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

Potentialabschätzung Asphaltkollektoren

Massnahme VR4 des Massnahmenplans Verminderung der Treibhausgase

Impressum

November 2019

Auftraggeber	Baudirektion Kanton Zürich Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Abteilung Energie Stampfenbachstrasse 12, 8090 Zürich www.energie.zh.ch, energie@bd.zh.ch
Auftragnehmer	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 Geowatt AG, Zürich, Engineering, Heizen und Kühlen mit Erdwärme, www.geowatt.ch
Autoren	Kriesi Energie GmbH, Ruedi Kriesi: Koordination, Bericht Geowatt AG, Ernst Rohner: Thermische Simulationen Flückiger und Bosshard AG, Dieter Flückiger, Michael Streiff: Kollektoraufbau, -kosten, rechtliche Situation
Begleitgruppe	Christoph Gmür, Baudirektion, AWEL, Abt. Energie Rupert H. Lieb, Baudirektion, TBA / Stab Dominik Oetiker, Baudirektion, AWEL / Abfallwirtschaft, Marco Ghelfi, Baudirektion, AWEL / Grundwasser Dr. Roland Wagner, Amt für Hochbauten, Stadt Zürich
Bezugsquelle	AWEL, Abteilung Energie, www.energie.zh.ch
Zitierempfehlung	AWEL, Abteilung Energie (Hrsg.) Potentialabschätzung von Asphaltkollektoren Massnahme VR4 des Massnahmenplans Verminderung der Treibhausgase der Baudirektion Kriesi Energie GmbH, Wädenswil (Verfasser)

Kriesi Energie GmbH
Flückiger + Bosshard AG
Geowatt AG

Zusammenfassung

Ein politischer Auftrag zur Klärung des Potentials von Asphaltkollektoren hat die Energiefachstelle des Kantons Zürich bewogen, deren Einsatzmöglichkeiten zu prüfen. Auf den Hauptautor dieser Studie ist sie durch dessen Überlegungen zu Asphaltkollektoren im Rahmen einer Studie zur Regeneration von Erdsonden [4] gestossen.

Die Vorstellung der Politiker, selbst Nationalstrassen grossflächig zur Wärmegewinnung zu nutzen, ist allerdings weit weg von den realen Möglichkeiten. Weil Asphaltkollektoren keine Wärmeisolation besitzen, eignen sie sich nur für die Gewinnung von Niedertemperaturwärme, und durch ihre horizontale Position erhalten sie nur im Sommer nennenswerte Energiemengen. Damit eignen sie sich fast nur für die Regeneration von Erdsondenfeldern, die nicht eigentlich Wärmequellen sind, sondern Saisonspeicher. Niedertemperaturwärme lässt sich zudem nur einige hundert Meter weit leiten. Für Asphaltkollektoren geeignete Strassen müssen also nahe beheizter Siedlungen liegen. Damit stehen die Gemeindestrassen im Fokus, nicht Kantons- oder gar Nationalstrassen.

In dieser Arbeit wird eine gegenüber den aus der Literatur bekannten abweichende Asphaltkollektorkonstruktion vorgeschlagen. Der Rohre sollen zuoberst in die Fundationsschicht eingebracht werden. Die resultierende ca. 15cm Überdeckung senkt zwar den Jahresgewinn, erlaubt aber ein einwandfreies Recycling. Aus der kiesigen Schicht lassen sich die Kollektorrohre auch nach vielen Jahren wieder herausziehen, während sie von umgebendem Asphalt kaum mehr zu trennen wären.

Mit Simulationen verschiedener Kombinationen von Asphaltkollektoren und Erdsondenfeldern wird hier gezeigt, dass sich durch Regeneration einerseits – wie erwartet - die Jahresarbeitszahl erhöhen und die Energiekosten senken lassen. Andererseits – und dies ist das erste wichtige Resultat – lassen sich durch vollständige Regeneration nicht nur die Anzahl Erdsonden drastisch senken, sondern insbesondere auch deren Abstände untereinander. Damit ist für ein Erdsondenfeld einer gegebenen Siedlung eine weit kleinere Fläche notwendig, was deren Anwendbarkeit für bestehende Bauten im dichten städtischen Umfeld deutlich verbessern dürfte.

Die Wärmekosten aus Asphaltkollektoren sind sehr stark von den Zeitpunkten von Einbau und Demontage resp. Erneuerung abhängig. Kann beides erfolgen, wenn die Strasse ohnehin bis zur Fundationsschicht erneuert werden muss, bleiben die dem Kollektor anzulastenden Zusatzkosten sehr gering und die Wärmekosten sogar deutlich tiefer als mit unverglasten Sonnenkollektoren. Das zweite überraschende Resultat: Diese Zusatzkosten sind nur ähnlich hoch, wie die Kostenreduktion dank der geringeren Sondenzahl!

D.h. Wärme aus einem Erdsondenfeld, das durch Asphaltkollektoren regeneriert wird, ist etwa gleich teuer wie aus einem Feld ohne Regeneration. Während aber ein Feld ohne Regeneration nach wenigen Jahrzehnten doch noch regeneriert oder ersatzlos stillgelegt werden muss und auch für nahe liegende Nachbarn eine Wärmenutzung des Untergrunds problematisch wird, lässt sich das Feld mit Regeneration beliebig lange über die 50 Betriebsjahre hinaus nutzen, und Nachbarn steht ihr Untergrund jederzeit zur Verfügung, unbeeinflusst von der bestehenden Wärmenutzung. Zudem ist der Stromverbrauch der Wärmepumpe erst noch etwas tiefer. Vollständige Regeneration von Erdsondenfeldern wird damit auch kommerziell interessant, wenn nicht genügend Abwärme gratis zur Verfügung steht.

In der Presse wurde Ende Oktober 2019 von negativen Erfahrungen mit einer Solarstrasse in Deutschland berichtet. Das ist eine völlig unterschiedliche Situation - dort geht es um Photovoltaik, also um Erzeugung von Elektrizität auf der Strassenoberfläche, hier um Wärmenutzung mit Kunststoffrohren, 15cm unter der Asphaltoberfläche.

Das positive Resultat soll nun mit ersten Pilotprojekten gefestigt werden. Die Kosten, Einfachheit von Bau und Demontage und insbesondere der erreichbare Ertrag müssen unter realen Bedingungen geprüft werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 3

2. Beeinflussung der Wärmekosten aus Erdsonden durch sommerliche Regeneration 3
   2.1 Unterkühlung vieler bestehender Erdsonden 3
   2.2 Regeneration zur Erhaltung einer hohen Jahresarbeitszahl 4
   2.3 Regeneration für minimale Anlagekosten und nachhaltige Wärmenutzung 6
   2.4 Nachteil der Regeneration zum passiven Kühlen 7

3. Bautypen und Erträge von Asphaltkollektoren 8
   3.1 Asphaltkollektoren als altes Konzept 8
   3.2 Vorschlag für den Aufbau von Asphaltkollektoren 9
   3.3 Wärmegewinn in Abhängigkeit der Verlegungstiefe 10
   3.4 Anordnung der Kollektoren in der Strasse 11

4. Kosten des Asphaltkollektors 12

5. Vergleich mit weiteren möglichen Quellen für die Regeneration 14
   5.1 Abwärme, Oberflächengewässer 14
   5.2 Unverglaste Sonnenkollektoren 14
   5.3 Aussenluft 16

6. Rechtliche Situation der Nutzung von Strassen als Asphaltkollektoren 16

7. Potential an nutzbaren Flächen in typischer Stadt- und Land-Gemeinde 17

8. Verbesserung des Mikroklimas durch Asphaltkollektoren 18

9. Erweiterung der verfügbaren Flächen mit kalter Fernwärme 18

10. Erwartete Verwendung von Asphaltkollektoren bei unterschiedlichen Energiepreisen 18

11. Permanente Lecküberwachung der Kollektorrohre 19

12. Regenerationssonden versus Hausanschluss im EFH Quartier mit älteren Sonden 19

13. Geeignete Situationen für Pilotprojekte 19

ANHANG 1: Ergänzende Grafiken aus Simulationen von Geowatt AG 21
ANHANG 2: Kostenrechnung Asphaltkollektoren (Berechnung F&B, 2.10.19): 24
ANHANG 3: Regenerationssonden versus Hausanschluss 26
ANHANG 4: Permanente Lecküberwachung 27
ANHANG 5: Referenzen 27

1. Einleitung

Dieser Bericht ist das Resultat eines Auftrags der Energiefachstelle des Kantons Zürich. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde die technische, finanzielle und rechtliche Machbarkeit von Asphaltkollektoren im Siedlungsraum und deren Nutzung für die Regeneration von Erdsonden abgeklärt. Dabei wurde diese Technologie mit Sonnenkollektoren verglichen und ihre Konkurrenzfähigkeit abgeschätzt.

Asphaltkollektoren liefern nur Niedertemperatur nahe der jeweiligen Umgebungstemperatur, weil sie sehr träge und unisoliert sind. Deshalb und wegen der horizontalen Ausrichtung liefern sie nur im Sommer nennenswerte Energiemengen. Damit beschränkt sich ihre Nutzbarkeit auf die Regeneration von Niedertemperatur-Saisonspeichern, d.h. praktisch von Erdsonden.

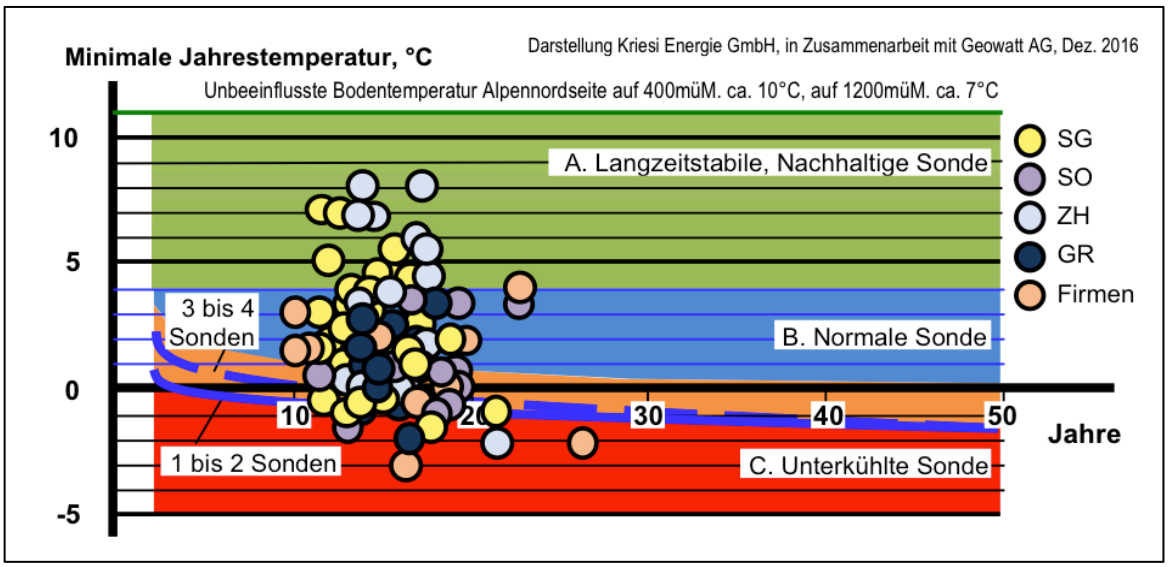
Dichte Siedlungen, ob städtisch oder ländlich, können mit Erdsondenfeldern mit Umgebungswärme beheizt werden. In vielen Siedlungen sind die Felder aber schon heute so dicht, dass sie ohne Regeneration in 10 bis 30 Jahren unterkühlen werden.

2. Beeinflussung der Wärmekosten aus Erdsonden durch sommerliche Regeneration.

2.1 Unterkühlung vieler bestehender Erdsonden

Viele bestehende Erdsonden sind schon heute unterkühlt. Als unterkühlt werden Anlagen definiert, die die Auslegungsanforderungen der SIA 382/6 voraussichtlich nicht erreichen werden, d.h. deren minimale Jahrestemperatur - als Mittel zwischen Vor- und Rücklauf - bei ähnlicher Belastung den Grenzwert von -1.5°C vor Ablauf von 50 Jahren unterschreiten dürfte. Dicht angeordneten Sonden, d.h. solchen zur Versorgung von Quartieren mit dicht beisammen liegenden Ein- oder Mehrfamilienhäusern, fliesst aus der Umgebung zu wenig Wärme zu, so dass ihre Mittel- und Minimaltemperatur kontinuierlich sinken.

Fig. 2.1: Messungen an 80 Anlagen zeigen einen beachtlichen Teil zu kühler Sonden. Bereits jetzt ist ihre Leistungsziffer gegenüber dem Neuzustand merklich reduziert. Sie müssen früher oder später regeneriert werden, damit sie weiterhin als Wärmequelle nutzbar sind (Ref. [1]).



2.2 Regeneration zur Erhaltung einer hohen Jahresarbeitszahl

Zur Bestimmung der Wirkung der Regeneration auf die Wärmekosten wurden an einer real existierenden Siedlung mit mehreren zusammen liegenden Mehrfamilienhäusern die Erdsonden nach verschiedenen Kriterien ausgelegt und die zu erwartenden Sondentemperaturen und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe berechnet.

Tab. 2.1: Anhand einer bestehenden Siedlung aus mehreren Mehrfamilienhäusern mit bekannten Daten zur Wärmepumpenheizung mit Erdsonden wurden die erwarteten Sondentemperaturen und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe mit 4 Varianten gerechnet:

a-1. ohne Regeneration, Auslegung nach SIA 384/6, d.h. Minimaltemperatur von -1.5°C wird nach 50 Jahren erreicht
a-2. ohne Regeneration, Auslegung mit 30 W/m
b. mit vollständiger Regeneration der jährlich entnommenen Wärmemenge mit der EWS Anzahl aus a-1
c. mit vollständiger Regeneration der jährlich entnommenen Wärmemenge mit minimaler Anzahl EWS.

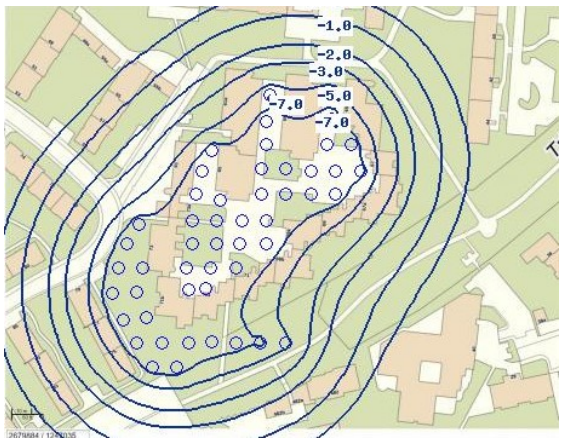
Bei Variante a-2, ohne Regeneration, sinkt die Minimaltemperatur schon nach 25 Jahren weit unter den Grenzwert der SIA 384/6 und die Leistungsziffer weit unter die Werte mit Regeneration (Var. b und c). Die Anlage wird also spätestens nach 25 Betriebsjahren eine Regeneration realisieren müssen, um Schäden an den Sonden zu vermeiden. Die Jahresarbeitszahl bei Variante b ist durch die vollständige Regeneration und die geringe spez. Sondenbelastung gleichbleibend hoch. Bei der Variante c bleibt die Arbeitszahl ebenfalls konstant, aber leicht tiefer als b.

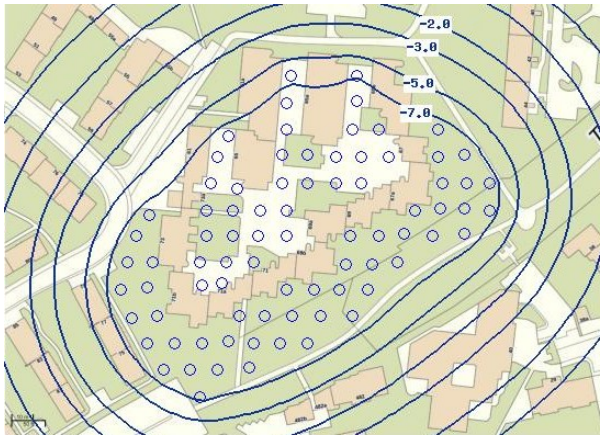
Anlagedaten:
- Erdsonden: 43 x 250m
- Heizleistung, inkl. BWW: 478kW
- Jahreswärmeerzeugung: 1186MWh

		Betriebsjahr	1		Betriebsjahr	25		Betriebsjahr	50	
Variante	EWS	Verdampfer	JAZ WP	Regener.	Verdampfer	JAZ WP	Regener.	Verdampfer	JAZ WP	Regener.
		MWh/a	-	MWh/a	MWh/a	-	MWh/a	MWh/a	-	MWh/a
a-1 ohne Reg.	80x250m	953.8	5.1	0.0	913.5	4.4	0.0	890.8	4.0	0.0
a-2) ohne Reg.	50x250m	943.7	4.9	0.0	890.2	4.0	0.0	860.2	3.6	0.0
b) mit Reg.	80x250m	960.9	5.3	971.3	961.7	5.3	970.5	961.9	5.3	961.9
c) mit Reg.	26x250m	942.3	4.9	941.9	942.4	4.9	943.5	942.2	4.9	942.4

Variante		Betriebsjahr	1		Betriebsjahr	25		Betriebsjahr	50	
		Tmax	Tmin		Tmax	Tmin		Tmax	Tmin	
a-1 ohne Reg.	80x250m	12.7	6.9		6.8	1.5		3.6	-1.5	
a-2) ohne Reg.	50x250m	12.7	4.6		4.5	-2.7		0.9	-5.9	
b) mit Reg.	80x250m	25.1	7.1		25.2	7.2		25.3	7.3	
c) mit Reg.	26x250m	40.0	-1.0		39.9	-1.1		40.0	-1.2	

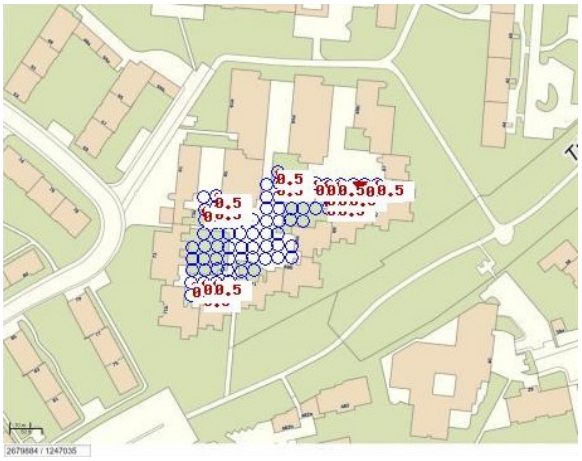
Fig. 2.2: Varianten a-1 und a-2: Nach 50, resp. 27 Betriebsjahren ohne Regeneration wird das Erdreich in grossem Umkreis unterkühlt sein, womit keine weitere Wärmenutzung des Untergrunds, auch für nahe gelegene Nachbarn, mehr möglich ist (angegebene Werte bedeuten die Abnahme gegenüber dem ursprünglichen Zustand in °C, Sondenabstand 12.5m).





Variante a-1 mit 80 Sonden nach 50 Jahren Variante a-2 mit 50 Sonden nach 27 Jahren

Fig. 2.3: Mit Varianten b und c mit vollständiger Regeneration der entnommenen Wärme erreichen die Erdreichtemperaturen auch nach 50 Jahren jeden Sommer wieder die Ausgangstemperaturen. Es kann tatsächlich von einer nachhaltigen Wärmequelle gesprochen werden.



Variante b mit 80 EWS nach 50 Jahren Variante c mit 50 EWS nach 27 Jahren

2.3 Regeneration für minimale Anlagekosten und nachhaltige Wärmenutzung

Anlage a-2, ohne Regeneration, mit reduzierter Sondenzahl, wird bereits nach 15 Jahren die von der SIA geforderte Minimaltemperatur unterschreiten und nach 20 bis 25 Jahren stillgelegt oder mit einer Regeneration ausgerüstet werden müssen. Wird die Anlage stillgelegt, sind die Sonden in 25 Jahren zu amortisieren, mit einer Annuität von 5 statt 3 Prozent pro Jahr (bei ca. 2% Zins). Die Jahreskosten der Sonden sind also in beiden Fällen – Betriebsdauer 25 oder 50 Jahre – etwa identisch. Wird die Anlage in 20 Jahren mit einer Regeneration ergänzt, so fallen deren Kosten einfach dannzumal an – Fall a würde damit zu einem Mittelweg zwischen c und d, mit gegenüber dem Minimum verlängerten Sonden.

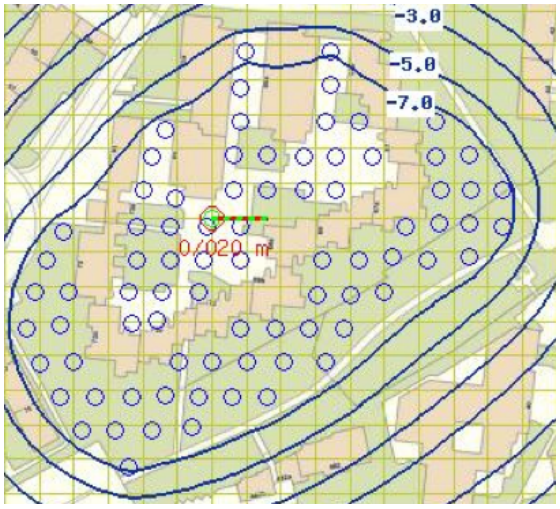
Tab. 2.2: Durch die Minimierung der Sondenzahl bei vollständiger Regeneration (Var. d) liegen die Energiekosten nur wenig höher gegenüber Var. c mit grosser Sondenzahl, die notwendigen Investitionen zum Bau der Erdsonden und entsprechend deren Amortisation aber sehr stark tiefer. Die vollständige Regeneration bei minimierter Sondenzahl ist also deutlich wirtschaftlicher als eine Minimierung der Energiekosten.
Anlagedaten: - Heizleistung, inkl. BWW: 478kW
- Jahreswärmeerzeugung: 1186MWh/a
- Wärmebezug aus den Sonden: ca. 890MWh/a
- Sondentiefe: 250m

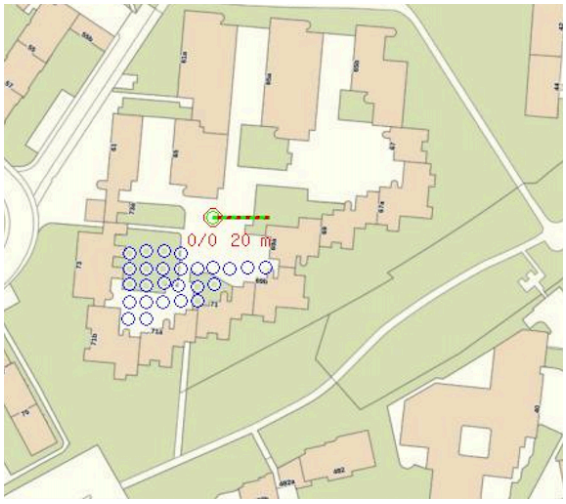
Regeneration	Anzahl Sonden -	Sonden-Invest., (70.-/m) Fr.	Sonden-Jahreskosten, 3[1)]/5[2)]%/a Fr./a	Minimaltemperatur nach 50 Jahren °C	Jahresarbeitszahl im 1. Jahr -	Jahresarbeitszahl nach 25 Jahren -	Jahresarbeitszahl nach 50 Jahren -	Stromkosten, Ø JAZ 0.15/kWh Fr./a
a-1. keine	80	1.4 Mio	42'000[1)]	-1.5	5.1	4.4	4.0	41'000
a-2. keine	50	0.9 Mio	44'000[2)]	-6.4	4.9	4.0	3.6	44'000
c. vollst.	80	1.4 Mio	42'000[1)]	6.7	5.3	5.3	5.3	34'000
d. vollst.	26	0.45 Mio	13'500[1)]	-1.2	4.9	4.9	4.9	37'000

[1)] Die Sonden können über 50 Jahre amortisiert werden
[2)] Die Sonden sind in 25 Jahre zu amortisieren. -1.5°C wird nach 19 Jahren unterschritten, -3.0°C nach 27 Jahren. D.h. nach 27 Jahren muss die Anlage abgeschaltet oder regeneriert werden.

Die dank Regeneration mögliche deutlich kleinere Sondenzahl reduziert nicht nur die Kosten für die Sonden und den Betrieb, sie verbessert auch die Möglichkeit, die nötige Anzahl Sonden in einer bestehenden Siedlung zwischen Häusern und Tiefgaragen anzuordnen. Dies insbesondere, weil dank der vollständigen Regeneration auch der Sondenabstand von 12.5m auf nur 6m reduziert werden kann, weil im Jahresrythmus der Radius der Temperaturschwankungen um die Sonden klein wird. Gegenüber dem ausgeführten Fall der bereits nach 25 Jahren kalten Anlage sinkt die notwendige Fläche des Sondenfelds also auf 26/50 * $(6m/12.5m)^2$ = 12% der bisherigen Fläche (sh. Fig. 2.4). Im innerstädtischen Bereich, wo für die Anordnung der Sonden vielleicht nur die Gehsteige verfügbar sind, kann dieser Vorteil der Regeneration entscheidend sein.

Fig. 2.4: Um ohne Regeneration nach 50 Betriebsjahren das von der SIA 384/6 geforderte Minimum von -1.5°C einzuhalten, sind 80 Sonden mit 12.5m Abstand notwendig (Bild links). Mit vollständiger Regeneration sind dafür minimal nur noch 26 Sonden nötig, die überdies in einem Abstand von nur 6m angeordnet werden können (Bild rechts). Die Minimaltemperatur wird jedes Jahr im Frühjahr erreicht, die Maximaltemperatur Ende Sommer. Im Jahresmittel liegt die Temperatur aber immer nahe der Ausgangstemperatur vor Erstellung der Anlage (sh. auch Anhang 1.b.). Damit ist die mittlere Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe im Mittel über die 50 Jahre deutlich besser gegenüber dem Fall ohne Regeneration. Der stark reduzierte Flächenbedarf des Erdsondenfeldes wird im innerstädtischen Bereich zusätzlich einen grossen Vorteil darstellen.





2.4 Nachteil der Regeneration zum passiven Kühlen

Als Folge der Erwärmung des Erdreichs durch vollständige Regeneration bei minimaler Sondenzahl (Var. d in Tab. 2.2) steigt die Temperatur der Sonden im Sommer tags auf 20 bis 40°C an. Nachts sinkt sie jedoch auch im Juli auf 13 bis 17°C ab (sh. Anh. 1b), womit passives Kühlen zeitlich limitiert wieder möglich wird. Für stärkere Kühlung wird aber ein Kompressor erforderlich.

3. Bautypen und Erträge von Asphaltkollektoren

3.1 Asphaltkollektoren als altes Konzept

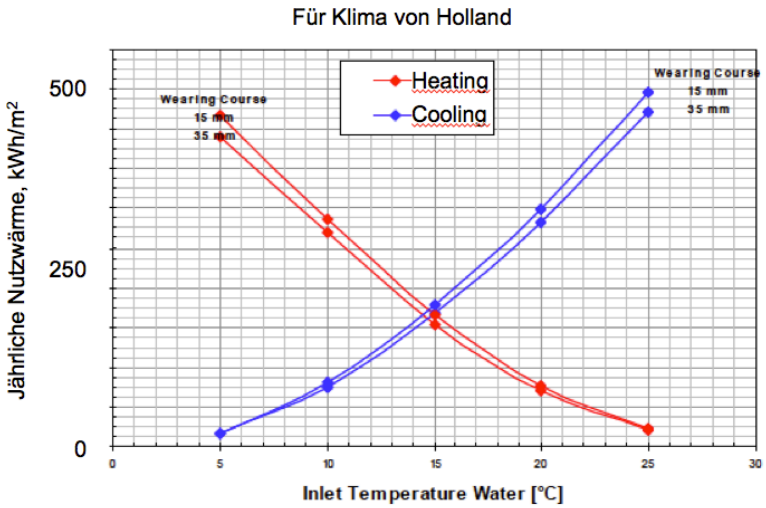
Das Konzept der Asphaltkollektoren zur Nutzung von Niedertemperaturwärme ist alt. Die erste gefundene Referenz stammt von Bernard Matthey, Montezillon, 1990.

Fig. 3.1: Das Westschweizer Ingenieurbüro B. Matthey, Montezillon, hat 1990 einen Erdspeicher mit einem Asphaltkollektor erwärmt, als Quelle für die Salle Polyvalente de Cortaillod [2]. Von Oktober bis März wird die gesammelte Wärme direkt der Wärmepumpe zugeführt, von April bis September dem Speicher. Die so jährlich gesammelte Wärme wird mit 330kWh/m^2 angegeben.

Fig. 3.2: Viel Entwicklungsarbeit und erste grössere Realisierungen erfolgten durch die holländische Ooms Producten. Die 10'000m^2 Brückenheizung bei Rotterdam wurde 2003 ausgeführt. Ref. [3]

Wie nachfolgende Figur 3.3 zeigt, können nennenswerte Energiemengen nur bei tiefen Temperaturen gesammelt werden.

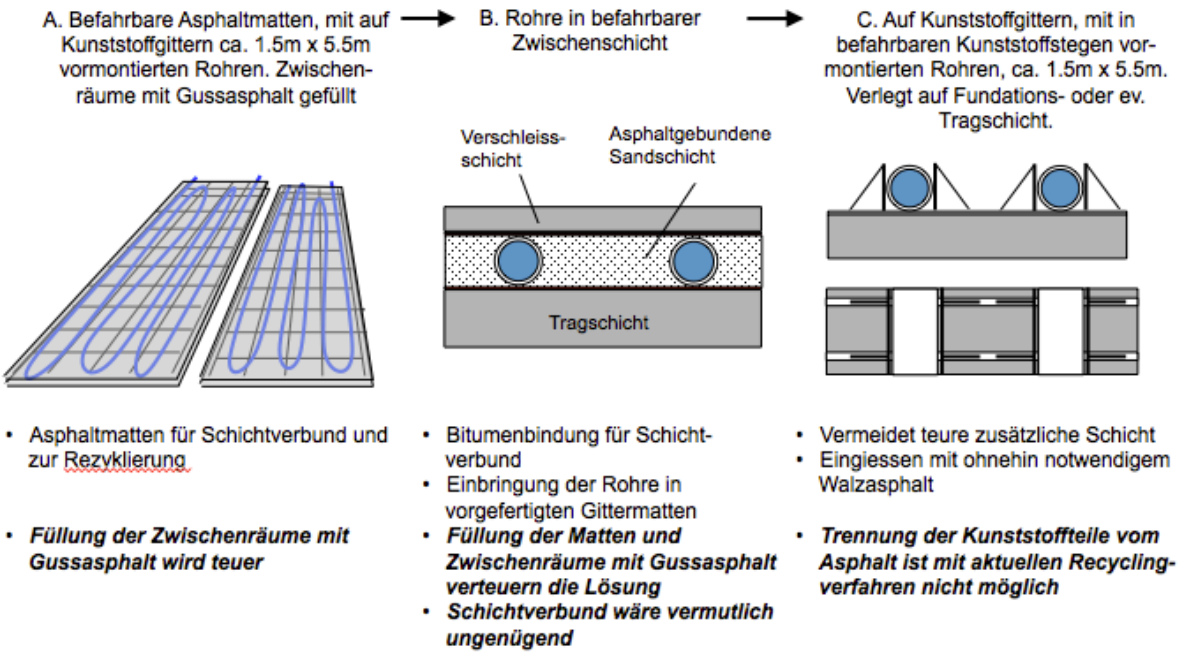
Fig. 3.3: Jährliche Nutzwärme von Asphaltkollektoren in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur in Holland. Ob die Kollektoren mit 15 oder 35mm überdeckt werden, hat wenig Einfluss auf die Ergiebigkeit (Ref. [3]).



3.2 Vorschlag für den Aufbau von Asphaltkollektoren

Um möglichst viel Energie sammeln zu können, sollte die Absorberfläche möglichst dicht unter der Oberfläche angeordnet werden, d.h. in oder direkt unter der Verschleissschicht. Dies begründet die von Ooms gewählte Konstruktion (Fig. 3.2). Das Ziel tiefer Kosten und die Notwendigkeit zum vollständigen Recycling der Asphaltschichten haben aber zum in Fig. 3.5 gezeigten Aufbau geführt. Bis diese Konstruktion favorisiert wurde, wurden die in Fig. 3.4 gezeigten Zwischenschritte durchlaufen.

Fig. 3.4: Varianten A bis C zeigen Zwischenschritte der Konstruktion, die wegen zu hohen Kosten, befürchtetem schlechtem Schichtverbund oder fehlendem Trennverfahren wieder verworfen wurden.



Insbesondere die Anforderungen an das Recyclingmaterial sind gleich hoch wie an neuen Asphalt. Im RC-Asphaltgranulatgemisch werden max. 2% Beton- oder Mischabbruch (Summe) und max. 0.3% sonstige Materialien wie Metall, Holz oder Kunststoff toleriert. Ein Fremdanteil in einem neu eingebauten Belag führt zu einer Mängelrüge, bis hin zum Ausbau auf Kosten des Herstellers. Magnetische Materialien können mit einem Magnet über dem Förderband gut entfernt werden. Alle anderen Materialen sind sehr schwierig, teuer und nicht wirtschaftlich, zu trennen.

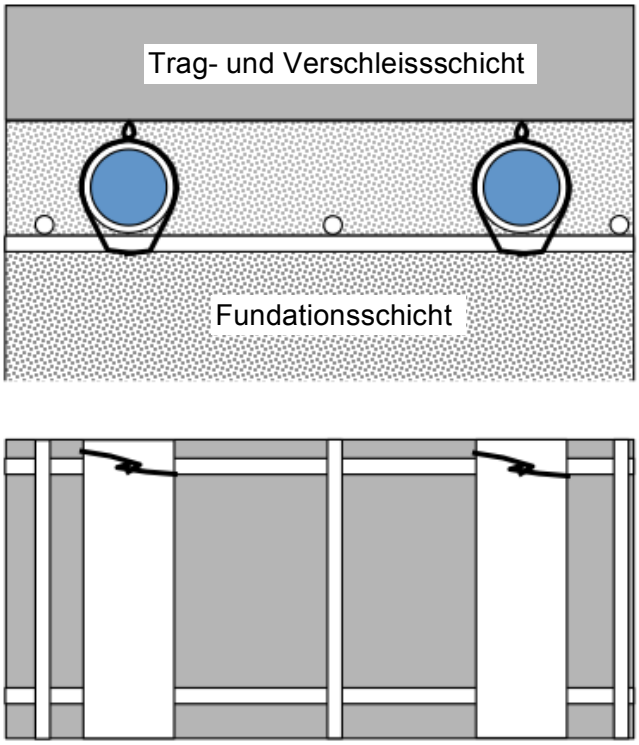


Fig. 3.5: Vorgeschlagener Aufbau: Geogitter als Abstandhalter werden mit den eingelegten Kunststoffrohren auf die gewalzte Fundationsschicht gelegt. Die Rohre werden mit einer ca. 3cm dicken Schicht aus feinem Kies, Ø 4 bis 8mm, überdeckt. Die Schicht wird gewalzt und somit für LKWs befahrbar. Darauf wird die Tragschicht aufgebracht.

Das Einbringen der auf Metallgittern vormontierten Rohre erlaubt ein rasches Verlegen.

Zur späteren Demontage wird der Asphalt weggefräst. Die Rohre werden zusammen mit den Matten mit einem Bagger aus der Fundationsschicht heraus gerissen.

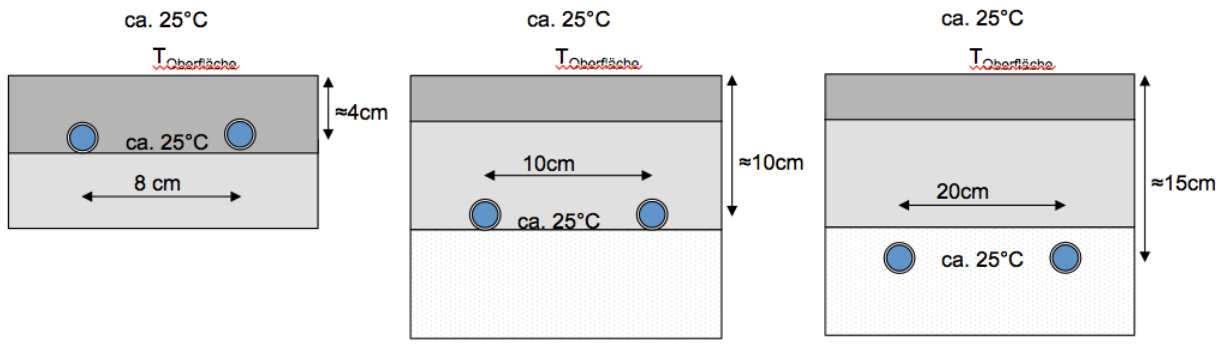
Vorteil der Konstruktion mit dem tief liegenden Kollektor ist die lange Nutzungszeit des Kollektors ohne Eingriffe an der Strasse. Nachteilig ist umgekehrt die meist sehr lange Zeit bis zum nächsten vollständigen Ausbau der Asphaltschichten; bis ein Kollektor in die Strasse eingebaut werden kann, kann es damit lange dauern. Nachteilig ist auch der tiefere Wirkungsgrad durch die grössere Überdeckung, wobei diese in den betrachteten Gemeindestrassen kleiner ist als in den nicht zur Diskussion stehenden Kantons- oder Nationalstrassen.

3.3 Wärmegewinn in Abhängigkeit der Verlegungstiefe

Für die Anwendung von Asphaltkollektoren kommen nur Gemeindestrassen in Frage, weil davon viel mehr Kilometer bestehen als von Kantonsstrassen und letztere zu einem beträchtlichen Teil ausserhalb der Siedlungsgebiete liegen. In den stärker befahrenen Kantonsstrassen kämen die Rohre mit der gewählten Kollektorkonstruktion zudem wegen der dickeren Asphaltschichten noch tiefer zu liegen.

Gemeindestrassen sind aus 3 Schichten aufgebaut. Zuunterst liegt die Fundation, aus einem 45 bis 50cm dicken, gebundenen oder ungebundenen Kiesgemisch. Die darüber liegende Tragschicht aus Walzasphalt hat in einer Quartierstrasse etwa 7cm Dicke, in einer Sammelstrasse etwa 10cm. Die Verschleiss- oder Deckschicht zuoberst besteht aus einer 3cm dicken Asphaltschicht. Damit ergeben sich für die möglichen Konstruktionen Rohrüberdeckungen von etwa 4, 10 und 15 cm. Dazu wurden die erreichbaren Jahresenergiemengen errechnet, die sich aus dem Jahresverlauf der Erdsondentemperaturen ergeben, wie sie dem Beispiel in Kapitel 2.3 zugrunde liegen.

Fig. 3.6: Werden die Kollektorrohre oben in die Fundationsschicht gelegt, so beträgt der jährliche Energiegewinn für die Regeneration des realen Erdsondenfeldes 120 kWh/m^{2}a oder noch 30% gegenüber einer optimalen Position in der Verschleissschicht.



Ertrag: 385 kWh/m^{2}a **148 kWh/m^{2}a** **120 kWh/m^{2}a**

3.4 Anordnung der Kollektoren in der Strasse

Die ursprüngliche Vorstellung, Asphaltkollektoren nur in Strassenabschnitten zu realisieren, in denen kein Konflikt mit anderen Werkleitungen entstehen kann, musste rasch fallen gelassen werden – im dichteren Siedlungsgebiet, wo die Regeneration von Erdsonden gefragt sein wird, enthalten alle Strassen verschiedenste Werkleitungen. Asphaltkollektoren können also nur Bedeutung erlangen, wenn sie auch über anderen Werkleitungen möglich sind. Die meisten Werkleitungen liegen aber unter der Fundationsschicht und werden während 50 bis 80 Jahren nicht verändert, ein Zeitraum, der für die Amortisation eines Asphaltkollektors ausreicht.

Viel häufiger sind Arbeiten an einzelnen Hausanschlüssen. Um diese ohne Konflikte mit Asphaltkollektoren zu ermöglichen, werden sie als 8m lange Felder mit jeweils 2m breiten Zwischenräumen geplant. Dieser Abstand genügt, um mit einem Graben einen Zugang zu den tiefer liegenden Werkleitungen ohne Beschädigung des Asphaltkollektors zu schaffen.

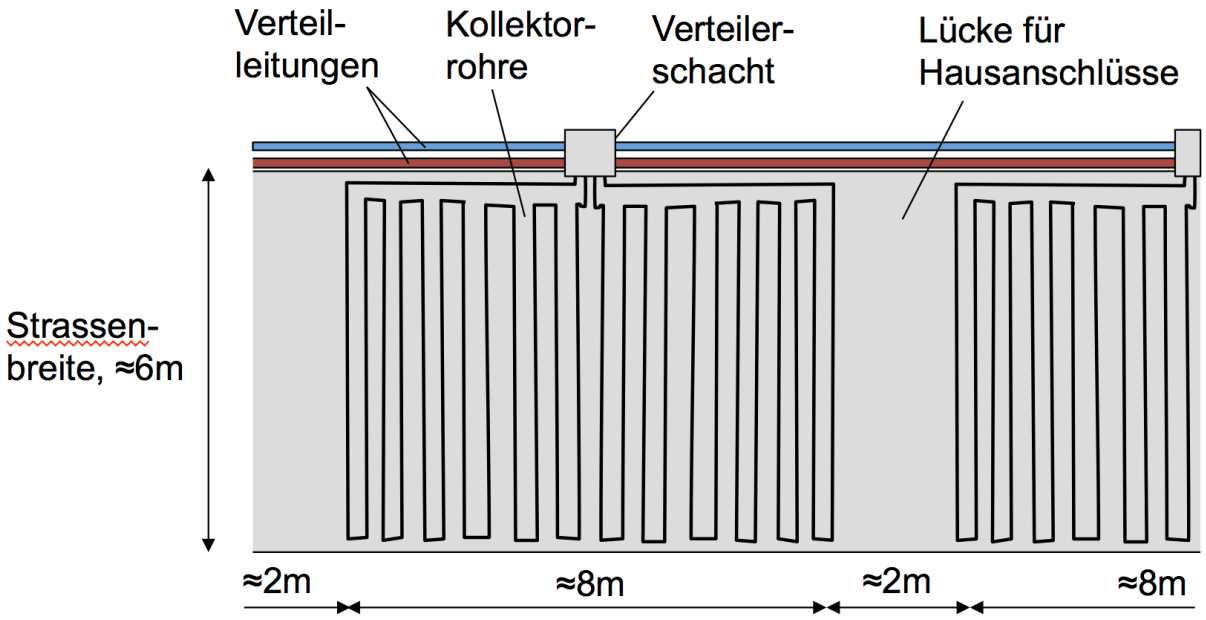
Die 6.3m x 8.4m grossen Felder werden aus 4 vorgefertigten Segmenten auf die Baustelle geliefert. Jedes Segment besteht aus einer Norm-Lagermatte HX188.63, Drahtstärke 6mm, Rohrabstand 150mm, à 6.3x2.1m (oder 5.3x2.1m). In jedem Segment ist 1 Rohrschlange mit Ø 25/20.4mm, Qualität PE-RC, montiert. Auf der Baustelle werden je 2 Segmente zu 1 Rohrschlange verschweisst und an einen Verteiler mit nur 2 Vor- und Rückläufen angeschlossen.

Mit dem 15cm tief liegenden Kollektor mit 120kWh/m^{2}a Ergiebigkeit beträgt die Maximalleistung 120W/m^2, womit zur Rückspeisung der ca. 890 MWh/a gem. Kap. 2.3 eine aktive Fläche von 7500m^2 notwendig sind.

Kollektorfeldeigenschaften pro Feld:

- Abmessungen:	6.3m x 8.4m
- Maximale Leistung:	6.4 kW
- Durchfluss:	660 l/h = 12.5 l/h/m^2
- Maximale Temperaturerhöhung:	8.1K
- Jahresertrag:	6400 kWh/a
- Druckabfall mit d 25/20.4mm, je 2 Segmente in Serie, 188m Rohrlänge/Kreis, 20% Ethylenglykol, bei 10°C:	0.11bar

Fig. 3.7: Die Kollektorelemente werden mit ca. 8m Länge und der Breite entsprechend der Strasse auf Geogittern vorgefertigt. Die Kollektorrohre werden auf der Baustelle in den Verteilerschächten an die Verteiler angeschweisst und damit mit den Verteilleitungen verbunden. Die 2m breiten Abstände zwischen den Feldern erlauben den konfliktfreien Neu- oder Umbau von Hausanschlüssen an tiefer liegende Werkleitungen.



4. Kosten des Asphaltkollektors

Die Kosten des Asphaltkollektors variieren stark, je nach Anteil der anzurechnenden Asphaltierungskosten beim Neueinbau und Rückbau. Im Idealfall kann der Kollektor ein- und zurückgebaut werden zu Zeitpunkten, an denen die Strasse ohnehin bis zur Fundationsschicht erneuert werden muss (Kostenzusammenstellung sh. Anhang 2).

Tab. 4.1: Kosten des Asphaltkollektors inkl. Längssammelleitung in Franken pro m^2 Kollektor / Rp. pro kWh (Annuität 4%). Die mit 4 Rp/kWh gegenüber Studie [4] von 2017 doppelten Wärmekosten resultieren weitgehend aus der halben Ergiebigkeit durch die tiefere Position des Kollektors.

	Varianten zum Anteil der dem Kollektor anzurechnenden Asphaltarbeiten	Stichleitung und Hausanschluss		
		ohne	mit (MFH)	mit (EFH)
a.	inkl. Rückbau der Kollektoren allein, ohne Asphaltarbeiten: Kollektorein- und -ausbau erfolgen jeweils zum Zeitpunkt, wenn die Strasse bis zur Fundationsschicht erneuert wird.	122.- /4.1	124.- /4.1	161.- /5.4
b.	inkl. gesamter Rückbau, ohne Asphaltarbeiten: Der Kollektoreinbau erfolgt zum Zeitpunkt, wenn die Strasse bis zur Fundationsschicht erneuert wird, der Ausbau, wenn der Kollektor defekt ist. Die Asphaltschichten auf Strasse und Gehweg müssen also auf Kosten des Kollektoreigentümers entfernt und neu eingebaut werden.	226.- /7.5	228.- /7.5	265.- /8.8
c.	inkl. Belagsarbeiten und Rückbau der Kollektoren: Kollektorein- und -ausbau erfolgen unabhängig von der Strassenerneuerung	319.- /10.6	321.- /10.7	358.- /11.9

Zur vollständigen Regeneration der Anlagen in Kap. 2.3 sind jährlich 891MWh Wärme notwendig. Mit der vorgeschlagenen Kollektorkonstruktion aus Kap. 3.3, mit 15cm überdeckten Rohren und einem Jahresertrag von ca. 120kWh/m^2, ist also eine aktive Kollektorfläche von 891MW/120kWh/m^2 = 7'500m^2 notwendig. Dank der Regeneration sinkt die Sondenlänge von 80 x 250m = 20'000m auf 26 x 250m = 7'500m (sh. Tab. 2.2). Die Gesamt-Betriebskosten aus Wärmepumpenstrom und Amortisation von Sonden und Asphaltkollektor sind in Tab. 4.2 gezeigt.

Werden die Sonden dieser Mehrfamilienhaussiedlung mit einem Asphaltkollektor mit idealen Voraussetzungen regeneriert, d.h. Ein- und Ausbau erfolgen, wenn der Asphalt ohnehin bis zur Fundationsschicht erneuert wird, so sind die Jahreskosten mit vollständiger Regeneration und minimaler Sondenlänge etwa gleich hoch wie ohne Regeneration.

Mit Regeneration bleibt das Erdreich für die Wärmenutzung aber über die 50 Jahre hinaus und auch jederzeit für nahe liegende Grundstücke verfügbar. Es ist somit keine Frage mehr, ob eine vollständige Regeneration im Falle zentral genutzter grosser Erdsondenfelder Sinn macht, wenn Regeneration so günstig verfügbar wird.

Die dargestellten Gesamt-Betriebskosten sind stark von den gewählten Amortisationsfaktoren, den tatsächlichen Kosten für Sonden und Asphaltkollektor sowie der gesammelten Energiemenge abhängig. Es sind also einige ausgeführte Projekte nötig, um breiter anwendbare, tragfähige Kostenangaben zu erhalten. Die Gesamtkosten mit und ohne Regeneration liegen aber in jedem Fall so nahe beisammen, dass sich die Durchführung eines Pilotprojektes lohnt.

Auch wurde keine Optimierungsrechnung zwischen Sondenlänge und Stromverbrauch bei vollständiger Regeneration durchgeführt. Mit dem eingesetzten Strompreis von 15 Rp./kWh dürfte das Optimum nahe bei der minimalen Sondenlänge liegen. In Anbetracht der Aussichten zur künftigen Stromversorgung muss aber von höheren Preisen ausgegangen werden, was zu etwas grösseren Sondenlängen und leicht höheren Jahresarbeitszahlen führen dürfte.

Tab. 4.2: Mit den Energiemengen für die Regeneration und den Antrieb der Wärmepumpen von Tab. 2.2 und den hier bestimmten Kosten für den Asphaltkollektor ergeben sich fast gleich hohe Jahreskosten mit vollständiger Regeneration und minimaler Sondenlänge als ohne Regeneration. Während ohne Regeneration die Minimaltemperatur erst nach 25 resp. 50 Jahren erreicht wird, geschieht dies mit Regeneration in jedem Frühjahr, um sich aber im Laufe des Sommers wieder über die Ausgangstemperatur zu Betriebsbeginn zu erhöhen.

Regeneration	**Sonden-Investition (70.-/m) Fr.**	**Sondenkosten, 3[1]/5[2]%/a Fr./a**	**Stromkosten, (15Rp/kWh) Fr./a**	**Kollektorinvestition Fr.**	**Kollektorkosten, 4%/a Fr./a**	**Kosten gesamt Fr./a**
a-1. keine	1.4 Mio	42'000[1]	41'000	-	-	**83'000**
a-2. keine	0.9 Mio	44'000[2]	44'000	-	-	**88'000**
b. vollst.	1.4 Mio	42'000[1]	34'000	0.93 Mio	37'000	**113'000**
c. vollst.	0.45 Mio	13'500[1]	37'000	0.93 Mio	37'000	**88'000**

[1] Die Sonden können über 50 Jahre amortisiert werden

[2] Die Sonden sind in 25 Jahre zu amortisieren. -1.5°C wird nach 19 Jahren unterschritten, -3.0°C nach 27 Jahren. D.h. nach 27 Jahren muss die Anlage abgeschaltet oder regeneriert werden.

5. Vergleich mit weiteren möglichen Quellen für die Regeneration

5.1 Abwärme, Oberflächengewässer

In den Siedlungsgebieten bestehen nicht viele Wärmequellen, mit denen Erdsonden günstig regeneriert werden könnten. Prozessabwärme und Kanalisation haben geringe Potentiale. Prozessabwärme und auch Seen oder Flüsse sind geographisch sehr begrenzt. Kalte Abwärme lässt sich aber nicht weit leiten, weil die kleinen Temperaturdifferenzen grosse Wassermengen erfordern und das Verlegen von Fernleitungen im Siedlungsgebiet sehr aufwendig sein kann. Dies begrenzt die Wärmeleistung pro Wärmequelle. Überlegungen von Minergie mit dem EWZ von 2014 zeigten, dass deshalb lokale Erdsonden für Wohnbauten im Normalfall günstiger sind als zentrale Anlagen mit kalter Fernwärme etwa aus Seewasser.

5.2 Unverglaste Sonnenkollektoren

Analog dem Asphaltkollektor lässt sich für die Regeneration der Sonden eines Einfamilienhauses ein mit Rohrschlangen ausgerüsteter Sitzplatz oder Gartenweg als Kollektor verwenden.

Gemäss [4] bieten sich zur Regeneration von Erdsonden aber auch unverglaste Sonnenkollektoren an, wie sie üblicherweise für die Schwimmbadheizung verwendet werden.

Eine konkrete Anfrage bei Soltop Schuppisser AG, Elgg, ergab für günstige Kunststoffkollektoren eine erwartete Lebensdauer von nur 15 bis 20 Jahren bei Kosten für die installierte Anlage von 60 bis 70% gegenüber Absorbern aus rostfreiem Stahl. Damit kommen diese nicht in Frage, nachdem die Anlage weit länger funktionieren soll.

Anlagen mit Absorbern aus rostfreiem Stahl, inkl. Installation auf dem Flachdach eines Mehrfamilienhauses und Vertikalleitung zum Erdgeschoss, ohne Wanddurchbruch und Anschluss an den bestehenden Sondenkreis, bedeuten Investitionen von 800.- bis 1000.- Fr./m^2, für Anlagegrössen von 20 bis 200m^2, ebenfalls gemäss Angaben Soltop Schuppisser AG (Ref. [5]). Damit sind Lebensdauern bis 50 Jahre zu erwarten (die ältesten heute existierenden Anlagen sind 40 Jahre alt).

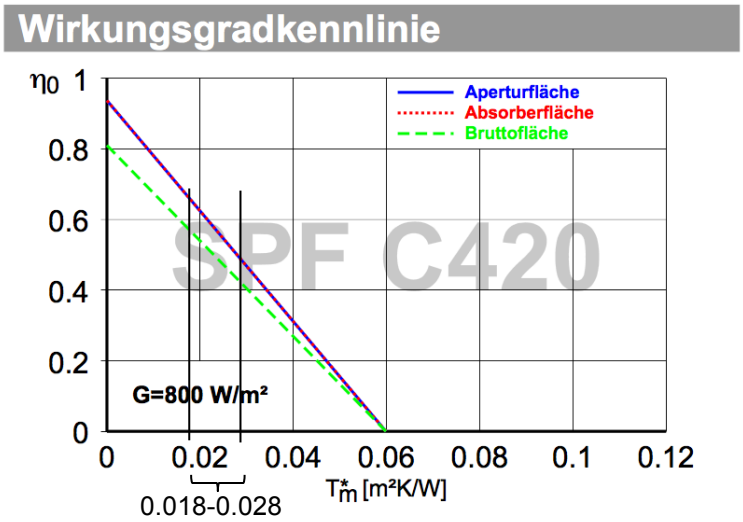


Fig. 5.1: Bei typischen 500W/m^2 Einstrahlung und 25 bis 30°C Nutztemperatur bei 16°C Aussentemperatur (Mittelwert Mai bis September für Zürich) ist mit nebenstehendem Diagramm (Ref. [6]) ein Wirkungsgrad von 40 bis 55% zu erwarten. Die Jahresleistung von Mai bis September beträgt damit etwa 200 bis 300kWh/m^2 oder rund das Doppelte des Asphaltkollektors. Bei 4% Annuität resultieren Wärmekosten von 10 bis 20 Rp./kWh.

Der Asphaltkollektor ist damit an Orten interessant, wo er für weniger als ca. 400.-/m^2 realisiert werden kann. Er wird damit für grössere Anlagen zum unverglasten Sonnenkollektor konkurrenzfähig selbst, wenn gemäss Kap. 4, lit c. auch die Asphalt- und Rückbauarbeiten zulasten des Asphaltkollektors gehen.

Zudem steht der Sonnenkollektor in Konflikt mit anderen Nutzungen der gleichen Dachfläche, etwa für Pflanzen oder PV-Anlagen. Auf dem Flachdach wären zwar auch die gleichzeitige Nutzung von PV und unverglastem Sonnenkollektor möglich. Photovoltaikflächen, die auch im Winter einen nennenswerten Ertrag liefern, wenn Elektrizität den grössten Wert hat, müssen steil gegen Süden geneigt und in grösserer Distanz zueinander aufgestellt werden, um sich im Winter wenig zu beschatten. Umgekehrt kann ein thermischer Kollektor zur Sondenregeneration so ausgelegt werden, dass er nur im Sommer Wärme sammelt. Er kann somit zwischen die PV-Flächen gelegt werden, wie in Fig. 5.2 dargestellt. Damit bleiben auch auf dem mit PV genutzten Dach rund die Hälfte der Fläche für die thermische Nutzung verfügbar. In höheren Mehrfamilienhäusern wird damit die verfügbare Dachfläche aber knapp werden (sh. Fig. 5.3).

Fig. 5.2: Werden PV-Flächen auf einem Flachdach steil aufgestellt, damit sie auch im Winter einen hohen Ertrag liefern, wenn der Wert der erzeugten Elektrizität am höchsten ist, so bleibt dazwischen etwa die Hälfte der Fläche für die sommerliche Nutzung von Niedertemperaturwärme mit einem unverglasten thermischen Sonnenkollektor verfügbar. Bei höheren Gebäuden wird diese Fläche zur vollständigen Regeneration nicht ausreichen.

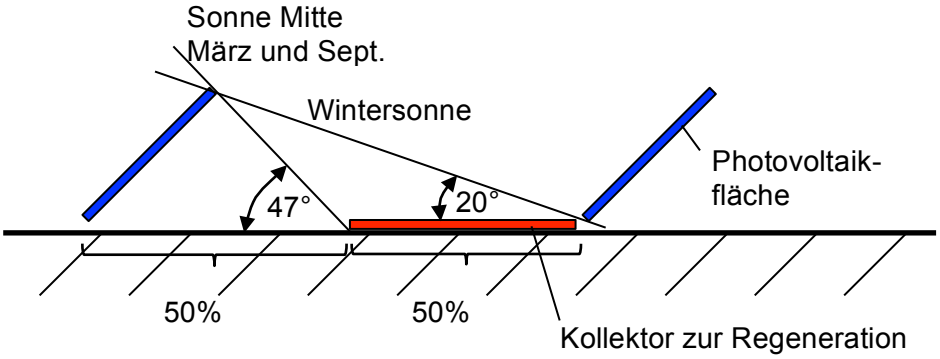
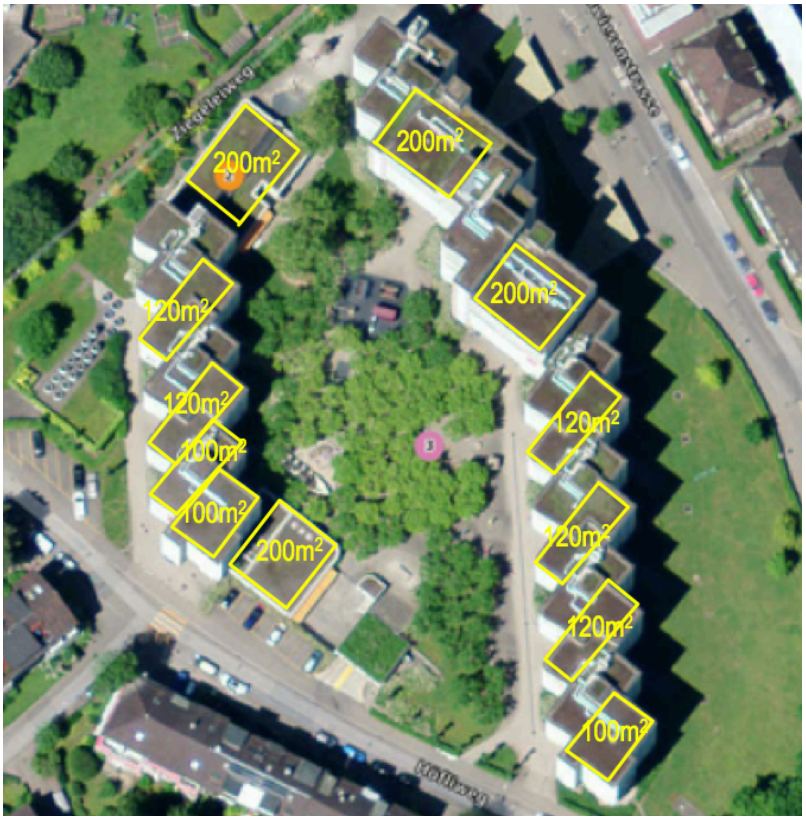


Fig. 5.3: Am Beispiel der städtischen Siedlung Heuried mit ebenfalls ca. 400kW Heizleistung und 5 bis 7 Geschossen wäre die verfügbare Dachfläche zur vollständigen Regeneration knapp (aus: www.map.search.ch). Wird die gleiche Verdampferenergie von 890 MWh/a angenommen, so wäre dafür bei einer Kollektorleistung von 300kWh/m^{2}a eine Fläche von 3000m^2 nötig. Gemäss Bild wäre aber nur etwa 1700m^2 Dachfläche verfügbar. Bei gleichzeitiger Nutzung der Dächer für PV würden damit sogar nur knapp 1000m^2 oder 1/3 der nötigen Fläche erreicht.



5.3 Aussenluft

Als lokale Wärmequelle bietet sich neben Sonnenenergie nur Aussenluft an. In Verbindung mit einer Komfortlüftungsanlage ergibt sich dazu eine einfache Lösung. Durch Abkühlung der Aussenluft vor dem Lüftungsgerät bis auf etwa 10°C und entsprechender Trocknung mit einer reversiblen Wärmepumpe lässt sich dem Luftstrom dank dem hohen Anteil an Feuchtigkeit viel Wärme entziehen. Die Menge reicht im Minergie-Haus zur Deckung von etwa der Hälfte der jährlichen Verdampferleistung der Wärmepumpe für Raumheizung und Warmwasser.

Die abgekühlte Aussenluft kann im nachfolgenden Lüftungsgerät mit der Abluftwärme wieder erwärmt werden. Je nach Kühlbedarf kann der Bypass des Lüftungsgeräts geöffnet und dem Haus mehr oder weniger kühle und getrocknete Zuluft zugeführt werden, als angenehmer Nebennutzen dieser Art der Sondenregeneration.

Der nötige apparative Aufwand ist klein, weil nur eine Ergänzung des bestehenden Luftstroms mit einem Kühler und eine reversible statt reine Heizungswärmepumpe notwendig sind. Ergänzt mit einem unverglasten Sonnenkollektor kann sich diese Lösung als günstig erweisen. Konkrete Zahlen aus ausgeführten Anlagen existieren noch nicht (sh. dazu auch [4])

6. Rechtliche Situation der Nutzung von Strassen als Asphaltkollektoren

Kollektorrohre in der Strasse können rechtlich wie Werkleitungen betrachtet werden. D.h. sie werden vom Strasseneigentümer, also der Gemeinde, in der Regel geduldet. In der Konzession wird üblicherweise ein Beseitigungsrevers festgehalten, das den Werkleitungsbetreiber verpflichtet, seine Leitungen auf eigene Kosten aus- und wieder einzubauen, wenn dies zum Unterhalt der Strasse notwendig ist. Nutzer der Konzession sind meist öffentlich-rechtliche Organisationen, wie Elektrizitätswerk, Wasserversorgung, etc, können aber auch Private sein, wie z.B. Cablecom.

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Strasse bis zur Fundationsschicht kurze Zeit nach dem Bau wieder geöffnet werden muss, ist klein. Sie besteht aber, etwa im Falle eines Wasserleitungsbruchs, durch welchen eine Strasse auf einer grösseren Länge aufgerissen werden kann.

Falls Asphaltkollektoren einmal eine grössere Verbreitung erreichen sollten, liessen sich Schäden an der Strasse, die zu einem vorzeitigen Ersatz des Kollektors führen und für die kein Dritter verantwortlich gemacht werden kann, versichern. Für Bau und Betrieb solcher Anlagen würde sich auch ein Contractingmodell, z.B. mit einem Gemeindewerk als Träger, eignen. Damit könnten solche Risiken auf eine grössere Anlagenzahl verteilt werden.

7. Potential an nutzbaren Flächen in typischer Stadt- und Land-Gemeinde

Der grosse Erneuerungszeitraum der Trag-, und noch mehr der Fundationsschichten, erfordert eine langfristige Planung. Typischerweise wird eine Strasse ganz selten genau dann erneuert, wenn eine angrenzende Siedlung Erdsonden einbauen will. Die Erneuerung von Gemeindestrassen hat einen Planungsvorlauf von 5 bis 7 Jahren, was die Abstimmung erleichtert. Zudem hat eine Siedlung nach Einbau der Erdsonden, je nach Sondenlänge und gegenseitigem Abstand, 5 bis 10 Jahre Zeit, die Regeneration zu realisieren.

Bei 50 bis 80 Jahren Lebensdauer einer Strasse eignen sich damit ein Anteil der Gemeindestrassen von

(5 bis 10 Jahre)/(50 bis 80 Jahre), entsprechend 7 bis 20%,

zur Verwendung als Asphaltkollektoren. Wird allerdings davon ausgegangen, dass viele Strassen zum Zeitpunkt der Erstellung der Siedlungen neu gebaut worden sind, so wird der Anteil der nutzbaren Strassen für 1940 bis 1970 erstellte Siedlungen sehr hoch, für jüngere ganz tief sein.

Fig. 7.1: Anhand dieses Ausschnitts in Au, Wädenswil, (aus: www.map.search.ch) lassen sich die verfügbaren Flächen in einem gemischten ländlichen Baugebiet, mit weitgehend zwischen 1950 und heute entstandenen Bauten, abschätzen. Asphaltierte Plätze und Parkflächen sind klein (rot: private, gelb: Schulen) oder unsicher (blau: Gewerbeflächen) durch erwartete grössere bauliche Veränderungen. Die Flachdachflächen (grün) sind im abgebildeten Gebiet mit rund 20’000m^2 deutlich kleiner als die Strassenflächen mit rund 60’000m^2.

8. Verbesserung des Mikroklimas durch Asphaltkollektoren

Für eine Person auf der Strasse oder dem Gehweg ist die Sonneneinstrahlung mit 1000W/m^2 gegenüber der Rückstrahlung des Bodens dominant. Befindet sie sich aber unter einem Sonnenschutz, etwa einer Sonnenstore über einem Schaufenster, werden die Reflexion und die Wärmestrahlung der Strasse sehr spürbar.

Eine tiefere Oberflächentemperatur der Strasse beeinflusst aber nur die Wärmeabstrahlung der Strasse und damit nur etwa die Hälfte der auf die Person treffenden Strahlung.

Die tief liegenden Kollektorrohre bedeuten nicht nur eine kleine Maximalleistung von etwa 120 W/m^2, also nur 12% der Einstrahlung, sondern auch eine nur schwache Absenkung der Oberflächentemperatur um nur ca. 3K von 58 auf 55°C (sh. Anh. 1.c). Wird also nur die Hälfte der auf die Person treffenden Wärmestrahlung um ca. 12% reduziert, so wird die Wirkung kaum spürbar. *

* Wärmeabstrahlung einer 58°C gegenüber 55°C warmen Strassenoberfläche:
Oberfläche 58°C: $E = 5.7 \times 10^{-8} (T^4 - T^4) = 5.7 \times (3.31^4 - 3.03^4) = 206$ W/m^2;
Oberfläche 55°C: $E = 5.7 \times 10^{-8} (T^4 - T^4) = 5.7 \times (3.28^4 - 3.03^4) = 181$ W/m^2 = 88%
Reflexion der Strasse: 20% von 1000W/m^2 = 200W/m^2;

9. Erweiterung der verfügbaren Flächen mit kalter Fernwärme

Die Investitionen für den Asphaltkollektor zur Lieferung der 891 MWh zur Regeneration der Sonden im Beispiel von Kap. 2.3 und Tab. 4.1 betragen 0.93 Mio Franken. Mit der verwendeten Annuität von 4% ergibt dies einen Preis der kWh von 4 Rp. oder 1/3 der Wärmekosten des unverglasten Sonnenkollektors (sh. Fig. 5.1).

Der Asphaltkollektor wäre also immer noch eine günstige Wärmequelle, wenn eine geeignete Strasse in einiger Entfernung liegt, so dass eine kalte Fernleitung mit 25% der Kosten des Kollektors oder 230'000.- Franken verlegt werden muss.

Bei geschätzten Kosten einer Fernleitung in einem einfachen Gebiet von 500.- pro Meter liesse sich damit eine Leitung von 400 bis 500m Länge realisieren.

Diese Möglichkeit vergrössert die Wahrscheinlichkeit, im Einzugsgebiet einer Siedlung eine passende Strasse zu finden.

10. Erwartete Verwendung von Asphaltkollektoren bei unterschiedlichen Energiepreisen

Die erfreulichen resultierenden Verhältnisse mit fast gleichen Kosten für vollständige Regeneration bei verkürzten Sonden gegenüber reiner Wärmeentnahme machen die Frage zur erwarteten künftigen Anwendung des Asphaltkollektors weitgehend unabhängig vom Energiepreis. Vielmehr ist anzunehmen, dass die Regeneration grösserer Erdsondenfelder mittels Asphaltkollektoren zum Standard wird, sofern genügend Erfahrungsdaten verfügbar sein werden, die die hier gemachten Angaben bestätigen.

Die zu erwartende Zahl von Asphaltkollektoren ist also vielmehr eine Frage der Anzahl bestehender und künftiger grösserer Erdsondenfelder. Im städtischen Gebiet waren diese für bestehende Siedlungen bisher einerseits durch die zu hohe Temperatur der Wärmeverteilung und durch den verfügbaren Platz zur Erstellung von Erdsonden limitiert. Die Möglichkeit, die Sonden mit nur 6 statt 20m Abstand und nur 35 bis 50% der bisherigen Zahl anzuordnen, dürfte das Interesse in neueren, mit Bodenheizungen ausgerüsteten Siedlungen stark verändern.

Die künftige Zahl von Wärmepumpenheizungen mit Erdsonden als Quelle wiederum wird stark von der Klimapolitik und der künftigen Elektrizitätsversorgung abhängen.

11. Permanente Lecküberwachung der Kollektorrohre

Wie im Beispiel in Anhang 4 gezeigt, existieren Methoden zur permanenten Lecküberwachung von erdverlegten Rohren. Doch sind die Renditebedingungen von Asphaltkollektoren knapp und ein Überwachungssystem und –dienst mit Sicherheit nicht finanzierbar. D.h. auch, dass ein Asphaltkollektor also nur eine Erfolgschance hat, wenn er über lange Zeit zuverlässig funktionieren und deshalb keine Lecküberwachung brauchen wird.

12. Regenerationssonden versus Hausanschluss im EFH Quartier mit älteren Sonden

Ein Erdsondenfeld könnte nicht nur durch Anschluss der bestehenden Sonden an einen Asphaltkollektor regeneriert werden. Die Wärme des Asphaltkollektors könnte dem Erdreich auch durch zusätzliche neue Sonden zugeführt werden. Damit würden die Hausanschlüsse entfallen. Dafür wären neue Sonden und Gräben von der Strasse bis zu diesen notwendig. Eine solche Lösung wäre für ein EFH-Quartier mit einer Sonde und Heizung pro Haus vorstellbar. Der grobe Kostenvergleich in Anhang 3 favorisiert klar den Hausanschluss gegenüber neuen, parallelen Sonden.

13. Geeignete Situationen für Pilotprojekte

Zur Erhärtung der für diesen Bericht zusammengestellten Vorschläge und Daten sind erste Pilotprojekte notwendig. Damit können die Angaben und Annahmen erhärtet und vielleicht das nötige Vertrauen in diese neue Technik geschaffen werden, als notwendige Voraussetzung für eine breitere Anwendung.

In einem ersten Schritt ist im kleinen Rahmen eine Verifikation des erzielbaren Ertrags bei 15cm Asphaltüberdeckung zu empfehlen. Dies kann anhand einer neuen Erdsonde für ein Einfamilienhaus mit ca. 5kW und etwa 75m^2 Asphaltkollektor geschehen. Damit werden vergleichbare Erdreichtemperaturen wie im grossen Sondenfeld erhalten, einem entscheidenden Faktor für den erreichbaren Jahresertrag des Kollektors.

Für die Durchführung eines zweiten, grösseren Pilotprojekts dürften die folgenden Voraussetzungen vereinfachend sein:

1. Heizleistung des oder der durch eine Heizzentrale versorgten Gebäude mindestens 50kW: Damit benötigt der Kollektor etwa 750m^2 entsprechend 6 x 125m (netto, 156m brutto, d.h. inkl. Lücken für Hausanschlüsse). Dies wäre eine genügende Grösse, um die Einbaumethode testen zu können und trotzdem die Anlagekosten mit ca. 100'000.- angesichts der Unsicherheiten in Grenzen zu halten. Die anteilmässigen Kosten der Detailplanung werden damit deutlich zu hoch ausfallen, was im Rahmen eines Pilotprojekts aber nicht relevant ist.
2. Die an den Häusern vorbeiführende Strasse wird in nächsten 1 bis 2 Jahren bis zur Fundation erneuert: Damit kann das Projekt in absehbarer Zeit realisiert werden. Dies dürfte v.a. bei 1940 bis 1970 erstellten Siedlungen zutreffen.
3. Die Strasse ist nicht wesentlich durch Bäume oder Häuser beschattet: Damit wird eine mindestens durchschnittliche gesammelte Energiemenge erreicht.
4. Die Distanz von der Strasse zur Heizzentrale beträgt weniger als 50m: Damit bleiben die Kosten für die Stichleitung tief, sofern keine aufwendigen Gärten oder Bauten dazwischen liegen.
5. Bauliche Situation der Siedlung mit abnehmender Wahrscheinlichkeit zur Realisierung:
   a. Bestehende Siedlung mit bestehender WP mit unterkühlten Erdsonden: Hier wird ein genügender Handlungsdruck bestehen. Wenn der oder einer der Eigentümer zudem technisch interessiert ist, wären dies gute Voraussetzungen für den notwendigen Ein-

bau von Messfühlern für eine mindestens 5-jährige Messperiode. Die längere Phase ist notwendig, um die thermische Erholung des Sondenfeldes beobachten zu können.

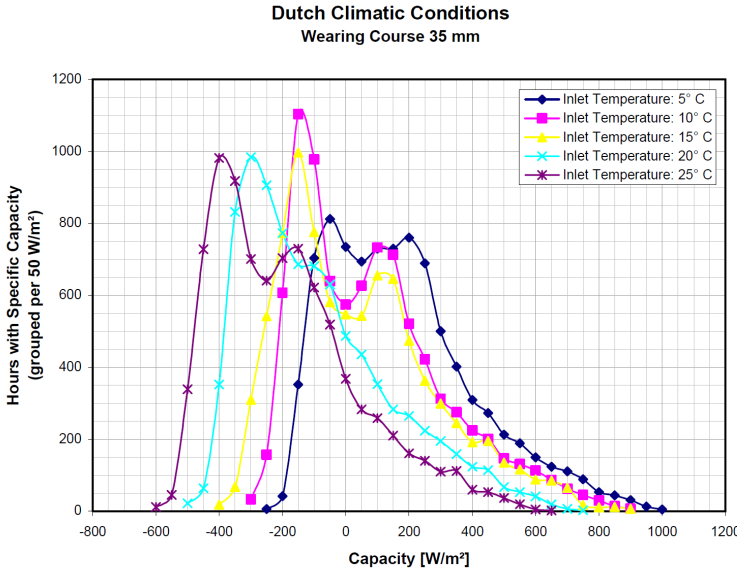
b. Neubausiedlung mit WP und Erdsonden.
c. Bestehende Siedlung, in der der Heizkessel durch eine WP ersetzt wird

6. Eigentumsverhältnisse der Siedlung mit abnehmender Wahrscheinlichkeit zur Realisierung:
   a. MFH, mit Contracter für WP-Betrieb. Der Contractingvertrag kann dank Regeneration verlängert werden;
   b. MFH, Mietobjekt, 1 Eigentümer;
   c. MFH, Eigentumswohnungen, mit Eigentümergemeinschaft mit grosser Einigkeit zum Vorgehen;
   d. EFH-Quartier mit gemeinsamer Heizzentrale oder Platzproblemen zur Platzierung von Sonnenkollektoren und mit einer sehr harmonischen Eigentümergemeinschaft.

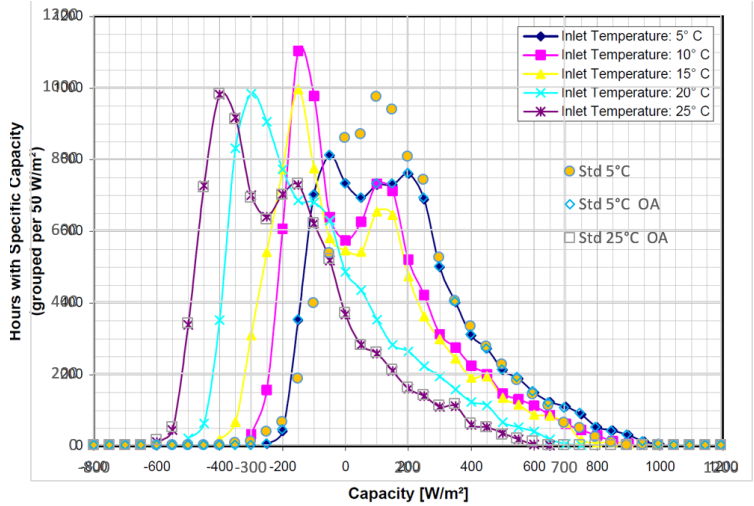
ANHANG 1: Ergänzende Grafiken aus Simulationen von Geowatt AG

a. Asphaltkollektor

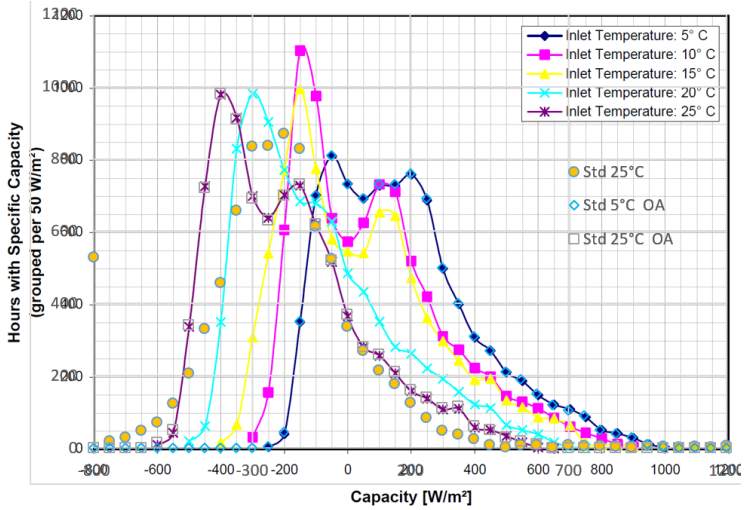
Für die Bestimmung der Leistung des Asphaltkollektors wurden mit einem einfachen Modell die Daten von Ooms Avenhorn (Ref. [3]) auf die Formel für einen unverglasten Sonnenkollektor mit Meteodaten für Uccle, NL, umgerechnet.



Die Parameter wurden so variiert, dass das Intergral unter der entsprechenden Kurve mit den berechneten Werten der Meteostation Uccle ca. übereinstimmten. Im nebenstehenden Diagramm sind die berechneten Werte bei 5°C Eintrittstemperatur in den Kollektor (Std 5°C) über die gemessenen Werte gelegt.

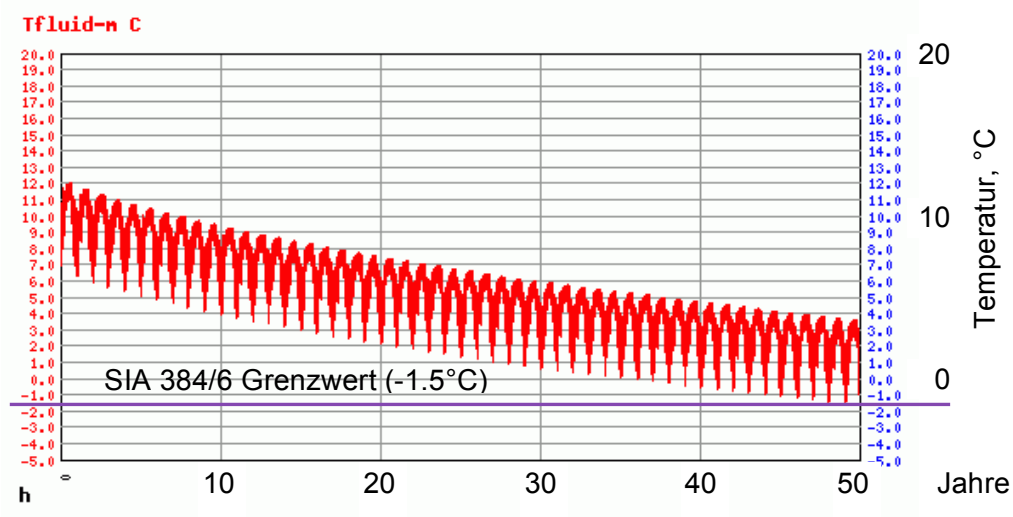


Im nebenstehenden Diagramm sind die berechneten Werte bei 25°C Eintrittstemperatur in den Kollektor (Std 25°C) über die gemessenen gelegt.

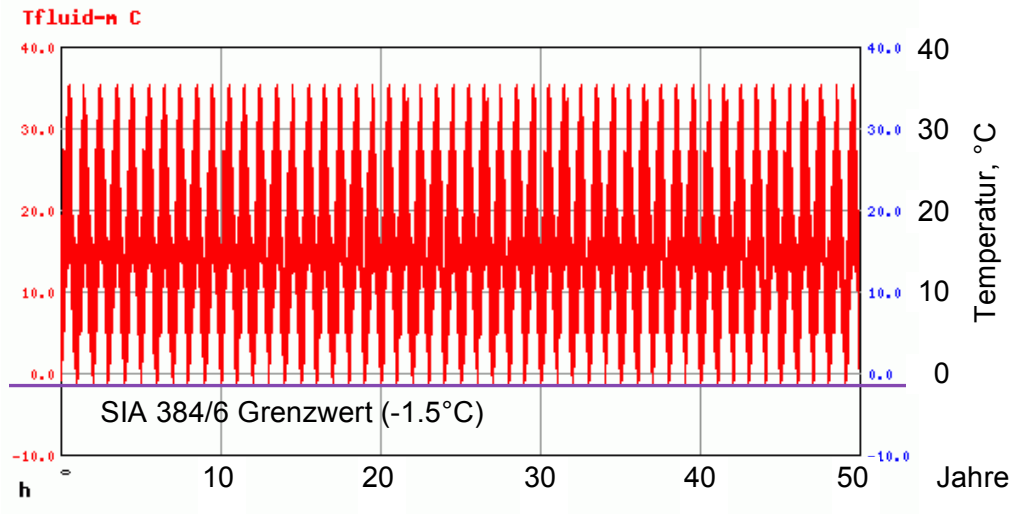


b. Erdsondentemperaturen zu Tab. 2.2

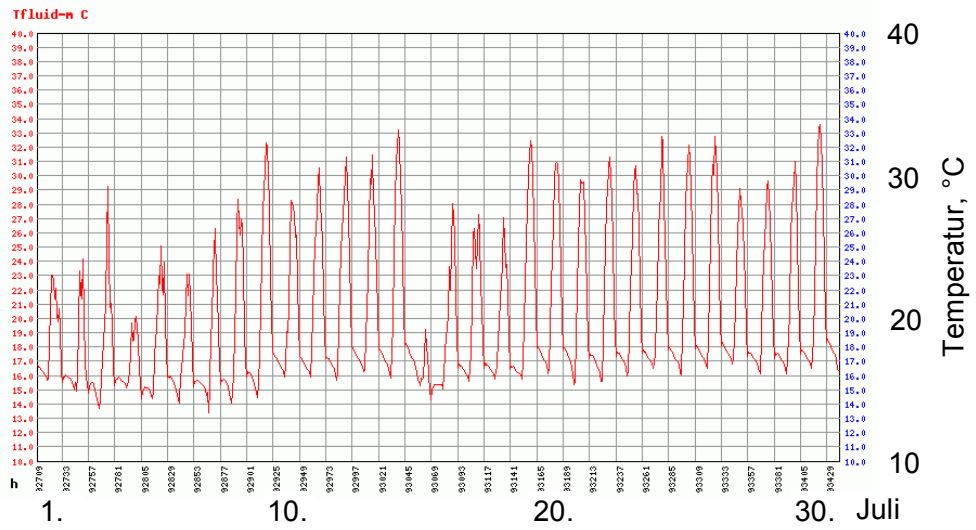
Einhaltung der Minimaltemperatur nach 50 Jahren ohne Regeneration:



Einhaltung der Minimaltemperatur mit minimaler Sondenlänge und vollständiger Regeneration

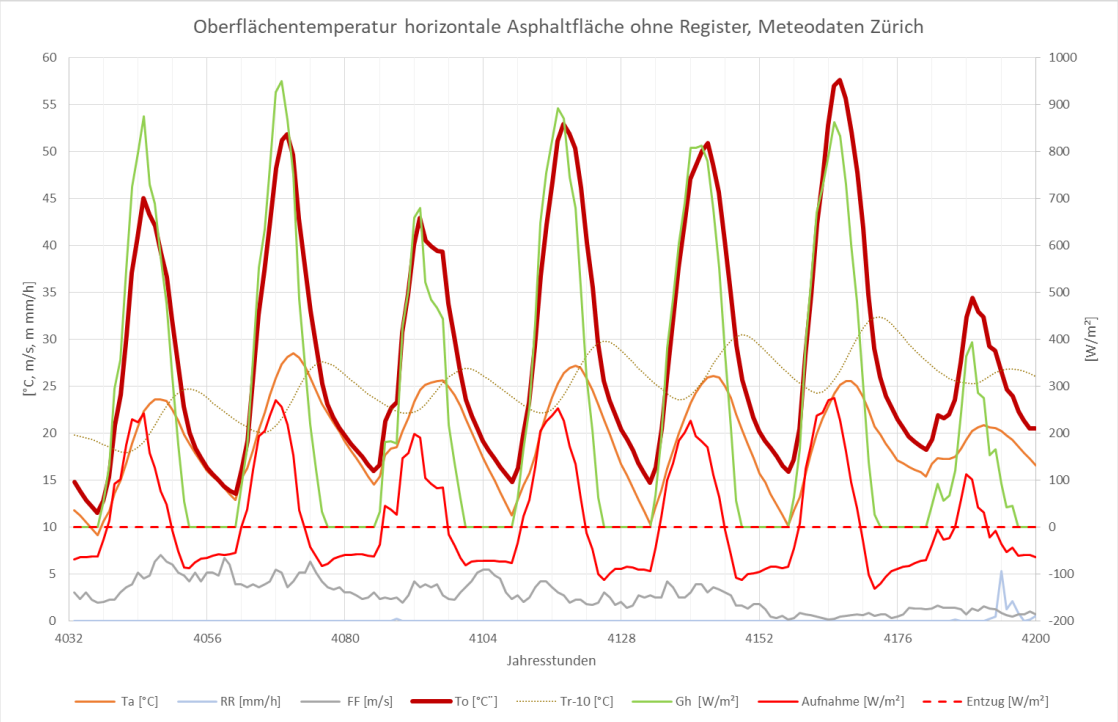


Temperaturverlauf im Juli bei vollständiger Regeneration und minimaler Sondenlänge

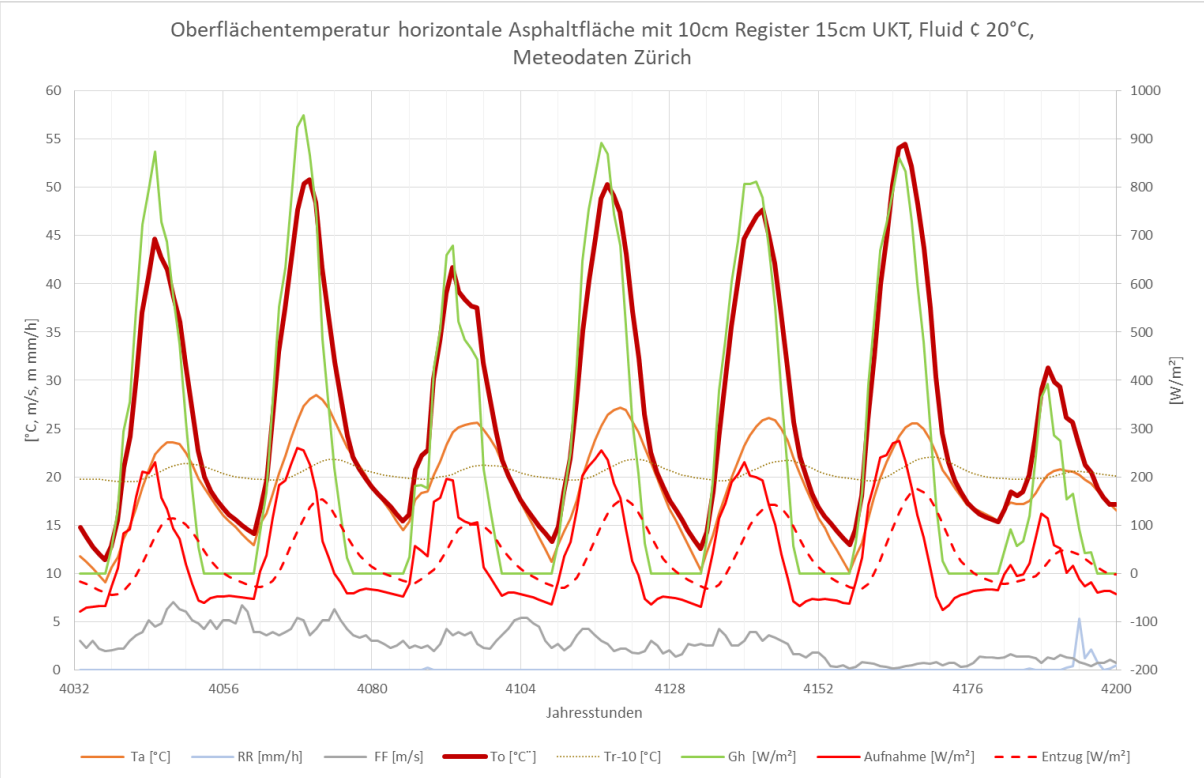


c. Strassenoberflächentemperatur mit und ohne Register

Oberflächentemperatur ohne Register



Oberflächentemperatur mit Register mit 20°C 15cm unter Asphaltoberfläche:
Die Spitzentemperaturen liegen nur ca. 3K tiefer als ohne Register.



ANHANG 2: Kostenrechnung Asphaltkollektoren (Berechnung F&B, 2.10.19):

- Kosten Kollektor und Sammelleitungen

Nachfolgende Kostentabelle umfasst einen Strassenabschnitt von 6 x 50m, entsprechend 0.8x300m^2 = 240m^2 aktiver Fläche. Die in Abschnitt 8 grau hinterlegten Felder zeigen das Minimum der im Idealfall vom Kollektorbetreiber zu tragenden Rückbaukosten.

	19059 A Kostenschätzung Asphaltkollektoren	**Länge: 50 m'**			**Breite: 6.0 m**			aktiv
	exkl. Mehrwertsteuer / Genauigkeit: ± 20%							240m^2
		Menge	Einh.	E-Preis	Betrag	Summe	Summe min.	pro m^2
					CHF	CHF	CHF	CHF/m^2
1	**Baustelleneinrichtungen**							
	Installation ca. 10% von Bausumme	1	P		6'963.00		4'696.00	
2	**Vorbereitungsarbeiten**							
	Abtrag Kies 6cm fest	18	m^3	60.00	1'080.00			
	Entsorgung Kies fest (50%)	7	m^3	30.00	210.00			
	Erstellung Rohplanie	300	m^2	5.00	1'500.00			
3	**Asphaltkollektoren**							
	Lieferung	5	Stk.	1'300.00	6'500.00			
	Verlegung	5	Stk.	500.00	2'500.00			
	Ergänzung Kies fest (ab Zwischenlager)	11	m^3	25.00	275.00			
4	**Vor- und Rücklauf**							
	Aushub fest	1	m^3	35.00	35.00			
	Entsorgung fest	0.5	m^3	30.00	15.00			
	PE ø 30 liefern und verlegen	5	m'	15.00	75.00			
	Liefern Betonkies 0/16 fest	0.5	m^3	52.00	26.00			
	Einbringen Betonkies 0/16 fest	0.5	m^3	25.00	12.50			
	Auffüllung fest	0.5	m^3	20.00	10.00			
5	**Übergabeschacht**							
	Aushub fest	4	m^3	35.00	140.00			
	Entsorgung fest	2	m^3	30.00	60.00			
	Liefern und versetzen Schacht NW 800mm, Tiefe: 1.00m	1	Stk.	600.00	600.00			
	Liefern und versetzen Gussabdeckung	1	Stk.	500.00	500.00			
	Liefern Geröll fest	0.5	m^3	65.00	32.50			
	Erstellung Sickerpackung	0.5	m^3	30.00	15.00			
	Erstellung Ablauf und Boden mit Mörtel ausstreichen	1	Stk.	50.00	50.00			
	Rohreinführungen bohren und abdichten	4	Stk.	80.00	320.00			
	Auffüllung fest	2	m^3	20.00	40.00			
	Einbau + Lieferung Verteiler	1	Stk.	1'850.00	1'850.00			
6	**Längsleitungen**							
	Aushub U-Graben bis 1.10m fest	45	m^3	35.00	1'575.00			
	PE ø 110 liefern und verlegen	100	m'	25.00	2'500.00			
	Liefern Betonkies 0/16 fest	15	m^3	52.00	780.00			
	Einbringen Betonkies 0/16 fest	15	m^3	25.00	375.00			
	Auffüllung fest	30	m^3	20.00	600.00	**28'639.00**	**26'372.00**	
7	**Abschlüsse und Belagsarbeiten**							
	Aushub für Abschlüsse	2.5	m^3	50.00	125.00			
	Liefern Randstein	10	m'	35.00	350.00			
	Versetzen Randstein in Beton	10	m'	60.00	600.00			
	Planie Fahrbahn	300	m^2	6.00	1'800.00			
	Einbau Fahrbahn Tragschicht 10 cm	75	t	150.00	11'250.00			
	Einbau Fahrbahn Deckschicht 3cm	22	t	180.00	3'960.00			
	Planie Gehweg	100	m^2	5.00	500.00			
	Einbau Gehweg Tragschicht 6.0cm	15	t	170.00	2'550.00			
	Einbau Gehweg Deckschicht 2.5cm	6	t	200.00	1'200.00			
						22'335.00		
8	**Rückbau**							
	Belag Fahrbahn fräsen / aufbrechen	300	m^2	8.00	2'400.00			
	Belag Gehweg aufbrechen	5	m^2	6.00	30.00			
	Entsorgung Ausbauasphalt	98	t	30.00	2'940.00			
	Entfernung Kollektoren	240	m^2	5.00	1'200.00			
	Entsorgung Kollektoren	240	m^2	2.00	480.00			
	Abbruch und Entsorgung Übergabeschacht	1	St	250.00	250.00			
	Verfüllen der ausser Betrieb genommenen Längsleitungen	1	m3	280.00	280.00			
	Grabenauffüllung liefern und einbringen fest	1.5	m^3	40.00	60.00			
	Liefern und einbringen Fundationsschicht ca. 5 cm, fest	15	m^3	45.00	675.00		2'945.00	
	Planie Fahrbahn	300	m^2	6.00	1'800.00			
	Einbau Fahrbahn Tragschicht 10 cm	75	t	150.00	11'250.00			
	Einbau Fahrbahn Deckschicht 3cm	22	t	180.00	3'960.00			
	Planie Gehweg	5	m^2	5.00	25.00			
	Einbau Gehweg Tragschicht 6.0cm	1	t	170.00	170.00			
	Einbau Gehweg Deckschicht 2.5cm	0.5	t	200.00	100.00			
						25'620.00		
	Übersicht Kostenschätzung							
	exkl. Mehrwertsteuer / Genauigkeit: ± 20%					Betrag		Betrag
						CHF		CHF/m^2
	Erstellung ohne Belagsarbeiten					28'639.00		**119.30**
	Erstellung mit Belagsarbeiten					50'974.00		**212.40**
	Gesamtkosten ohne Belagsarbeiten, inkl. Rückbau	Längsleitungen werden verfüllt nicht abgebrochen				54'259.00		**226.10**
	Gesamtkosten mit Belagsarbeiten, inkl. Rückbau	Längsleitungen werden verfüllt nicht abgebrochen				76'594.00		**319.10**
	Erstellung ohne Belagsarbeiten, mit min. Rückbauanteil	Längsleitungen werden verfüllt nicht abgebrochen					29'317.00	**122.20**

- Kosten der Stichleitungen zur Heizzentrale und Hausanschluss:

Annahmen:

- MFH: Heizleistung 375kW (inkl. WW), Erzeugung 955MWh/a, Regenerationsbedarf 891MWh/a, Asphaltkollektor 7500m^2;
  Durchfluss 12.5 l/m^{2}h, d.h. 94m^3/h;
  Rohrdurchmesser: di für Geschw. 2.5m/s: 140mm = NW 160
  Stichleitung 50m
- EFH: Heizleistung 8kW (inkl. WW), Erzeugung 20MWh/a, Regenerationsbedarf 18MWh/a, Asphaltkollektor 147m^2;
  Stichleitung 15m (jede 2. Leitung wird die Strasse queren), NW 63
  Es werden viele Stichleitungen gleichzeitig mit dem Kollektorbau erstellt.

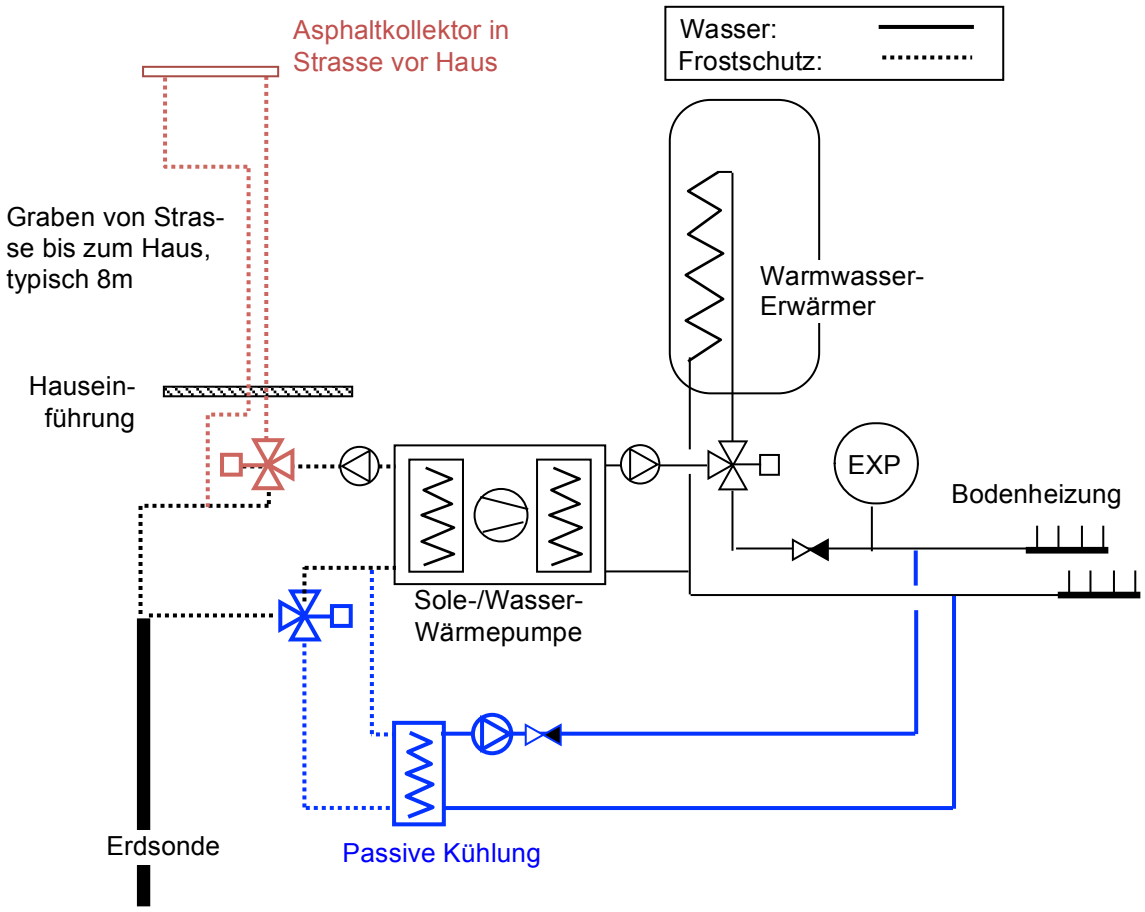
Kosten Stichleitung (wie Längsleitung des Kollektors gem. vorangehender Tabelle):

- MFH	Graben 50m,	1’575.00
	PE-Rohr NW 160mm 100m, liefern, verlegen,	2'500.00
	Einbringen Betonkies,	780.00
	Auffüllung:	375.00
	Total:	5’230.00
	pro m^2 Kollektor:	**0.70**
- EFH	Graben 15m,	470.00
	PE-Rohr NW 63mm 30m, liefern, verlegen,	450.00
	Einbringen Betonkies,	234.00
	Auffüllung:	112.00
	Total:	1’266.00
	pro m^2 Kollektor:	**8.60**

Kosten Anschluss zum Sondenkreis im Gebäude:

- MFH	Kernbohrungen, Abdichtung	500.00
	Absperrarmaturen, Entlüftung, Entleerung, 3-Weg-Ventil, installiert	3’000.00
	Leitung, isoliert, 20m	3'000.00
	Vergrösserung Expansion:	2’000.00
	Elektroanschluss	1’000.00
	Total:	9’500.00
	pro m^2 Kollektor:	**1.30**
- EFH	Kernbohrungen, Abdichtung	300.00
	Absperrarmaturen, Entlüftung, Entleerung, 3-Weg-Ventil, installiert	1’500.00
	Leitung, isoliert, 10m	1’500.00
	Vergrösserung Expansion:	200.00
	Elektroanschluss	800.00
	Total:	4’300.00
	pro m^2 Kollektor:	**30.00**

ANHANG 3: Regenerationssonden versus Hausanschluss
(Schema sh. Ref. [4])



Kosten Hausanschluss zu den bestehenden Sonden pro EFH (entsprechend Asphaltkollektor mit 147m^2)**:**

Hausanschluss zu den bestehenden Sonden pro EFH (entsprechend 147m^2)**:**

- Graben, PE-Doppelleitung 8m	2'000.- Fr.
- Kernbohrung, Abdichtung	300.- Fr.
- Absperrarmaturen, Entlüftung, Entleerung, 3-Weg-Ventil, installiert	1'500.- Fr.
- Leitung im Haus, isoliert, 10m	1'500.- Fr.
- Vergrösserung Expansion:	200.- Fr.
- Elektroanschluss	800.- Fr.
- Total:	6'300.- Fr.

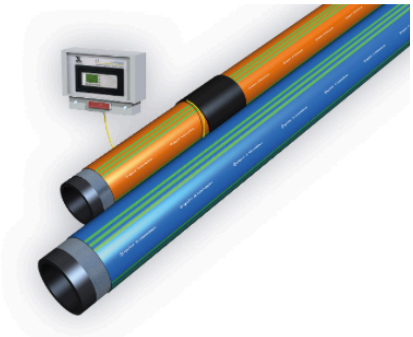
Zum Vergleich neue, parallele Sonde:

- neue Sonde 200m (Fr. 60.-/m)	12'000.- Fr.
- Graben 6m	1'500.- Fr.
- Total:	13'500.- Fr.

ANHANG 4: Permanente Lecküberwachung (Jansen AG, CH-9463 Oberriet, www.jansen.com)

Jansen Egeplast 3L Sicherheitsrohrsystem®

Das permanent überwachte System



Das Rohrsystem mit permanenter Überwachung und exakte Leckortung für offene und geschlossene Bauweisen.

Das Jansen Egeplast 3L Sicherheitsrohrsystem bietet eine 100-prozentige Lecküberwachung für den Boden- und Gewässerschutz. Eine mit dem Rohr verbundene Überwachungseinheit löst selbst im Fall einer Kleinstbeschädigung des Rohres Alarm aus. Meldungen erfolgen direkt auf die Leitstelle oder auf das Smartphone. Es kann angeschlossene Pumpensysteme automatisch abschalten und somit Havarie frühzeitig und zuverlässig verhindern.

Aufbau

- Schutzmantelrohr
- Vollwandrohr aus PE 100 RC
- elektrisch leitende Barriere- Detektionsschicht aus Aluminium
- additive Schutzschicht aus PE_{plus}

Dimension

dn 25 – 630 mm

Druckstufen

- PN 10, PN 16
- PN 25 (auf Anfrage)

Anwendung

- Wasser
- Gas
- Abwasser
- Industrie

ANHANG 5: Referenzen

[1]: Kriesi R., Analyse von Erdwärmesondenanlagen, Bundesamt für Energie, 2017
[2]: Matthey B., Accumulateurs saisonniers souterrrains de chaleur, Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA, 2037 Montezillon, 22ème journée technique et d'information de la Société Suisse de la Géothermie, 4. nov. 2011.
[3]: De Bondt, A.H., Generation of energy via Asphalt Pavement Surfaces, Ooms Avenhorn Holding, 1990 bv, http://www.oomspmb.com
[4]: Kriesi R., Methoden der Erdsonden-Regeneration, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, 2017
[5]: Soltop Schupisser AG, CH-8353 Elgg, www.soltop.ch, Mail vom 27.9.2019
[6]: Solar Collector Factsheet SPF-Nr. C420, Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik Rapperswil, CH-8640 Rapperswil, 5.5.2004

12.11.2019/RKR