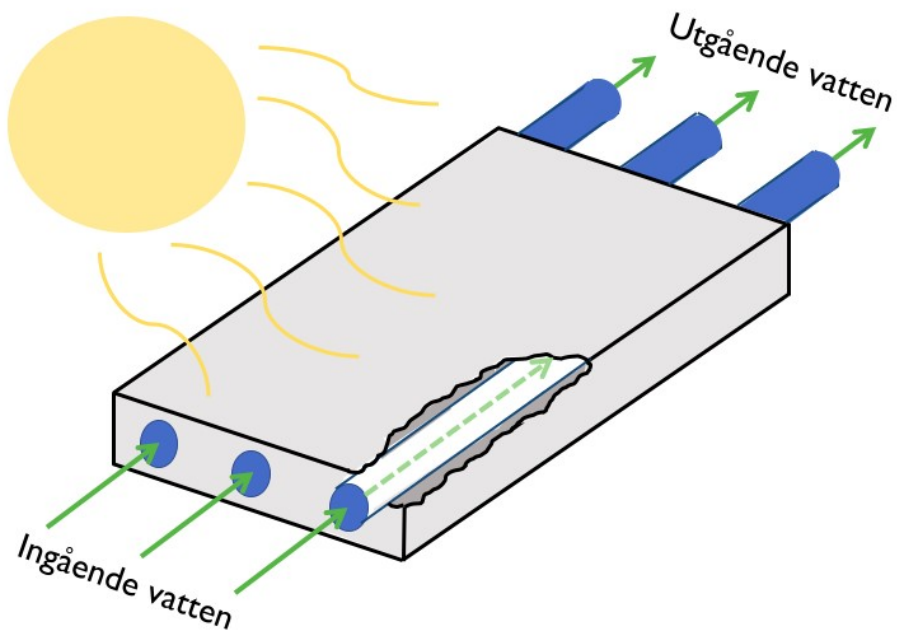




Asfaltssolfångare

En studie av ytparametrar och materialegenskaper för optimering av termisk energiutvinning

Kandidatarbete inom Samhällsbyggnadsteknik, avdelningen för Byggnadsteknologi

JULIA ANDERSSON
CAROLINA DAHLGREN CAMACHO
FRIDA SIMONSEN
EMMA WAHLFRIDSSON

KANDIDATARBETE ACEX10-18-10

Asfaltssolfångare

En studie av ytparametrar och materialegenskaper för optimering av
termisk energiutvinning

ANDERSSON, JULIA
DAHLGREN CAMACHO, CAROLINA
SIMONSEN, FRIDA
WAHLFRIDSSON, EMMA



CHALMERS

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi
ACEX10-18-10
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2018

Asfaltssolfångare

<https://www.sharelatex.com/8682913375mzgbsdvsckjv> En studie av ytparametrar och materialegenskaper för optimering av termisk energiutvinning

JULIA ANDERSSON

CAROLINA DAHLGREN CAMACHO

FRIDA SIMONSEN

EMMA WAHLFRIDSSON

© Julia Andersson, Carolina Dahlgren Camacho, Frida Simonsen, Emma Wahlfridsson, 2018.

Handledare: Josef Johnsson, Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik. Avdelningen för Byggnadsteknologi.

Handledare: Bijan Adl-Zarrab, Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik. Avdelningen för Byggnadsteknologi.

Examinator: Mihail Serkitjis, Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik. Avdelning för Byggnadsteknologi

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Byggnadsteknologi

Chalmers tekniska högskola

SE-412 96 Gothenburg

Sverige

Telefon: +46 (0)31 772 1000

Omslag: Bild gjord av författarna, Göteborg 2018.

Chalmers Reproservice

Göteborg, Sverige 2018

Asfaltssolfångare

En studie av ytparametrar och materialegenskaper för optimering av termisk energiutvinning

JULIA ANDERSSON

CAROLINA DAHLGREN CAMACHO

FRIDA SIMONSEN

EMMA WAHLFRIDSSON

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Byggnadsteknologi

Chalmers tekniska högskola

Sammandrag

Konceptet asfaltssolfångare ämnar till att utvinna termisk energi från asfaltsytor som blir uppvärmda av solstrålning. Under asfaltsytan placeras rör innehållande en fluid vilken värms upp av den varma asfalten. Fluiden transporteras vidare med hjälp av en pump för att antingen lagras eller användas till uppvärmning direkt.

I denna studie har uppvärmningsbehovet för en skola belägen på en icke specificerad plats i centrala Göteborg jämförts med mängden energi som en asfaltssolfångare teoretiskt kan utvinna. Solfångaren placeras på en redan anlagd gång- och cykelväg och är i bruk under månaderna maj till september. För att optimera mängden utvunnen energi har ett antal variabler för asfaltssolfångaren undersökts. Dessa variabler inkluderar ytparametrar som albedotal, materialegenskaper som värmekonduktivitet och specifik värmekapacitet samt övriga aspekter som rördjup och centrumavstånd mellan rör.

Studien visade att skolans värmeenergibehov kan tillgodoses av en asfaltssolfångare utifrån gjorda uppskattningar. Vidare studier kring distributions- och lagringsförluster samt påverkan av skymd sol och regn behöver göras för att öka tillförlitligheten för resultatet. Då solenergi är en sporadisk energikälla kan solfångaren ses som ett komplement till befintligt värmesystem. För att avgöra om konceptet kan implementeras behövs vidare undersökningar kring ekonomiska aspekter, praktiskt tillvägagångssätt, livslängd, miljöpåverkan samt hur stor mängd energi som pumpen förbrukar.

Nyckelord: asfalt, solfångare, asfaltssolfångare, albedo, termisk konduktivitet, värmetransport

Asphalt solar collector

A study of surface parameters and material properties for optimizing energy thermal harvesting

JULIA ANDERSSON

CAROLINA DAHLGREN CAMACHO

FRIDA SIMONSEN

EMMA WAHLFRIDSSON

Department of Architecture and Civil engineering

Building Technology

Chalmers University of Technology

Abstract

The concept of asphalt solar collector aims to harvest thermal energy from asphalt surfaces that are heated by solar radiation. Pipes containing a fluid is placed underneath an asphalt surface. The fluid is further transported by a pump either to be stored, or used for direct heating.

In this study, the heating requirement for a school located in a non-specified but central area in Gothenburg, has been compared with the amount of energy that an asphalt solar collector can theoretically harvest. The solar collector is placed on an existing path for pedestrians and bicycles, and the system is in use during the months of May to September. To optimize the amount of harvested energy, a number of variables for the asphalt solar collector have been investigated. These variables include surface parameters such as albedo, material properties such as thermal conductivity and specific thermal capacity and other aspects such as pipe depth and center spacing between pipes.

The study showed that the school's need for heating can be met by an asphalt solar collector based on estimates. Further studies on distribution- and storage losses, as well as the impact of shading and rain need to be done to obtain a reliable result. As solar energy is a sporadic source of energy, the solar collector can be seen as a complement to the existing heating system. In order to determine whether the concept can be implemented, further studies on economic aspects, practical approaches, life expectancy, environmental impact and the amount of energy consumed by the pump are needed.

Keywords: asphalt, solar collector, asphalt solar collector, albedo, thermal conductivity, heat transfer

Förord

Den här rapporten är resultatet av ett kandidatarbete som skrivits på Chalmers tekniska högskola inom ämnesområdet byggnadsteknologi. Arbetet avslutar kandidatdelen av civilingenjörsutbildningen och är skrivet av fyra studenter från programmet Samhällsbyggnadsteknik.

Det finns många personer som lagt tid och engagemang för att bistå med hjälp till arbetet. Först och främst vill vi rikta ett särskilt tack till våra handledare Josef Johnsson och Bijan Adl-Zarrabi på institutionen Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik för stöd och handledning längs vägen. Utan er hjälp hade arbetet inte varit möjligt att genomföra. Vi vill även tacka följande personer som ägnat tid till att hjälpa oss genom möten eller på annat sätt förmedlat värdefull information som bidragit till rapporten.

- Madeleine Fahlström, *Miljö- och energisamordnare på Peab Industri AB*
- Mats Wendel, *Innovationsstrateg på Peab Asfalt AB.*
- Johan Bolander, *Arbetschef i region väst på Peab Asfalt AB.*
- Govindan Induchoodan, *doktorand på institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik, Chalmers.*
- Rickard Granath, *Manager på Marketing, Uponor VVS.*
- Karl-Erik Calderon, *Produktspecialist Markvärme/ teknisk försäljning och support på svensk marknad, Uponor VVS.*
- Markus Eriksson, *Examensarbetare, Göteborgs Energi.*
- Christofer Åslund, *Enhetschef, Göteborgs Energi.*

Julia Andersson, Carolina Dahlgren Camacho,
Frida Simonsen och Emma Wahlfridsson.

Göteborg, Maj 2018.

Innehåll

Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Metod	3
2 Teori	5
2.1 Solfångare	5
2.1.1 Icke-koncentrerande solfångare	5
2.1.2 Asfaltssolfångare	6
2.2 Värmetransportmekanismer	7
2.2.1 Värmeledning	7
2.2.1.1 Termisk konduktivitet	7
2.2.1.2 Finita differensmetoden (FDM)	8
2.2.2 Konvektion	9
2.2.2.1 Formler	9
2.2.3 Strålning	10
2.2.3.1 Kortvågig strålning	10
2.2.3.2 Transmission	10
2.2.3.3 Absorption	10
2.2.3.4 Långvågig strålning	11
2.2.4 Specifik värmekapacitet	11
2.3 Asfaltssolfångarens uppbyggnad	12
2.3.1 Asfalt	12
2.3.2 Stenmaterial	12
2.3.2.1 Granit	13
2.3.2.2 Diabas	13
2.3.3 Bindemedel	13
2.3.3.1 Grafen	13
2.3.4 Ekoasfalt	14
2.3.5 Rörssystem	14
2.3.5.1 Rörmaterial	14

2.3.5.2	Rördiameter	14
2.3.5.3	Röravstånd	14
2.3.5.4	Rördjup	14
2.3.5.5	Rörarrangemang	15
2.3.6	Fluid	15
2.3.6.1	Flödes hastighet	16
2.3.7	Isolering	16
3	Metod	17
3.1	Koncept	17
3.1.1	Gång- och cykelväg	17
3.1.2	Skolbyggnad	18
3.2	Simulering	18
3.3	Ingående parametrar	19
3.4	Klimatdata	21
4	Resultat	23
4.1	Simulering	23
4.1.1	Test 1	24
4.1.2	Test 2	24
4.1.3	Test 3	25
4.1.4	Test 4	26
5	Diskussion	27
5.1	Utvärdering av resultat	27
5.1.1	Felkällor simulering	29
5.2	Etik och ansvar	29
5.3	Framtid	30
6	Slutsats	33
	Litteraturförteckning	35
	Bilaga A Energibehov skola	III
	Bilaga B Körprotokoll	V
B.1	Test 1	VI
B.2	Test 2	VII
B.3	Test 3	VIII
B.4	Test 4	IX

Figurer

2.1	Visualisering av asfaltssolfångarens uppbyggnad	6
2.2	Resultat från temperaturmätning, där kombinationer av två asfaltslager med olika konduktivitet testats. Publicerad med tillåtelse från upphovsman.	8
3.1	Principskiss över systemet	17
3.2	Tvärsnittsvy av asfaltssolfångaren för olika lagersammansättningar . .	19
4.1	Visualisering av rördjup för test 4.1 och 4.2. Bilderna är hämtade från Python under simuleringen.	26

Tabeller

2.1	Materialparametrar för några olika bergarter	13
3.1	Genomsnittlig specifik energiprestanda för vald skola	18
3.2	Egenskaper Uponor PEX-rör	21
3.3	Egenskaper isoleringen STYROFOAM 300 BE-A-N	21
3.4	Variabla rörparametrar i simuleringen	21
3.5	Materialparametrar för olika material	21
4.1	Total solintensitet, Göteborg	23
4.2	Resultat test 1, utan isolering	24
4.3	Resultat test 2, med 20 mm isolering	24
4.4	Resultat test 3, varierad konduktivitet	25
4.5	Idealt och praktiskt tillämpbart fall under maj-september	26
A.1	Genomsnittlig specifik energiprestanda	III

1

Inledning

1.1 Bakgrund

För att möta de utmaningar som Parisavtalet innebär har Sverige målsättningen att inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser år 2045 (Naturvårdsverket, 2018c). Av den totala energianvändningen i Sverige, år 2016, kom 42 % från förnyelsebara källor. Därmed måste en omställning från icke-förnyelsebara energikällor till långsiktigt hållbara alternativ ske. Populationstillväxt och urbanisering har dessutom gjort att behovet av värme- och elenergi för städerna har ökat (Naturvårdsverket, 2018a). Upprättat mål kan nås genom att effektivisera och utöka befintliga förnyelsebara energikällor, men också genom uppmuntran till utveckling av nya hållbara energilösningar.

Solenergi är en förnyelsebar energikälla med stor utvecklingspotential då den alltid strålar mot jorden. Enligt Naturvårdsverket (2018b) hade några få procent av jordens ökenyta räckt för att tillgodose hela världens befolkning med energi. Ett intressant utvecklingsområde kan vara energiutvinning från asfaltsbelagda vägar som exponeras för solstrålning. I Sveriges städer finns tillgång till asfaltsytor, varvid det blir intressant att undersöka om dessa kan nyttjas som solfångare.

När solstrålning träffar asfaltssolfångarens mörka yta absorberas strålningsenergi och lagras i asfalten i form av värmeenergi. Genom att placera vattenfyllda rör i asfalten skulle värmeenergi potentiellt kunna utvinnas. De varma asfaltsytorna emitterar även värme till omgivningen och ger en temperaturökning i luften, vilket är känt som *Urban heat island effect*. Följden blir att temperaturen i städerna stiger vilket ökar behovet av energi avsedd till att kyla byggnader. Asfaltssolfångare skulle kunna minska detta problem då en kylande effekt på asfaltsytan erhålls när värmen förs vidare i asfaltssolfångaren istället för att emitteras (Bobes-Jesus, Pascual-Muñoz, Castro-Fresno & Rodriguez-Hernandez, 2013).

En asfaltssolfångare etablerades tidigare i år på en bilväg i Östersund. Syftet är att nyttja utvunnen värmeenergi från solstrålning till att smälta snö, ett alternativ till halkbekämpning som saltning och sandning. Testbanan är 120 meter lång och tre meter bred. Rören är placerade tre centimeter under körbanan och ska testas under en tvåårsperiod för vidare utveckling av konceptet som kostat fem miljoner kronor (Nohrstedt, 2018). Asfaltssolfångare kan således potentiellt lösa två problem; reducera *Urban heat island effect* samt bidra till innovativa lösningar som kan ta tillvara på solenergi för att täcka framtidens energibehov.

1.2 Syfte

Avsikten med studien är att undersöka hur en asfaltssolfångares materialegenskaper, ytparametrar och utformning kan optimeras mot termisk energiutvinning, samt hur väl den kan tillgodose en $500m^2$ stor skolas uppvärmningsbehov.

1.3 Avgränsningar

Studien specificeras genom att tillämpa följande avgränsningar.

- Asfaltssolfångaren kommer optimeras med avseende på att omvandla solstrålning till termisk energi.
- Distributions- och lagringsförluster av termisk energi kommer behandlas i diskussionen. Däremot görs inga utförliga beräkningar.
- Pumpens kapacitet och energiförbrukning kommer inte att beaktas.
- Asfaltssolfångarens eventuella bidrag till minskad *Urban heat island effect* kommer behandlas, men inga beräkningar utförs.
- Kostnader för modellerad asfaltssolfångare kommer inte att beräknas.
- Asfaltssolfångarens placering specificeras inte men platsen förutsätts ligga i centrala Göteborg.
- Gång- och cykelbanan som asfaltssolfångaren kommer appliceras på förutsätts vara rak samt ha en plan och jämn yta.
- Asfaltssolfångaren antas vara i drift under månaderna maj till september eftersom solen värmer mest i Göteborg under den perioden.
- Hur systemet påverkas när asfaltssolfångaren inte är i drift kommer inte behandlas.
- Hur yttre omständigheter såsom friktion, pålagd last, fuktpåverkan från regn, och skydd sol påverkar systemet beaktas inte i beräkningar.
- Jämförelser mellan alternativa beläggningsmaterial och asfalt kommer inte att göras.

Avgränsningar ovan är viktiga komponenter för att skapa ett helhetsperspektiv av asfaltssolfångarkonceptet. De utesluts medvetet från studien för att minska dess omfång.

1.4 Metod

Studien har genomfördes kvalitativt genom litteraturstudier och ett studiebesök på Peabs asfaltsverk i Källered. Dessutom kontaktades en innovationsstrateg på asfaltsavdelningen inom samma företag, samt en doktorand på Chalmers vars forskningsområde behandlar materialet grafen. Mötena ämnades ge djupare kunskap angående tillverkning och anläggning av asfalt, samt tillvarata forskning som ligger nära ämnesområdet. För övriga frågor om till exempel energiförluster och materialspecifika värden kontaktades personer på bland annat Göteborgs Energi och Uponor.

Numeriska beräkningar har gjorts och evaluerats genom simulering med kod tillhandahållen av handledare i programmeringsspråket Python. Klimatdata hämtades från en väderstation i Göteborg. Följande parametrar utvärderades i studien:

- Termisk konduktivitet
- Albedotal
- Specifik värmekapacitet
- Flödes hastighet
- Centrumavstånd mellan rör (cc-mått)
- Rördjup
- Lagertjocklek
- Isoleringsskikt

Asfaltssolfångaren är tänkt att placeras på en gång- och cykelväg i anslutning till en $500m^2$ stor skola i centrala Göteborg, där exakt position inte specificerats. Utifrån ovan nämnda utvärderingar simulerades ett idealt samt ett praktiskt tillämpbart fall under månaderna maj till september för att ta fram den teoretiskt utvunna termiska energin. Denna jämfördes sedan mot en skolas energibehov, där data hämtades från Boverket.

2

Teori

I följande kapitel presenteras den bakomliggande teorin till konceptet asfaltssolfångare.

2.1 Solfångare

En solfångare omvandlar solenergi till termisk energi och överför värmen till en fluid som finns i solfångarens rörsystem. Beroende på syfte transporteras fluiden vidare, exempelvis till en varmvattenberedare eller lagringstank (Kalogirou, 2004). Vidare kommer termen termisk energi benämnas som enbart energi då inget annat anges.

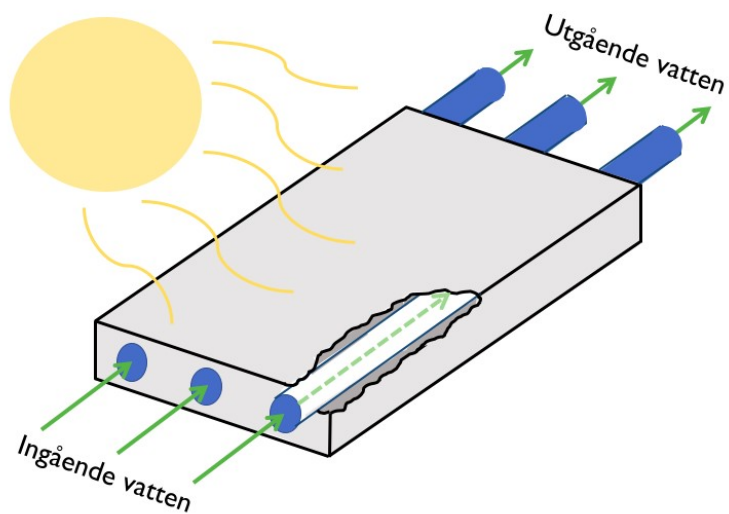
2.1.1 Icke-koncentrerande solfångare

Solfångare delas vanligen upp i två olika typer; koncentrerande och icke-koncentrerade solfångare. Det som skiljer dem åt är att ytan hos en koncentrerande solfångare är konkav och reflekterande, medan ytan är horisontell och plan hos en icke-koncentrerande (Tian & Zhao, 2013). Den senare är vanligtvis permanent fixerad i en viss position, där en vinkel på 10-15° lutning mot solen är mest gynnsam (Kalogirou, 2004). Solfångaren har huvudsakligen ett inglasat skydd, en absorberande platta, rör som är fyllda med en värmeöverförande fluid samt ett isolerande undre lager (Tian & Zhao, 2013).

Den absorberande plattan har vanligtvis en svart yta för att absorbera så mycket värmeenergi som möjligt. Optimalt för denna yta är att den består av flera skikt med olika termiska egenskaper; ett övre skikt bestående av ett material som har hög absorption för kortvågig strålning men som är relativt transparent för långvågig termisk strålning, samt ett nedre tunt skikt med hög reflektans och låg emittans för långvågig strålning (Kalogirou, 2004). Solstrålning som tas upp av den absorberande plattan bör snabbt överföras till fluiden för att undvika att systemet överhettas (Tian & Zhao, 2013).

2.1.2 Asfaltssolfångare

En asfaltssolfångare är en modifierad icke-koncentrerande solfångare, där asfaltsytan fungerar som en absorberande platta. Under ytan placeras ett rörsystem som fylls med en värmeöverförande fluid. Då ytan exponeras för solstrålning absorberas energi. Värmen transporteras genom ytan och värmer upp vätskan i rören (Energimyndigheten, 2011). Då asfaltssolfångaren är i bruk förutsätts asfalten inte komma upp i högre temperaturer än 70°C (Bobes-Jesus m. fl., 2013). Nedan i figur 2.1 visas en modell för asfaltssolfångarens uppbyggnad.



Figur 2.1: Visualisering av asfaltssolfångarens uppbyggnad

2.2 Värmetransportmekanismer

Nedan följer en beskrivning av de tre värmetransportmekanismerna värmeledning, konvektion och strålning med tillhörande materialparametrar och ytegenskaper.

2.2.1 Värmeledning

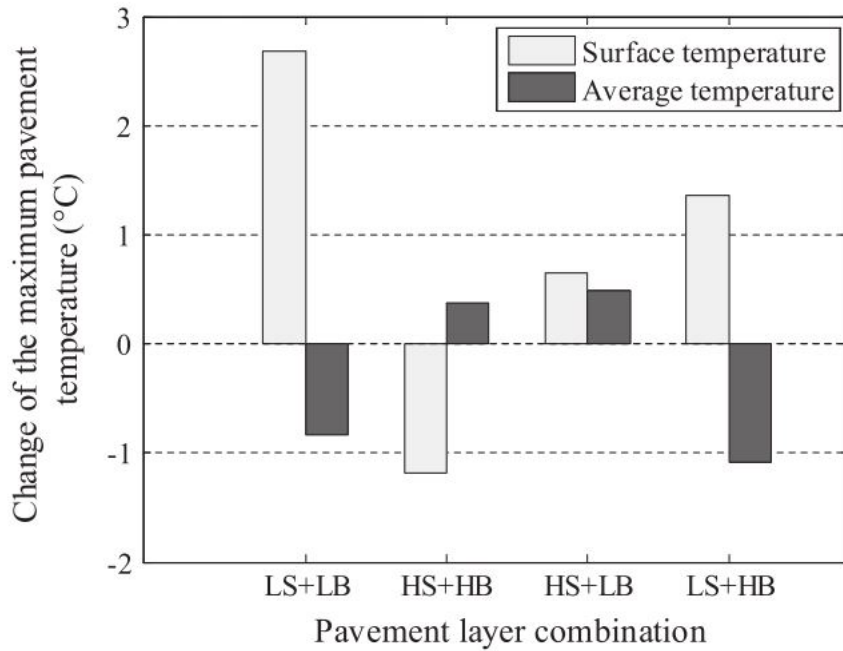
Värmeledning, även kallat termisk konduktion, är den process där värme överförs genom ett eller flera medium på grund av temperaturskillnad i mediet. Värmen transporteras från högre temperatur till lägre temperatur (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

2.2.1.1 Termisk konduktivitet

Termisk konduktivitet, λ , är ett mått på ett materials värmeledningsförmåga och mäts i enheten W/mK. Vidare menas termisk konduktivitet då konduktivitet nämns. Asfalt har normalt en konduktivitet mellan 1.5 och 2.1 W/mK (Sen & Roesler, 2016). Värmekonduktionsekvationen i det tvådimensionella planet presenteras i ekvation 2.1 nedan. Ekvationen visar förhållandet mellan värmeledning i två dimensioner och tidsderivatan multiplicerat med densitet och värmekapacitet (Hagentoft, 2012).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

I en studie gjord av Jiaqi Chen, Hao Wangb och Hongzhou Zhu testades det att kombinera olika konduktiviteter hos två lager i ett asfaltsprov. Temperaturen i ytskiktet och medeltemperatur inuti asfalten mättes och jämfördes med en vanlig komposition av asfalt. Totalt gjordes fyra olika tester. Resultaten visade att låg konduktivitet på yt- och bottenskikt ökade temperaturen på ytan eftersom värmetransporten genom ytan och asfaltslagret därmed går trögt. När hög konduktivitet på ytlagret och låg konduktivitet hos bottenlagret testades gav det en ökning på både yttemperatur och medeltemperatur inuti asfalten. Vid hög termisk konduktivitet hos båda lagren visade testerna att yttemperaturen istället sänktes medan den uppmätta medeltemperaturen inuti asfalten ökade eftersom kombinationen maximerar värmeledningen nedåt. Resultaten från mätningarna visas nedan i figur 2.2 (Chen, Wang & Zhu, 2017a). HS innebär hög konduktivitet i det översta lagret (high surface), LB innebär låg konduktivitet i bottenlagret (low surface).



Figur 2.2: Resultat från temperaturmätning, där kombinationer av två asfaltslager med olika konduktivitet testats. Publicerad med tillåtelse från upphovsman.
(Chen, Wang & Zhu, 2017b)

För att optimera energiutvinningen ur asfaltssolfångaren, det vill säga öka medeltemperaturen inuti asfaltslagret visar testet att kombinationen LB och HS är mest fördelaktig. Dessutom ger det ett incitament till att isolering, med lägre konduktivitet än asfalt, under det översta lagret kan förbättra resultatet ytterligare.

2.2.1.2 Finita differensmetoden (FDM)

Värmekonduktionsekvationen kan lösas med hjälp av numerisk analys. Finita differensmetoden (FDM) kan användas för att lösa en- och tvådimensionella värmekonduktionsekvationer. Metoden finner lösningar till differentialekvationer genom att substituera derivatorna med finita differenser. Området där ett värmefflöde sker delas upp i ett stort antal rektanglar vilka bildar ett rutnätsmönster. Temperaturen i mitten av varje rektangel, noden, beräknas. Nettoflödet av värme till en rektangulär subdomän ger upphov till en temperaturökning. Resultaten från de numeriska lösningarna är temperaturen i varje nod, beräknat N gånger enligt ekvation 2.2.

$$T(t_{start}) \rightarrow T(t_{start} + 1 \times \Delta t) \rightarrow T(t_{start} + 2 \times \Delta t) \rightarrow \dots T(t_{start} + N \times \Delta t) \quad (2.2)$$

där Δt representerar det använda tidssteget (Hagentoft, 2012).

Ett stabilt tidssteg erhålls då temperaturen i noden är större än temperaturen i de omgivande cellerna enligt ekvation 2.3 (Hagentoft, 2012). Det valda tidssteget behöver vara mindre än det stabila tidssteget för att modellen ska vara tillförlitlig.

$$|\Delta T| = \frac{\sum Q \cdot \Delta t}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho c} < 1 \quad (2.3)$$

Det stabila tidssteget för ett tvådimensionellt problem kan beräknas enligt ekvation 2.4 (Hagentoft, 2012).

$$\Delta t^{stab} = 0,99 \cdot \frac{\Delta x_i \cdot \Delta y_j \cdot (\rho c)_{i,j}}{K_{i,j}^l + K_{i,j}^r + K_{i,j}^u + K_{i,j}^d} \quad (2.4)$$

där Δx_i är bredden och Δy_j är höjden för cellen som noden ligger i. Konduktanserna $K_{i,j}^l$, $K_{i,j}^r$, $K_{i,j}^u$, $K_{i,j}^d$ representerar konduktanserna för omgivande celler till vänster, höger, över och under cellen som den betraktade noden ligger i. Det stabila tidssteget måste kontrolleras för samtliga celler i domänen med värmefflöde. För simuleringen används det minsta stabila tidssteget för samtliga celler (Hagentoft, 2012).

2.2.2 Konvektion

Konvektion kan beskrivas som värmeöverföring mellan vätskor och gaser, där drivkraften är densitetsskillnad (Nationalencyklopedin, 2018h). Det kan röra sig om naturlig konvektion eller påtvingad konvektion. Naturlig konvektion sker när rörelse i en fluid skapas av temperaturskillnader. Påtvingad konvektion skapas av mekanisk påverkan, till exempel en fläkt eller en pump. Det leder till ökade hastigheter och värmeöverföringen blir effektivare (Nationalencyklopedin, 2018h).

I asfaltssolfångaren uppstår två olika konvektionsprocesser. Den första sker mellan asfaltsytan och luften ovanför, medan den andra är mellan cirkulationsvätskan och rörens väggar (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

2.2.2.1 Formler

Konvektionskoefficienten för naturlig konvektion kan enligt (Hagentoft, 2012) uppskattas vara;

$$0,3 \leq \alpha_c \leq 0,8 \quad (2.5)$$

För påtvingad konvektion med en vindhastighet $u[m/s]$ parallell mot ytan gäller enligt Hagentoft (2012) följande ekvationer;

$$\alpha_c = 6 + 4 \cdot u \quad u \leq 5m/s \quad (2.6)$$

$$\alpha_c = 7,41 \cdot u^{0,78} \quad u \geq 5m/s \quad (2.7)$$

där α_c är koefficienten för värmetransport genom konvektion. För att beräkna värmeflödet kan följande uttryck användas

$$q_c = \alpha_c(T_s - T_a) \quad (2.8)$$

där $q_c[W/m^2]$ är värmeflödet, $\alpha_c[W/(m^2K)]$ och $T_s - T_a$ är temperaturskillnaden mellan ytan och omgivande luft.

2.2.3 Strålning

Strålning är energiöverföring genom elektromagnetiska strålningsvågor utan behov av något medium (Nationalencyklopedin, 2018j).

2.2.3.1 Kortvågig strålning

Kortvågig solstrålning som absorberas av atmosfären når aldrig jordytan. Andelen strålning som inte absorberas träffar antingen jorden direkt eller bryts av och sprids i övergången mellan rymd och atmosfär. Ljusspridningen som uppstår benämns som diffus solstrålning. Mängden effekt av den direkta solstrålningen som når mark och vattenytan utan att spridas bestäms av luftfuktighet, luftburna partiklar (aerosoler), molnighet och solhöjd (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

När en inkommande våg träffar en yta reflekteras (ρ), absorberas (α) eller transmitteras (τ) den. Balansen efter att inkommande strålning träffat ytan beskrivs genom ekvationen nedan (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.9)$$

2.2.3.2 Transmission

Transmission kan kortfattat beskrivas som transportprocessen då ett material släpper igenom elektromagnetisk strålning (Nationalencyklopedin, 2018k). Transmission av strålning genom ett fast material förutsätts vara försumbar, vilket innebär

$$\tau = 0 \quad (2.10)$$

(Hagentoft, 2012).

2.2.3.3 Absorption

Absorption är en process där en fluid eller en energiform upptas av en kropp. När solstrålningen träffar en yta absorberas endast en viss mängd strålningsenergi och värmer upp materialet, medan resterande del reflekteras enligt ekvation 2.9 (Nationalencyklopedin, 2018a).

För att avgöra hur mycket strålning som absorberas används albedotal, ett mått på andelen kortvågig strålning som en yta reflekterar. Värdet på albedo ligger

mellan 0 och 1 där 1 innebär fullständig reflektion. För att öka effektiviteten för asfaltssolfångaren är ett lågt albedotal önskvärt då det innebär att en stor del av solstrålningen absorberas och värmer upp ytan. Albedotalet påverkas i huvudsak av ytans färg och geometri. En mörk, jämn yta absorberar mer strålning än en ljus, skrovlig yta. När asfalten är nylagd är den mörk och har ett albedotal mellan 0.04 och 0.06. Med tiden slits ytan och på grund av detta ökar albedotalet till mellan 0.09-0.18 (Sen & Roesler, 2016). Eftersom asfalt inte är en ideal svart kropp sker ingen fullständig absorption av infallande strålning och den absorberade solstrålningen beräknas som:

$$q_s = \alpha_s q_i \quad (2.11)$$

där q_s är den utav kroppen absorberade strålningen [Wm^{-2}], q_i som är den infallande solstrålningen [Wm^{-2}] och α_s är materialets absorbtivitet (Bobes-Jesus m. fl., 2013). Albedotalet motsvarar den andel som inte absorberas, alltså $1 - \alpha_s$.

2.2.3.4 Långvågig strålning

Ytor har en förmåga att sända ut långvågig elektromagnetisk strålning, även kallat emissivitet (Nationalencyklopedin, 2018d). I en asfaltssolfångare har värdet på emissiviteten en stor betydelse för temperaturprofilen. Om emissiviteten ökar leder det till temperatursänkning (Bobes-Jesus m. fl., 2013). Att sänka emissiviteten från 0,9 till 0,1 kan istället öka värmeeffektiviteten hos den absorberande ytan med 30 % (Fan m. fl., 2018). Värmestrålningen som emitteras beräknas genom följande ekvation

$$q_r = \sigma \epsilon T_s^4 \quad (2.12)$$

där q_r har enheten [Wm^{-2}], ϵ är materialets emissivitet, σ är Stefan-Boltzmanns konstant $5,67 * 10^{-8}$ [$Wm^{-2}K^{-4}$], och T_s är ytans temperatur i Kelvin. (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

Vid tillämpning inom byggnadsfysik kan följande approximation av emissiviteten göras

$$\epsilon = \alpha_r \quad (2.13)$$

Enligt ekvationen 2.13 kan emissiviteten därmed uppskattas vara samma som absorptiviteten för långvågig strålning (Hagentoft, 2012).

2.2.4 Specifik värmekapacitet

Specifik värmekapacitet kan beskrivas som en substans förmåga att lagra termisk energi. När värme adderas eller tas ifrån en massa kommer temperaturen att förändras. Låt ΔT vara en liten temperaturförändring när en liten mängd värme Δq adderas till massan. Den specifika värmekapaciteten c [J/kgK] kan då enligt ekvation 2.14 definieras som

$$\Delta q = c \Delta T \quad (2.14)$$

Värmelagringsförmågan per volymenhet massa, volymetrisk värmekapacitet blir då ρc [$J/m^3 K$]. Värdet på värmekapaciteten är beroende av omgivande förhållanden då värme adderas.

Den specifika värmekapaciteten kan uttryckas som c_p när omgivande tryck är konstant och c_v när massans volym hålls konstant. Relationen mellan c_p och c_v blir då

$$c_p = c_v + \frac{\alpha^2(T + 273.15)}{\kappa\rho} \quad (2.15)$$

där κ [$1/Pa$] är kompressibiliteten hos materialet och α [$1/K$] den termiska volymetriska utvidningskoefficienten. Skillnaden mellan c_p och c_v kan i byggnadsfysikaliska tillämpningar försummas för fluider och fasta material, vilket ger ekvation 2.16

$$c_p \simeq c_v = c \quad (2.16)$$

(Hagentoft, 2012).

2.3 Asfaltssolfångarens uppbyggnad

Nedan följer en beskrivning av asfaltssolfångarens komponenter samt lämpliga val av dessa.

2.3.1 Asfalt

Asfalt är ett kompositmaterial bestående av sten och bindemedel. Asfaltsmassan hettas upp till omkring 120-150 °C vid produktion och är svart när den anläggs. Med tiden bleknar ytan på grund av belastning och omgivande klimatpåfrestningar, vilket har betydande inverkan på till exempel beläggningens termiska egenskaper (Projektgrupp inom NVF Utskott 33, 2000). Påfrestningarna ger upphov till slitage och gör att asfaltvägar måste renoveras i snitt var 17e år. Beroende på asfaltens skick kan antingen ett övre skikt fräsas bort och nytt lager asfalt läggas, eller så kan hela asfalten behöva rivas upp enligt M. Wendel (personlig kommunikation, 26 februari 2018).

2.3.2 Stenmaterial

Asfalten består till största del av stenmaterial. Krossmaterial i olika fraktioner används och vilka bergarter som ingår varierar. Stenmaterialets kornstorlek är även avgörande för att bestämma mängden bitumen som krävs för att binda samman asfalten (Nationalencyklopedin, 2018b).

Den termiska konduktiviteten minskar med ökande temperatur, i vilken utsträckning varierar däremot för olika bergarter (Vosteen & Schellschmidt, 2003). En lämplig bergart bör väljas utifrån värmeledningsförmåga, densitet, albedo samt tillgänglighet.

2.3.2.1 Granit

Granit är en ljusfärgad magmatisk djupbergart, huvudsakligen bestående av kvarts och fältspat samt mindre mängder av glimmer, amfiboler och andra mineraler (Geology, 2018). Brytning av granit görs främst i södra och sydvästra Sverige (Nationalencyklopedin, 2018g).

2.3.2.2 Diabas

Diabas är en magmatisk gångbergart som är vanlig i oceanbottnarnas jordskorpa. Den är mörk till färgen och består främst av mineralerna plagioklas och pyroxen (Naturhistoriska Riksmuseet, 2018). Brytning av diabas görs bland annat i Billingryd, Skövde (Calner, 2011).

Tabell 2.1: Materialparametrar för några olika bergarter

	Värmeledningsförmåga $\lambda[W/mK]$	Densitet $\rho[kg/m^3]$	Specifik värmekapacitet $c_p[kJ/(kgK)]$
Granit	1,7-2,0	2600-2700	0,85
Diabas	2,1	2600-3000	0,79

I tabell 2.1 är värdena på specifik värmekapacitet och värmeledningsförmåga angiven vid 100 °C (Wang, Lu, Song, Shao & Qi, 2010). Värden för densitet hämtas från Aldens artikel *Densities of Common Rocks and Minerals* (Alden, 2018).

2.3.3 Bindemedel

Bindemedlet i asfalt är destillerat bitumen som framställs genom raffinering av råolja och utgör vanligtvis cirka 3-7,5 viktprocent av asfaltmassan (Nationalencyklopedin, 2018b). Oljeprodukten har termoplastiska egenskaper, vilket innebär att den är formbar utan specifik smältpunkt. När temperaturen höjs rör sig molekylerna fritt inom materialet. Det leder till att bitumenet flyter ut, kopplar samman andra komponenter i asfalten och ökar konduktiviteten (Tang, Wu, Chen, Pan & Sun, 2014).

2.3.3.1 Grafen

Grafen är ett material bestående av ett enda lager kolatomer som är ordnade i hexagonala mönster. Det gör materialet starkt och får dessutom en god ledningsförmåga (Nationalencyklopedin, 2018f). För att förhindra den oxidationsprocess som föråldrar bitumen kan grafen blandas in i bindemedlet enligt G. Induchoodan (personlig kommunikation, 6 mars 2018). Grafenets goda värmeledningsförmåga skulle även kunna förbättra värmeöverföringen genom asfalten (Nationalencyklopedin, 2018c). Exempelvis kan en viktprocent av bitumen ersättas med grafen enligt G. Induchoodan, forskare på Chalmers (personlig kommunikation, 6 mars 2018).

2.3.4 Ekoasfalt

Ekoasfalt är asfalt som producerats på ett mer miljövänligt sätt. Skillnader ligger inte i den färdiga produkten utan i uppvärmningsprocessen. Fossil eldningsolja har ersatts med koldioxidneutral bioolja som är en restprodukt från livsmedelsindustrin. Enligt J. Bolander (personlig kommunikation, 27 februari 2018) är detta ett mer miljövänligt alternativ som bland annat kan minska koldioxidutsläppen. Begreppet *ekoasfalt* används olika inom olika företag i byggbranschen.

2.3.5 Rörsystem

2.3.5.1 Rörmaterial

I en asfaltssolfångare är det önskvärt att rörmaterialet har hög värmeledningsförmåga. Material som har använts i tidigare studier är bland annat stål med värmeledningsförmågan $43 - 54 \text{ W/mK}$, koppar med 372 W/mK och järn med $80,4 \text{ W/mK}$ (Bobes-Jesus m. fl., 2013). Bobes-Jesus m. fl. menar vidare att nackdelen med att använda metaller är att de utsätts för korrosion och därför kan istället plast som har en lägre värmeledningsförmåga användas. I snösmältningsystem har följande plaster använts; PEX-AL som har värmeledningsförmågan 0.43 W/mK , PEX 0.43 W/mK och ONIX 0.29 W/mK . Tester med efterföljande mätning av in- och utloppstemperatur visade att kopparrör gav störst ökning på temperaturen hos fluiden. För PEX-AL skiljde sig utloppstemperaturen enbart $3 \text{ }^\circ\text{C}$ jämfört med koppar (Bobes-Jesus m. fl., 2013). Då PEX-AL inte tål temperaturer över $120 \text{ }^\circ\text{C}$ bör det beaktas vid anläggningsprocessen enligt M. Wendel (personlig kommunikation, 26 februari 2018).

2.3.5.2 Rördiameter

Rördiametern påverkar flödesförhållandena på fluiden i rören. Om diametern på röret för ett konstant flöde ökar leder det till att värmeöverföringskoefficienten för turbulent flöde minskar. Det är mest fördelaktigt att ha turbulent strömning i rören eftersom mer värmeenergi då kan utvinnas (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

2.3.5.3 Röravstånd

Vid minskning av röravstånd ökar kapaciteteten för värmeuppsamling, förutsatt att fler rör placeras. Även temperaturen på utloppsvätskan minskar i detta fall, eftersom värmen då fördelas på flera rör (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

2.3.5.4 Rördjup

På grund av konvektion mellan asfalten och omgivningen är asfaltens maximala temperatur 20 mm under ytan. Det skulle därför vara fördelaktigt att lägga rören på detta djup för att optimera energiutvinningen (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

2.3.5.5 Rörarrangemang

Det finns två olika rörsystem för en asfaltssolfångare. Rörsystemet är antingen anordnat parallellt eller serpentint. Ett jämnt flöde är optimalt för att effektivisera energiutvinningen. Om ojämnheter finns kan det minska effekten med 2-20 %. Värmeöverföringen i rörsystemet sker mellan fluiden och rörets vägg (Bobes-Jesus m. fl., 2013). Ett jämnt flöde uppfylls enklast genom att använda serpentint system. Parallellt system är dock vanligare i kommersiellt syfte, eftersom det är lätthanterligt och tillverkningen sker i större omfattning (Matrawy & Farkas, 1997).

2.3.6 Fluid

Fluiden som transporterar värmeenergin bör ha en hög specifik värmekapacitet och en låg viskositet för att effektivisera systemet. Det är även önskvärt att den har en låg kostnad och är i flytande form inom det operativa temperaturintervallet (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

Vatten stämmer in på ovanstående punkter och är den vanligaste fluiden som används i en asfaltssolfångare (Chiarelli, Al-Mohammedawi, Dawson & García, 2017). I kallare klimat kan även glykol tillsättas för att sänka vattnets fryspunkt. Tillsatsmedlet har hög specifik värmekapacitet samt en låg viskositet (Bobes-Jesus m. fl., 2013). Blandas lika delar vatten och glykol fryser inte blandningen förrän vid -35 °C vilket är fördelaktigt under vinterhalvåret (Nationalencyklopedin, 2018e). Det finns olika sorters glykol, varav en är propylenglykol som anses vara mindre giftig än övriga (Nationalencyklopedin, 2018i).

En annan betydande egenskap är fluidens värmeledningsförmåga. Då vatten har en relativt låg värmeledningsförmåga kan nanopartiklar med hög konduktivitet tillsättas. Exempel på nanopartiklar är kol, metall och metalloxider (Pandey & Chaurasiya, 2016).

2.3.6.1 Flödes hastighet

Värmeöverföringshastigheten mellan rörvägg och vätskan sker genom konvektion och är beroende av strömningsförhållandet. Det förhållandet avgörs med hjälp av Reynolds tal, Re som påverkas av samverkan mellan rördiameter och flödes hastighet. För flödet inuti rören så utvecklas turbulent flöde vid $Re \approx 2300$, men ett fullt utvecklat turbulent flöde uppfylls vid $Re \approx 10000$ (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

Ytterligare slutsatser som kan dras gällande flödes hastigheten i systemet är följande

- En ökning av flödet med konstant rördiameter ökar flödes hastigheten och därmed även värmeöverföringskoefficienten. Det leder till att mängden energi som kan utvinnas från systemet också ökar.
- Ökad flödes hastighet ger en minskad maximal temperatur på asfaltsytan.
- En ökad flödes hastighet har ingen betydande inverkan på temperaturgradienten nedåt i asfaltslagret.
- Ökad flödes hastighet minskar temperaturökningen för fluiden. Det innebär att ett längre rör krävs för att vätskan ska nå samma temperatur för asfalten på ett visst djup.
- Då flödet ökar minskar den nödvändiga tiden för att solfångaren ska nå stationärt tillstånd (Bobes-Jesus m. fl., 2013).

2.3.7 Isolering

Syftet med att placera ett isolerande material under det övre asfaltslagret är att minska värmeenergiförluster till marken. Eftersom asfalten vid anläggning utsätts för högt tryck är det fördelaktigt att använda sig av ett material med hög tryckhållfasthet (Isover, 2018a).

Isoleringsmaterialet XPS-cellplast, anpassad för mark och grundläggning. Materialet måste klara 250 kPa vid en maximal tillåten deformation på 5%. Cellplasten tål en temperatur på 150 °C, lämplig användningstemperatur är maximalt 75 °C (Isover, 2013).

Cellplasten har en värmekonduktivitet på cirka 0,033 W/mK, densitet på 35 kg/m³ samt specifik värmekapacitet på 1000 J/kgK där den sistnämnda har samma värde som för luft eftersom cellplast består av det till 98 % (Isover, 2013).

3

Metod

3.1 Koncept

I studien implementeras konceptet asfaltssolfångare på en 200 meter lång gång- och cykelväg i anslutning till en skola i centrala Göteborg, vars exakta position inte specificeras. Pumpen förutsätts ha tillräcklig kapacitet för en sådan lång väg. I figur 3.1 nedan visas en principskiss på hur systemet är tänkt att appliceras. Skolan visas i rött samt gång- och cykelvägen i svart.

Vidare utfördes det undersökningar kring hur asfaltssolfångaren kan optimeras för att utvinna termisk energi och tillgodose en skola uppvärmningsbehov.



Figur 3.1: Principskiss över systemet

3.1.1 Gång- och cykelväg

Rören placeras på en redan anlagd gång- och cykelväg då sättningar i marken skett på grund av tidigare belastning. Det medför att påfrestningarna på rören minskar och anläggningen förenklas då rören lättare hålls på plats enligt J. Bolander (personlig kommunikation, 27 februari 2018). Ur ett samhällsperspektiv är det även en god idé att förstärka och rusta upp befintliga gång- och cykelvägar

eftersom Göteborg Stad satsar på dem i sin stadsplanering (Göteborg stad, 2015).

3.1.2 Skolbyggnad

Värmeenergin som utvinns från asfaltssolfångaren transporteras genom rörsystemet och lagras tills det finns ett uppvärmningsbehov. Därefter kan energin användas till att värma upp en skola med area på $500m^2 A_{temp}$, byggnadens totala golvarea. Tabell A.1 redovisar byggnaders genomsnittliga energianvändning fördelad på A_{temp} , så kallad specifik energianvändning. Byggnadens energianvändning avser den energi som vid normalt brukande under normalår behöver levereras till byggnaden, det vill säga köpt energi för värme, kyla, varmvatten och fastighetsenergi (Boverket, 2011). Utifrån tabell A.1 beräknades värdena för skolans area och anpassades till studiens resultat, vilka redovisas nedan i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Genomsnittlig specifik energiprestanda för vald skola

	Värmepump [kWh/år]	Elvärme [kWh/år]	Olja/gas [kWh/år]	Fjärrvärme [kWh/år]
Energianv.	33 000	67 000	74 500	65 500
Tappvarmvatten	4 500	7 000	7 000	6 000
Uppvärmning	47 000	86 000	98 000	85 500

3.2 Simulering

Simuleringar gjordes i programmeringsspråket Python med kod tillhandahållen av Josef Johnsson (personlig kommunikation, 8 mars 2018). Flödeshastighet bestämdes genom att säkerställa att turbulent flöde uppstod vid vald rördiameter. Vidare följdes körprotokollet, se bilaga B, för att beräkna resterande resultat. Variablerna i körprotokollet är angivna i SI-enheter och rördjup avser avståndet från asfaltens yta till rörens överkant.

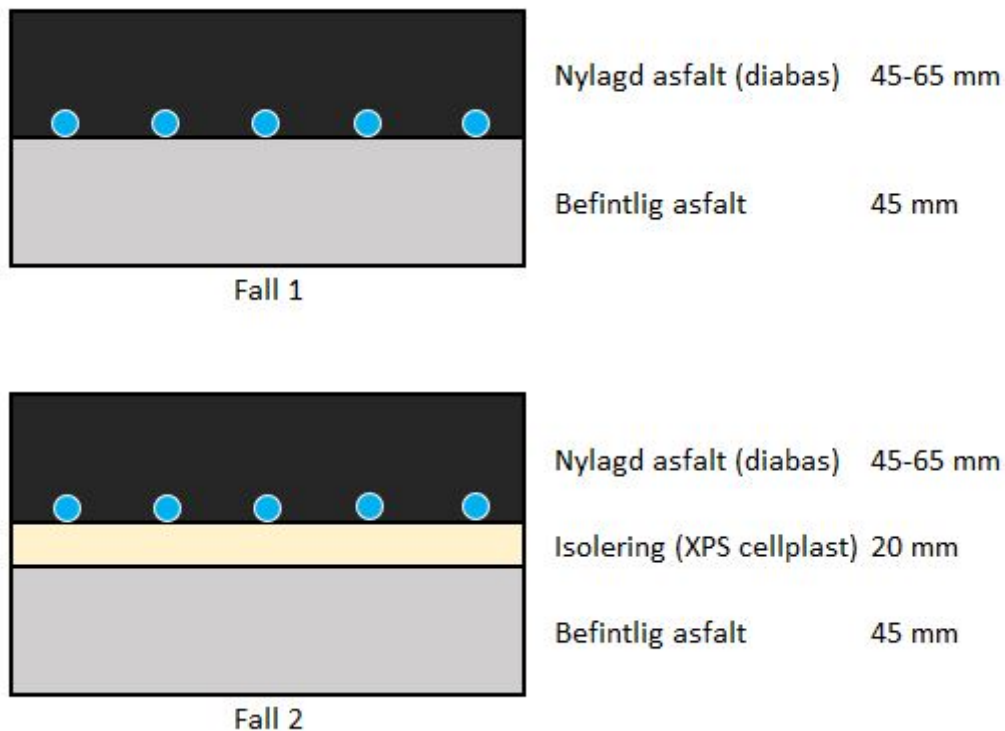
Test 1, 2 och 3 simulerades under 100 timmar i juli.

- Test 1: Konstant konduktivitet på $2 W/mK$. Varierat rördjup och cc-mått. Utan isolering
- Test 2: Konstant konduktivitet på $2 W/mK$. Varierat rördjup och cc-mått. 20 mm isoleringslager mellan asfaltslagren.
- Test 3: Konduktiviteten för diabas respektive bitumen är känd, men inte konduktiviteten för kombinationen av dessa. För att beakta osäkerheten testades tre olika värden för konduktivitet. Maximal utvinning av energi i systemet bestämdes genom att den mest ideala kombinationen av rördjup och cc-mått togs vidare (test 2.1) till test 3. Även ett realistiskt fall (test 2.7) studerades vidare i test 3. Fallet gjordes utan isolering.

I test 4 simulerades slutligen fall 3.3 och 3.5 vidare med tidsperioden 15e maj till 15e september, det vill säga 2975 timmar. Även här exkluderades isoleringslagret.

3.3 Ingående parametrar

I simuleringen studerades två lagersammansättningar, med och utan isolering i asfaltssolfångaren, se figur 3.2. Generellt för en gång- och cykelväg är asfaltslagret 45 mm tjockt enligt J. Bolander (personlig kommunikation, 27 februari 2018), vilket utgör det befintliga lagret. Isoleringen valdes till 20 mm cellplast. I simuleringen varierades den nylagda asfaltsytans tjocklek beroende på önskat rördjup eftersom rören placerades mellan de båda asfaltslagren. De olika lagersammansättningarna användes sedan som grund när rördjup och rörens cc-avstånd varierades.



Figur 3.2: Tvärsnittsvy av asfaltssolfångaren för olika lagersammansättningar

Vid optimeringen av asfaltssolfångaren har begränsningar gjorts gällande vilka parametrar som tillåts variera. Följande parametrar bestämdes till ett fast värde och varierades inte i simuleringen.

- Rörmaterial
 - Enligt avsnitt 2.3.5.1 valdes rörmaterialet till plastsorten PEX-AL. *Uponor Meltaway PEX-AL* valdes för ändamålet då de har ett gummiartat beteende med hög temperaturtålighet för att vara plast. De är reptåliga och saknar sprickpropagering vid till exempel vibrationer, vilket är gynnsamt för marksystem (Uponor, 2018).
- Rörarrangemang
 - Enligt avsnitt 2.3.5.5 valdes parallellt system.
- Rörradie och rörtjocklek
 - Rören som användes hade ytterradie 12,5 mm och rörtjocklek 2,3 mm enligt Uponors produktblad (Uponor, 2018).
- Fluid
 - Vatten valdes som fluid i systemet enligt avsnitt 2.3.6. För att sänka fryspunkten på vattnet tillsattes 35 volymprocent propylenglykol i blandningen.
- Flödeshastighet
 - Med fixt rörradie kunde iterativa beräkningar göras för att säkerställa ett turbulent flöde. Flödeshastigheten bestämdes sedan till ett konstant värde.
- Stenmaterial
 - Stenmaterial i den nylagda asfalten valdes till diabas, enligt 2.3.2.
- Isolering
 - XPS cellplast valdes som isolering mellan rör och befintlig asfalt. *STYROFOAM 300 BE-A-N* visade sig vara en lämplig cellplast för isolering i mark där belastningen är hög (Isover, 2018b). Prefabmaterial med tjockleken 20 mm valdes. Övriga parametrar överensstämmer med avsnitt 2.3.7.

Nedan i tabellerna 3.2, 3.4 och 3.5 preciseras variabla och konstanta parametrar samt materialegenskaper som användes i simuleringarna.

Tabell 3.2: Egenskaper Uponor PEX-rör

Ytterradie $[mm]$	12,5
Rörtjocklek $[mm]$	2,3
Konduktivitet $[W/(mK)]$	0,35
Densitet $[kg/m^3]$	925
Specifik värmekapacitet $[J/(kgK)]$	2300

Tabell 3.3: Egenskaper isoleringen STYROFOAM 300 BE-A-N

Tjocklek $[mm]$	20
Konduktivitet $[W/(mK)]$	0,33
Densitet $[kg/m^3]$	32
Specifik värmekapacitet $[J/(kgK)]$	1000

Tabell 3.4: Variabla rörparametrar i simuleringen

Tjocklek nytt asfaltslager $[mm]$	45	55	65
Rördjup till centrumrör, d $[mm]$	32,5	42,5	52,5
Avstånd mellan rör, cc $[mm]$	200	300	600

Tabell 3.5: Materialparametrar för olika material

	Nylagd asfalt	Isolering	Befintlig asfalt	Vätska
Konduktivitet $[W/(mK)]$	2	0,033	1,5	0,41
Densitet $[kg/m^3]$	2520	32	2432	1035
Specifik värmekapacitet $[J/(kgK)]$	920	1000	1630	3812

3.4 Klimatdata

Klimatdata hämtades från en mätstation i Göteborg, [57.78;11.83], bearbetad för ett normalår tillhandahållen av handledare J. Johnsson (personlig kommunikation, 19 mars 2018). Uppmätta värden på solintensitet, lufttemperatur, vind, relativ fuktighet samt molnighet användes vid simulering.

4

Resultat

4.1 Simulering

Flödeshastigheten bestämdes till 0,36 l/s för att få turbulent flöde med vald rördiameter. Rördjup definieras från asfaltsytan till rörens överkant. Den totala energiutvinningen för samtliga tabeller är baserad på en 200 meter lång gång- och cykelväg. Vidare följdes körprotokoll, se bilaga B, för test 1 - 4 och resultaten presenteras nedan. I samtliga tester avser 'total energiutvinning' energimängden per 600 m².

Nedan visas en tabell över total solintensitet. Datan är uppmätt mellan 15e maj till 15e september, vilket motsvar antalet timmar i tabell 4.1 nedan. Värdena i tabell 4.1 jämfördes sedan med simuleringsresultaten i diskussionen.

Tabell 4.1: Total solintensitet, Göteborg

Solintensitet [W/m ²]	574 941
Timmar [h]	2975
Area gång- och cykelväg [m ²]	600
Total energi [kWh]	344 965

4.1.1 Test 1

I test 1 varierades rördjup och cc-mått i asfaltssolfångaren under perioden 27e juli till 31e juli, det vill säga 100 timmar. Resultat presenteras i tabell 4.2 nedan.

Tabell 4.2: Resultat test 1, utan isolering

Test	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
Rördjup [mm]	20	20	20	30	30	30	40	40	40
cc-mått [mm]	200	300	600	200	300	600	200	300	600
Konduktivitet [W/mK]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Energiutvinning [kWh/m ²]	17,00	12,34	6,50	16,27	11,94	6,35	15,05	11,22	6,06
Total energiutvinning [kWh]	10200	7404	3900	9762	7164	3810	9030	6732	3636
Medeltemp. fluid [° C]	9,8	10,3	10,5	9,6	10,0	10,4	9,3	9,8	10,2

Från tabellen kan utläsas att ju lägre cc-mått och rördjup, desto större mängd energi kan utvinnas. Test 1.1 med rördjup 20 mm och cc-mått 200 mm ger den högsta energiutvinningen.

4.1.2 Test 2

Rördjup och cc-mått varierades med ett isoleringslager på 20 mm, under rören, mellan den nylagda och befintliga asfalten. Resultatet presenteras i tabell 4.3 nedan.

Tabell 4.3: Resultat test 2, med 20 mm isolering

Test	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
Rördjup [mm]	20	20	20	30	30	30	40	40	40
cc-mått [mm]	200	300	600	200	300	600	200	300	600
Konduktivitet [W/mK]	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Energiutvinning [kWh/m ²]	17,12	11,82	6,02	16,49	11,57	5,89	15,40	10,98	5,65
Total energiutvinning [kWh]	10272	7092	3612	9894	6942	3534	9240	6588	3390
Medeltemp. fluid [° C]	9,9	10,1	10,1	9,7	9,9	10,0	9,4	9,7	9,8

Tabell 4.3 visar att isoleringen inte har märkvärd inverkan på energiutvinningen. Av den anledningen försummas isoleringen i efterföljande tester.

4.1.3 Test 3

Det finns en osäkerhet kring vilken konduktivitet som en asfaltsmassa med diabas har, varvid konduktiviteten har varierats mellan $1,5 - 2,5 \text{ W/mK}$ för simuleringarna. Resultaten från tester med varierad konduktivitet finns redovisade i tabell 4.4. Asfaltsmassan med diabas som stenmaterial ligger troligtvis över $2,1 \text{ W/mK}$ då bitumen har en högre konduktivitet än vad diabas har. I test 3 varierades därför konduktiviteten. Test 3.1-3.3 motsvarar ideala värden för rördjup medan 3.4-3.6 motsvarar praktiskt tillämpbara värden. Resultatet presenteras i tabell 4.4 nedan.

Tabell 4.4: Resultat test 3, varierad konduktivitet

Test	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
Rördjup [mm]	20	20	20	50	50	50
cc-mått [mm]	200	200	200	200	200	200
Konduktivitet [W/mK]	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5
Energiutvinning [kWh/m ²]	15,68	17,00	17,94	13,47	15,05	16,20
Total energiutvinning [kWh]	9408	10200	10764	8082	9030	9720
Medeltemp. fluid [° C]	9,4	9,8 8	10,1	8,8	9,3	9,6

Resultaten i tabellen ovan visar att ju högre konduktivitet, desto högre energiutvinning. Test 3.3 kan betraktas som det ideala fallet men då det kanske inte är praktiskt tillämpbart simuleras även test 3.5 vidare i test 4. Test 3.5 har rördjupet 50 mm och konduktiviteten $2,0 \text{ W/mK}$.

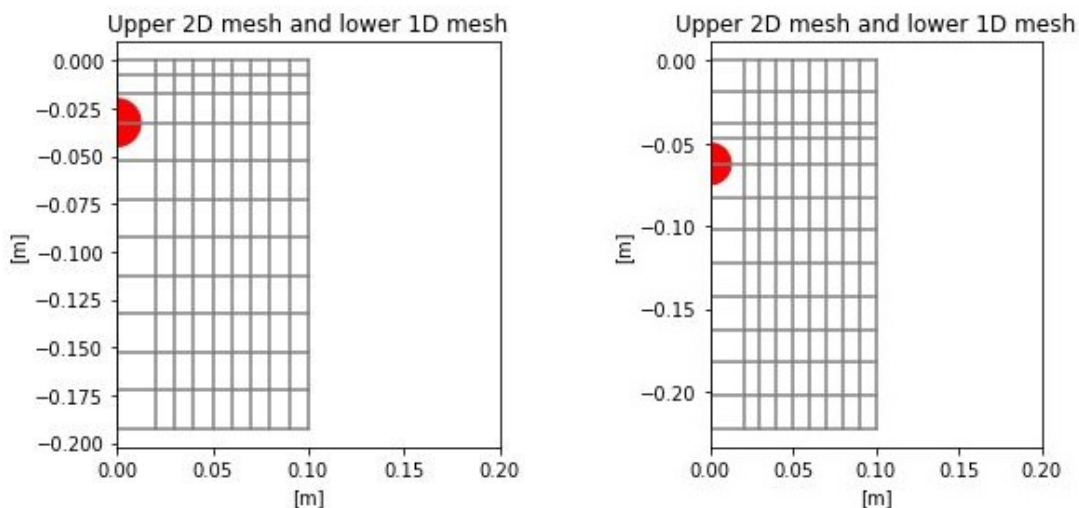
4.1.4 Test 4

I test 4 undersöktes mängden energi utvunnen under hela driftperioden, 15e maj till 15e september för test 3.3 och 3.5. Resultaten presenteras i tabell 4.5 nedan.

Tabell 4.5: Idealt och praktiskt tillämpbart fall under maj-september

Test	4.1	4.2
Rördjup [mm]	20	50
cc-mått [mm]	200	200
Konduktivitet [W/mK]	2,5	2,0
Energiutvinning [kWh/m ²]	395,56	376,13
Total energiutvinning [kWh]	237 336	225 678

Nedan visas en visualisering av resultaten för idealt och praktiskt tillämpbart rördjup samt konduktivitet. Simuleringen utfördes med rutnät enligt figur 4.1 och i bilderna visas även rörets position jämfört med asfaltsytan. Den vänstra bilden motsvarar test 4.1 och den högra 4.2.



Figur 4.1: Visualisering av rördjup för test 4.1 och 4.2. Bilderna är hämtade från Python under simuleringen.

5

Diskussion

5.1 Utvärdering av resultat

Enligt resultaten från test 4.1, se tabell 4.5, blir energiutvinningen med val av de mest ideala parametrarna från simuleringen 237 000 kWh under maj till september, då asfaltssolfångaren är i drift. Det praktiskt tillämpbara fallet, test 4.2 med rördjup 50 mm, se tabell 4.5, gav resultatet 226 000 kWh energiutvinning per år. Eftersom beräkningarna inte beaktar distributions- och lagringsförluster, krävs vidare analys. Enligt C. Åslund (personlig kommunikation, 3 maj 2018) skulle lagringsförlusterna vid förvaring i ett borrhålslager uppskattas till 10-15 %. M. Eriksson (personlig kommunikation, 18 april 2018) bekräftar att antagandet om 10 % för energiförluster för ett säsongslager bör vara rimligt och ge tillräckligt god marginal. Gällande distribution är det däremot svårare att uppskatta den procentuella förlusten menar C. Åslund (personlig kommunikation, 3 maj 2018). Energin som förloras vid transport av vattnet beror exempelvis på temperaturskillnaden mellan fluid och asfalt. Åslund tror dock att distributionsförluster inte bör vara betydande i den här studien. Även M. Eriksson (personlig kommunikation, 18 april 2018) menar att värmeförluster vid distribution kan antas vara försumbar. Förklaring till varför de kan antas vara försumbara är att exempelvis friktionsförluster i rören återgår till systemet i form av värme. Med 15 % lagringsförluster erhålls 202 000 kWh för det ideala fallet samt 192 000 kWh för det praktiskt tillämpbara fallet. Resultatet visar att skolans energibehov, se tabell 3.1, kan täckas av den modellerade asfaltssolfångaren oavsett jämfört värmesystem. Värdena kan även jämföras med data för solintensitet i Göteborg under studerade månader, se tabell 4.1. Fallet med idealt rördjup och konduktivitet nyttjar 59 % av den totala solenergin under driftsperioden. För det praktiskt tillämpade fallet är motsvarande andel 56 % ¹. Resultatet kan verka högt, vilket kan bero på avgränsningar som gjorts samt den förenklade beräkningsmodellen.

Hur stor energimängd som kan utvinnas beror delvis på rörsystemets utformning. Enligt tabell 4.2 utvinns mest energi vid små värden på cc-mått eftersom fler rör får plats i bredd under vägen. Det innebär en högre investeringskostnad, men skulle kunna öka kapaciteten för systemet. Samma tabell visar att ju närmre ytan rören placeras, desto större energiutvinning. På grund av belastning och underhåll är det dock inte säkert att det är möjligt att placera rören 20 mm under

¹Efter publicering visade det sig att dessa siffror inte var tillförlitliga

asfaltsytan. Enligt J. Bolander (personlig kommunikation, 27e februari 2018) krävs ett lager med minst 45 mm asfalt.

I referensprojektet som nämns i bakgrunden har rören däremot lagts 30 mm under en bilväg. En sådan väg är normalt sett mer belastad jämfört med en gång- och cykelväg, vilket innebär att rören eventuellt kan placeras på det ideala djupet 20 mm. För att inte förstöra rören vid anläggning av vägen krävs en metod som inte belastar ytan i samma grad som asfatsläggare gör idag. Om utvecklingen kring asfaltssolfångare och asfalt fortsätter är det möjligt att det ideala rördjupet kan fungera i framtiden.

Utöver ovanstående parametrar är även ett lågt albedotal och en hög konduktivitet avgörande för optimal energiutvinning. Enligt J. Bolander (personlig kommunikation, 27 februari 2018) är det önskvärt att ha stenmaterial med ett lågt albedotal eftersom det översta, mörka bitumenlagret kommer att slitas bort. Stenmaterialet blottläggs efter en tids belastning och blir då avgörande för asfaltens albedotal och hur mycket strålning som asfalten absorberar. Då det finns en osäkerhet kring vilken konduktivitet den nylagda asfalten har bör experimentella tester genomföras för att säkerställa simuleringens överensstämmande med verkligheten. Diabas fördelaktiga materialegenskaper bör vidare ställas mot dess höga densitet. Hög densitet innebär tungt att transportera vilket leder till en högre fraktkostnad än för ett lättare material. Dessutom innebär en högre densitet en högre belastning på rörsystemet. Utöver värmeledningsförmåga, albedo samt densitet är tillgänglighet en viktig faktor vid val av stenmaterial. Diabas bryts i Skövde och kan därför ses ha god tillgänglighet geografiskt sett för Göteborg, men tillgången av bergarten är inte utredd. För andra platser är det möjligt att diabas inte är ett lämpligt val.

Under den andra simuleringen lades ett lager isolering av XPS-cellplast under rören i syfte att minska värmeförlusterna från rören till underliggande mark. Resultat från test 1 och test 2, se tabell 4.2 och 4.3, visar att isoleringen inte påverkar energiutvinningen nämnvärt. Energin som utvinns då isolering inkluderas blir något högre med cc-mått 20 mm, men något lägre då cc-måttet ökas. Ytterligare skillnad mellan resultaten är att maximal vattentemperatur i rören blir cirka 1 ° C högre än vid tester utan isolering. Det kan förefalla oväntat och möjligen felaktigt att isoleringen inte påverkar resultatet positivt för samtliga tester. En tänkbar anledning kan vara att då övre och undre asfaltslager separeras av ett isolerande skikt, utgör enbart det övre lagret den massa som lagrar energin. Fler möjliga orsaker till minskad energiutvinning behöver vidare undersökas för att skapa förståelse kring utfallet.

Det går att diskutera om resultatet stämmer överens med verkligheten och därmed är tillförlitligt. Pumpens energibehov är inte utrett och detta bör tas med i beaktning. Simuleringarna i studien bortser dessutom från skugga och fukt på asfaltsytan, vilket påverkar resultatet och dess rimlighet.

5.1.1 Felkällor simulering

Vid simulering har en viss finhet på rutnätet se figur 4.1 valts för att få rimliga beräkningstider med hänsyn till antalet tester. Om rutnätet görs oändligt fint närmar sig beräkningsmodellen verkligheten. I beräkningsmodellen har det även förutsatts att asfaltslagren placerats direkt på marken. Därmed har ett makadamlager med andra egenskaper än mark försumrats. Marken under asfaltslagren har även antagits ha en konstant temperatur i simuleringen, vilken i verkligheten varierar.

Verkligt albedotal för asfaltsytan kan avvika från valt eftersom det baserats på värden för annan asfaltssammansättning. Albedotalet kommer även att öka med tiden och ge en något sämre energiutvinning.

5.2 Etik och ansvar

För att asfaltssolfångare ska kunna ses som konkurrenskraftigt jämfört med andra energikällor behöver den bland annat ha en ekonomisk vinning och inte innebära en risk vad gäller människor och miljö. Propylenglykol är som tidigare nämnt mindre hälsofarligt jämfört med andra typer av glykoler. Att blanda in propylenglykol i den värmeöverförande fluiden kan dock fortfarande innebära en miljö- och hälsorisk om någon form av läckage uppstår i rören. Läckan kan dessutom bli komplicerad att åtgärda eftersom rören ska gjutas i asfalten. Därav bör det utredas om det är lämpligt att placera rör med en glykolblandning i nära anslutning till bostadsområden och annan tät bebyggelse. Om rören inte är vätskefyllda när asfaltssolfångaren inte är i drift, exempelvis under vinterhalvåret, kan frysskyddsmedel uteslutas. Hälsoskadliga risker till följd av glykolanvändning i systemet skulle då reduceras.

En annan aspekt som är viktig att beröra är systemets livslängd och återvinning. Eftersom livslängden för asfaltsvägar är cirka 17 år är det önskvärt att asfaltssolfångaren har likvärdig hållbarhet. Upprivningskostnaderna kan då hållas på samma nivå som för en vanlig asfaltsväg. Idag återvinns 12 % av asfalten i Sverige, men enligt M. Wendel (personlig kommunikation, 26 februari 2018) är det tekniskt möjligt att återvinna 40 %. Om det är komplicerat att separera asfalten från rören kan asfaltssolfångaren försvåra återvinningsprocessen. Till skillnad från asfalt är rören som studerats inte återvinningsbara enligt K.E. Calderon (personlig kommunikation, 4 april 2018). Vidare hävdar Calderon att produktionen av PEX-AL har en relativt låg miljöpåverkan och har ingen negativ effekt på miljön när de ligger i marken. Miljöpåverkan från asfaltsproduktion kan minskas genom att välja företagets motsvarighet till ekoasfalt. Ett sådant val innebär i dagsläget att kostnaderna för systemet kan bli högre, men det kan även ses som konkurrenskraftigt att göra hållbara satsningar inom anläggningsbranschen.

En omställning till innovativa hållbara energikällor, likt asfaltssolfångare, kan till en början behöva politiska incitament i form av subventioner och investeringar för att vara ekonomiskt konkurrenskraftiga. För att motivera en kommunal, regional eller statlig investering av asfaltssolfångare bör energisystemet tillföra något till invånarna. Därav är det lämpligt att välja en offentlig byggnad, exempelvis en skola, för att ändamålet ska vara att bidra till allmännyttan. Göteborgs stad äger och ansvarar för de flesta av gång- och cykelvägarna i kommunen (Göteborg stad, 2018). Rimligtvis kan då ansvaret gällande drift och underhåll av en asfaltssolfångarväg falla på Göteborgs stad.

Vidare kan det diskuteras hur anläggning av en asfaltssolfångarväg skulle utföras praktiskt i produktionen. Det kommer enligt J. Bolander (personlig kommunikation, 27 februari 2018) inte krävas en ny yrkesgrupp med särskild kompetens för anläggning av systemet. Ansvaret kommer istället att falla på asfaltarläggarna. Då rören inte tål temperaturer över 120 °C kommer asfalten behöva läggas med ökad försiktighet. Vid anläggning är temperaturen på asfaltsmassan cirka 150 °C men enligt M. Wendel (personlig kommunikation, 26 februari 2018) går det att sänka temperaturen till 50-80 °C för mindre trafikerade vägar. Det kan ske utan att asfaltens hållfasthet försämras. Rörsystemet klarar heller inte för hög belastning utan anläggningen bör ske genom att använda spridermaskiner. Dessutom måste maskiner som används vid underhåll och drift anpassas till systemet.

5.3 Framtid

Asfalt kommer enligt J. Bolander (personlig kommunikation, 27 februari 2018) användas så länge fordon körs på vägar. Fortsatt utveckling av asfaltssolfångare som ett kompletterande energisystem kan därmed vara en god investering. Asfaltssolfångare kan förutom att utvinna energi för uppvärmning av byggnader användas med syftet att smälta snö på vägar. I det fallet är systemet i drift under hela året. Ett sådant snösmältningssystem finns redan etablerat i Östersund och konceptet är under utveckling. Fördelen förutom att utvunnen energi kan nyttjas lokalt är att konventionella och klimatbelastande metoder som saltning och sandning kan uteslutas.

Projektet med snösmältningssystemet har kostat 5 miljoner kronor att genomföra (Nohrstedt, 2018). Vidare behövs undersökning om det kan vara lönsamt att ta fram ett asfaltssolfångarkoncept som istället avser att värma byggnader. Genom att ta fram en kostnadskalkyl för dimensionering och anläggning av en asfaltssolfångarväg kan jämförelser göras med kostnaden för andra energislag. Därefter kan en slutsats dras gällande lönsamheten i att implementera konceptet. Det kan däremot diskuteras om ekonomisk lönsamhet bör ställas mot innovationer som främjar utvecklingen mot ett mer hållbart samhälle.

I länder med varmare klimat och fler soltimmar än Göteborg kan det vara mer lämpligt att optimera asfaltssolfångare med avseende på reduktion av *Urban heat island effect*. Förutom att sänka lufttemperaturen i städer där värmeöeffekter är ett problem, minskas också energibehovet för att kyla byggnaderna. Göteborg har statistiskt sett mycket nederbörd (Statistiska Centralbyrån, 2011). Vattenbeläggning från regn hindrar solenergin att värma upp asfalten, eftersom vattnets fasövergång är en energikrävande process. Därav skulle det vara fördelaktigt att placera asfaltssolfångare på platser med mindre nederbörd och fler soltimmar.

Det bör utredas om asfaltssolfångare är lämpligt att placera på andra ytor än gång- och cykelvägar. Att implementera asfaltssolfångare på ytor som exempelvis parkeringsplatser och bilvägar kan bidra till ett mervärde av befintliga ytor och på så sätt öka mängden utvunnen energi. Det är dock möjligt att parkeringsplatser kommer byggas ned under mark i framtiden eftersom de upptar värdefull yta i staden. Att applicera konceptet på gång- och cykelvägar går även hand i hand med Göteborg Stads vision om att utöka cykelmöjligheterna i staden.

I framtiden kommer förmodligen nya material upptäckas, vilket kan göra energiutvinningen effektivare än idag. Önskade förbättringar för energiutvinning, miljö och kostnad gäller främst asfaltsmassan, men också rören samt fluiden. Grafen är ett exempel på ämne som skulle kunna höja konduktiviteten för asfaltsmassan. Däremot behövs vidare forskning om grafen kan implementeras i konceptet och om effekten är ekonomiskt försvarsbar. Eftersom bitumen utvinns ur råolja kan det vara önskvärt att ersätta den i framtiden. Enligt M. Wendel (personlig kommunikation, 26 februari 2018) är det visserligen en av världens mest återvunna produkt. För att asfaltssolfångaren ska ha lägsta möjliga ekologiska fotavtryck behöver dess komponenter väljas noggrant.

Slutligen är konduktivitet och albedotal inte parametrar som beaktas i asfaltverk idag då det inte är nödvändigt i beläggningssyfte. Framtida materialförslag för asfaltssolfångaren kan inte tillåtas kompromissas med de ursprungliga syften som vägen har, som bärighet och säkerhet.

6

Slutsats

Sammantaget skulle en skolas uppvärmningsbehov kunna tillgodoses av asfaltsolfångaren. Däremot kan resultatets rimlighet ifrågasättas på grund av en förenklad beräkningsmodell, avgränsningar samt uppskattningar som gjorts. Omständigheter som skymd sol och ansamling av regn är något som bortsetts från i studien men som kan ha avgörande inverkan i tätbebyggda områden.

För att besvara frågeställningen om det är lämpligt att satsa på innovationen bör det forskas vidare kring energiförluster i distribution- och lagringsskedet. Dessutom är det viktigt att inkludera en studie kring asfaltssolfångarens livslängd från tillverkning till avveckling för att få ett grepp om energilösningens hållbarhet och klimatavtryck. Ytterligare ett område som bör studeras vidare är vad som händer med rörsystemet under vinterhalvåret när asfaltssolfångaren inte är i drift. Frågan om ekonomisk hållbarhet kvarstår. Asfaltssolfångarens kapacitet att utvinna energi bör vägas mot investerings- och driftskostnader.

Avslutningsvis kan social, ekonomisk och ekologisk hållbarhet nås genom nyskapande idéer likt energiutvinning från uppvärmda asfaltsvägar. I enlighet med Sveriges miljömål kan asfaltssolfångaren potentiellt sett bidra till att täcka framtidens energibehov.

Litteraturförteckning

- Alden, A. (2018). *Densities of Common Rocks and Minerals*. Hämtad från <https://www.thoughtco.com/densities-of-common-rocks-and-minerals-1439119>
- Bobes-Jesus, V., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D. & Rodriguez-Hernandez, J. (2013). Asphalt solar collectors: A literature review. *Applied Energy*, 102, 962–970. Hämtad från <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.050> doi: 10.1016/j.apenergy.2012.08.050
- Boverket. (2011). Boverkets byggregler, BBR avsnitt 9 BFS 2011:6 t.o.m. BFS 2015:3. *BBR*. Hämtad från <http://www.boverket.se/globalassets/vagledning/kunskapsbanken/bbr/bbr-22/bbr-avsnitt-9>
- Calner, M. (2011). Guide till de västgötska platåbergens geologi. *Geologiskt forum*. Hämtad från http://www.geologiskaforeningen.se/images/Geologisktforumnr70_17-28_vastergotland.pdf
- Chen, J., Wang, H. & Zhu, H. (2017a, 2). Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect. *Applied Thermal Engineering*, 113, 739–748. Hämtad från <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431116332136> doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.080
- Chen, J., Wang, H. & Zhu, H. (2017b, 2). Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect. *Applied Thermal Engineering*, 113, 744. Hämtad från <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431116332136> doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.080
- Chiarelli, A., Al-Mohammedawi, A., Dawson, A. & García, A. (2017, 2). Construction and configuration of convection-powered asphalt solar collectors for the reduction of urban temperatures. *International Journal of Thermal Sciences*, 112, 242–251. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072916305877?via%3Dihub> doi: 10.1016/J.IJTHERMALSCI.2016.10.012
- Energimyndigheten. (2011). *Solfångare*. Hämtad från <http://www.energikunskap.se/sv/FAKTABASEN/Vad-ar-energi/Energibarare/Fornybar-energi/Sol/Solfangare/>
- Fan, M., Liang, H., You, S., Zhang, H., Zheng, W. & Xia, J. (2018, 1). Heat transfer analysis of a new volumetric based receiver for parabolic trough solar collector. *Energy*, 142, 920–931. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/>

- science/article/pii/S0360544217317814?via%3Dihub doi: 10.1016/J.ENERGY.2017.10.076
- Geology. (2018). *Granite: Igneous Rock - Pictures, Definition & More*. Hämtad från <https://geology.com/rocks/granite.shtml>
- Göteborg stad. (2015). *Cykelprogram för en nära storstad*. Hämtad från https://goteborg.se/wps/wcm/connect/538134e2-844e-4e46-acc4-fe74a673cefb/Cykelprogram_antagen_web_FINAL.pdf?MOD=AJPERES
- Göteborg stad. (2018). *Ansvar för vägnätet i Göteborg*. Hämtad från http://goteborg.se/wps/portal/start/gator-vagar-och-torg/gator-och-vagar/trafiklaget-just-nu/ansvar-for-vagntet-i-goteborg/!ut/p/z1/hY7LDoIwFES_hm3vBUpt3NUdR0IrEezGAKmFBCgp1SZ-vbg00Ti7yZzJDEgoQY7Vo90V68xY9Yu_SHbdh9mBb0KBPNwhpnGe5fR4jk4pheIfIJcYf0ggZCC7eiC
- Hagentoft, C.-E. (2012). *Introduction to building physics* (1:7 utgåvan). Studentlitteratur AB.
- Isover. (2013). STYROFOAM™ XPS. *Produktblad*.
- Isover. (2018a). *Isolera garageuppfart*. Hämtad från <https://www.isover.se/isolera-garageuppfart>
- Isover. (2018b). *STYROFOAM 300 BE-A-N*. Hämtad från <https://www.isover.se/products/styrofoam-300-be-n-storformat>
- Kalogirou, S. A. (2004, 1). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128504000103?via%3Dihub> doi: 10.1016/J.PECS.2004.02.001
- Matrawy, K. & Farkas, I. (1997, 6). Comparison study for three types of solar collectors for water heating. *Energy Conversion and Management*, 38(9), 861–869. Hämtad från https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890496000891?_rdoc=1&_fmt=high&_origin=gateway&_docanchor=&md5=b8429449ccfc9c30159a5f9aeaa92ffb doi: 10.1016/S0196-8904(96)00089-1
- Nationalencyklopedin. (2018a). *Absorption*. Hämtad från <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/absorption>
- Nationalencyklopedin. (2018b). *Asfalt*. Hämtad från <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/asfaltbeläggning>
- Nationalencyklopedin. (2018c). *Bitumen*. Hämtad från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/bitumen> (Hejhej)
- Nationalencyklopedin. (2018d). *Emissivitet*. Hämtad från <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/emissivitet>
- Nationalencyklopedin. (2018e). *Glykol*. Hämtad från [https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/glykol-\(etylenglykol\)](https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/glykol-(etylenglykol))
- Nationalencyklopedin. (2018f). *Grafen*. Hämtad från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/grafen>
- Nationalencyklopedin. (2018g). *Granit*. Hämtad från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/granit>

- Nationalencyklopedin. (2018h). *Konvektion*. Hämtad från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/konvektion>
- Nationalencyklopedin. (2018i). *Propylenglykol*. Hämtad från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/propylenglykol>
- Nationalencyklopedin. (2018j). *Solstrålning*. Hämtad från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/solstrålning>
- Nationalencyklopedin. (2018k). *Transmission*. Hämtad från [https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/transmission-\(3\)](https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/transmission-(3))
- Naturhistoriska Riksmuseet. (2018). *Magmatiska bergarter*. Hämtad från <http://www.nrm.se/faktaomnaturenochrymden/geologi/bergarterochmalmer/magmatiskabergarter.1605.html>
- Naturvårdsverket. (2018a). *Energianvändning - Västra Götalands län*. Hämtad från <https://www.miljomal.se/Miljomalen/Alla-indikatorer/Indikatorsida/?iid=46&pl=2&t=Lan&l=14>
- Naturvårdsverket. (2018b). *Förnybar energi*. Hämtad från <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Energi/Fornybar-energi/>
- Naturvårdsverket. (2018c). *Utsläpp av växthusgaser till år 2045*. Hämtad från <https://www.miljomal.se/etappmalen/Begransad-klimatpaverkan/Utslapp-av-vaxthusgaser-till-ar-2045>
- Nohrstedt, L. (2018, 3). No Title. *Ny Teknik*. Hämtad från <https://www.nyteknik.se/fordon/jamtlandsk-solenergi-haller-vagen-isfri-6906635>
- Pandey, K. M. & Chaurasiya, R. (2016). A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Hämtad från https://ac.els-cdn.com/S136403211630569X/1-s2.0-S136403211630569X-main.pdf?_tid=3d628f90-1235-11e8-b4bf-00000aacb35d&acdnat=1518688239_86aed89b83dd877c3a2aced975c24ee8https://ac.els-cdn.com/S136403211630569X/1-s2.0-S136403211630569X-main.pdf?_tid=9447cc4 doi: 10.1016/j.rser.2016.09.078
- Projektgrupp inom NVF Utskott 33. (2000). *Asfaltens Gröna Bok* (forskningsrapport). Borlänge: Nordiska TVägtekniska Förbundet. Hämtad från <http://www.nvfnorden.org/lisalib/getfile.aspx?itemid=1604>
- Sen, S. & Roesler, J. (2016, 3). Aging albedo model for asphalt pavement surfaces. *Journal of Cleaner Production*, 117, 169–175. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616000378> doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.019
- Statistiska Centralbyrån. (2011). *Väder*. Hämtad från http://www.scb.se/statistik/_publikationer/ov0904_2011a01_br_03_a01br1101.pdf
- Tang, N., Wu, S. P., Chen, M. Y., Pan, P. & Sun, C. J. (2014, 8). Effect mechanism of mixing on improving conductivity of asphalt solar collector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 650–655. Hämtad från https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931014003196?_rdoc=1&fmt=high&origin=

gateway&_docanchor=&md5=b8429449ccfc9c30159a5f9aeaa92ffb doi:
10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.014

- Tian, Y. & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538–553. Hämtad från https://ac.els-cdn.com/S0306261912008549/1-s2.0-S0306261912008549-main.pdf?_tid=f53869d4-117f-11e8-8abb-00000aacb35d&acdnat=1518610371_d32e96e213c31d42212e37cb2254fb03 doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.051
- Uponor. (2018). *Uponor Ytvärmesystem Innehåll Inledning*. Hämtad från https://mail-attachment.googleusercontent.com/attachment/u/1/?ui=2&ik=d442c41cc6&view=att&th=1629b539da3b2b10&attid=0.1&disp=inline&safe=1&zw&saddbat=ANGjdJ_IPRUrIrOFIyKGyOuPHF3dNo2iyP6nLVVU5c2xSjv4w7p06Ee20rQRtDC14_kneAAE0qFtqdCSTY8kYdUuYbDN8SV2zTPcJDles
- Vosteen, H.-D. & Schellschmidt, R. U. U. (2003). Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and chemistry of the earth*. Hämtad från https://ac.els-cdn.com/S147470650300069X/1-s2.0-S147470650300069X-main.pdf?_tid=a86bf344-d87a-4fba-919a-ea172a2e425b&acdnat=1519985688_9d9e4ad5fc1f03a1de2353aeaa148731 doi: 10.1016/S1474-7065(03)00069-X
- Wang, D., Lu, X., Song, Y., Shao, R. & Qi, T. (2010, 10). Influence of the temperature dependence of thermal parameters of heat conduction models on the reconstruction of thermal history of igneous-intrusion-bearing basins. *Computers & Geosciences*, 36(10), 1339–1344. Hämtad från <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300410002050> doi: 10.1016/J.CAGEO.2010.03.014

A

Energibehov skola

Tabell A.1: Genomsnittlig specifik energiprestanda

	Värmepump [kWh/m ² år]	Elvärme [kWh/m ² år]	Olja/gas [kWh/m ² år]	Fjärrvärme [kWh/m ² år]
Energianv.	66	134	149	131
Tappvarmvatten	9	14	14	12
Uppvärmning	94	172	196	171

Från Energideklarationsregistret, Boverket (personlig kommunikation, 9 april 2018).

B

Körprotokoll

B.1 Test 1

	Test 1.1	Test 1.2	Test 1.3	Test 1.4	Test 1.5	Test 1.6	Test 1.7	Test 1.8	Test 1.9
Mesh									
Rördjup	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05
Rörsystem									
cc-mått	0,2	0,3	0,6	0,2	0,3	0,6	0,2	0,3	0,6
Ytterradie	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Tjocklek rörvägg	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
Flöde	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Rörlängd	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Konduktivitet	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Densitet	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Spec. värmekap.	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
Vätska									
Densitet vätska	1035	1035	1035	1035	1035	1035	1035	1035	1035
Spec. värme vätska	3812	3812	3812	3812	3812	3812	3812	3812	3812
Konduktivitet vätska	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Viskositet vätska	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712
Mark									
Konduktivitet	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Densitet	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Spec. värme	600	600	600	600	600	600	600	600	600
Väg									
Vägbredd	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Vägdjup	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Lager									
Tjocklek övre lager 1	0,045	0,045	0,045	0,055	0,055	0,055	0,075	0,075	0,075
Konduktivitet lager 1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Densitet lager 1	2520	2520	2520	2520	2520	2520	2520	2520	2520
Spec. värme lager 1	920	920	920	920	920	920	920	920	920
Tjocklek lager 2	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
Konduktivitet lager 2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Densitet lager 2	2432	2432	2432	2432	2432	2432	2432	2432	2432
Spec. värme lager 2	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630
Ytparametrar									
Albedo	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Emissivitet	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
Temperatur									
Starttemp. vätska	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501
Tid									
Startsekund	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000
Startdatum	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli
Slutsekund	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000
Slutdatum	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli
Tidssteg	24	24	24	23	24	24	24	24	24
Resultat									
Flödestyp	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent
Energiutvinning per m2	17,00	12,34	6,50	16,27	11,94	6,35	15,05	11,22	6,06
Energiutvinning tot. [kWh]	10200	7404	3900	9762	7164	3810	9030	6732	3636
Maxtemp. vatten	13,5	13,8	13,9	13,0	13,4	13,5	12,3	12,6	12,7
Medeltemp. vatten	9,8	10,3	10,5	9,6	10,0	10,4	9,3	9,8	10,2

B.2 Test 2

	Test 2.1	Test 2.2	Test 2.3	Test 2.4	Test 2.5	Test 2.6	Test 2.7	Test 2.8	Test 2.9
Mesh									
Rördjup	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05
Rörsystem									
cc-mått	0,2	0,3	0,6	0,2	0,3	0,6	0,2	0,3	0,6
Ytterradie	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Tjocklek rörvägg	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
Flöde	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Rörlängd	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Konduktivitet	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Densitet	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Spec. värmekap.	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
Vätska									
Densitet vätska	1035	1035	1035	1035	1035	1035	1035	1035	1035
Spec. värme vätska	3812	3812	3812	3812	3812	3812	3812	3812	3812
Konduktivitet vätska	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Viskositet vätska	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712
Mark									
Konduktivitet	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Densitet	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Spec. värme	600	600	600	600	600	600	600	600	600
Väg									
Vägbredd	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Vägdjup	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Lager									
Tjocklek lager 1	0,045	0,045	0,045	0,055	0,055	0,055	0,0625	0,0625	0,0625
Konduktivitet lager 1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Densitet lager 1	2520	2520	2520	2520	2520	2520	2520	2520	2520
Spec. värme lager 1	920	920	920	920	920	920	920	920	920
Tjocklek lager 2	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Konduktivitet lager 2	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
Densitet lager 2	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Spec. värme lager 2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Tjocklek lager 3	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
Konduktivitet lager 3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Densitet lager 3	2432	2432	2432	2432	2432	2432	2432	2432	2432
Spec. värme lager 3	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630	1630
Ytparametrar									
Albedo	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Emissivitet	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
Temperatur									
Starttemp. vätska	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501
Tid									
Startsekund	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000
Startdatum	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli
Slutsekund	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000
Slutdatum	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli
Tidssteg	24	24	24	23	24	24	24	24	24
Resultat									
Flödestyp	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent
Energiutvinning per m2	17,12	11,82	6,02	16,49	11,57	5,89	15,40	10,98	5,65
Energiutvinning tot. [kWh]	10272	7092	3612	9894	6942	3534	9240	6588	3390
Maxtemp. vatten	14,6	14,9	14,9	14,2	14,5	14,5	13,4	13,8	13,9
Medeltemp. vatten	9,9	10,1	10,1	9,7	9,9	10,0	9,4	9,7	9,8

B.3 Test 3

	Test 3.1	Test 3.2	Test 3.3	Test 3.4	Test 3.5	Test 3.6
Mesh						
Rördjup	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05
Rörsystem						
cc-mått	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ytterradie	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125
Tjocklek rörvägg	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023
Flöde	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Rörlängd	200	200	200	200	200	200
Konduktivitet	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Densitet	925	925	925	925	925	925
Spec. värmeKap.	2300	2300	2300	2300	2300	2300
Vätska						
Densitet vätska	1035	1035	1035	1035	1035	1035
Spec. värme vätska	3812	3812	3812	3812	3812	3812
Konduktivitet vätska	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Viskositet vätska	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712	0,00712
Mark						
Konduktivitet	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Densitet	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Spec. värmeKap.	600	600	600	600	600	600
Väg						
Vägbredd	3	3	3	3	3	3
Vägdjup	6	6	6	6	6	6
Lager						
Tjocklek lager 1	0,045	0,045	0,045	0,075	0,075	0,075
Konduktivitet lager 1	1,5	2	2,5	1,5	2	2,5
Densitet lager 1	2520	2520	2520	2520	2520	2520
Spec. värme lager 1	920	920	920	920	920	920
Tjocklek lager 3	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
Konduktivitet lager 3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Densitet lager 3	2432	2432	2432	2432	2432	2432
Spec. värme lager 3	1630	1630	1630	1630	1630	1630
Ytparametrar						
Albedo	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Emissivitet	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
Temperatur						
Starttemp vätska	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501	4,501
Tid						
Startsekund	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000	18000000
Startdatum	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli	27e juli
Slutsekund	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000	18360000
Slutdatum	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli	31e juli
Tidssteg	24	24	24	24	24	24
Resultat						
Flödestyp	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent
Energiutvinning per m2	15,68	17,00	17,94	13,47	15,05	16,20
Energiutvinning tot. [kWh]	9408	10200	10764	8082	9030	9720
Maxtemp. vatten	12,7	13,5	14,0	11,4	12,3	12,9
Medeltemp. vatten	9,4	9,8	10,1	8,8	9,3	9,6

B.4 Test 4

	Test 4.1	Test 4.2
Mesh		
Rördjup	0,02	0,05
Rörsystem		
cc-mått	0,2	0,2
Ytterradie	0,0125	0,0125
Tjocklek rörvägg	0,0023	0,0023
Flöde	0,36	0,36
Rörlängd	200	200
Konduktivitet	0,35	0,35
Densitet	925	925
Spec. värmekap.	2300	2300
Vätska		
Densitet vätska	1035	1035
Spec. värme vätska	3812	3812
Konduktivitet vätska	0,41	0,41
Viskositet vätska	0,00712	0,00712
Mark		
Konduktivitet	1,2	1,2
Densitet	1300	1300
Spec. värme	600	600
Väg		
Vägbredd	3	3
Vägdjup	6	6
Lager		
Tjocklek lager 1	0,045	0,075
Konduktivitet lager 1	2,5	2
Densitet lager 1	2520	2520
Spec. värme lager 1	920	920
Tjocklek lager 3	0,045	0,045
Konduktivitet lager 3	1,5	1,5
Densitet lager 3	2432	2432
Spec. värme lager 3	1630	1630
Ytparametrar		
Albedo	0,09	0,09
Emissivitet	0,91	0,91
Temperatur		
Starttemp. vätska	4,501	4,501
Tid		
Startsekund	11581200	11581200
Startdatum	15e maj	15e maj
Slutsekund	22291200	22291200
Slutdatum	15e sept.	15e sept.
Tidssteg	24	24
Resultat		
Flödestyp	Turbulent	Turbulent
Energiutvinning per m2	395,56	376,13
Energiutvinning tot. [kWh]	237336	225678
Maxtemp. vatten	15,2	14,3
Medeltemp. vatten	8,7	8,6

