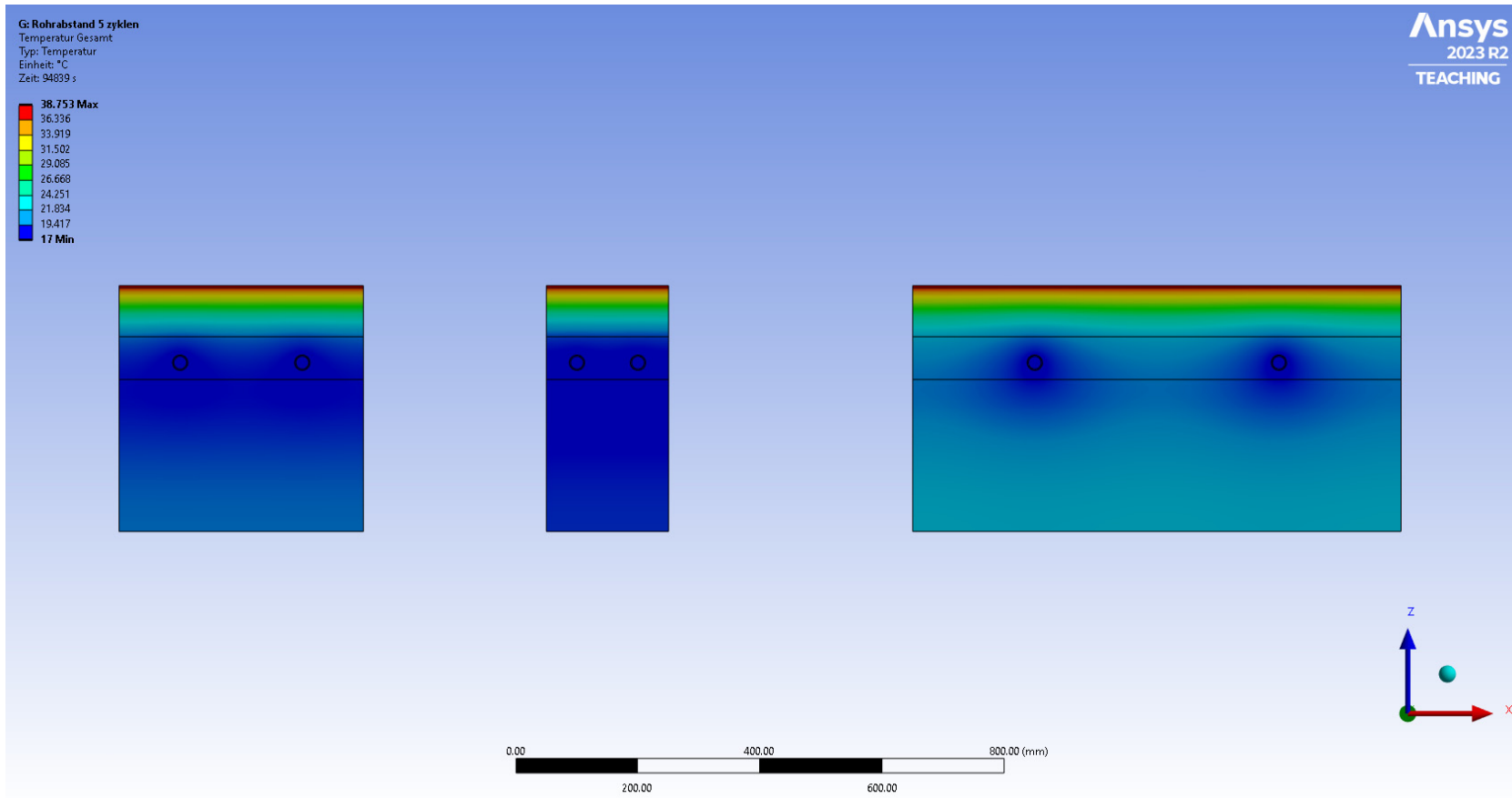


Abbildung 52: Momentaufnahme aus der thermischen Analyse, Asphaltkollektor mit unterschiedlichem Rohrabstand, Aufwärmphase

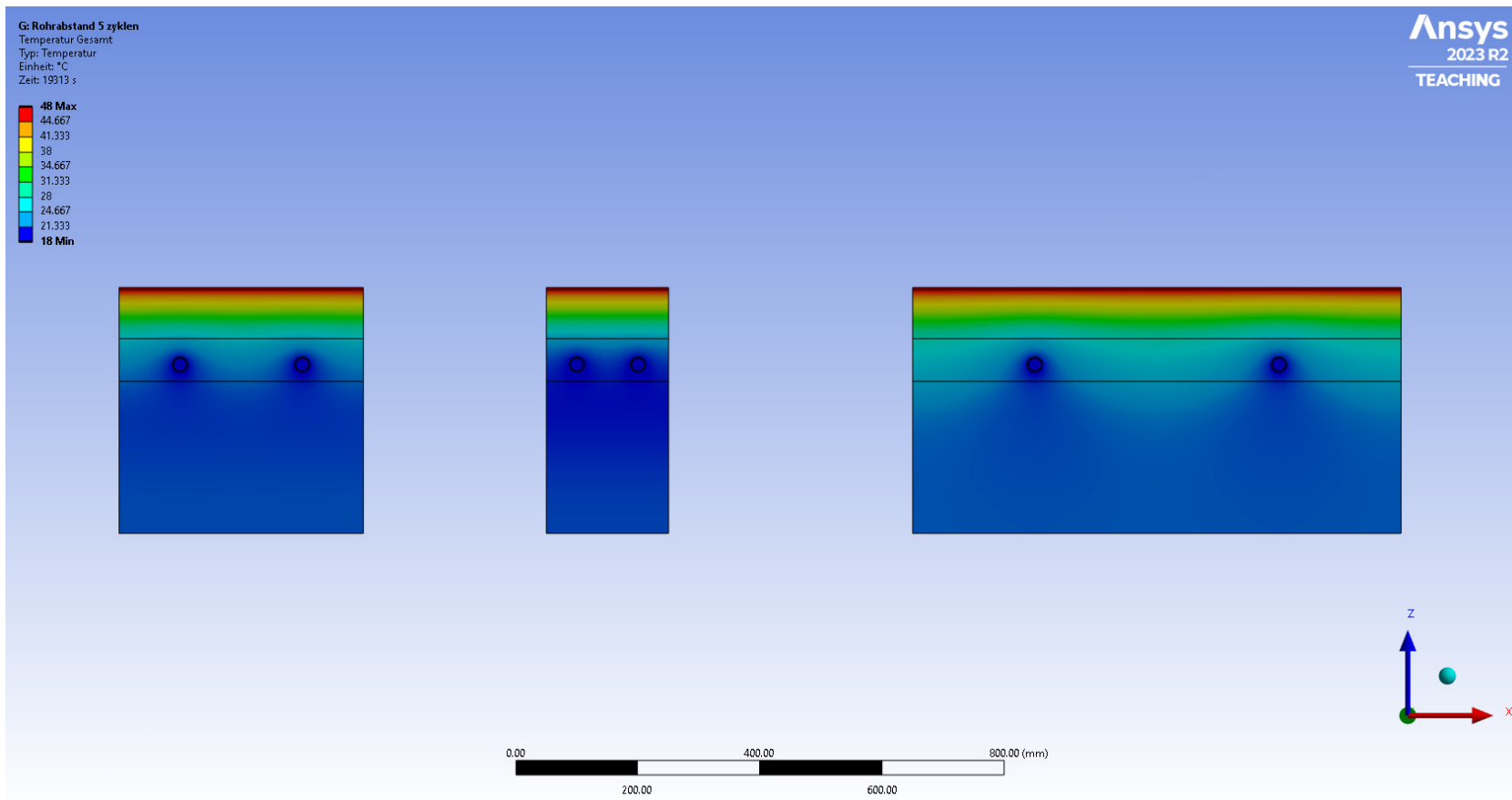


Abbildung 53: Momentaufnahme aus der thermischen Analyse, Asphaltkollektor mit unterschiedlichem Rohrabstand, Mittag

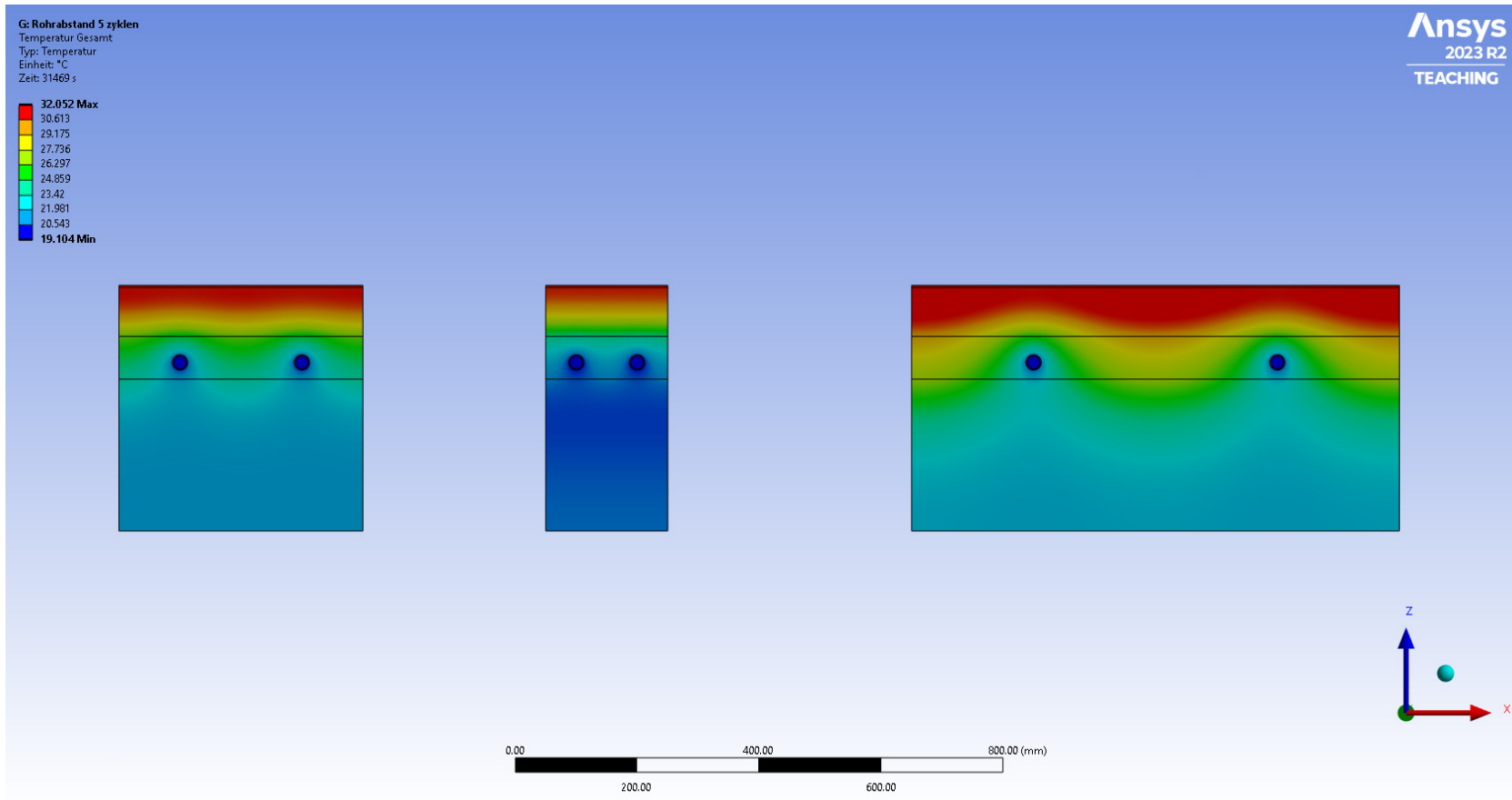


Abbildung 54: Momentaufnahme aus der thermischen Analyse, Asphaltkollektor mit unterschiedlichem Rohrabstand, Abkühlphase

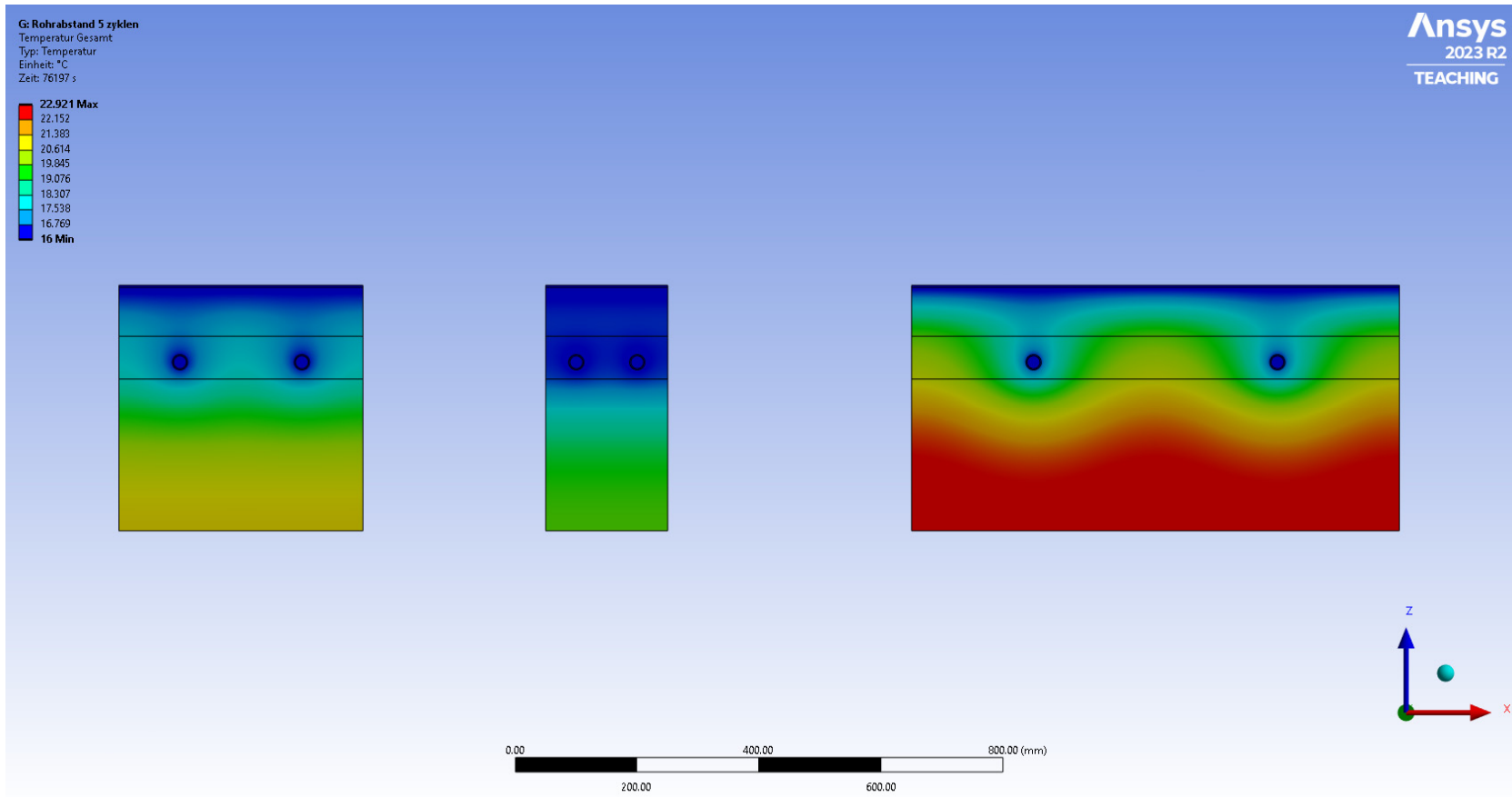


Abbildung 55: Momentaufnahme aus der thermischen Analyse, Asphaltkollektor mit unterschiedlichem Rohrabstand, Asphalt ausgekühlt



9.2 Bilder Installation Asphaltkollektor



Abbildung 56: Bohrung der Löcher für die Temperatursensoren unterhalb des Asphaltkollektors



Abbildung 57: Einbetonierung der Asphaltkollektoren



Abbildung 58: Drohnenaufnahme Asphaltkollektor



Abbildung 59: Asphaltierung



Abbildung 60: Überprüfung der Widerstandswerte der PT1000-Fühler, angeschlossen an den LoRaWAN-Geräten



Abbildung 61: Infrarotsensor zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Asphalts und Wetterstation



9.3 Datenblätter

Datenblatt Wärmepumpe Ochsner Terra 40. 32 – 40 kW

OCHSNER WÄRMEPUMPEN | ERDREICH SOLE

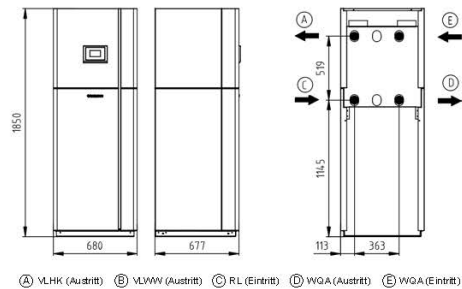
TERRA 40 HPLA

MONOVALENTES HEIZSYSTEM
MIT WÄRMEQUELLE SOLE

BESTELLNUMMER: 221610

BAUREIHE: M6

TV MAX. 65 °C



GERÄTEDATEN

Abmessungen HxBxT	[mm]	1900x680x680
Anschluss Hydraulik	[Zoll]	2"
Gewicht	[kg]	228
Farbe Gehäuse		weiß/anthrazit

TECHNISCHE DATEN

Phasen/Nennspannung/Frequenz	[~]/[V]/[Hz]	3/400/50
Leistungsfaktor cos φ		0,80
Absicherung (Auslösekennlinie „C“)	[A]	40
Max. Betriebsstrom	[A]	31,00
Max. Anlaufstrom / max. mit Entlastung	[A]	158,00 / 79,00
Schalleistungspegel/Schalldruckpegel (in 1m)	[dBA]	54,00 / 46,00

LEISTUNGSDATEN HEIZBETRIEB (nach EN 14511)

Normpunkt SO/W55

Heizleistung	[kW]	40,40
Leistungsaufnahme ges. / Betriebsstrom	[kW]/[A]	8,60 / 15,60
Leistungszahl		4,70

Betriebspunkt SO/W50

Heizleistung	[kW]	37,50
Leistungsaufnahme ges. / Betriebsstrom	[kW]/[A]	11,10 / 20,20
Leistungszahl		3,40

Betriebspunkt SO/W60

Heizleistung	[kW]	35,50
Leistungsaufnahme ges. / Betriebsstrom	[kW]/[A]	13,40 / 24,30
Leistungszahl		2,60

KONDENSATOR

Bauart	Plattenwärme- tauscher	
Werkstoff	Edelstahl 1.4401	
Max. Betriebsdruck Kältemittel	[bar]	45
Max. Betriebsdruck Wärmeträger	[bar]	10
Wärmeträger-Temperaturdifferenz	[K]	5
Einsatzbereich	[°C]	65
Wärmeträger	Wasser	
Prüfdruck	[bar]	51
Wärmeträger-Volumenstrom	[m³/h]	6,90
Interne Druckdifferenz	[mbar]	40
Volumenstrommessteil (VMT)	extern	VMT-DN50 kvs40
Umwälzpumpe Wärmenutzung (WNA)	extern	Stratos 40/1-8
Restförderhöhe I WNA extern	[mbar]	650 (inkl. VMT)

KÄLTEKREISLAUF

Arbeitsmittel	R410A	
Kältemittelfüllmenge	[kg]	10,4

VERDICHTER

Bauart	Scroll
Leistungsstufen	1
Drehzahl	[UpM] 2900
Spannung/Frequenz	[V]/[Hz] 400/50

VERDAMPFER

Bauart	Plattenwärmetauscher	
Werkstoff	Edelstahl 1.4401	
Anzahl	[Stk.]	1
Max. Betriebsdruck Wärmeträger	[bar]	6
Max. Betriebsdruck Kältemittel	[bar]	12
Wärmeträger-Temperaturdifferenz	[K]	3
Einsatzbereich	[°C]	6/120
Wärmeträger	Sole max. 30%	
Prüfdruck	[bar]	51
Wärmeträger-Volumenstrom	[m³/h]	9,99
Interne Druckdifferenz	[mbar]	90
Volumenstrommessteil (VMT)	extern	VMT-DN50 kvs40
Umwälzpumpe Wärmequelle (WGA)	extern	Stratos 40/1-12
Restförderhöhe I WGA extern	[mbar]	757 (inkl. VMT)

Hydraulik-Variante	E-Heizstab		3-Wege-Umschaltmodul	
	intern	extern	intern	extern
M2-1 M4-1	x		x	
M2-2 M4-2		x	x	
M2-3 M4-3	x			x
M2-4 M4-4 M6		x		x

www.ochsner.com

Stand: 2019-05-21

OCHSNER Wärmepumpen sind im Sinne der Maschinenrichtlinie Hausaltgeräte



Datenblatt Wärmepumpe Ochsner Terra 16. 11 – 16 kW

OCHSNER
WÄRMEPUMPEN

Model:				TERRA 14			
Luft-Wasser-Wärmepumpe:				Nein			
Wasser-Wasser-Wärmepumpe:				Nein			
Sole-Wasser-Wärmepumpe:				Ja			
Direktverdampfung-Wasser-Wärmepumpe:				Nein			
Niedertemperatur-Wärmepumpe:				Nein			
Mit Zusatzheizgerät:				Nein			
Kombiheizgerät mit Wärmepumpe:				Nein			
Temperaturanwendung				mittel			
Klimaverhältnisse				durchschnittlich			

Angabe	Symbol	Wert	Einheit
Wärmenennleistung (*)	Praded	12	kW
Angegebene Leistung für Teillast bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur Tj			
Tj = -7 °C	Pdh	11,7	kW
Tj = +2 °C	Pdh	12,3	kW
Tj = +7 °C	Pdh	12,6	kW
Tj = +12 °C	Pdh	13,0	kW
Tj = Bivalenztemperatur	Pdh	11,6	kW
Tj = Betriebstemperaturgrenzwert	Pdh	11,6	kW
Für Luft-Wasser-Wärmepumpen: Tj = -15 °C (wenn TOL< -20 °C)	Pdh	11,6	kW
Bivalenztemperatur	Tbiv	-10	°C
Leistungsaufnahme „Kompressor aus“		0	W
Stromverbrauch in anderen Betriebsarten als dem Betriebszustand			
Aus-Zustand	Poff	20	kW
Thermostat-aus-Zustand	Pto	20	kW
Bereitschaftszustand	Psb	20	kW
Betriebszustand mit Kurbelgehäuseheizung	Pck	0	kW
Sonstige Elemente			
Leistungssteuerung	fest		
Schalleistungspegel	innen	50,0	dB
	außen	—	
Jährlicher Energieverbrauch	QHE		kWh
Kombiheizgerät mit Wärmepumpe			
Angegebenes Lastprofil	—		
Täglicher Stromverbrauch	Qelec	—	kWh

Angabe	Symbol	Wert	Einheit
Jahreszeitbedingte Raumheizungs-Energieeffizienz	ηs	131	%
Angegebene Leistungszahl oder Heizzahl für Teillast bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur Tj			
Tj = -7 °C	COPd	3,86	
Tj = +2 °C	COPd	3,44	
Tj = +7 °C	COPd	3,90	
Tj = +12 °C	COPd	4,45	
Tj = Bivalenztemperatur	COPd	2,72	
Tj = Betriebstemperaturgrenzwert	COPd	2,72	
Für Luft-Wasser-Wärmepumpen: Tj = -15 °C (wenn TOL< -20 °C)	COPd	2,72	
Für Luft-Wasser-Wärmepumpen: Betriebsgrenzwert-Temperatur	TOL	-10	°C
Grenzwert der Betriebstemperatur des Heizwassers	WTOL	65	°C
Zusatzheizgerät			
Wärmenennleistung (*)	Psup	0,00	kW
Art der Energiezufuhr	elektrisch		
Für Luft-Wasser-Wärmepumpen: Nenn-Luftdurchsatz, außen			
	—	—	m³/h
Für Wasser/Sole-Wasser-Wärmepumpen: Wasser- oder Sole-Nenndurchsatz			
	—	3,5	m³/h
Warmwasserbereitungs-Energieeffizienz			
	ηwh	—	%
Täglicher Brennstoffverbrauch	Qfuel	—	kWh

Kontakt	OCHSNER Wärmepumpen GmbH, Ochsner-Straße 1, A-3350 Haag
---------	---

(*) Für Heizgeräte und Kombiheizgeräte mit Wärmepumpe ist die Wärmenennleistung Praded gleich der Auslegungslast im Heizbetrieb Pdesignh und die Wärmenennleistung eines Zusatzheizgerätes Psup gleich der zusätzlichen Heizleistung sup(Tj).



Datenblatt HakaGerodur Verrohrung



ANWENDUNGSBEREICHE

1-SCHICHTIGE AUSFÜHRUNG

- Trinkwasserinstallation

5-SCHICHTIGE AUSFÜHRUNG

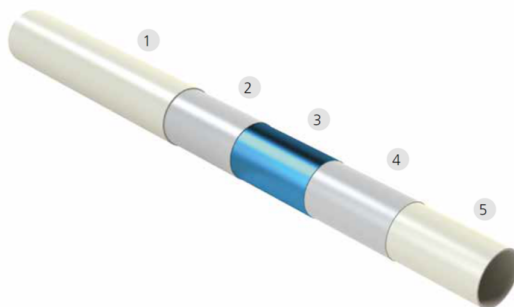
- Flächenheizung
- Kühlsystem
- Heizkörperanbindung

VORTEILE

- hohe Temperatur- und Druckbeständigkeit
- korrosions- und inkrustationsbeständig
- beständig gegen zahlreiche Chemikalien
- sauerstoffdicht (5-Schicht-Rohr) nach DIN 4726
- hohe Elastizität

SCHICHTAUFBAU

- 1 Aussenschicht aus PE-Xc
- 2 Haftvermittler
- 3 EVOH-Sauerstoff Sperrschicht
- 4 Haftvermittler
- 5 Innenrohr aus PE-Xc



EIGENSCHAFTEN

Rohraussendurchmesser [mm]	8.0	10.0	12.0	13.6	14.0	15.6	16.0	16.0	17.0	18.0	20.0	25.0
Rohrwandstärke [mm]	1.0	1.3	1.4	1.8	2.0	1.8	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.3
Rohrinnendurchmesser [mm]	6.0	7.4	9.2	10.0	10.0	12.0	13.0	12.0	13.0	14.0	16.0	20.4
Kleinster Biegeradius [mm] ohne Biegefeder: 5D	40	50	60	68	70	78	80	80	85	90	100	125
Kleinster Biegeradius [mm] mit Biegehilfe: 2D	16	20	24	27.2	28	31.2	32	32	34	36	40	50
Metergewicht [g / m]	22	35	46	66	74	77	67	87	93	99	112	162
Wasserinhalt [Liter / m]	0.028	0.043	0.066	0.079	0.079	0.113	0.113	0.113	0.113	0.154	0.201	0.327
Maximale Betriebstemperatur, über 50 Jahre [°C]	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Maximale Betriebstemperatur, max. 1 Jahr [°C]	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Notlaufemperatur, max. 100 Stunden [°C]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Maximaler Betriebsdruck, Anw.-Klassen 4/5 [bar]	8	8	8	6	8	6	6	8	8	8	6	6

Stand 22.12.22 / Irrtümer und Änderungen vorbehalten.

Weitere Produkteigenschaften finden Sie auf unserer Website. Andere Dimensionen auf Anfrage.

Zulassungen / Zertifizierungen

Unser Portfolio wird laufend erweitert.

Den aktuellen Status finden Sie auf unserer Website.

HakaGerodur AG
Mooswiesstrasse 67
CH-9201 Gossau SG

sekretariat@hakagerodur.ch
Tel. +41 (0)71 388 94 94
www.hakagerodur.ch

