



Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft

Asphaltkollektor **EW Wald AG**

Zwischenbericht zum Stand der Arbeiten
Dezember 2023





Impressum

Dezember 2023

| | |
|--|--|
| Projekt / Subventions- empfangende | EW Wald AG, Energieversorgungs-Unternehmen, www.ew-wald.ch Kriesi Energie GmbH, Wädenswil, Ingenieurbüro für Energiekonzepte und –systeme, www.kriesi-energie.ch Flückiger und Bosshard AG, Zürich, Ingenieurbüro für Hoch- und Tiefbau, www.fbag.ch |
| Subventions- geberin | Baudirektion Kanton Zürich Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Abteilung Energie Stampfenbachstrasse 12, 8090 Zürich www.energie.zh.ch , energie@bd.zh.ch |
| Autor | Kriesi Energie GmbH, Ruedi Kriesi |
| Bezugsquelle | AWEL, Abteilung Energie, www.zh.ch/en-pp |
| Zitierempfehlung | AWEL, Abteilung Energie (Hrsg.) Asphaltkollektor EW Wald AG, En-PP 21-10 Zwischenbericht zum Stand der Arbeiten, Dezember 2023 Kriesi Energie GmbH, Wädenswil (Verfasser) |

Asphaltkollektor EW Wald AG, Neubau Betriebsgebäude

Im Auftrag der Abteilung Energie des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft

Zwischenbericht zum Stand der Arbeiten, Dezember 2023

Auftragnehmer:

- Kriesi Energie GmbH, Ruedi Kriesi, Dr. sc. techn., Koordination, Messungen, Bericht
- Flückiger + Bosshard AG, Michael Streiff, Kollektorkonstruktion
- EW Wald AG, Daniel Diggelmann, Bauherrenvertreter

Inhalt:

Zusammenfassung

1. Einführung
2. Anordnung der Felder des Asphaltkollektors
3. Einbindung des Asphaltkollektors in die Haustechnik
 - a. Hydraulik, Schema
 - b. Steuerung
4. Aufbau des Kollektors
5. Einbau des Kollektors
6. Messerergebnisse
 - a. Kollektorertrag
 - b. Diskussion des erhöhten Ertrags gegenüber der Simulation
 - c. Kollektor- und Erdsondentemperaturen
 - d. Kühlwirkung durch den Kollektor für die Umgebung
7. Kollektorkosten, Zielwert
 - a. Kollektorkosten
 - b. Zielwert der max. idealen Kollektorkosten

ANHANG

- I. Messinstallation
- II. Durchfluss, Druckverlust und Volumen des Asphaltkollektors
- III. Betriebspunkt der Kollektorpumpe
- IV. Expansionsvolumen
- V. Messungen der Hochschule Rapperswil HSR

Zusammenfassung

Im Jahr 2019 haben die Kriesi Energie GmbH und die Flückiger & Bosshard AG eine Studie zu Asphaltkollektoren zur Regeneration von Erdsonden erarbeitet („Potentialabschätzung Asphaltkollektoren«, AWEL 2019, Kriesi Energie GmbH, Flückiger & Bosshard AG). Diese lässt diese Technik als günstige Form der Sondenregeneration erwarten, mit grossem Potential im Hinblick auf die absehbare starke Erhöhung der Anzahl Wärmepumpen. Das durch die EW Wald AG durchgeführte und vom Kanton Zürich unterstützte Pilotprojekt nutzt die Erkenntnisse jener Arbeit. Das Projekt ist Teil des Massnahmenplans Verminderung der Treibhausgase des Kantons Zürich.

Die EW Wald AG hat 2022 mit ihrem Neubau einen Asphaltkollektor zur Regeneration der Erdsonden erstellt. Dieser ist in 17 Teilflächen mit insgesamt 262 m² aufgeteilt. Es war vorgesehen, die Kollektorrohre in Eisenraster einzubinden und zusammen mit diesen auf die Kiesunterlage zu legen. Aus organisatorischen Gründen wurden die Kollektorrohre aber erst auf der Baustelle in die Raster eingesetzt und anschliessend mit Stahlrahmen und Kollektorrohren in Zementmörtel eingegossen. Die Rohre von je zwei Feldern werden gekoppelt und zu einem der beiden Schächte geführt. Während des Asphaltierens wurden die Rohre mit Wasser durchströmt, um ein Überhitzen zu vermeiden.

Dieser Kollektoraufbau erlaubt eine Trennung der Rohre und des Zementmörtels am Ende ihrer Lebensdauer zum vollständigen Recycling des Asphalts.

Im Sommer 2023 wurde eine erste Regenerationsphase gemessen. Dazu wurden einerseits Wärmezähler verwendet, andererseits separate Temperaturmessfühler in Vor- und Rücklauf des Kollektorkreislaufs. Aufgrund der Studie von 2019 wurde ein Ertrag von 120 kWh/m² erwartet. Tatsächlich wurden aber 220 kWh/m² erreicht. Die Erklärung liegt primär in der besseren Leitfähigkeit der Mörtelschicht um die Rohre gegenüber Kies und Asphalt, in die die Rohre ursprünglich hätten eingelegt werden sollen.

In diesem ersten Sommer lagen die Austrittstemperaturen aus der Erdsonde immer unter 20°C, obwohl nicht nur der Asphaltkollektor der Sonde Wärmezuführte, sondern auch die Raumkühlung. Damit wäre in diesem Sommer der Betrieb der Kühlflächen auch mit rein passivem Wärmeaustausch zu den Sonden möglich gewesen, die Verwendung der Wärmepumpe als Kühlmaschine damit hinfällig. Ob dies in den nachfolgenden Sommerperioden so bleiben wird, muss sich erst zeigen.

Entgegen den Erwartungen ist die Kühlwirkung des Asphaltkollektors für eine Person neben der Strasse mit einer rund ¼ tieferen Wärmezufuhr durchaus spürbar, wie die Infrarotaufnahmen der Strassenoberfläche erwarten lassen.

Die Kollektorkosten lagen in diesem Projekt mit rund 400 Fr./m² deutlich höher als erwartet. Hauptgrund ist die Unsicherheit aller Unternehmer, wodurch zu aufwendige Abläufe gewählt und zu teure Komponenten eingesetzt wurden. Auch der Einbau der Rohre in die Zementmörtelschicht hat einen erhöhten Aufwand verlangt. Für ein grösseres Nachfolgeprojekt dürften die Kosten deutlich gesenkt werden können.

1. Einführung

Das Projekt basiert auf einer Studie zur Abschätzung des Potentials von Asphaltkollektoren von 2019 und ist Teil des Massnahmenplans Verminderung der Treibhausgase des Kantons Zürich.

Verschiedene Temperaturmessungen haben gezeigt, dass ältere Erdsonden entgegen früheren Annahmen oft nach 20 bis 30 Jahren auskühlen, insbesondere bei dichter Anordnung, so dass ein effizienter Betrieb der Wärmepumpen nicht mehr möglich ist. Um dies zu vermeiden, müssen die Sonden durch Wärmezufuhr im Sommer regeneriert werden. Dazu bieten sich Wärmepumpen mit Quelle Aussenluft oder Sonnenkollektoren an. Da zur Erwärmung der Sonden im Sommer nur Temperaturen unter 20 bis 25°C nötig sind, eignen sich dazu auch unverglaste Sonnenkollektoren und insbesondere selbst Asphaltkollektoren, d.h. unter die Asphaltschicht eingelegte wasserführende Rohre. Durch ihre Einfachheit versprechen sie eine wirtschaftlich interessante Anwendung.

Im Jahr 2022 wurden der Neubau des EW Wald mit den Asphaltkollektoren erstellt und Messeinrichtungen eingebaut, um den Wärmeertrag und die Wirkung auf die Sondentemperaturen zu belegen. Die ursprünglich geplante Kollektorfläche von 430 m² musste zur Reduktion der Kosten auf 262 m² reduziert werden. Durch die kleinere Fläche hat auch die Länge der Verteilungen und die Anzahl der Schächte abgenommen.

Im Frühjahr 23 konnte das System gleichzeitig mit dem Bezug des Gebäudes durch das EW Wald in Betrieb genommen und bis Herbst 23 ein erster Zyklus der Sondenregeneration ausgemessen werden.

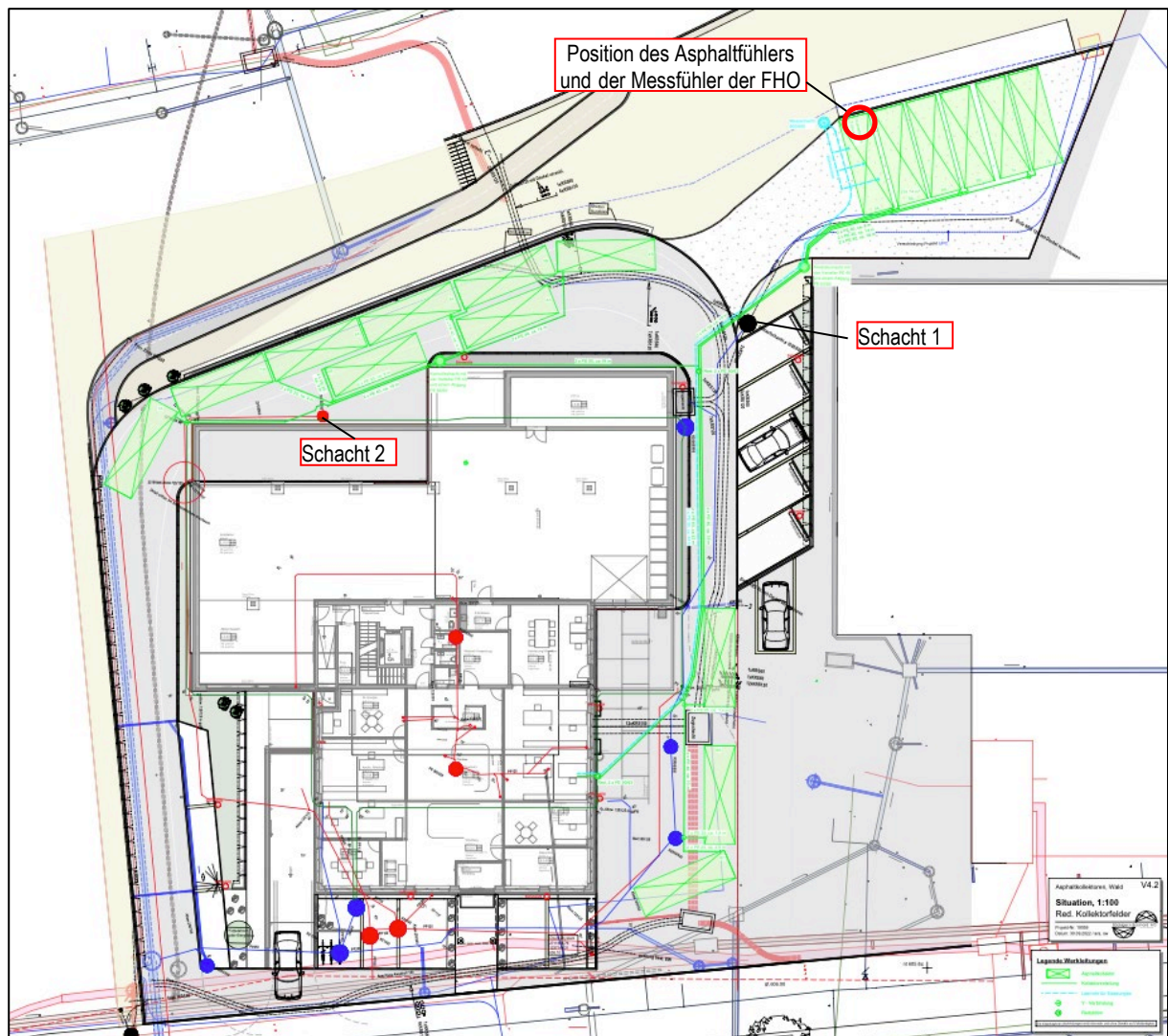
Die Steuerung der Kollektorpumpe erfolgte in diesem ersten Sommer manuell, weil die übergeordnete Heizungssteuerung nicht bereit war. Dies erwies sich als problemlos, weil die Stunden mit zu kühlem Asphalt von Ende April bis Mitte Oktober sehr selten waren.

Bild 1: Der Neubau des EW Wald:



2. Anordnung der Felder des Asphaltkollektors

Bild 2: Position der 17 Kollektorfelder östlich und nördlich des Gebäudes



Die ursprünglich 6 grösseren Felder im Kehrplatz in der SO-Ecke mussten auf 3 kleinere reduziert werden, weil die Auflagen des Nachbarn, auf dessen Grundstück diese Fläche liegt, nicht mehr akzeptierbar waren. Um die Zuleitungen zu verkürzen, wurden die Felder in der Strasse westlich zum Rohrlagerplatz in der NO-Ecke verlegt.

Die Gesamtfläche der 17 Felder beträgt $17 \times 15.4\text{m}^2 = 262 \text{ m}^2$. Jedes Feld misst $2.2 \times 7\text{m}$ und verfügt über 1 Kreis à 70m Rohr.

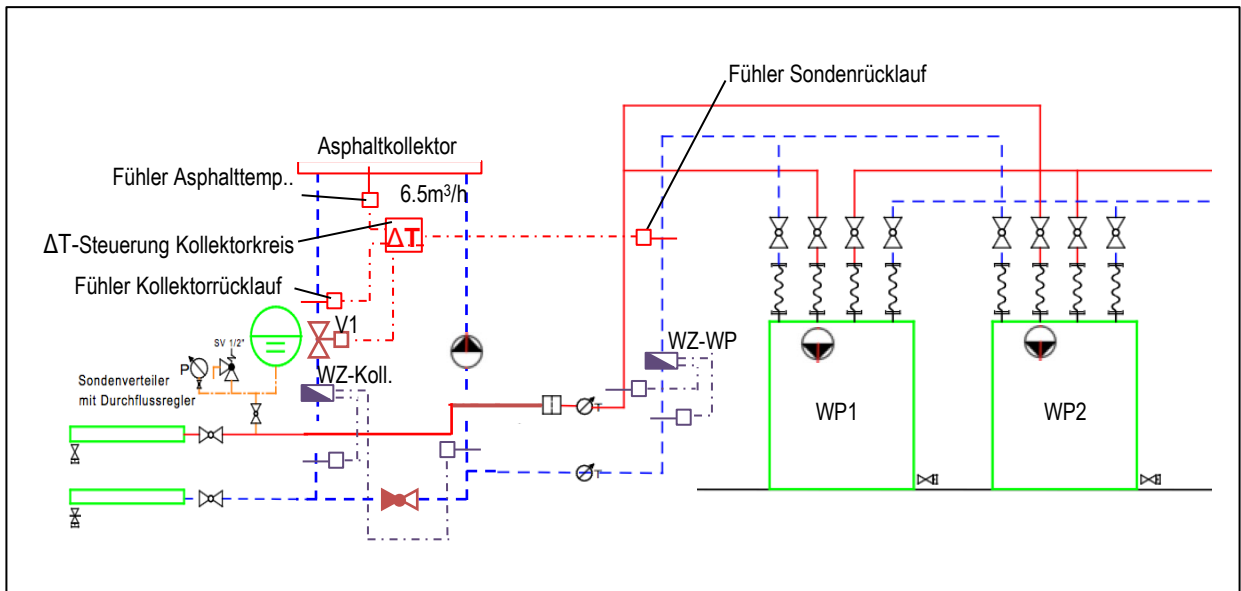
Die Temperaturfühler im Asphalt zur Einschaltung der Pumpensteuerung und zur Analyse des Kollektorverhaltens liegen im westlichsten der 6 Felder in der NO-Ecke des Grundstücks.

3. Einbindung des Asphaltkollektors in die Haustechnik

a. Hydraulik, Schema

Durch die Verkleinerung der Kollektorabmessungen gegenüber der ursprünglichen Planung ist auch der Durchfluss reduziert worden. Deshalb wird nur noch ein Teil der Wassermenge der Wärmepumpe über den Kollektor geführt. Das 2. elektrische Durchgangsventil im WP-Rücklauf wurde durch ein mechanisches Rückschlagventil ersetzt.

Bild 3: Schema der Einbindung des Kollektors in den Wärmepumpenkreis



Zum Schema: WZ-Koll: Wärmezähler im Kollektorkreis
WZ-WP: Wärmezähler im Wärmepumpenkreis
Kollektorkreis ein/aus: V1 offen/zu

Die Wärmezähler registrieren positive und negative Wärmemengen getrennt. Somit lassen sich aus den Angaben der beiden die gesamte Wärme-Einbringung und -Entnahme in und aus den Erdsonden berechnen.

Die Wärmezähler werden nicht wie ursprünglich vorgesehen als eigenständige Geräte gewählt, sondern ebenso wie die Differenztemperatursteuerung in das Gebäudeleitsystem integriert.

Bild 4: Die Fühler zur Einschaltung der Kollektorpumpe liegen mit grösserem Abstand zu den Rohren. Sie sollen nach einem kurzen Einschalten nicht reagieren, wenn der Vorlauf zur Zentrale im Moment noch kühler ist als der Sondenrücklauf.



Bild 5: Heizzentrale mit den beiden Ochsner Wärmepumpen mit 14 und 40 kW Heizleistung. Im Hintergrund die Anschlüsse der 6 Erdsonden.



Bild 6: Vor- und Rücklauf der 6 Erdsonden (noch ohne Wärmedämmung). Am Rücklauf angeschlossen sind die Abgänge zu den Kollektorfeldern. Zwischen den Abgängen ist das Rückschlagventil sichtbar, im Kollektorkreis im Vorlauf der Wärmezähler (WZ-Koll), das Durchgangsventil und die Umwälzpumpe.



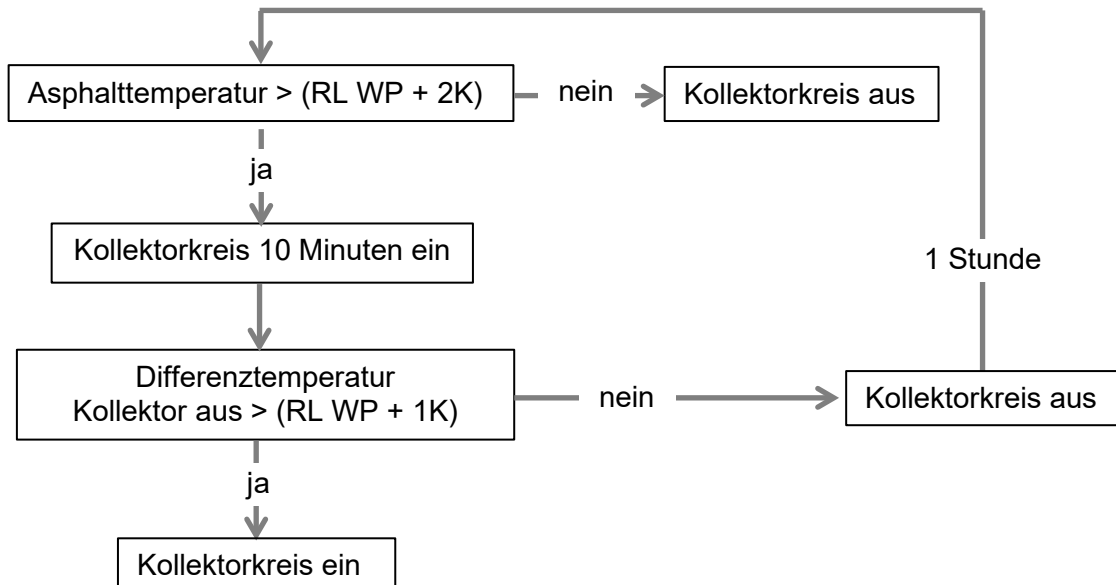
b. Steuerung:

Die Steuerung der Kollektorumwälzpumpe erfolgt über einen Differenzthermostaten zwischen Asphaltkollektor und Wärmepumpenrücklauf zur Sonde resp. Erdsondenaustritt.

Durch die unterschiedliche Beschattung des Kollektorfeldes wird es keinen eindeutigen Referenzpunkt für die Kollektormitteltemperatur geben. Die Temperatur des Wärmepumpenrücklaufs wird durch die Warmwasser-Bereitung täglich abgesenkt. In diesem Moment wird die Kollektorpumpe einschalten, wenn die Asphalttemperatur den WP-Rücklauf um 2K überschreitet.

Zum Ausschalten eignet sich der Wärmepumpenrücklauf schlecht, weil er bei abgeschalteter Wärmepumpe auf Raumtemperatur ansteigen kann. Deshalb wird dazu die Austrittstemperatur aus der Sonde verwendet.

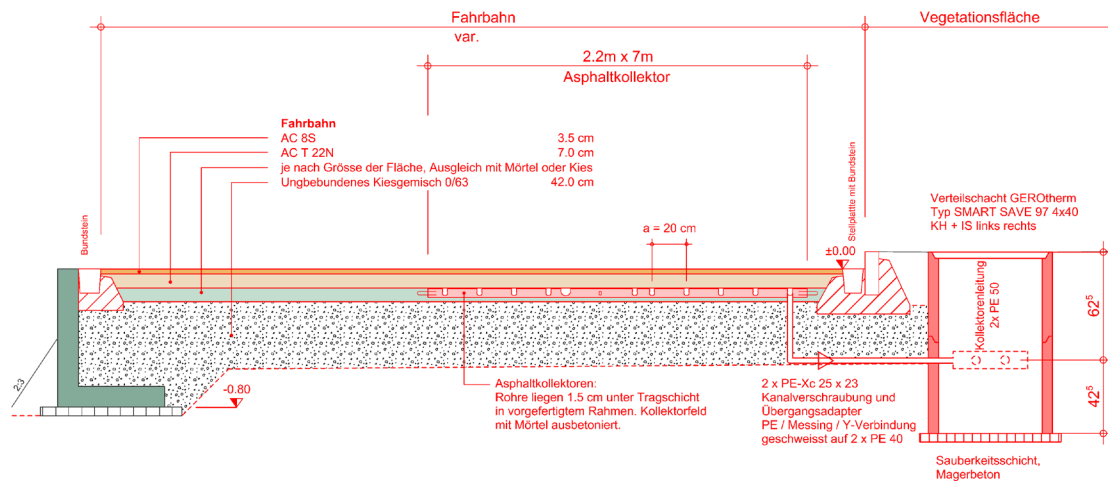
Diese Logik wird in das Leitsystem der Haussteuerung und Messwerterfassung integriert.



4. Aufbau des Kollektors

Die Asphaltüberdeckung der Kollektorrohre ist mit 7cm Trag- und 3.5cm Deckschicht ähnlich dem Bericht vom November 2019. Die Rohre sind nun aber nicht mehr im losen Kies, sondern in einer Zementmörtelschicht eingesetzt, um die Festigkeit weiter zu erhöhen, ohne die spätere Trennbarkeit zu gefährden. Die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtaufbaus wird dadurch verbessert.

Bild 7: Schema des Kollektoraufbaus (Flückiger + Bosshard)



5. Einbau des Kollektors:

Bild 8: Zur Montage der Kollektorrohre werden Stahlrahmen geschweisst. Die Querprofile halten nicht nur die Rohre, sie verhindern auch ein Wegfliessen des Zementmörtels bei geneigter Einbauposition. Dies ist auch der Grund, weshalb zur Vormontage nicht billigere Betongitter verwendet werden, wie sie für thermoaktive Decken üblich sind.

Die Längsprofile mussten in regelmässigen Abständen eingeschnitten werden, damit sich der Rahmen der Biegung der Strasse anpassen lässt.

Das Bild zeigt das einzige Feld, in dem die Rohre erst am Einbauort verlegt wurden.



Bild 9: Der komplette Kollektor wird an den Einbauort transportiert.

Es war vorgesehen, die Rohre in der Werkstatt einzubauen und die vorkonfektionierten Kollektoren auf die Baustelle zu liefern. Damit hätte der Rohreinbau bei mindestens ca. 18°C erfolgen können, damit sich die Rohre gut biegen lassen.

Aus terminlichen Gründen wurden die Rohre aber erst auf dem Installationsplatz auf der Baustelle eingebaut.



Bild 10: Das gleiche Feld wie in Bild 8 nach dem Einbau der Zementmörtelschicht, angepasst an die Krümmung der Strasse.



Bild 11: Zur Organisation der weiteren Arbeiten war der Wechsel zur Einlage der Rohre in eine Zementmörtelschicht eine grosse Vereinfachung, können die Felder nun doch nach dem Aushärten sofort mit schwerem Gerät befahren werden.



Bild 12: Einbringen des Zementmörtels mit dem Förderband



Bild 13: Die Rohre werden wenn möglich nicht belastet. Dank dem Abstand kann das Personal zwischen den Rohren stehen.

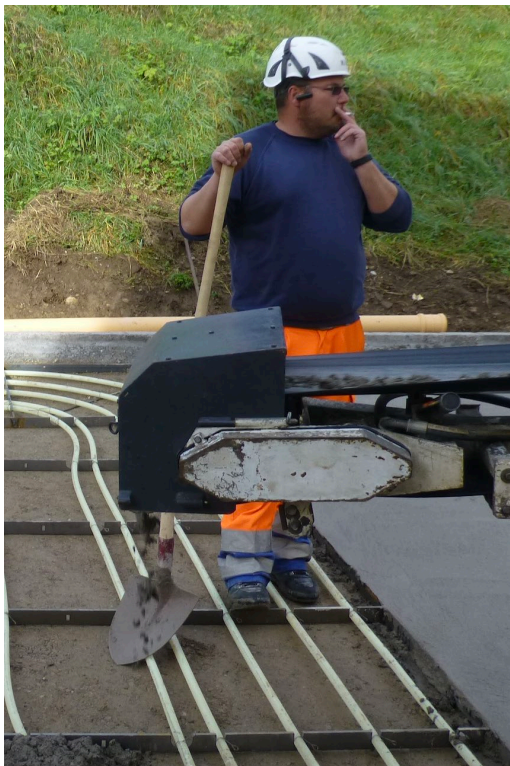


Bild 14: Sobald die Rohre überdeckt sind, müssen die Rohre zur gleichmässigen Verteilung der Mörtelschicht betreten werden.



Bild 15: Die Asphalttschicht wird mit einem Strassenfertiger eingebaut.



Bilder 16, 17: Während der Aufbringung der ca. 130°C heißen Asphalttschicht sind die Kunststoffrohre über die Schächte mit der Heizzentrale verbunden und werden von dort mit Kühlwasser durchströmt, um Überhitzen zu vermeiden. Anschliessend wurden die Rohre vollständig geleert und mit Frostschutz gefüllt. Die Schächte von HakaGerodur, Gerotherm Typ Smart, sind mit Abgleich- und Absperr- und Entlüftungsventilen versehen.

Die gewählte Rohrqualität von HakaGerodur:
5-Schicht Vollkunststoffrohr PE-Xc/EVOH/PE-Xc, 25x2.3mm



6. Messresultate

a. Kollektorsertrag

Tabelle 1: Zur Bestimmung des Kollektorsertrags wurden einerseits die mit eigenen Messfüh-
lern erfassten Vor- und Rücklauftemperaturen und die Durchflusswerte des Wärmezählers
verwendet (Tabelle oben), andererseits die angezeigten Werte des Wärmezählers (Tabelle un-
ten). Die Übereinstimmung ist sehr gut. Mit Einbezug des fehlenden Oktoberwerts des Wär-
mezählers wird die Übereinstimmung fast perfekt.

Im vergangenen ersten Betriebssommer wurde die Kollektorpumpe manuell geschaltet, weil
die vorgesehene Steuerung der ganzen Haustechnik noch nicht in Betrieb war. Deshalb wur-
den auch kurze Phasen mit negativen Leistungen erhalten. Zur Bestimmung des Jahreser-
trags wurden nur die positiven Werte beigezogen. Die Differenz ist aber gering, wie die je
letzten beiden Spalten der beiden Tabellen zeigen.

**Mit 224 kWh/m²a liegt der im Sommer 2023 gemessene Ertrag 86% über dem mit der
Simulation prognostizierten Wert 120 kWh/m² für 15cm Überdeckung (Bericht Potential-
abschätzung Asphaltkollektoren vom 12.11.2019).**

| gem. mittl. Delta-T aus Messdosen (Durchfluss von WZ) | | | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------------------|--|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--|
| 2023 | Stunden- zahl | Mittelwert Delta-T-Koll. | Mittelwert Delta-T-Koll, Werte >0. | Mittl. Leistung, kW | Mittl. Leistg, nur Werte >0, kW | Mittl. Leist. W/m ² | Energie/ Monat, MWh | Energie/ Monat, MWh, nur >0 | |
| April, 27.-30./84 h | 84.0 | 0.4 | 0.7 | 3.1 | 5.2 | 19.8 | 0.3 | 0.4 | |
| Mai | 740.0 | 1.4 | 1.5 | 10.4 | 11.2 | 42.7 | 7.7 | 8.3 | |
| Juni | 718.0 | 2.7 | 2.8 | 19.5 | 20.3 | 77.4 | 14.0 | 14.6 | |
| Juli | 742.0 | 2.4 | 2.5 | 16.8 | 17.5 | 66.9 | 12.5 | 13.0 | |
| Aug | 742.0 | 1.9 | 2.1 | 13.4 | 14.5 | 55.2 | 9.9 | 10.7 | |
| Sep (8 h/d ab 26.9.) | 652.0 | 1.6 | 1.8 | 11.6 | 13.2 | 50.4 | 7.6 | 8.6 | |
| Okt (8 h/d bis 26.10.) | 206.7 | 1.8 | 1.9 | 14.6 | 15.3 | 58.4 | 3.0 | 3.2 | |
| Jahr | 3678.0 | 1.8 | 1.9 | 12.8 | 13.9 | 53.0 | 54.9 | 58.8 | |
| | | | | | | | kWh/m2/a: | 224 | |

| T aus Messdosen (Du | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|--|--|
| Kollektorkreis gem. Wärmezähler (ab 10.5.) | | | | | | | | | |
| 2023 | Mittl. Leistung, kW | Mittl. Delta-T, K | Mittl. Durch- fluss, m3/h | Leistung, (Produkt), kW | Wasser- menge ges. m3/Mt. | Stunden- zahl, h | Energie/ Mt. (Produkt), MWh | Kühl- energie, reg. Wert, MWh | Heiz- energie, reg. Wert, MWh |
| April, 27.-30./84 h | | | 6.6 | | | | | | |
| Mai | 13.2 | 1.7 | 7 | 12.6 | 3261 | 466 | 5.9 | 5.9 | 0.26 |
| Juni | 22.8 | 3.1 | 6.8 | 22.3 | 4904 | 721 | 16.1 | 15.8 | 0.59 |
| Juli | 19.8 | 2.7 | 6.6 | 18.9 | 4891 | 741 | 14.0 | 14 | 0.62 |
| Aug | 16.9 | 2.3 | 6.6 | 16.1 | 4902 | 743 | 12.0 | 11.9 | 0.65 |
| Sep (8 h/d ab 26.9.) | 12.2 | 1.8 | 6.67 | 12.7 | 4298 | 644 | 8.2 | 8.24 | 0.53 |
| Okt (8 h/d bis 26.10.) | | | 6.7 | | | | | | |
| Jahr | | | | | 22256.0 | 3315.2 | 56.1 | 55.8 | 2.7 |
| | | | | | | kWh/m2/a: | 214 | 213 | 10 |

Bild 18: Von Ende April bis 26. September war die Kollektorpumpe konstant eingeschaltet, bis 26.10. anschliessend nur noch 8 Stunden pro Tag. Die mittleren Leistungen beziehen sich auf diese Laufzeiten. Von April bis September bilden diese den Sonnenstand und die mittleren Aussentemperaturen ab. Deren Anstieg im Oktober bedeutet, dass die tägliche Pumpenlaufzeit mit 8 Stunden zu kurz war. Mit einem höheren Wert hätte mehr Energie gewonnen werden können.

Der Stromverbrauch der Umwälzpumpe von 212 W (sh. Anhang I) beträgt nur 1.7% des mittleren Wärmeertrags von April bis Oktober. Soll die Pumpe bei einem Pumpenstromanteil von 10% der Wärmeleistung abgestellt werden, ist dies bei einem Delta-T des Kollektorkreises von 0.3 K der Fall. Die Differenz kann aber auch grosszügiger gewählt werden, um ungenauen Temperaturfühler entgegenzuwirken, da aufgrund der Speicherwirkung des Asphalts eine kleine Wärmeintragleistung auch in Intervallen genutzt werden kann.

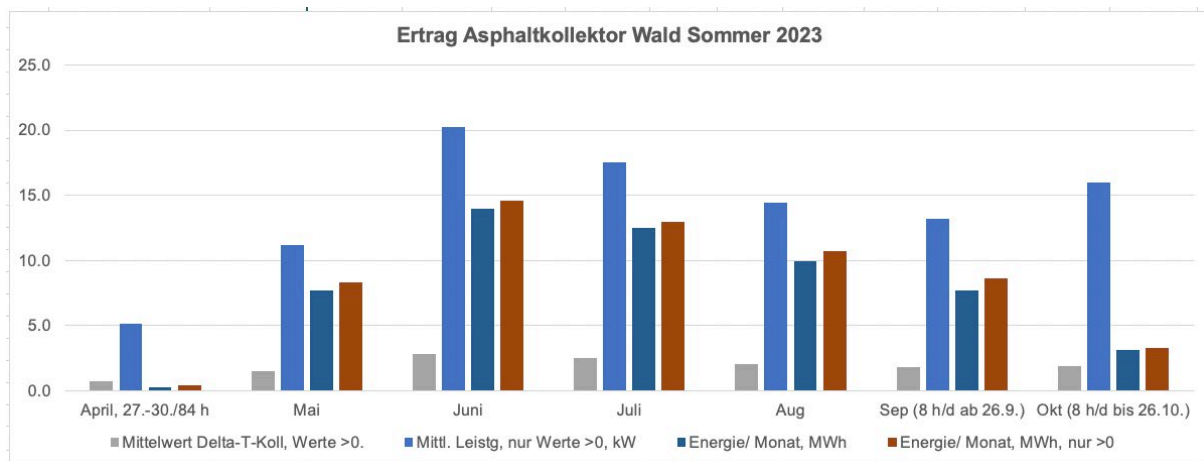


Tabelle 2: Die Tabelle zeigt die monatlichen Heiz- und Kühlenergien im Solekreis der Wärmepumpen. Der Wärmebedarf für die WW-Bereitung war hoch, weil die Zirkulation irrtümlich rund um die Uhr in Betrieb war. Der Nettobeitrag der Raumkühlung zur Regeneration war damit sehr gering im Verhältnis zum Ertrag des Asphaltkollektors.

Entsprechend klein war auch der Einfluss der aktiven Kühlung auf die Temperatur und den Wirkungsgrad des Kollektors.

| 2023 | Kühlenergie, reg. Wert, MWh | Heizenergie, reg. Wert, MWh |
|------|-----------------------------|-----------------------------|
| Mai | 0.55 | 2.34 |
| Juni | 4.54 | 1.85 |
| Juli | 4.80 | 1.99 |
| Aug | 3.65 | 2.16 |
| Sep, | 2.83 | 1.92 |
| Jahr | 16.4 | 10.3 |

Anteil der Wärmerücklieferung am Wärmebedarf:

Rücklieferung: Asphaltkollektor: 224 kWh/m² x 262m² = 59 MWh
 Rücklieferung aus Raumkühlung: 16 MWh
 Wärmebezug für WW: -10 MWh
 Rücklieferung netto: 63 MWh
 Raumwärmebedarf gem. SIA Systemnachweis: 76 MWh
 (124.2 MJ/m², 2217 m²)

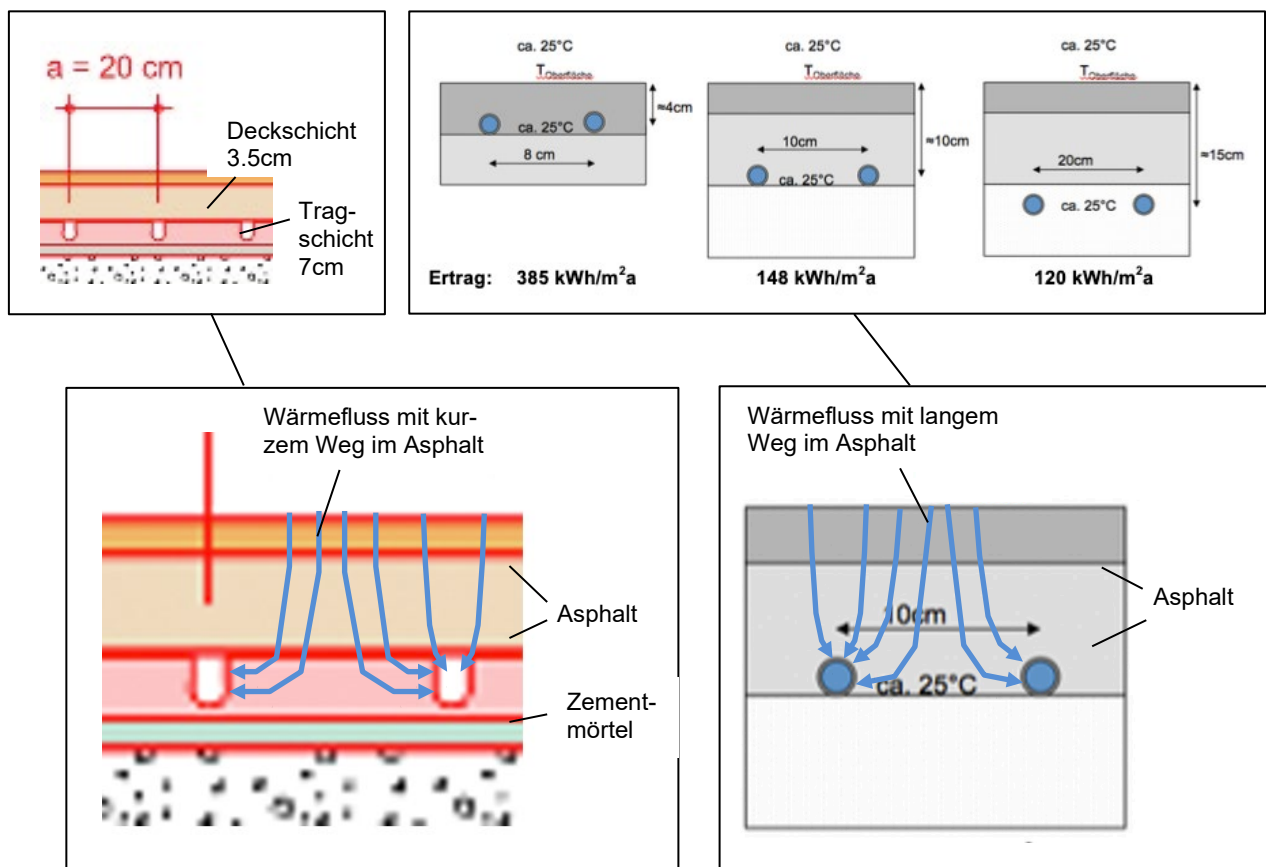
Anteil der Wärmerücklieferung am Wärmebedarf: 63 MWh/76 MWh = **83%**

b. Diskussion des erhöhten Ertrags gegenüber der Simulation

Der Ertrag ist sehr stark von der Überdeckung der Kollektorrohre abhängig. Die bevorzugte Variante mit direkt in den Asphalt eingelegten Kollektorrohren entfällt, weil sie nie mehr vom Asphalt trennbar wären, ein vollständiges Recycling des Asphalts deshalb unmöglich. In der Ausführung liegen die Rohre unter 10.5cm Asphalt plus ca. 3cm Zementmörtel. Die Stärke der Überdeckung liegt damit näher der rechten als der mittleren der simulierten Varianten.

- Ein erster Grund für den höheren Ertrag liegt in der kleineren Überdeckung, die erst Ende August durch Einbringung des Deckbelags von 7cm auf 10.5cm erhöht wurde, einschliesslich der Überdeckung durch die darunter liegende Betonschicht von ca. 3cm also von 10cm auf 14cm. Allerdings wurde der Ertrag bei nur 10cm Überdeckung mit Asphalt auch nur auf 148 kWh/m²a prognostiziert.
- Als zweiter Grund weist die Zementmörtelschicht eine deutlich bessere Wärmeleitfähigkeit von 2.3 W/mK gegenüber 0.7 W/mK für Asphalt auf. Das bedeutet, dass der Wärmestrom weitgehend senkrecht durch die Asphaltschicht verläuft und horizontal weitgehend im Beton, wie in Bild 19 unten dargestellt. Die Strecke des Wärmeflusses im Asphalt wird damit kürzer. Eine detaillierte Simulation wäre für eine weitere Ertragsoptimierung von Interesse. Diese Aufgabe wird von der Fachhochschule HSR im Rahmen ihres ebenfalls an dieser Anlage durchgeführten Messprojekts wahrgenommen.

Bild 19: Realisierter Kollektoraufbau (links) und 2019 simulierte Aufbauvarianten (rechts)



- Ein dritter Grund liegt in den gegenüber der Norm um 12% erhöhten Zahl Sonnenstunden in der Messperiode von April bis Oktober 2023. Insbesondere im Juni war die Zahl Sonnenstunden 54% über dem Durchschnitt. **Entsprechend ist im Normjahr ein Ertrag von $224 \text{ kWh/m}^2 / 1.12 = 200 \text{ kWh/m}^2$ zu erwarten.**

c. Kollektor- und Erdsondentemperaturen, Eignung zur passiven Raumkühlung

Bild 20: Folgende Temperaturkurven zeigen die Zeiten aktiver Raumkühlung in der Periode von 1. bis 9 Juli 23 anhand des heizungsseitigen Austritts der Wärmepumpe 2 (dunkelblaue Linie). Sinkt diese ab, steigt die Wärmezufuhr zur Sonde (Absinken der hellblauen Linie) und entsprechend die Eintrittstemperatur in den Asphaltkollektor (rote Linie). Da dieser sehr träge reagiert, fällt die Differenztemperatur des Asphaltkollektors (gelbe Linie) kurzzeitig ab, teils zu negativen Werten.

Es ist nicht so klar, wie diese negativen Beiträge des Asphaltkollektors zu werten sind, ob dessen Tagesertrag tatsächlich steigen würde, falls die Pumpe während den Zeiten negativer Beiträge abgestellt würde. Da die Differenz der Jahreserträge mit allen Werten gegenüber nur den positiven mit 6.7% nicht sehr gross ist, ist der maximal mögliche Fehler klein, womit sich eine genauere Analyse erübrigt.

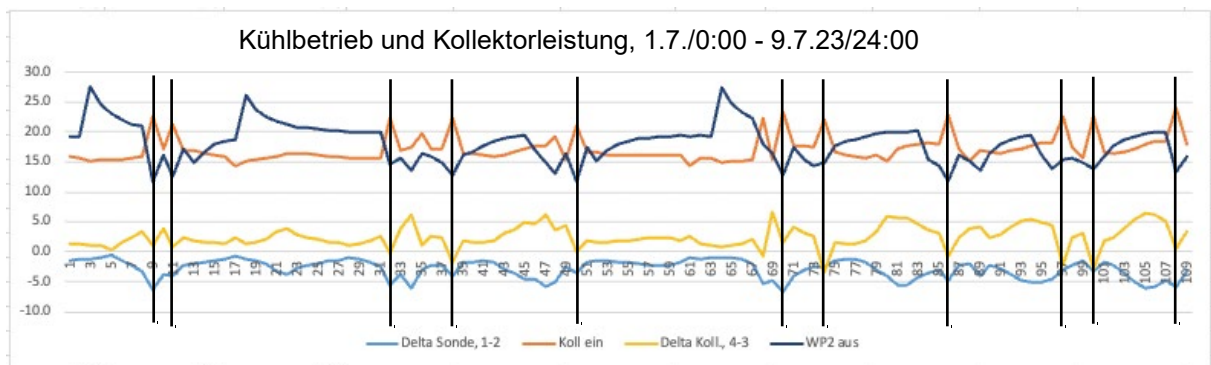
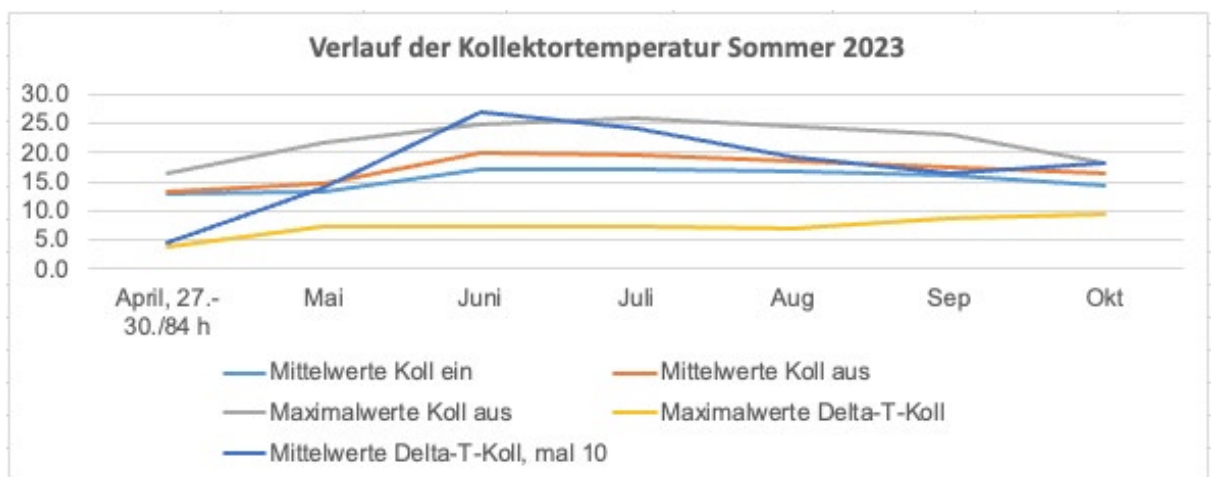


Bild 21: Der Temperaturanstieg im Kollektor bewegt sich im Monatsmittel von 0.5 K (4 April-tage) bis 2.7 K im Juni (10-fache Werte dargestellt zur besseren Ablesbarkeit). Die kleine Temperaturdifferenz wurde gewählt, um den Wirkungsgradverlust klein zu halten. Die maximale Austrittstemperatur aus dem Kollektor erreicht im Juli 26°C, im Monatsmittel aber nur 20°C, liegt also im Bereich der mittleren Aussentemperatur von ebenfalls 20°C in diesem Monat. Die für den Wärmeverlust an die Umgebung verantwortliche Oberflächentemperatur des Asphalts liegt aber wesentlich höher, wie Abschnitt c. dieses Kapitels zeigt.



Verlauf der Sondentemperatur und Raumkühlung:

Die Regeneration der Erdsonden hebt deren Temperaturniveau im Sommer stark an. Wie sich dies im Laufe der Jahre auf den Temperaturverlauf im Winter und damit auf den Wärmepumpenwirkungsgrad und die Leistung der Wärmepumpe auswirken wird, bleibt abzuwarten.

Bild 22: Die Austrittstemperatur des Kollektors entspricht der Eintrittstemperatur in die Sonde. Deren Maximum erreicht 25°C im Juli. Die Austrittstemperatur aus der Sonde steigt aber maximal auf nur 19°C Mit einem Maximum unter 20°C hätte die Sonde selbst im Juli zur passiven Raumkühlung über die Bodenheizung verwendet werden können. Ob dies im zweiten Betriebsjahr immer noch der Fall sein wird, muss sich erst zeigen.

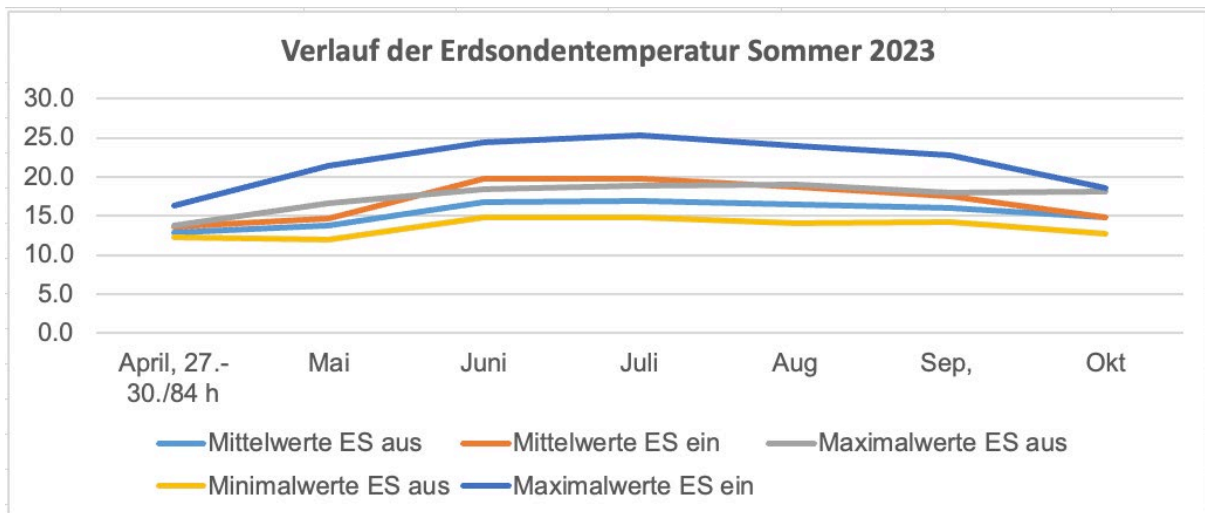


Tabelle 3: Vergleich der Sondentemperatur mit anderen Projekten zur Erdsondenregeneration

Für die mittlere Sommertemperatur der Erdsonde wäre im Falle des Projekts in Wald ein tieferer Wert zu erwarten als in den beiden übrigen, ist die eingebrachte Wärmemenge im Verhältnis zum Bedarf doch hier deutlich tiefer. Umgekehrt wurde die Erdsonde in diesem Fall noch nie für den Heizbetrieb verwendet, womit die Anfangstemperatur höher lag.

Hingegen liegt der Maximalwert der Sondentemperatur in Wald deutlich tiefer als in den anderen Fällen, was durchaus den Erwartungen entspricht, da der Asphaltkollektor träge reagiert und die Wärmeabfuhr rund um die Uhr stattfinden kann, mit Ausnahme kurzer Momente mit starkem Anstieg der Kollektoreintrittstemperatur durch die aktive Raumkühlung (sh. Bild 19).

| | Bericht ¹⁾ | EFH Bargezi ²⁾ | EW Wald |
|---|-----------------------|---------------------------|--------------|
| Kollektortyp | PVT-Kollektor | Sonnenkoll. unverglast | Asphaltkoll. |
| Verhältnis Regeneration/Wärmebezug: | 104 % | 140% | 83% |
| Mittlere Sondentemperatur* Okt.-Apr.: | 12.8°C | 12.5°C | - |
| Mittlere Sondentemperatur* Mai-Sep.: | 18.0°C | 16.3°C | 17.3°C |
| Mittlere Sondentemperatur Maximalwerte: | 24°C | 28°C | 18.4°C |

* Mittelwert zwischen Vor- und Rücklauf

¹⁾ Lennart Rogenhofer, ETH Zürich, und Pascal Leumann, ewz: Vergleich verschiedener Energieerzeugungskonzepte in vier Mehrfamilienhäusern; BFE, EWZ, kant. Baudirektion Zürich, Schlussbericht 6.12.2018.

²⁾ Messprojekt Regeneration der Erdsonden mit Sonnenkollektor des EFH Bargezi, Kriesi Energie GmbH, Dez. 2023

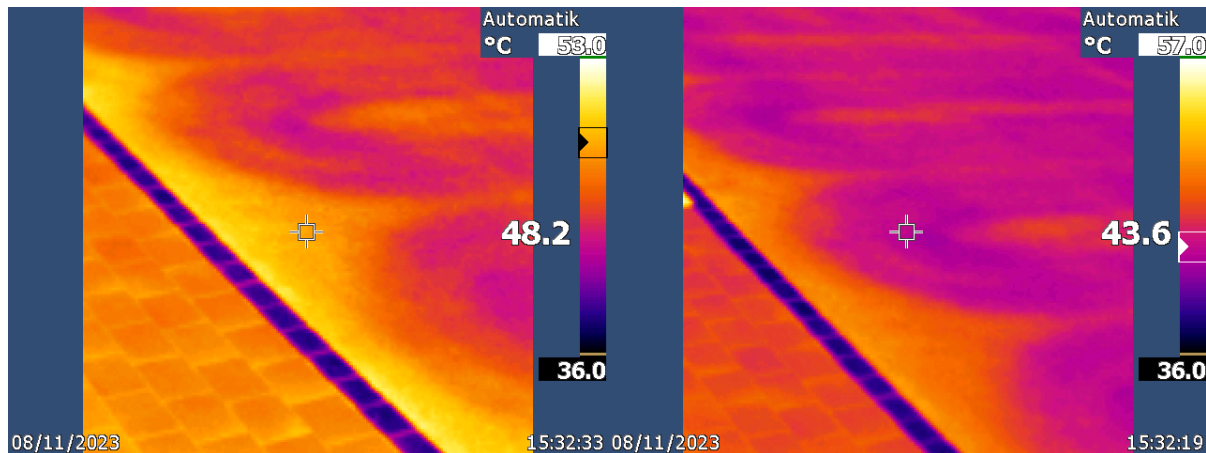
d. Kühlwirkung durch den Kollektor für die Umgebung

Beispiel des wolkenlosen 11.8.23, Aussentemperatur 28°C:

Zur Bestimmung der Kühlwirkung wird die Differenz des Strahlungsaustauschs der Strassenoberfläche ohne zu mit eingelegten Rohren und einem schwarzen Körper im Schatten, d.h. mit z.B. 28°C, verwendet.

- Der Strahlungsaustausch ΔE erfolgt proportional zur 4. Potenz der absoluten Temperaturen der beiden Oberflächen:
 $\Delta E: \quad \varepsilon \times (((T_{o1}/100)^4 - (T_u/100)^4) - (((T_{o2}/100)^4 - (T_u/100)^4))$
- Temperaturen:
Asphaltoberfläche ohne Rohre $T_{o1} = 273 + 48.2 = 321.2\text{K}$
Asphaltoberfläche mit Rohren $T_{o2} = 273 + 43.6 = 316.6$
Umgebung, Person $T_u = 273 + 28 = 301\text{K}$
- Relativer Austausch $\Delta E/E: \Delta E / \varepsilon \times ((T_{o1}/100)^4 - (T_u/100)^4) =$
 $= ((3.212^4 - 3.01^4) - (3.166^4 - 3.01^4)) / (3.212^4 - 3.01^4)$
 $= ((106.4 - 82.1) - (100.5 - 82.1)) / (106.4 - 82.1)$
 $= (24.3 - 18.4) / 24.3 = \mathbf{24\%}$

Bild 23: Entgegen den Erwartungen ist die Kühlwirkung des Asphaltkollektors für eine Person neben der Strasse mit einer rund $\frac{1}{4}$ tieferen Wärmezufuhr durchaus spürbar.



7. Kollektorkosten, Zielwert

a. Kollektorkosten

Tabelle 4: Gegenüber den Abschätzungen im Bericht von 2019 lag bereits der Planungswert des Kollektors in Wald 59% höher und die Ausführung schliesslich 315%. Dank dem 1.7-fach höheren Ertrag steigt aber auch der wirtschaftlich gleichwertige Preis, so dass die Ausführung noch 160% zu teuer ausgefallen ist.

| Grösse, m2 | Bericht 2019 | | | | Planung Wald | | Ausführung Wald | | % |
|--|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
| | 300 | | pro m2 | | 430 pro m2 | | 262 pro m2 | | |
| 1 Baustelleneinrichtung | | | | | | | | | |
| 10% von Bausumme | 6963 | 6963 | 23.2 | 23.2 | 5165 | 12.0 | | | |
| 2 Vorbereitungsarbeiten | | 2790 | 0.0 | 9.3 | 11590 | 27.0 | | | |
| Abtragung, Entsorgung Kies 6cm | 1290 | | 4.3 | | | | | | |
| Rohplanie | 1500 | | 5.0 | | | | | | |
| 3 Asphaltkollektor | | 9275 | 0.0 | 30.9 | 24480 | 56.9 | 60077 | 229.3 | 55.2 |
| Lieferung | 6500 | | 21.7 | | | | | | |
| Verlegung | 2500 | | 8.3 | | | | | | |
| Ergänzung Kies | 275 | | 0.9 | | | | | | |
| 4 Vor-/Rücklauf, Zentrale | 175 | 175 | 0.6 | 0.6 | | | 7993 | 30.5 | 7.3 |
| 5 Übergabeschacht | 3500 | 3500 | 11.7 | 11.7 | 15500 | 36.0 | 12638 | 48.2 | 11.6 |
| 6 Längsleitungen | | 5830 | 0.0 | 19.4 | 11650 | 27.1 | 23211 | 88.6 | 21.3 |
| 7 Elektroinstallationen | | | | | | 0.0 | 5000 | 19.1 | 4.6 |
| Summe Ausführung | | 28533 | 95.1 | 95.1 | 68385 | 159.0 | 108919 | 415.7 | 100.0 |
| ertragskorrigierte Kosten, Fr./% (*200/120, d.h.*1.7) | | | | | | | | | |
| | | | | 158.5 | =100% | 100.3 | % | 262.3 | % |

Die zu hohen Kosten dieses ersten ausgeführten Kollektors sind ein Resultat der unvermeidlichen Unsicherheiten, die bei der Ausführung eines Pilotprojektes entstehen. Aus Vorsicht werden dann zuverlässigere, aber halt teurere Lösungen gewählt.

Eine umfassende Abschätzung der Kosten eines nächsten Projekts wurde noch nicht durchgeführt. Präzis wird dies ohnehin erst anhand eines neuen realen Projekts möglich. Einsparungen werden sowohl bei der Kollektorkonstruktion als auch bei der Anschlussverrohrung möglich werden.

Rund 10% Reduktion ergeben sich nur schon, weil die Nachrechnung ergeben hat, dass die Abgrenzung der Kollektorkosten nicht korrekt war. Weitere Reduktionen sollten durch eine Änderung der Kollektorkonstruktion möglich werden. Diese muss aber erst mit dem Lieferanten im Detail geprüft werden.

Zu den Verrohrungen wird der Unternehmer eine neue Offerte zur ausgeführten Anlage erstellen. Er war von der Einfachheit der notwendigen Abläufe positiv überrascht, was sich auf seine neue Kostenrechnung auswirken wird. Zudem wird er günstigere Komponenten einsetzen.

b. Zielwert der max. idealen Kollektorkosten

Im Bericht Potentialabschätzung Asphaltkollektoren, AWEL 2019, Kriesi Energie GmbH, Flückiger & Bosshard AG, wurden anhand einer Musteranlage einer Mehrfamilienhaussiedlung die Sondenlängen für 50 Jahre Nutzungsdauer ohne und mit vollständiger Regeneration und gleiche Jahresarbeitszahl berechnet. Im Minimum steht damit die Kosteneinsparung durch die kürzeren Sonden zur Finanzierung des Asphaltkollektors zur Verfügung. Dies würde einem Idealfall entsprechen, bei dem die Investitionen mit und ohne Regeneration gleich hoch sind.

Tatsächlich hat die Lösung mit Regeneration aber einen wesentlich höheren Wert, da das Erdreich in diesem Fall nach 50 Jahren immer noch die Ausgangstemperatur besitzt und die Sonden voraussichtlich weiter genutzt werden können, während es ohne Regeneration ausgekühlt wäre und eine neue Wärmeerzeugung erstellt werden müsste.

Tabelle 5: Notwendige Grösse des Asphaltkollektors mit den Daten der Musteranlage:

| Komponente | Anlage | pro kW |
|--|----------|--------------------|
| Heizleistung: | 478 kW | 1 kW |
| Wärmebezug aus Sonde: | 890 MWh | 1.9 MWh |
| Wärmeabgabe: (entsprechend 2400 h/a) | 1186 MWh | 2.4 MWh |
| Sondenlänge, ohne Regeneration, 50 Betriebsjahre: | 20'000 m | 42.1 m |
| Sondenlänge, mit vollst. Regeneration, 50 Betriebsjahre: | 6'500 m | 13.6 m |
| Differenz der Sondenlänge: | 13'500 m | 28.5 m |
| Differenz der Sondenkosten (Fr. 70.-/m) | | 1995 Fr. |
| Fläche Asphaltkollektor (1.9MWh/220 kWh/m ² a): | | 8.6 m ² |

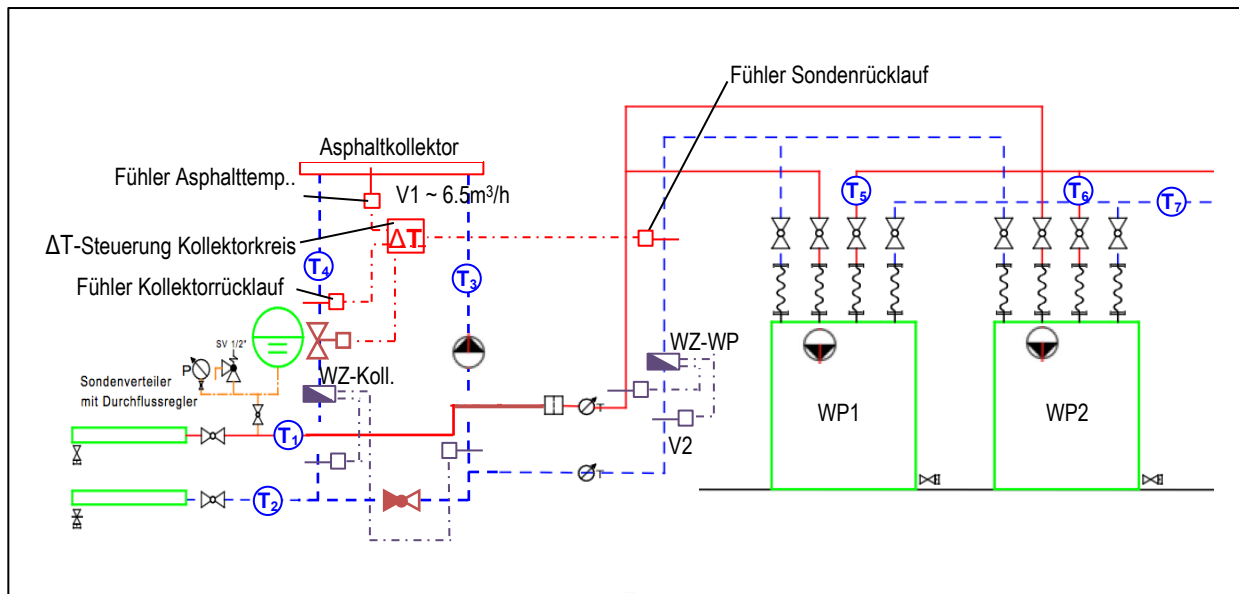
Folgerungen für die im Idealfall maximalen Asphaltkollektorkosten:

Ideale max. Kollektorkosten, 1995 Fr./8.6m²: 231 Fr./m²

Das heisst, die in diesem ersten Projekt erreichten Kosten müssten in einem Folgeprojekt im Idealfall um über 40% reduziert werden können.

ANHANG:

I. Messinstallationen

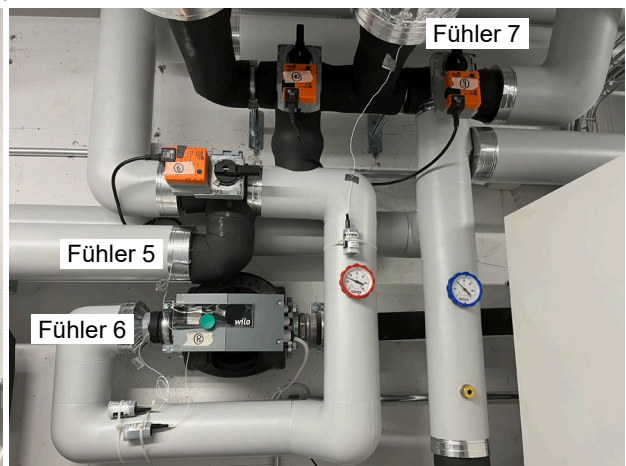
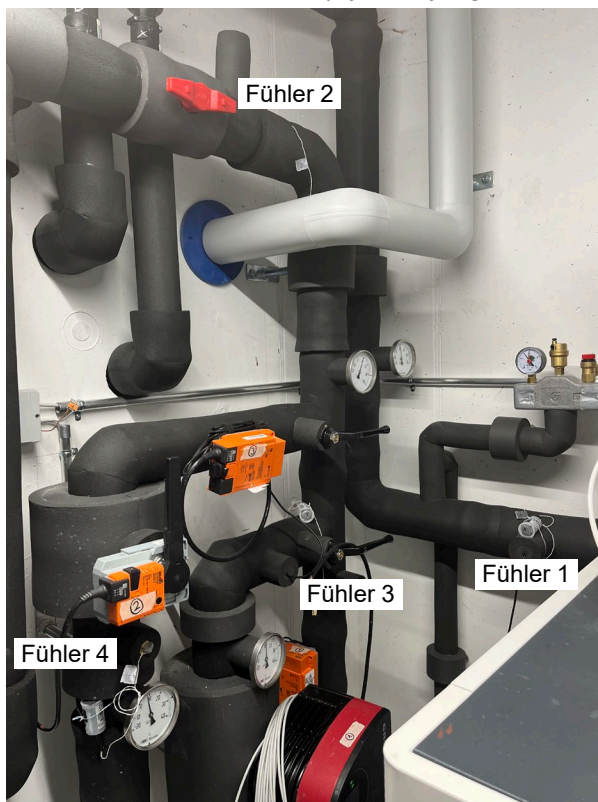


Wärmemengen:

- von Kollektor: $V1 * (T_4 - T_3)$
- von Erdsonde: $V2 * (T_1 - T_2)$
- zur Erdsonde: $V2 * (T_2 - T_1)$

V2 wird 2 Niveaubereiche haben, je nachdem, ob WP1 oder WP2 ein.

Position der Messfühler (Typ Tinytag TK-4023):



- Fühler 1: Von Erdsonde
- Fühler 2: Zur Erdsonde
- Fühler 3: Zum Kollektor
- Fühler 4: Von Kollektor
- Fühler 5: Von WP 1
- Fühler 6: Von WP 2
- Fühler 7: Zu den WPs

II. Durchfluss, Druckverlust und Volumen des Asphaltkollektors:

Gesamtfläche 17 Felder: $17 \times 15.4\text{m}^2 = 262\text{m}^2$,

Fläche pro Kollektorfeld: $2.2\text{m} \times 7\text{m} = 15.6\text{m}^2$

Rohrlänge pro Feld: 70m

Rohre HakaGerodur: d 25x2.3mm, 5-schichtig, PE-Xc/EVOH/PE-Xc

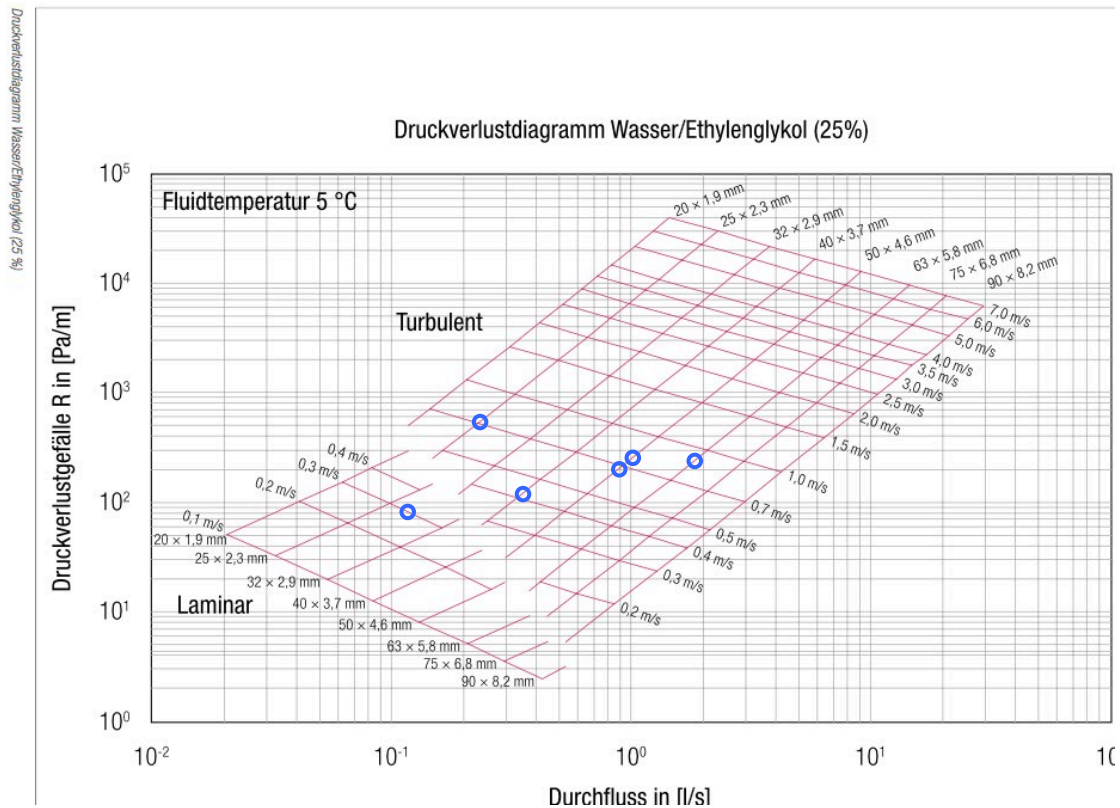
Delta-Tmax Kollektor: 4 K

Daten der Rohrabschnitte:

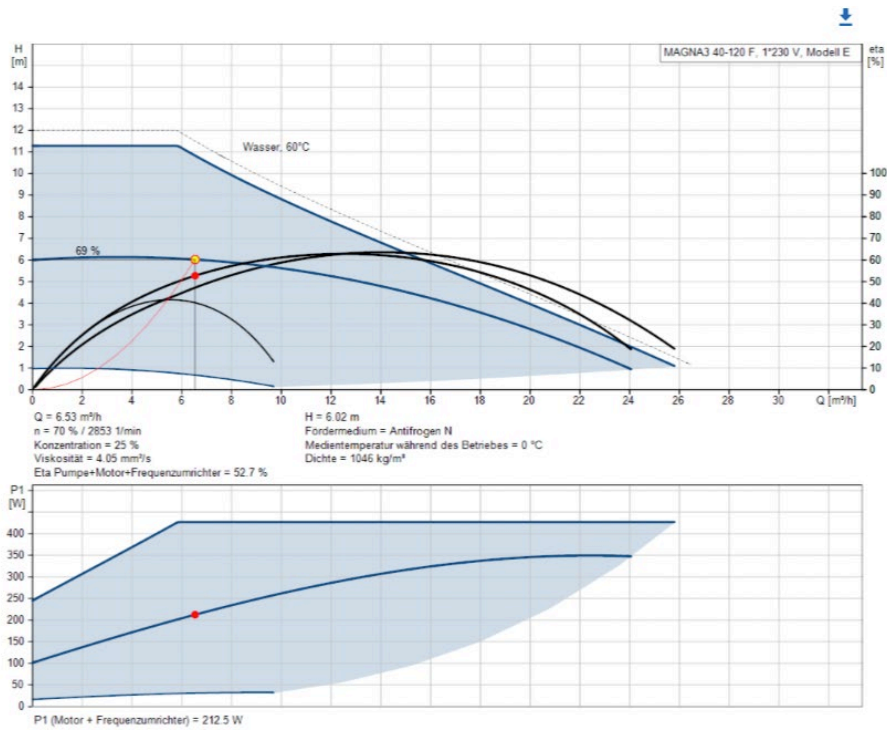
| Rohr | Durchfluss, l/s /m ³ /h | Druckverlust Pa/m | Rohrlänge, m | Druckverlust längster Strang, bar | Inhalt, Liter |
|---------------|------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| PE25x2.3 | 0.11 | 85 | 70 | 0.06 | 17x23=391 |
| PE25x2.3 | 0.22 | 550 | 2x18 | 0.2 | 12 |
| | 0.22 | | 2x (12 + 20 + 12 + 5 + 8 + 13) = 140 | | 46 |
| PE40x3.7 | 0.33 | 120 | 2x43 | 0.1 | 71 |
| PE50x4.6 | 1.0 | 240 | 2x10 | 0.05 | 25 |
| PE50x4.6 | 0.89 | 200 | 2x18 | | 46 |
| PE63x5.8 | 1.8 | 230 | 2x36 | 0.16 | 150 |
| gesamt | 1.8 / 6.5 | | | 0.57 | 740 |

Druckverlusttabelle Rehau Raugeo Erdwärmekollektoren mit 23% Ethylenglykol bei 5°C. Im normalen Betrieb wird die Temperatur fast immer höher liegen, Viskosität und Druckverlust also tiefer.

Werte Umwälzpumpe Asphaltkollektor: 6.5 m³/h – 0.6 bar;



III. Betriebspunkt der Kollektorpumpe: Grundfos Magna 3, 40-120 f (6.5 m³/h, 0.6bar, Stromverbrauch 212 W)



Betriebspunkt

Eingabe:

Q:

H:

H statisch *: m

Fördermedium

Fördermedium:

Konzentration *: %

IV. Expansionsvolumen:

Temperaturbereich, max/min: 30/-8°C

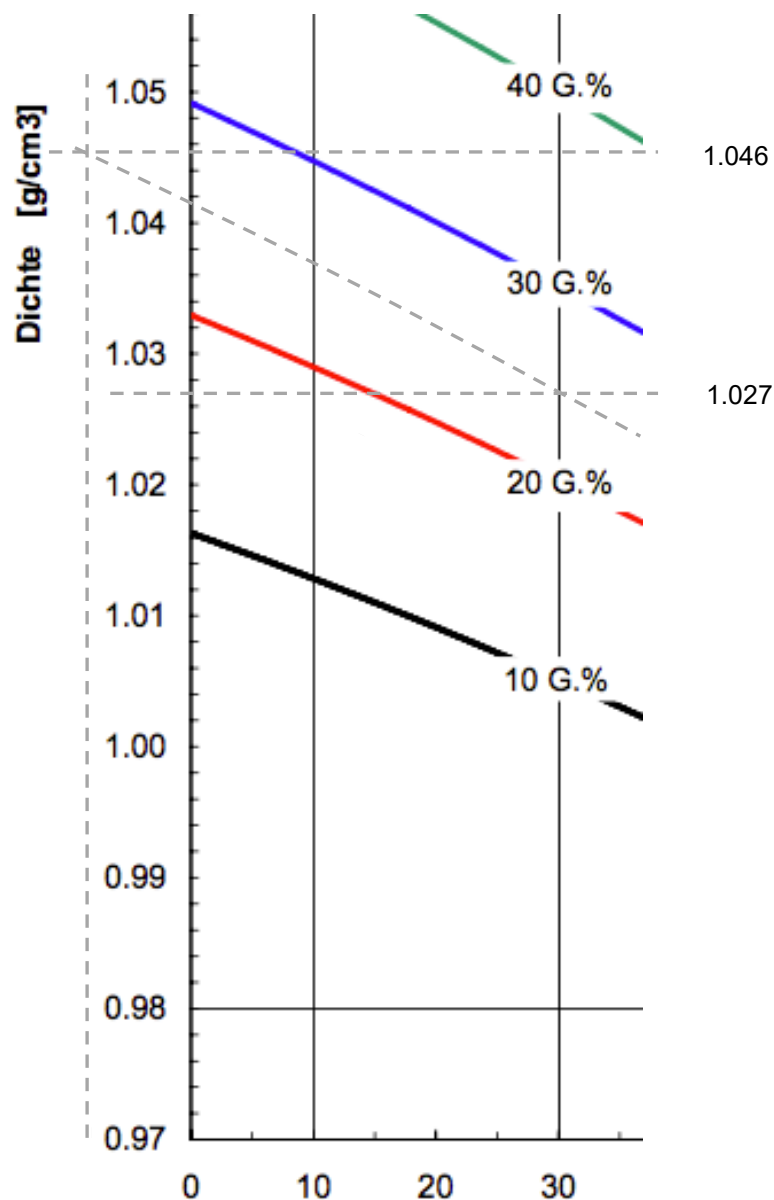
Dichteunterschied 25% Ethylenglykol: $(1.046\text{g/cm}^3 - 1.027\text{g/cm}^3) / 1.027\text{g/cm}^3 = 1.9\%$

D.h. Zu kompensierendes Expansionsvolumen für Kollektor und Sammelrohre: 15 Liter

* sh. Anhang

Alle Abgänge in den Schächten A und B müssen mit Drosselementen ausgerüstet werden, um die gleichen Temperaturspreizungen der einzelnen Felder einstellen zu können.

Auszug aus Diagramm Ethylenglykol Dichte/Temperatur:



V. Messungen der HSR

Unter dem westlichsten Element des Kollektorfelds auf der Nord-Ostseite des Gebäudes (sh. Bild 2) wurden 30cm unter den Rohren und in der Ebene der Rohre Messfühler angebracht. Weitere Fühler sollen später über dieser Stelle die Asphalttemperatur messen. Die Fühler werden zur Datenerfassung mit Kabeln mit der Zentrale verbunden.

Die Fühler der Fachhochschule sind im gleichen Feld wie die Regelfühler (Bild 4) an den Rohren und im Erdreich montiert. Die beiden nach oben wegführenden Kabel sind mit den in Bild 4 sichtbaren Steuerfühlern verbunden.

