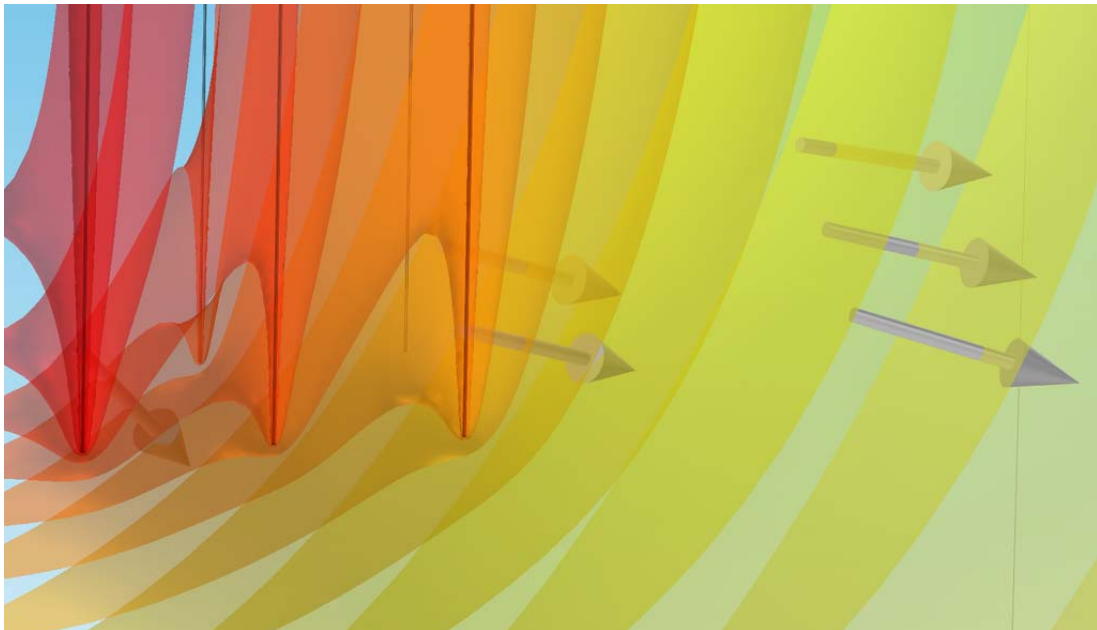




**KTH Industrial Engineering
and Management**

Temperaturzoner för lagring av värmeenergi i cirkulärt borrhålsfält

Jens Penttilä



Master of Science Thesis EGI-2013-087MSC



**KTH Industrial Engineering
and Management**

**Temperaturzoner för lagring av värmeenergi i cirkulärt
borrhålsfält**

Jens Penttilä

Approved	Examiner	Supervisor
2013-07-14	Björn Palm	José Acuña
	Commissioner	Contact person

ABSTRACT

The thermal response of a borehole field is often described by non-dimensional response factors called g-functions. The g-function was firstly generated as a numerical solution based on SBM (Superposition Borehole Model). An analytical approach, the FLS (Finite Line Source), is also accepted for generating the g-function. In this work the potential to numerically produce g-functions is studied for circular borehole fields using the commercial software COMSOL. The numerical method is flexible and allows the generation of g-functions for any borehole field geometry. The approach is partially validated by comparing the solution for a square borehole field containing 36 boreholes (6x6) with g-functions generated with the FLS approach and with the program EED (Earth Energy Designer). The latter is based on Eskilsons SBM, one of the first documents where the concept of g-functions was introduced. Once the approach is validated, the square COMSOL model is compared with a circular geometry borehole field developed by the same method, consisting of 3 concentric rings having 6, 12, and 18 boreholes. Finally the influence on the circular geometry g-function is studied when connecting the boreholes in radial zones with different thermal loads.

SAMMANFATTNING

Den termiska responsen för ett borrhålsfält beskrivs ofta med den dimensionslösa responsfunktionen kallad g -funktion. Responsfunktionen togs först fram som en numerisk lösning med SBM (Superposition Borehole Model). En analytisk metod, FLS (Finite Line Source) är också accepterad för framtagandet av g -funktioner. I det här arbetet undersöks förutsättningarna att numeriskt ta fram g -funktioner för cirkulära borrhålsfält genom att använda det kommersiella simuleringsprogrammet COMSOL Multiphysics. Den numeriska metoden är flexibel och kan användas för alla typer av borrhålsgeometrier. Metoden att använda COMSOL valideras delvis genom att jämföra resultatet för ett kvadratisk borrhålsfält innehållande 36 borrhål (6x6) med lösningar framtagna med FLS och med dimensioneringsprogrammet EED (Earth Energy Designer). Det senare har sin grund i Eskilson's SBM, ett av de första arbeten där begreppet g -funktion introducerades. När metoden att använda COMSOL verifierats, jämförs den kvadratiske borrhålsmodellen med en cirkulär borrhålskonfiguration, upprättad med samma metod, innehållande 3 koncentriska ringar om vardera 6, 12, 18 borrhål. Slutligen undersöks hur den termiska responsen påverkas då borrhålen i ett cirkulärt borrhålsfält kopplas samman och grupperas i radiella zoner med olika termiska laster.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Abstract	1
Sammanfattning	2
Nomenklatur.....	4
Introduktion.....	5
Problem	5
Metod och angreppssätt	6
Teoretisk bakgrund.....	6
6x6 COMSOL modell	7
Rutnätsindelning (mesh).....	11
g-funktion beräkning	12
Jämförelse och validering mot EED och FLS	13
Cirkulär COMSOL modell	14
Jämförelse av borrhålsfält med kvadratisk –och cirkulär geometri.....	15
Radiella temperaturzoner i cirkulär borrhålsgeometri.....	15
Strategier för lastprofiler till temperaturzoner samt utfall	17
Slutsatser	30
Referenser	31

NOMENKLATUR

Förkortningar

FLS	Finite Line Source
SBM	Superposition Borehole Model
DTRT	Distributed Thermal Response Test
r1	Inre ringen, zon 1
r2	Mellersta ringen, zon 2
r3	Yttre ringen, zon 3

Symboler

B	Avstånd mellan borrhål	$[m]$
C_p	Specifik värmekapacitet	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
C_{p_b}	Specifik värmekapacitet, berggrund	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
D	Borrhålsfältets begravda djup	$[m]$
FO_H	Fouriers nummer definierad i ekvation (2)	
g-funktion	g-funktion definierad i ekvation (1)	
H	Borrhålsdjup	$[m]$
k	Termisk konduktivitet	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
k_b	Berggrundens termiska konduktivitet	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
q_m	Värme flöde per enhet längd	$\left[\frac{W}{m}\right]$
q_{tg}	Geotermisk värme flöde	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
r_b	Borrhålsradie	$[m]$
T_{ave}	Medeltemperatur	$[^{\circ}C]$
T_{bhv}	Borrhålsväggens temperatur	$[^{\circ}C]$
T_{gr}	Ostörd markttemperatur	$[^{\circ}C]$
$T_{m,yta}$	Markytans temperatur	$[^{\circ}C]$
t	Tid	$[s]$
α	Termisk diffusivitet	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$
ρ	Densitet	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
ρ_b	Densitet, Berggrund	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

INTRODUKTION

Begreppet bergvärme syftar till att utnyttja energi som finns nere i berggrunden. Energin är ursprungligen lagrad solenergi, men består även av tillskott från jordens geotermiska aktivitet. Energin utvinns genom att borra djupa vertikala hål i berggrunden i vilka man cirkulerar en vätska. Värmeenergi hämtas upp från borrhålen som via en värmepump överförs till en byggnads uppvärmningssystem. Bergvärme är en accepterad teknologi med hög verkningsgrad och liten miljöpåverkan.

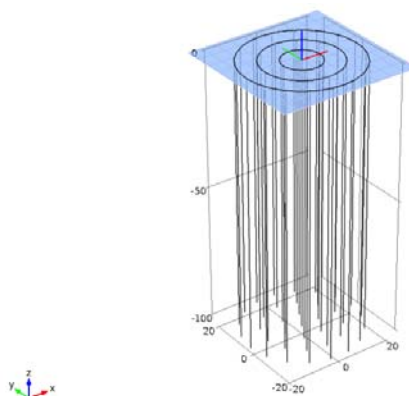
Beroende på vilka områdesspecifika temperaturnivåer som finns i berggrunden kan teknologin både utnyttjas för uppvärmning och kylning av främst kommersiella byggnader och bostadshus. Vid dimensionering av ett bergvärmesystem avgör användarbehovet och markens förutsättningar antalet borrhål som krävs, men även djup och avstånd mellan borrhål spelar in. Dimensioneringen av borrhålsfältet är viktig och avgör om installationen blir lönsam. Med ett ökande kylbehov hos fastigheter är styrningen av temperaturnivåer i borrhålsfältet, för att till exempel kunna utnyttja frikyla, en växande fråga. Den termiska responsen i berggrunden, till följd av varierande energiuttag är viktig att utreda i olika tidsperspektiv. Speciellt när det gäller längre tidsperspektiv på 10-tals år är det viktigt att berggrunden inte utarmas på termisk energi och livslängden för systemet begränsas.

I dagsläget finns både analytiska och numeriska modeller för att beräkna den termiska responsen. De analytiska modellerna har fördelen att vara beräkningssnabba, men bygger på många antaganden och förenklingar. De lämpar sig bättre för enkla geometrier och få borrhål. För en långsiktig analys på tidsperioder längre än decennier kan det vara aktuellt med mer omfattande beräkningar. Dessa kan tas fram med numeriska metoder som är mer flexibla men kräver större beräkningskraft.

PROBLEM

1. Undersöka och långsiktigt utvärdera en cirkulär geometri för ett borrhålsfält innehållande 36 borrhål placerade i koncentriska ringar om 6, 12, 18 borrhål.
2. Visa hur borrhålstemperaturer påverkas i ett 30 årigt perspektiv när borrhålen kopplas samman i radiella zoner med olika termiska laster. Zonerna består av de tidigare nämnda ringarna. Lastprofilen är från ett realistiskt balanserat fall med månadsvis upplösning över ett år, beskriven i Diagram 2.

Borrhålsgeometrin illustreras i Figur 1. Värmeöverföring betraktas från borrhålsväggen och ut i omgivande berggrund som är homogen och saknar grundvattenflöde.



FIGUR 1 CIRKULÄR BORRHÅLSGEOMETRI

METOD OCH ANGREPPSSÄTT

1. Utveckla och validera en metod för att skapa numeriska modeller i COMSOL för borrhålsfält. Genom simulering lösa det tredimensionella transienta värmeledningsproblemet. Använda metoden för att studera och utvärdera den efterfrågade cirkulära geometrin.
2. För att validera metoden undersöks en kvadratisk geometri innehållande 6x6 borrhål som går att jämföra med accepterade lösningar genererade numeriskt med EED och analytiskt med FLS. Med samma metod upprätta den efterfrågade cirkulära geometrin. För att rättvist jämföra den kvadratiske geometrin med den cirkulära har båda modellerna 36 borrhål, samma djup och samma topp- och bottenarea på borrhålsfältet.
3. Temperaturzonernas inverkan undersöks genom att utnyttja en given lastprofil och studera några olika laddningsstrategier då olika stor del energi tillförs de skilda radiella zonerna.

TEORETISK BAKGRUND

Den termiska responsen från ett borrhålsfält kan beskrivas med en dimensionslös responsfaktor kallad g -funktion. Den förklarar den dimensionslösa temperaturresponsen vid borrhålsväggen per tidsenhet för en stegrad tillförd värmeeffekt. Begreppet introducerades av Eskilson och Claesson i mitten av 80-talet. Metoden bygger på SBM (Superposition Borehole Method) som beräknar den termiska responsen i marken baserat på superposition av dellösningar för en tvådimensionell numerisk beräkning för ett borrhål i ett homogent omgivande material. Värmeflödet är olika mellan borrhålen och varierar i tid och längs borrhålsdjupet. g -funktionen tas fram för det specifika borrhålsfältet genom att beräkna medeltemperaturen för borrhålen som funktion av tiden. I ekvation (1) visas hur g -funktionen kan relateras till borrhålens medeltemperatur. I Ekvation (2) beskrivs Fouriers nummer som definierar den dimensionslösa tiden, Fo_H med hjälp av borrhålslängd, H , och markens termiska diffusivitet α .

$$T_{ave}(r_b) = \frac{q_m}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot g(\ln(9Fo_H), r_b/H, B/H) + T_{gr} \quad (1)$$

$$Fo_H = \frac{\alpha \cdot t}{H^2} \quad (2)$$

I denna rapport är konceptet g -funktion en viktig del vid evaluering av genererade modeller för termisk respons för efterfrågade borrhålsgeometrier. I Eskilsons doktorsavhandling (1987) förklaras g -funktionen och tillvägagångssättet för beräkning av värmeöverföring mellan olika borrhål. Varje geometri av borrhålsfält har sin egen g -funktion. Eskilson har med sina numeriska beräkningar byggt upp en stor databas med g -funktioner för olika konfigurationer av borrhålsfält. Databasen är grunden i flera beräkningsprogram där EED (Earth Energy Designer) ingår. Arbetet att ta fram EED startade 1992 och presenterades första gången 1994 (Hellström & Sanner, 1994).

För att komma ifrån den geometribundna SBM beräkningsmetoden föreslog Eskilson en analytisk metod för att approximera g -funktioner. Metoden bygger på att behandla varje borrhål som en finit linjekälla, där av namnet FLS (Finite Line Source). Fördelen med metoden är att den inte kräver lika stor beräkningskraft som den numeriska SBM och att den inte är geometriberoende och tillåter ojämnt avstånd mellan borrhålen. FLS som verktyg för att ta fram g -funktioner utvecklades vidare av Lamarche och Beauchamp (2007). Den största skillnaden mellan FLS och SBM är att FLS antar konstant värme flöde längs borrhålsväggen för alla borrhål medan SBM antar att bland annat alla borrhål kan ha samma temperatur. FLS antagande om konstant värme flöde resulterar i en överskattad temperatur vid långtidsstudier längre än några 10-tals år, jämfört med SBM lösningar, men det finns ingen absolut

referens för detta ännu. För kortare tidsperioder anses FLS vara en bra approximation av de numeriska beräkningsmodellerna. I Lamarche rapport (2007) finns mer ingående information om FLS som beräkningsmetod för g -funktioner. I artikeln "A Finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers" (Zeng et al., 2002) diskuteras användandet FLS i långtidsstudier.

Med en framtagen g -funktion för ett borrhålsfält kan de linjära egenskaperna för värmeledningsekvationen utnyttjas för att undersöka effekterna av varierande värmepulser. Det kan till exempel användas för att utvärdera eller dimensionera ett bergvärmsystem med varierande uttag och laddning under året. Tekniken är känd som temporal superposition. (Ingersoll et al., 1954), (Yavuzturk & Spitler, 1999).

COMSOL är ett simuleringsprogram baserat på finita elementmetoden som används för att finna approximativa lösningar till partiella differential- och integralekvationer. Ett exempel är värmeledningsekvationen som även är känd som diffusionsekvationen. Det är en partiell differentialekvation som används för att beskriva värmespridning i ett kontinuum där temperaturen är en funktion av materialets värmeledningsförmåga, densitet och värmekapacitet. Finita-elementmetoden går ut på att uppdelar ett kontinuerligt område till diskreta delområden. En utmaning vid approximering av partiella differentialekvationer är att den ersättande ekvationen ska vara numeriskt stabil. Finita elementmetoden fungerar bra när problemet består av komplexa ytor. En av fördelarna med COMSOL är att programmet direkt kan redigera en partiell differentialekvation som beskriver den simulerade upprättade modellen.

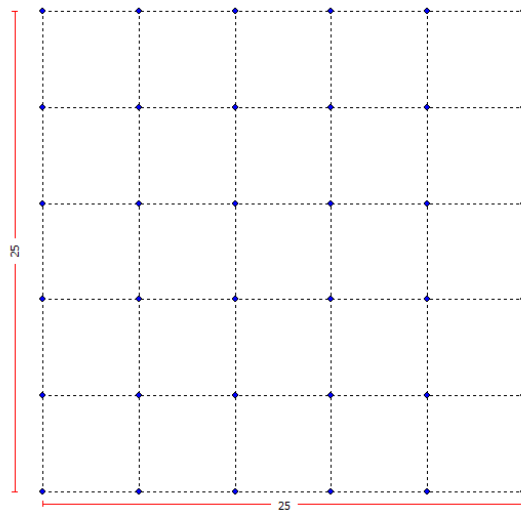
6x6 COMSOL MODELL

För att kunna validera en metod att skapa borrhålsmodeller med COMSOL måste den kunna jämföras med accepterade lösningar. g -funktioner för kvadratiska konfigurationer på borrhålsfält finns både framtagna analytiskt och numeriskt med accepterade metoder. Med detta i beaktande beslutas att ta fram en kvadratisk modell i COMSOL av samma storleksordning som den efterfrågade cirkulära borrhålsgeometrin. Det kvadratiska borrhålsfältets utseende sett från ovan visas Figur 2. Borrhålen är jämnt fördelade med 5m mellanrum, B , och med radien, r_b , 0,05m. Det totala borrhålsdjupet är 104m varav 100m utgör det aktiva borrhålsdjupet, H . Resterande 4m utgör det begravningsdjupet, D , från markytan och behandlas som adiabatiskt. En sammanställning av borrhålsfältets geometri visas i tabell 1. Den omgivande berggrunden sträcker sig 500m radiellt från borrhålsfältets centrum samt 604m ner från markytan.

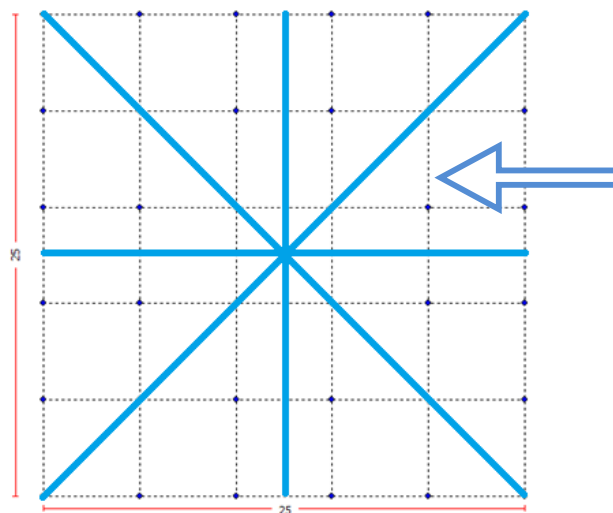
TABELL 1 BORRHÅLSFÄLTETS GEOMETRI 6x6

H [m]	100
r_b [m]	0,05
B [m]	5
D [m]	4

För att minska beräkningstiden simuleras minsta symmetri för borrhålsfältet som i detta fall är 1/8 av sektorn som utgör toppytan. Genom att använda spegling i snittytorna kan hela geometrin representeras se Figur 3. Med tillvägagångssättet erhålls samma resultat som om hela geometrin byggts upp och simulerats. I COMSOL används randvillkoret "Thermal Isolated" (adiabatisk yta) för speglingsytorna. Det går även att använda randvillkoret "Symmetry" (symmetri eller spegling) med samma resultat.



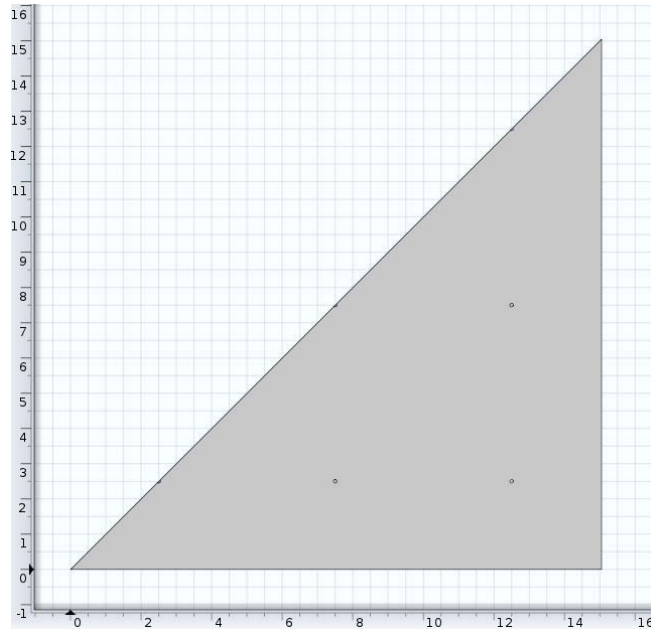
FIGUR 2 6X6 BORRHÅLSFÄLT, 5M AVSTÅND MELLAN BORRHÅLEN (BILD FRÅN EED)



FIGUR 3 REDUCERING AV GEOMETRI FÖR ATT MINSKA BERÄKNINGSTIDEN.

Borrhålen modelleras som solida cylindrar av material med hög termisk ledningsförmåga. Cylindrarna extraheras till det avsedda borrhålsdjupet samt 1m upp över markytan ($z=+1\text{m}$). En solid platta med tjocklek lika som borrhålsdiametern kopplar samman borrhålen vid $z=1\text{m}$ enligt Figur 4 det skuggade området. Plattan utgörs precis som borrhålen av ett material med hög ledningsförmåga. Plattas syfte är att fördela den tillförda värmeeffekten till borrhålen på ett sådant sätt att det termiska motståndet avgör hur stor del av den totala tillförda effekten som går till varje borrhål. Den totala effekten som leds till borrhålen tillförs plattans ovansida med hjälp av randvillkoret "Thermal Heat Flux" (ytan får ett givet värmeflöde) värdet sätts till 20W/m aktivt borrhål. I detta fall innebär det en total effekt på 9kW tillförs plattan i den reducerade modellen. De termiska egenskaperna för materialet i borrhålen bestäms så att en temperaturskillnad på cirka 1°C erhålls mellan toppen och botten på borrhålen vid pålagd effekt. Anledningen till införandet av temperaturgradient längs borrhålsdjupet är att den observerats i fältmässiga studier i Acuña's doktorsavhandling (2013). I rapporten framgår att gradienten är beroende av vilken

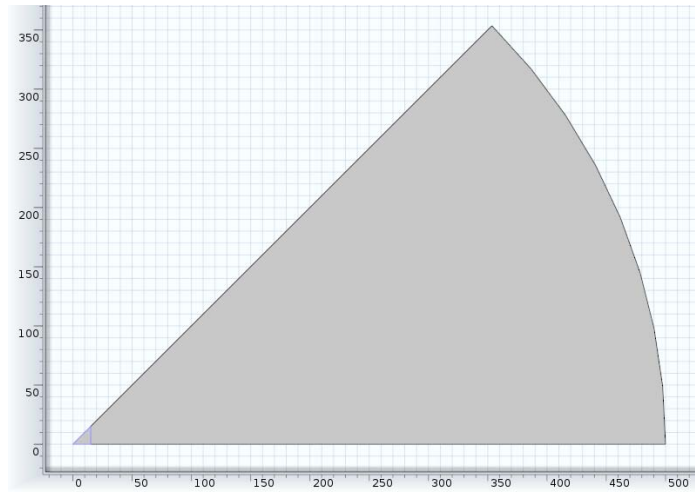
typ av kollektor som används samt effektutbyte till omgivning. Resultaten grundar sig på mätningar utfört med DTRT (Distributed Thermal Response Test). Med införandet av gradienten kan den konstruerade simuleringsmodellen antas vara närmare en verklig lösning än metoder som bortser från den.



FIGUR 4 BORRHÅLEN KOPPLAS SAMMAN AV EN PLATTA VID Z=1M

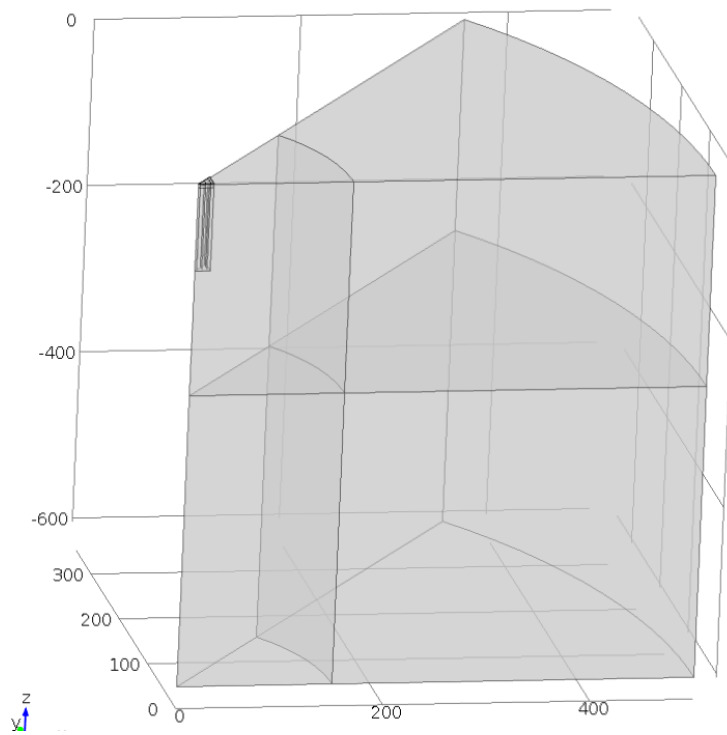
För att möjliggöra att modellen går att valideras mot FLS krävs ytterligare ett sätt att betrakta värmeöverföringen vid borrhålen till omgivningen. Speciellt för att uppfylla FLS kriteriet att alla borrhål har konstant värmeflöde längs borrhålsväggen. För att åstadkomma detta i COMSOL används en modelleringsstrategi som går ut på att borrhålen saknar tidigare beskrivet fyllnadsmaterial det vill säga att de är tomma. Randvillkoret längs borrhålsväggen sätts till "Thermal Heat Flux" (ytan får ett givet värmeflöde).

I modellen utgörs berggrunden precis som borrhålsfältet av $1/8$ hela geometrin. Sett från ovan, utgör volymen en sektor av en cirkel som utgår från borrhålsfältets mitt med radie av 500m, det skuggade området i Figur 5. Berggrundsdomänen sträcker sig från markytan $z=0\text{m}$ till $z=-604\text{m}$.



FIGUR 5 BERGGRUNDENS TOPPAREA FRÅN OVAN, Z=0M

I Figur 6 visas hur den modellerade geometrin ser ut i sin helhet. Termiska egenskaper hos material som används presenteras i tabell 2.



FIGUR 6 MODELLEN MED BORRHÅLSFÄLT OCH BERGGRUND

TABELL 2 TERMISKA EGENSKAPER FÖR MATERIAL I MODELLEN

Domän	Densitet, ρ , [$\frac{J}{kg \cdot K}$]	Specifik värmekapacitet, C_p , [$\frac{J}{kg \cdot K}$]	Termisk konduktivitet, k , [$\frac{J}{kg \cdot K}$]
Borrhål	1000	1	10M
Platta	1000	1	100M
Berggrund	2300	870	3,1

Samtliga yttre ytor för modellen förutom botten och markyta har randvillkoret "Thermal isolated" (adiabatisk yta). Bottenytan tar hänsyn till den områdesberoende geotermiska gradienten genom att ha randvillkoret "Thermal Heat Flux" (värmeflöde genom ytan). Markytan har randvillkoret "Temperature" (ytan får en given temperatur), temperaturen är områdesspecifik och representerar luftens årsmedeltemperatur för området. De områdesspecifika parametrarna är tagna för Stockholm och redovisas i tabell 3.

TABELL 3 GEOTERMISK VÄRMFLÖDE OCH LUFTTEMPERATUR I STOCKHOLM

Geotermiskt värmeflöde, q_{tg}	0,005 [$\frac{W}{m^2}$]
Luftens årsmedeltemperatur, $T_{m.yta}$	8 [°C]

För att göra borrhålen termiskt isolerade till omgivande berggrund de översta 4m (från $z=0m$ till $z=-4m$) får ytan på borrhålsdomänenerna randvillkoret "Thin Thermally Resistive Layer" (termiskt recessivt lager utan tjocklek). Samtliga domäner i modellen har en temperatur som begynnelsevillkor. Det motsvarar en temperaturgradient från botten på modellen till markytan som beror av den geotermiska gradienten, markytans temperatur, berggrundens termiska ledningsförmåga och djupet. Begynnelsetemperaturen som funktion av djupet z visas i ekvation (3).

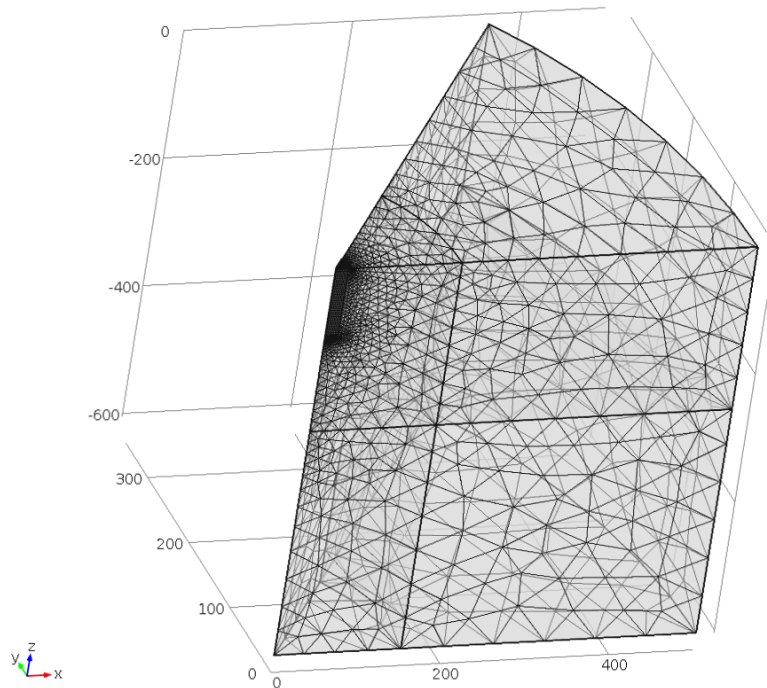
$$T(z) = T_{m.yta} - \frac{q_{tg}}{k_b} \cdot z \quad (3)$$

Där $T_{m.yta}$ är markytans temperatur, q_{tg} det geotermiska värmeflödet, k_b berggrundens termiska konduktivitet.

RUTNÄTSINDELNING (MESH)

Antalet element en modell utgörs av har direkt koppling till resultatet samt hur lång tid varje beräkningssteg kräver. En bra mesh bör innehålla så få element som möjligt utan att påverka den eftersträvade noggrannheten i resultatet.

Meshen i modellen för fyllda 6x6 borrhål utgörs av ett triangulär 2-D rutnät på ytan av plattan, som sammankopplar borrhålen, som sedan svepts längs borrhålsdjupet. Distributionen längs borrhålsdjupet är 20 element. Resterande omslutande bergvolym är uppbyggt av element med tetraedrisk form. Totalt antal element för den reducerade modellen består av cirka 156 000. En presentation av meshen visas i Figur 7 där det framgår att meshen består av mindre element nära borrhålen och ökar i storlek i riktning bort från borrhålsfältet.



FIGUR 7 PRESENTATION AV MESH 6X6

För 6x6 modellen framtagen med FLS metod är det totala antalet element cirka 111 000. Det lägre antalet element kan härledas till att borrhålsdomänerna är tomma. I övrigt är meshen uppbyggd med samma metod som tidigare beskrivits.

G-FUNKTION BERÄKNING

För att ta fram den dimensionslösa g-funktionen för borrhålsfältet beräknas medeltemperaturen på borrhålets sammanlagda yta som utgörs av borrhålsväggen längs det aktiva borrhålsdjupet. Medeltemperaturen beräknas som funktion av tiden och omvandlas till det dimensionslösa uttrycket g-funktion, enligt ekvation (4). T_{gr} är den ostörda marktemperaturen vid halva borrhålsdjupet och T_{bhv} är medeltemperaturen för samtliga borrhål vid borrhålsväggen som funktion av tiden. k_b , berggrundens termiska konduktivitet och q_m tillförd värmeeffekt per meter borrhål. Tidsstegen i simuleringen väljs automatiskt av COMSOL med förbehållet om ett maximalt steg på 30 dagar. g-funktionen plottas mot den naturliga logaritmen av $9Fo_H$ som visas i ekvation (5). Simuleringen fortgår tills värden för $9Fo_H$ når cirka 2, vilket typiskt motsvarar värdet då g-funktionen når sin asymptotiska del. Värdet motsvarar 200år i detta fall. Detta värde överensstämmer med resultat som presenteras i artikeln "Numerically Generated g-functions for Ground Coupled Heat Pump Applications" (Acuña et al., 2012). Metoden att beräkna ett borrhålsfältets g-funktion finns mer utförligt beskriven i Eskilson's doktorsavhandling (1987) samt i "Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code" (Eskilson 1986)

$$g = -(T_{gr} - T_{bhv}) \cdot \frac{2\pi \cdot k_b}{q_m} \quad (4)$$

$$Fo_H = \frac{k_b \cdot t}{\rho_b \cdot c_{pb} \cdot H^2} \quad (5)$$

JÄMFÖRELSE OCH VALIDERING MOT EED OCH FLS

För att säkerställa och validera borrhålsmodellen framtagen i COMSOL jämförs resultat mot två kända accepterade metoder. Dessa metoder avser lösningar för g-funktioner framtagna analytiskt med FLS och numeriskt med EED. Den senare metoden har sin grund i Eskilsons SBM. Metoderna använder samma geometri, ett borrhålsfält bestående av 36 borrhål placerade med 5m mellanrum i ett kvadratisk mönster. Det aktiva borrhålsdjupet är 100m och börjar 4m under markytan, det vill säga samma parametrar som i tabell 1. g-funktioner framtagna med de skilda metoderna visas i Diagram 1. Värt att poängtera är att följande beskrivna likheter och olikheter mellan metoderna är knutna till den specifika geometrin och kan skilja sig åt då andra borrhålskonfigurationer studeras. Överensstämmelsen mellan FLS som metod och COMSOL-modellen med randvillkor enligt FLS är mycket god för alla tider. g-funktionen framtagen från EED med SBM som metod är som förväntat lägre än FLS. Dock är g-funktionen framtagen med COMSOL med fyllda sammankopplade borrhål ännu något lägre. Skillnaden kan delvis förklaras av temperaturgradienten längs borrhålsdjupet som COMSOL-modellen använder medan EED lösningen antar konstant temperatur längs hela borrhålsdjupet. Då konduktiviteten i fyllnadsmaterialet ökas för att minska temperaturgradienten i borrhålen, tenderar g-funktionen för COMSOL-modellen att närma sig EED lösningen. För låga värden av $9Fo_H$ upp till cirka 1 har samtliga metoder en relativt god överensstämmelse. För tidsperioder längre än decennier rekommenderas numeriska beräkningsmetoder framför analytisk FLS metod som tenderar att överskatta temperaturresponsen. Detta är dock inte helt definierat och det pågår en del forskning just nu för att utreda vilken metod som är bäst.

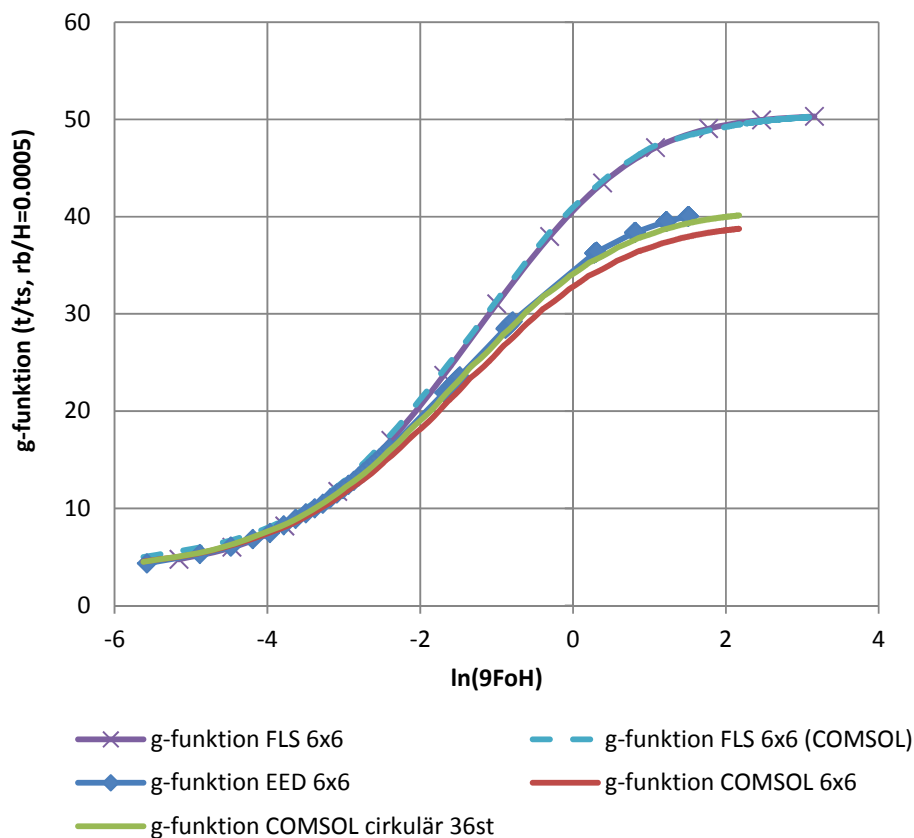
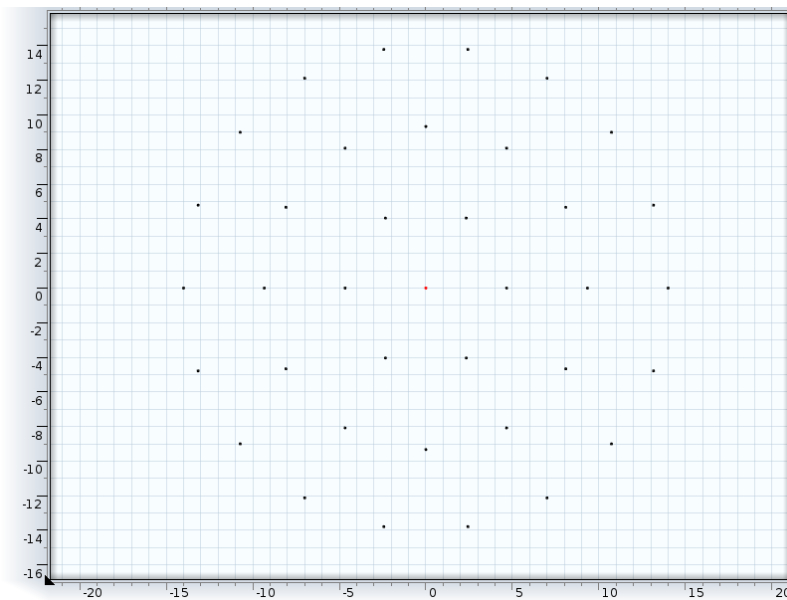


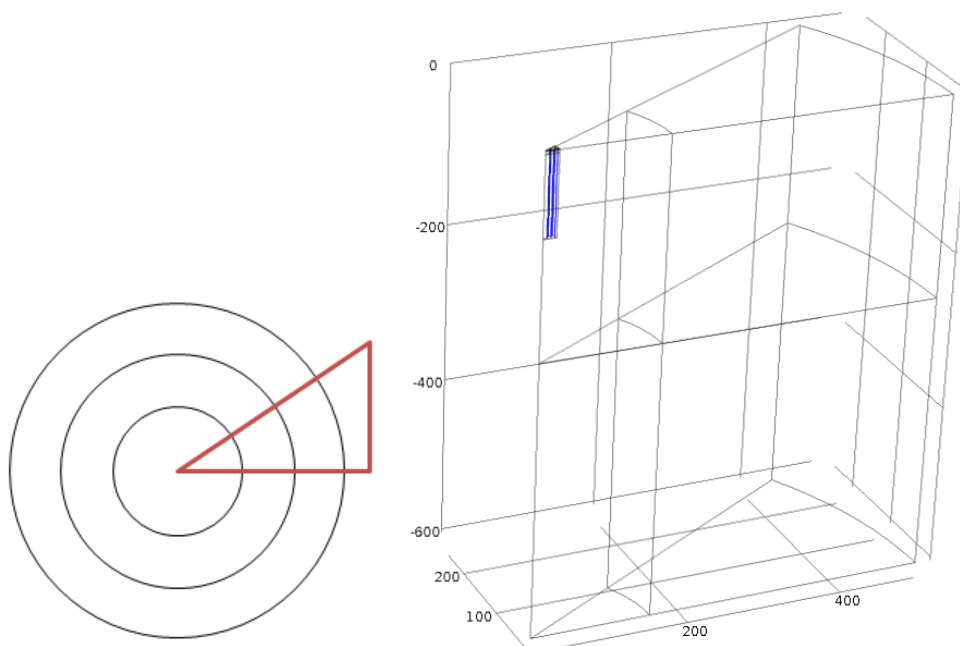
DIAGRAM 1 JÄMFÖRELSE G-FUNKTION

CIRKULÄR COMSOL MODELL

En modell för ett cirkulärt borrhålsfält byggdes upp i COMSOL med samma metod som beskrivits och validerats för den kvadratiske geometrin med fyllda sammankopplade borrhål med temperaturgradient längs borrhålsdjupet. I den cirkulära modellen placeras borrhålen i tre ringar bestående av 6 borrhål i den innersta ringen (r_1) 12 i den mellersta (r_2) och 18 i den yttre ringen (r_3). Samtliga borrhål är sammankopplade på samma sätt som för den kvadratiske modellen med en platta på toppen över markytan. Det kortaste borrhålsavståndet för det cirkulära borrhålsfältet avståndet är cirka 4,7m. Även mantelarean av borrhålsfälten kommer vara olika, något mindre hos den cirkulära geometrin som representeras av en cylinder. En skiss med borrhålsplacering visas i Figur 8. För att korta ner simuleringstiden för den cirkulära modellen används samma reduceringsmetod som för den kvadratiske modellen med spegling av minsta symmetri. För den cirkulära modellen innebär det att endast en 1/12 av den totala geometrin behöver simuleras. Den reducerade delen motsvarar en sektor på 30° grader av borrhålsfältet vilket visas i Figur 9.



FIGUR 8 BORRHÅLSPLACERING FÖR CIRKULÄR GEOMETRI 36 BORRHÅL



FIGUR 9 SEKTOR AV CIRKULÄRT 36 BORRHÅSFÄLT

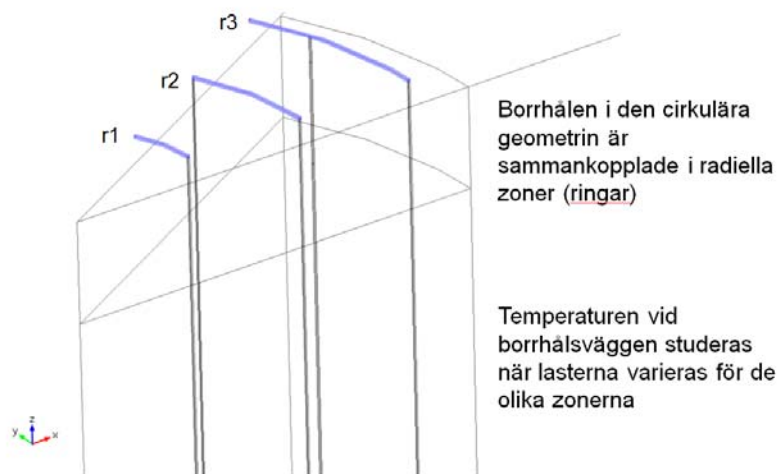
JÄMFÖRELSE AV BORRHÅSFÄLLT MED KVADRATISK – OCH CIRKULÄR GEOMETRI

g -funktionen som representerar temperaturrensen för det cirkulära borrhåsfältet är något högre än hos det motsvarande kvadratiske fältet skapat med samma metod. Vid konstant tillflöde av värmeenergi kommer denna skillnad ge en något högre temperatur vid borrhålsväggen för den cirkulära geometrin då tiden går mot oändligheten. Det cirkulära borrhåsfältet har formen av en cylinder medan det kvadratiske fältet har formen av ett rätblock. En tänkbar förklaring till skillnaden i g -funktion är att mantelarean för en cylinder är mindre än mantelarean för ett rätblock med samma tvärsnittsarea. Det betyder att cylindern har en mindre area exponerad mot omgivningen. Förlusterna tillförd av värmeledning till omgivningen blir således lägre och ger en högre lagertemperatur.

Skillnaden i g -funktion mellan de två geometrierna är liten och märkbar först efter lång tid. Trots den något högre g -funktionen för det cirkulära fältet ligger responsen något under lösningar genererade med EED för den kvadratiske fältet.

RADIELLA TEMPERATURZONER I CIRKULÄR BORRHÅLSGEOMETRI

För att studera radiella temperaturzoner i det cirkulära borrhåsfältet kopplas borrhålen samman i tre separata ringar istället för som tidigare med en gemensam platta. Den inre ringen består av 6 borrhål, den mellersta 12, och den yttre ringen 18 borrhål. Anledningen till att separera och gruppera borrhålen i radiella zoner är att möjliggöra styrning av energimängd som ska gå till varje zon. Temperaturen i en zon är direkt knuten till vilken effekt som tillförs samt värmeledning till omgivningen. Utformningen av ringarna presenteras i Figur 10.



FIGUR 10 CIRKULÄRT BORRHÅLSFÄLT SAMMANKOPPLAT I 3 RINGAR

Lastprofilen som är given för borrhålsfältet varierar över året med månadsvis upplösning och visas i Diagram 2. Lastprofilen ska illustrera ett realistiskt balanserat fall för användning i Stockholmsområdet. Med balanserat fall avses att energiuttaget under de kalla månaderna under året ska motsvara tillförseln av energi till borrhålsfältet under återladdningssäsongen på sommaren, nettot över året är noll.

Simuleringstiden väljs till 30 år vilket är en vanlig tidsperiod för aktörer på den kommersiella marknaden att studera och utreda vid dimensionering av bergvärmesystem. Tidsstegen i simuleringen väljs automatiskt av COMSOL med förbehållet om ett maximalt steg på 15 dagar. Det aktiva borrhålsdjupet är 200m. Borrhålsfältets geometri kan ses i tabell 4. För att hitta en så liten bergvolym som möjligt utan att den påverkar resultatet har olika storlekar på volym testats. Testerna har visat att den omslutande bergvolymen kan minskas till 150m i radie och 350m djup utan att påverka resultatet nämnvärt. Anledningen till en minskad bergvolym ligger i att lastfallet för borrhålsfältet är balanserat, samt att simuleringstiden minskats från 200 år till 30 år. Reducering av bergvolym syftar till att minska antalet element i modellen som i sin tur leder till kortare beräkningstider. Totalt antal element i modellen är cirka 18 000. Temperaturresponsen i borrhålsfältet tar några år på sig att stabilisera sig till ett regelbundet mönster från tidpunkten då simuleringen startar.

TABELL 4 BORRHÅLSFÄLTETS GEOMETI, REALISTISK LAST

H [m]	200
r_b [m]	0,05
B [m]	≈ 5
D [m]	4

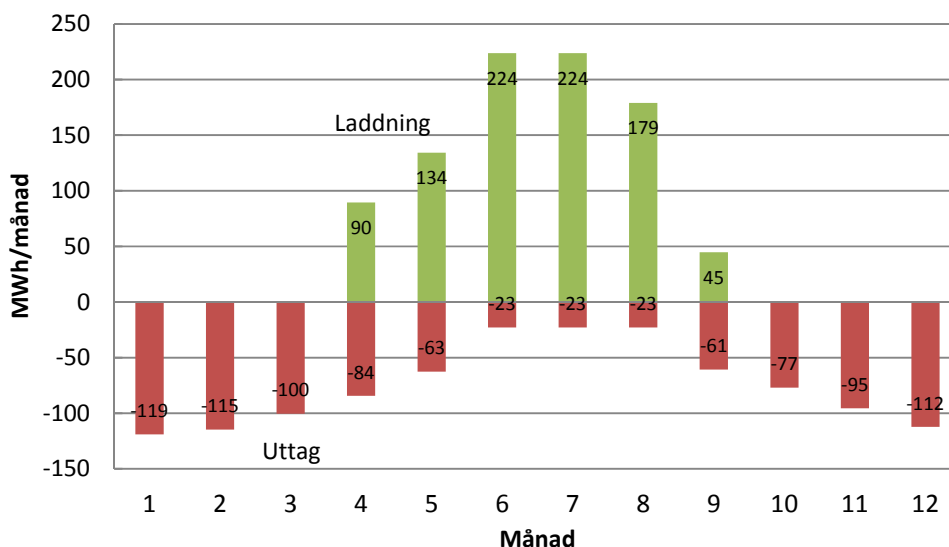


DIAGRAM 2 LAST FÖR BORRHÅLSFÄLT

STRATEGIER FÖR LASTPROFILER TILL TEMPERATURZONER SAMT UTFALL

För att undersöka hur varierande energiutbyte för de skilda zonerna spelar in på temperaturresponser för borrhålsfältet och respektive zon, testas sex olika styrstrategier. För varje strategi får de radiella zonerna sin egen lastprofil som kan variera i effekt och i tid. Summan av lastprofilerna för de tre zonerna motsvarar den givna totala lastprofilen, Diagram 2. Temperaturresponserna för respektive ring redovisas för år 15 tillsammans med en referens vilken representerar temperaturresponserna beräknad med EED för motsvarande kvadratiske borrhålsfält (6x6). En översikt på vad de olika strategierna innebär visas i tabell 5. Fler laddningsstrategier och eventuellt optimeringsarbete lämnas till fortsatta studier.

TABELL 5 ÖVERSIKT STYRSTRATEGIER

Styrstrategi	Fördelning av energiutbyte per meter borrhål, laddning (r1,r2,r3)	Fördelning av energiutbyte per meter borrhål, uttag (r1,r2,r3)	Fördelning som funktion av månad på året
1	(1,1,1)	(1,1,1)	-
2	(5,3,2)	(5,3,2)	-
3	(2,3,5)	(2,3,5)	-
4	(5,3,2)	(1,1,1)	-
5	(1,1,1)	(1,1,1)	tabell 6
6	tabell 7	tabell 7	tabell 7

1. Den första strategin syftar till att undersöka om modellen fungerar. Energiutbytet från varje zon väljs så att samtliga borrhål erhåller samma energiutbyte per meter borrhål. Utfallet ger mycket liknande temperaturresponser som av modellen då alla borrhål är sammankopplade med plattan ovan markytan. Eftersom modellernas övriga geometri är lika tolkas resultatet som en indikation på att modellen fungerar och ger troliga temperaturresponser för de olika zonerna. I Diagram 3 visas antalet MWh/månad som går till respektive ring i borrhålsfältet. I Diagram 4 visas hur stor effekt W/m borrhålen i respektive ring erhåller. Diagram 5 visar temperaturresponserna för borrhålen i respektive ring år 15.

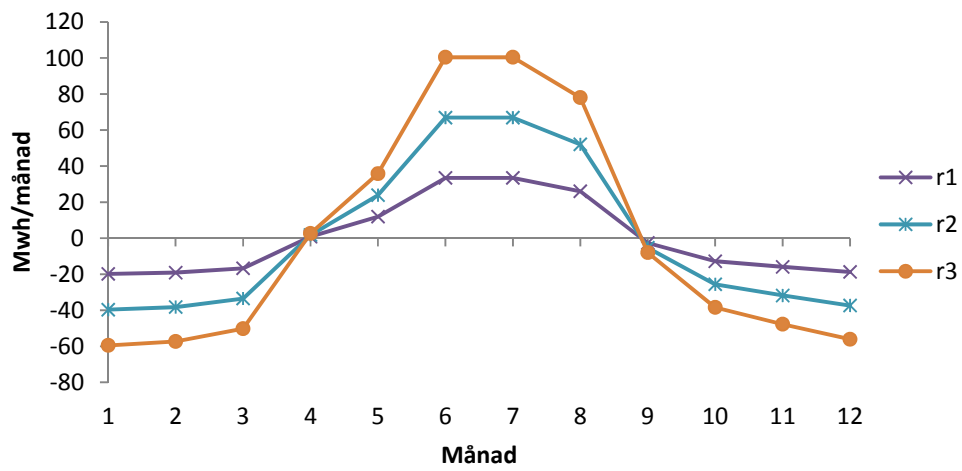


DIAGRAM 3 STRATEGI 1 LASTPROFIL MWH/MÅNAD TILL RESPEKTIVE RING

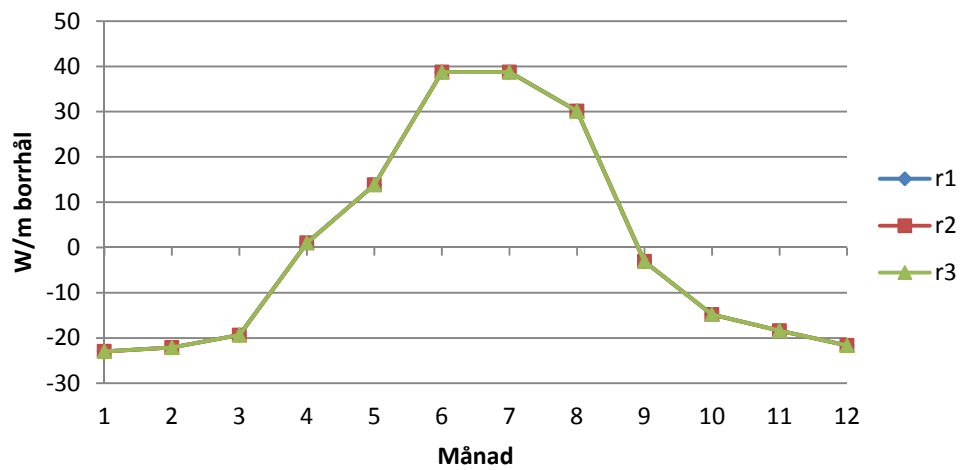


DIAGRAM 4 STRATEGI 1 LASTPROFIL W/M FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

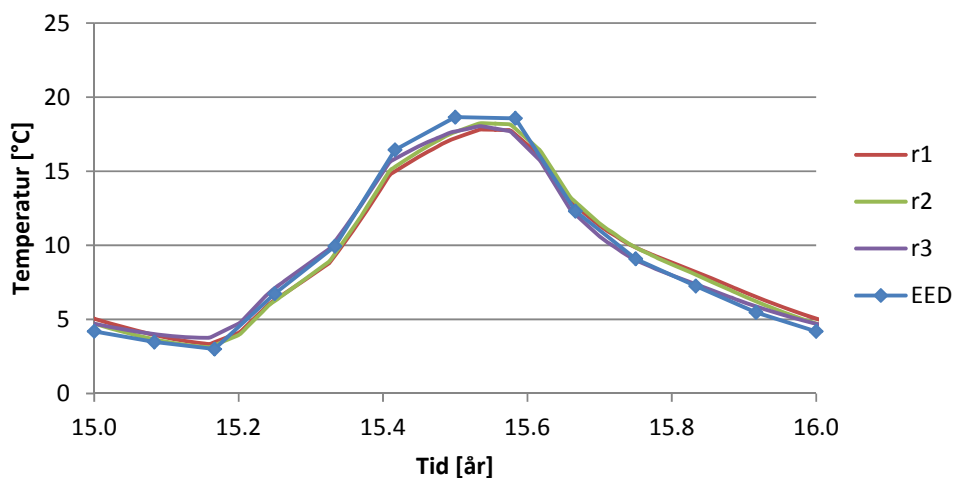


DIAGRAM 5 STRATEGI 1 BORRHÅLSTEMPERATUR ÅR 15 FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

2. Den andra strategin går ut på att utnyttja borrhålen närmast centrum på borrhålsfältet mest och sedan i fallande ordning ut från centrum. Det innefattar både laddning och uttag. Fördelningen av utnyttjandet är 50%, 30%, 20% för borrhålen i respektive ring 1, 2, 3. Resultatet för år 15 visar att temperaturen i den inre zonen varierar mest, mellan -1°C till 24°C. För den mellersta zonen varierar temperaturen något mindre, mellan 3°C till 19°C och för den yttre zonen varierar temperaturen mellan 5°C till 15°C. I Diagram 6 visas antalet MWh/månad som går till respektive ring i borrhålsfältet. I Diagram 7 visas hur stor effekt [W/m] borrhålen i respektive ring erhåller. Diagram 8 visar temperaturresponser för borrhålen i respektive ring år 15.

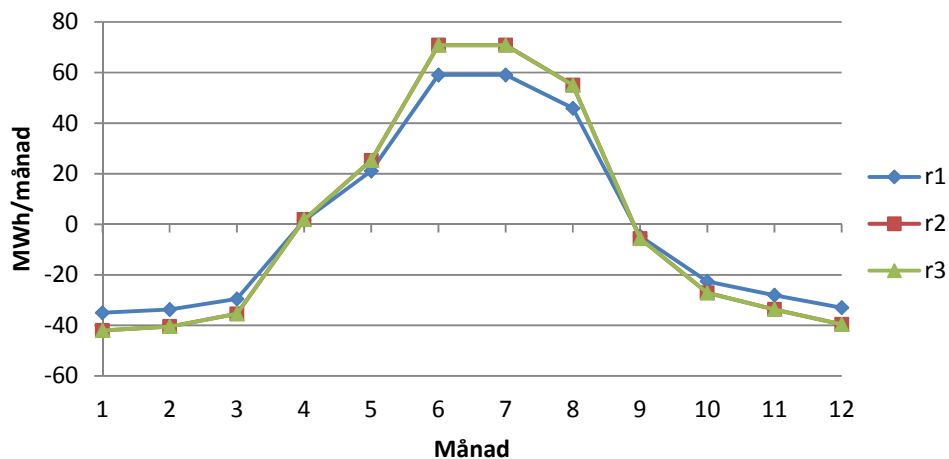


DIAGRAM 6 STRATEGI 2 LASTPROFIL MWh/MÅNAD TILL RESPEKTIVE RING

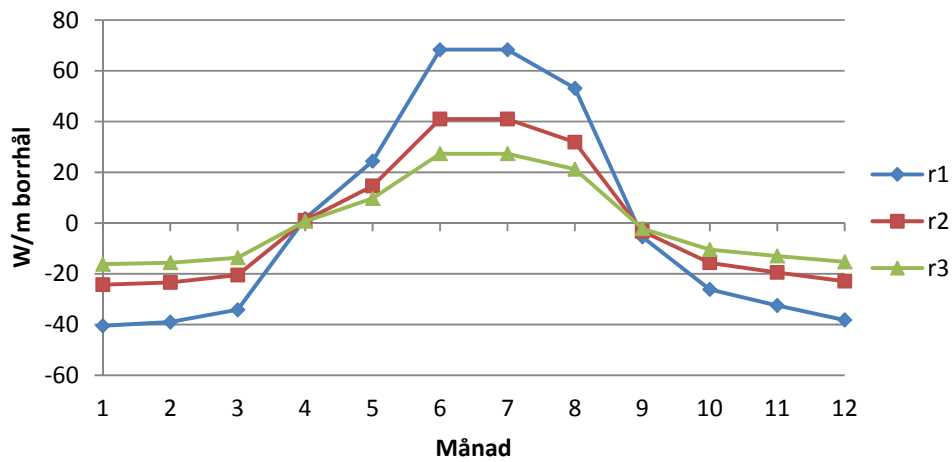


DIAGRAM 7 STRATEGI 2 LASTPROFIL W/M FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

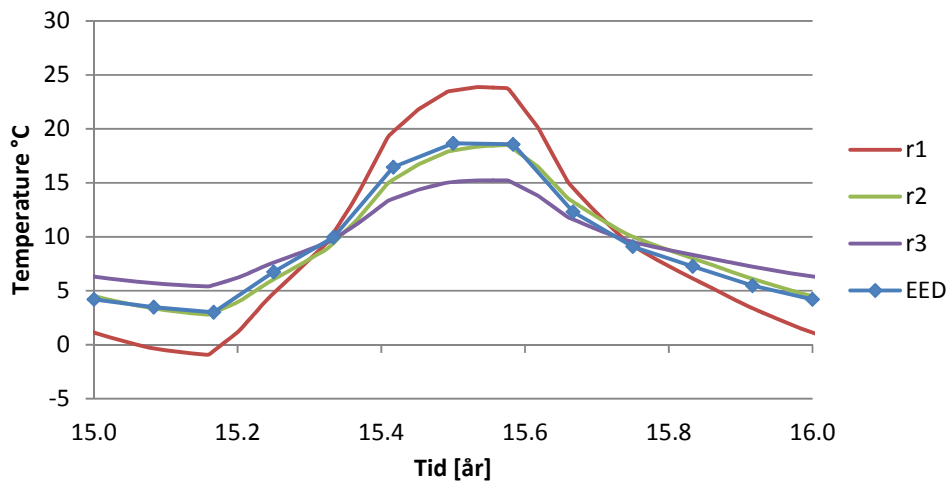


DIAGRAM 8 STRATEGI 2 BORRHÅLSTEMPERATUR ÅR 15 FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

3. Den tredje strategin är i princip samma som strategi två men spegelvänd. Det vill säga att de yttre borrhålen utnyttjas mer och sedan i fallande ordning i riktning mot borrhålsfältets centrum. Resultatet för år 15 visar att temperaturen i den yttre zonen varierar mest, mellan 2°C till 21°C. För den mellersta zonen varierar temperaturen något mindre, mellan 4°C till 16°C och för den inre zonen varierar temperaturen mellan 5°C till 15°C. I Diagram 9 visas antalet MWh/månad som går till respektive ring i borrhålsfältet. I Diagram 10 visas hur stor effekt W/m borrhålen i respektive ring erhåller. Diagram 11 visar temperaturresponserna för borrhålen i respektive ring år 15.

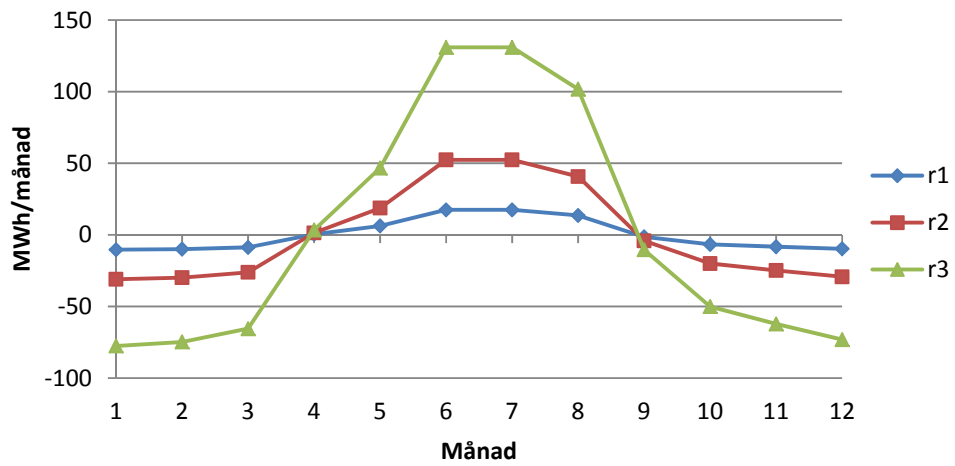


DIAGRAM 9 STRATEGI 3 LASTPROFIL MWH/MÅNAD TILL RESPEKTIVE RING

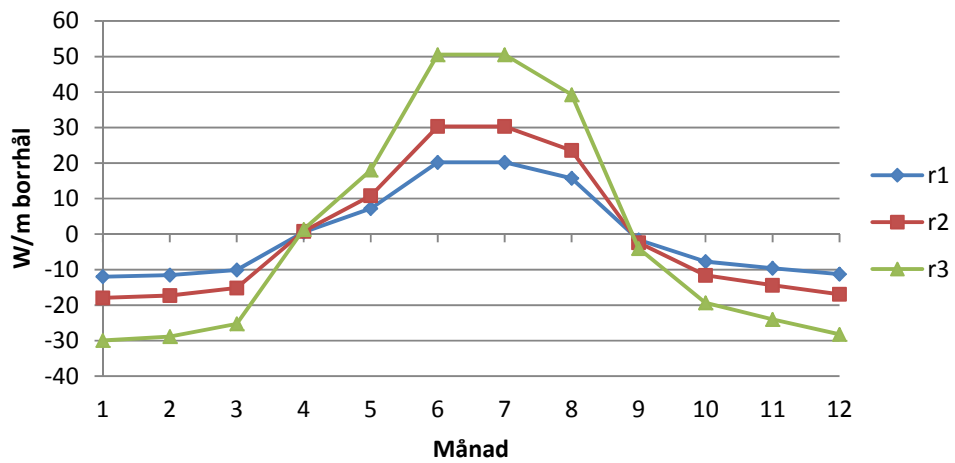


DIAGRAM 10 STRATEGI 3 LASTPROFIL W/M FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

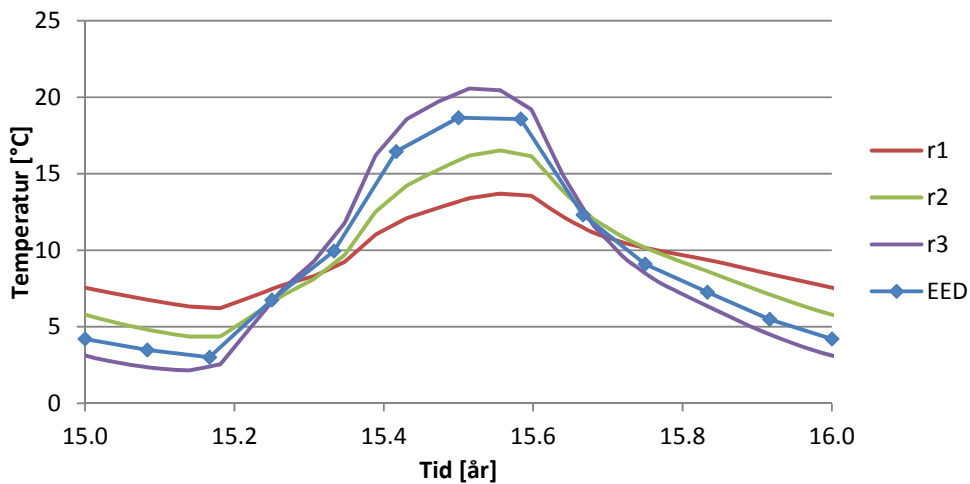


DIAGRAM 11 STRATEGI 3 BORRHÅLSTEMPERATUR ÅR 15 FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

4. Den fjärde strategin går ut på att uttaget energi per meter borrhål är samma för samtliga zoner men vid laddning får den inre zonen mest energi och sedan i fallande ordning ut från centrum. Fördelningen av laddningen är 50%, 30%, 20% för borrhålen i respektive ring 1, 2, 3. Resultatet för år 15 visar att temperaturen i den inre zonen varierar mest, mellan 5°C till 28°C men samtidig ligger både den lägsta och högsta temperaturen över resterande zoners temperaturnivåer för samma tider. Den mellersta zonen varierar i temperatur mindre, mellan 4°C till 20°C och för den yttre zonen varierar temperaturen mellan 4°C till 15°C. I Diagram 12 visas antalet MWh/månad som går till respektive ring i borrhålsfältet. I Diagram 13 visas hur stor effekt W/m borrhålen i respektive ring erhåller. Diagram 15 visar temperaturresponsen för borrhålen i respektive ring år 15.

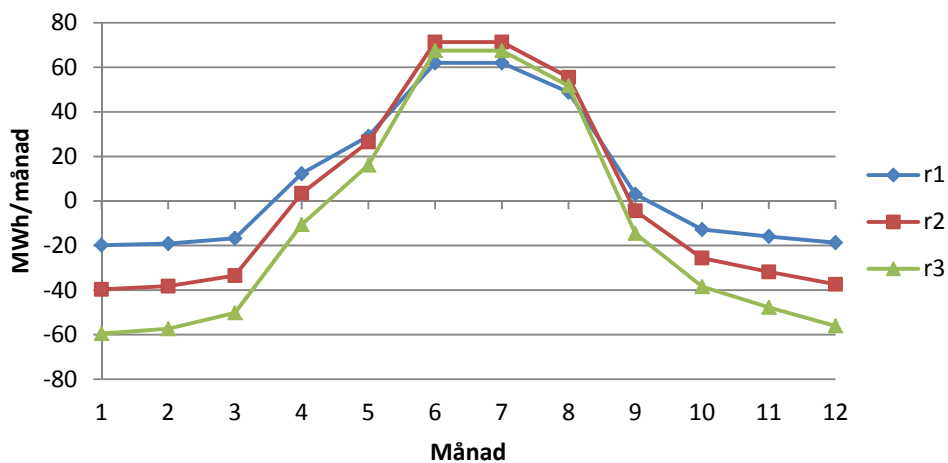


DIAGRAM 12 STRATEGI 4 LASTPROFIL MWH/MÅNAD TILL RESPEKTIVE RING

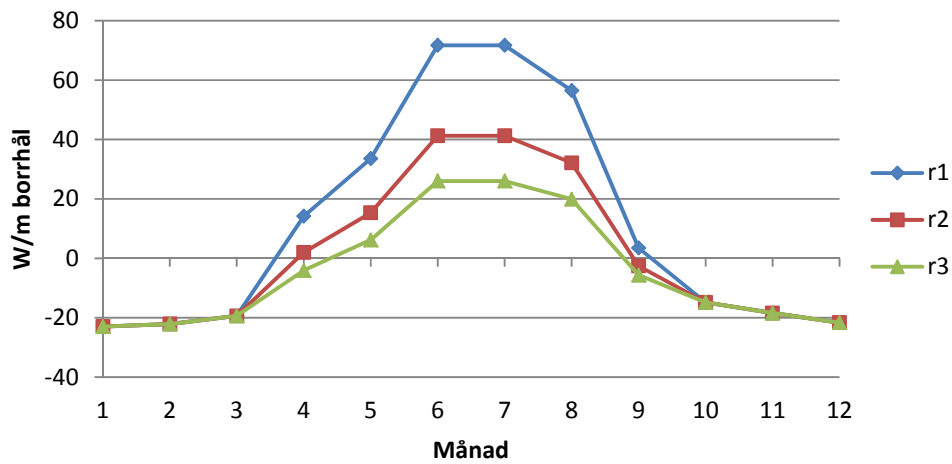


DIAGRAM 13 STRATEGI 4 LASTPROFIL [W/M] FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

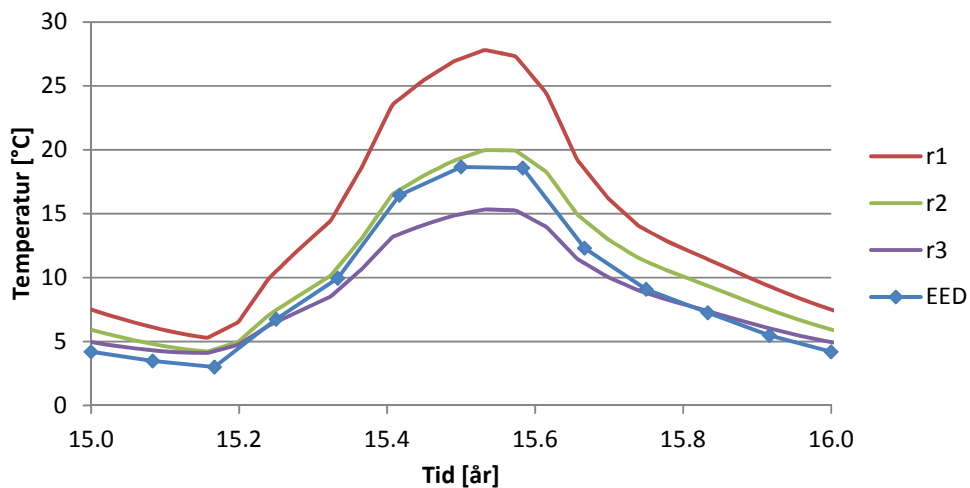


DIAGRAM 14 STRATEGI 4 BORRHÅLSTEMPERATUR ÅR 15 FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

5. Den femte strategin liknar strategi fyra, uttaget energi är samma för borrhålen i samtliga zoner. Däremot startar och stoppar laddningen för de tre zonerna vid olika tidpunkter. Under första månaden med laddning, laddas bara borrhålen i den inre zonen. Vid nästkommande månadsskifte startar även laddning för borrhål i den mellersta zonen och ytterligare en månad senare startar laddningen för borrhålen i den yttre zonen. Under de två månaderna med högst återladdning laddas borrhålen i samtliga zoner lika mycket. När återladdningssäsongen går mot sitt slut stoppas laddningen för de olika zonerna månadsvis på samma sätt med att den yttre zonen stoppas först sedan den mellersta zonen och sist den innersta zonen. Förloppet illustreras i tabell 6. Laddningseffekten till respektive zon fördelas så att borrhålen som laddas vid den aktuella tidpunkten erhåller samma effekt. Metoden leder i emellertid till att laddningseffekten för borrhålen får stora hopp då de olika zonerna aktiveras eller stoppas. Exempelvis ligger laddningseffekten för borrhålen i den inre zonen på realistiska nivåer på närmare 90W per meter borrhål under den första laddningsmånaden och även högt under de sista månaderna med laddning. Resultatet för år 15 visar att temperaturen i zonerna grovt avspeglar respektive zons laddningsprofil. Det vill säga

att stora fluktuationer i zonernas temperatur uppträder då de olika zonernas laddning startar och stoppar. Borrhålsfältets högsta respektive lägsta temperatur är 4°C och 28°C. I Diagram 15 visas antalet MWh/månad som går till respektive ring i borrhålsfältet. I Diagram 16 visas hur stor effekt W/m borrhålen i respektive ring erhåller. Diagram 17 visar temperaturresponsen för borrhålen i respektive ring år 15.

TABELL 6 STRATEGI 5, MÅNADER SOM RESPEKTIVE RING ERHÅLLER ÅTERLADDNING

Laddning			
	r1	r2	r3
1			
2			
3			
4	■		
5	■	■	
6	■	■	■
7	■	■	■
8	■	■	
9	■		
10			
11			
12			

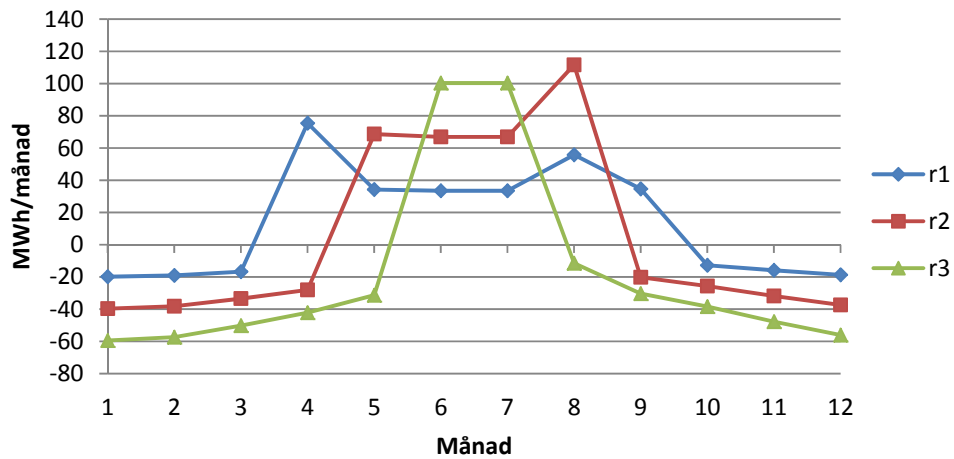


DIAGRAM 15 STRATEGI 5 LASTPROFIL MWH/MÅNAD TILL RESPEKTIVE RING

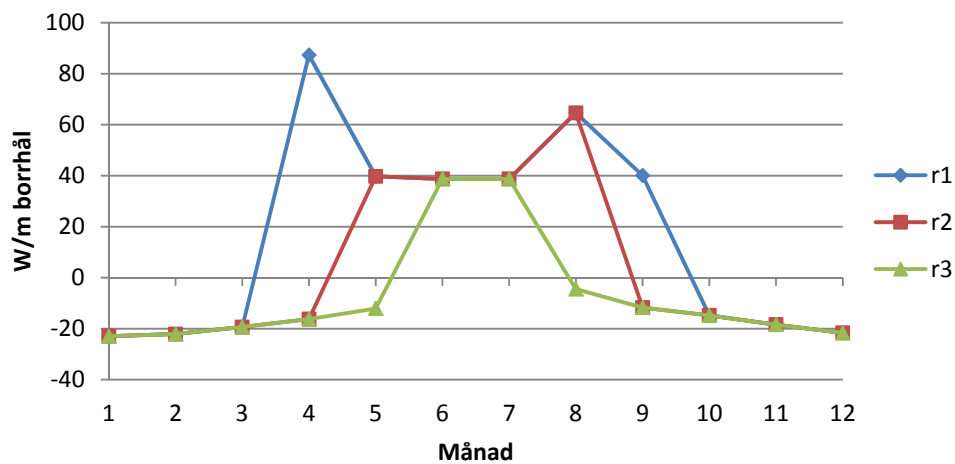


DIAGRAM 16 STRATEGI 5 LASTPROFIL W/M FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

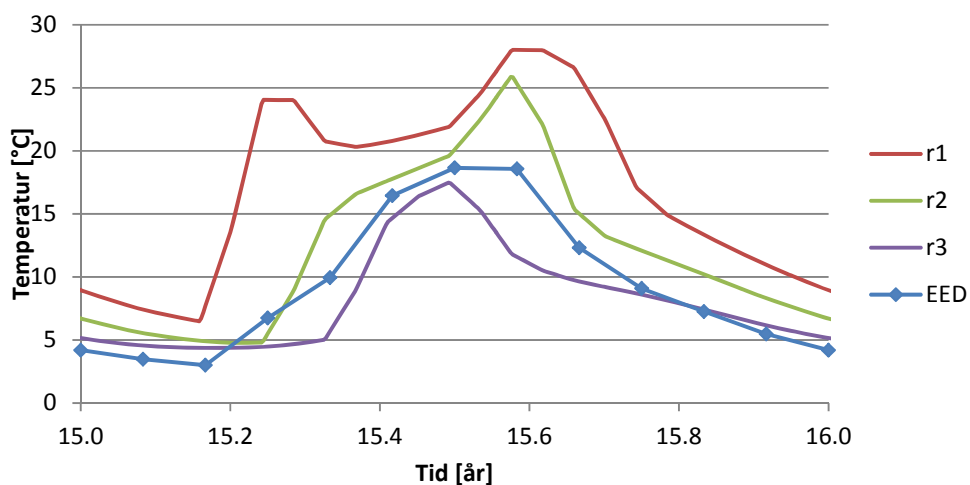


DIAGRAM 17 STRATEGI 5 BORRHÅLSTEMPERATUR ÅR 15 FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

6. Den sjätte strategin är en förfining av strategi fem som utjämnar laddningsprofilerna för zonerna. Detta för att erhålla en mer realistisk laddningseffekt per meter borrhål under främst den första månaden med laddning. Skillnaden är att under första månaden med laddning startar laddning både för den inre zonen och den mellersta. Dock erhåller borrhålen i den mellersta zonen 50% lägre laddningseffekt per meter borrhål den första månaden. Nästkommande månad delas laddningseffekten lika mellan borrhålen i de två zonerna. Följande tre månader laddas borrhålen i samtliga zoner. Under den sista laddningsmånaden stoppas laddningen i den yttre zonen samtidigt som borrhålen i den mellersta zonen erhåller 50% lägre laddning per meter borrhål än den inre zonen. Förloppet illustreras i tabell 7. De justerade laddningsprofilerna för zonerna resulterar i resonabla laddningseffekter per meter borrhål på cirka 40W för borrhål i samtliga zoner. Resultatet för år 15 visar att temperaturen i samtliga zoner har en jämn variation utan större fluktuationer då laddningen i de olika zonerna startas och stoppas. Temperaturen den inre zonen ligger alltid högst och varierar mellan 5°C till 20°C. Den mellersta zonen temperaturvariation följer den inre zonen variation med en offset på cirka -1°C. Den mellersta

zonens högsta respektive lägsta temperatur blir således 4°C och 19°C. För den yttre zonen varierar temperaturen mellan 4°C till 18°C. I Diagram 18 visas antalet MWh/månad som går till respektive ring i borrhålsfältet. I Diagram 19 visas hur stor effekt W/m borrhålen i respektive ring erhåller. Diagram 20 visar temperaturresponsen för borrhålen i respektive ring år 15.

TABELL 7 STRATEGI 6, MÅNADER SOM RESPEKTIVE RING ERHÅLLER ÅTERLADDNING

Laddning			
	r1	r2	r3
1			
2			
3			
4	2/3	1/3	
5			
6			
7			
8			
9	2/3	1/3	
10			
11			
12			

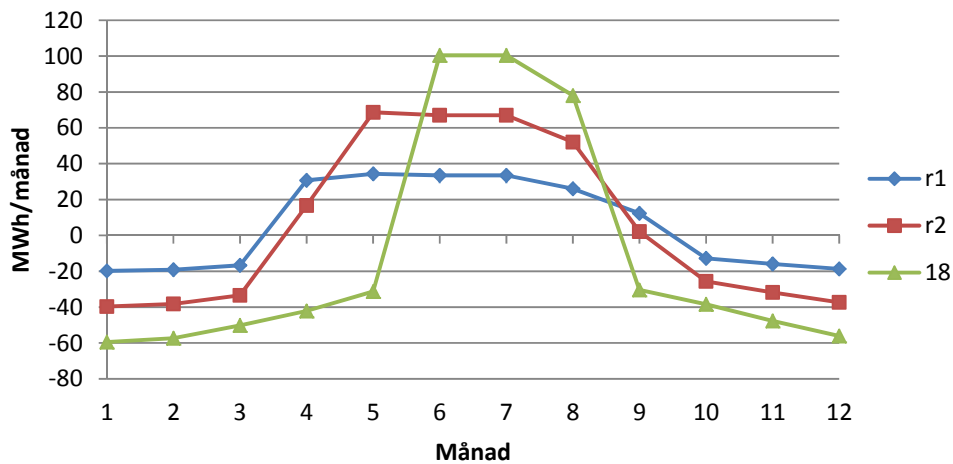


DIAGRAM 18 STRATEGI 6 LASTPROFIL MWH/MÅNAD TILL RESPEKTIVE RING

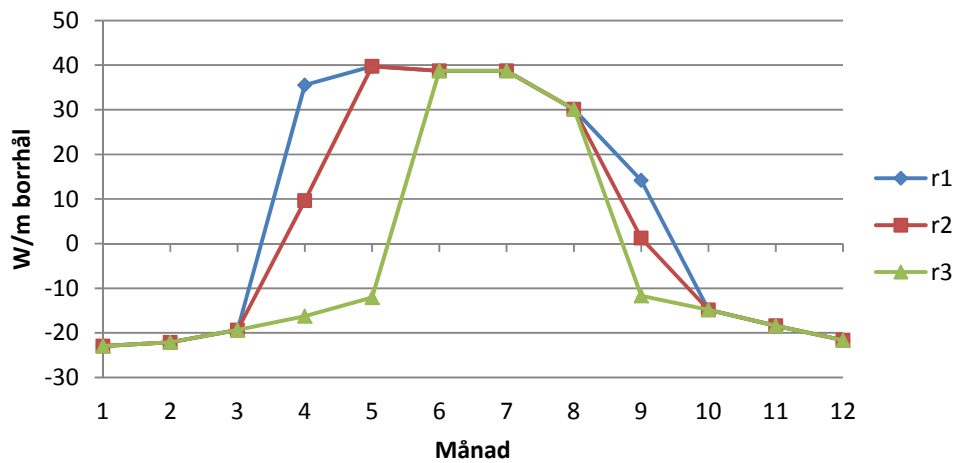


DIAGRAM 19 STRATEGI 6 LASTPROFIL W/M FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

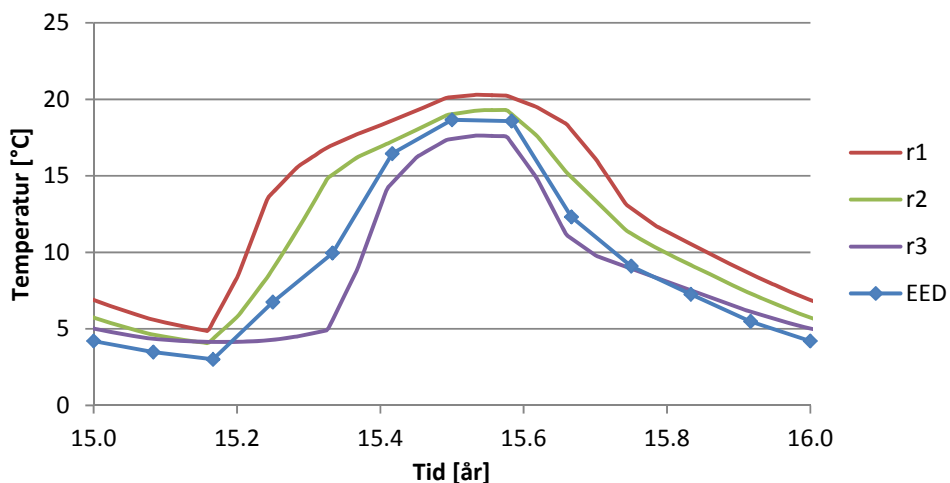


DIAGRAM 20 STRATEGI 6 BORRHÅLSTEMPERATUR ÅR 15 FÖR BORRHÅL I RESPEKTIVE RING

För att visa skillnader som olika styrstrategier ger upphov till sammanställd temperaturresponsen för år 15 för respektive ring. Styrstrategi 5 visas inte i sammanställningen, den ersätts av styrstrategi 6 som bygger på den föregående. Vid jämförandet av temperatursvar mellan olika styrstrategier för en ring måste det beaktas att skillnaden till största del kan härledas från lastprofilerna för respektive fall. För att göra en rättvis jämförelse bör både lastprofil och temperatursvar för samtliga zoner i borrhålsfältet för varje styrstrategi studeras.

Temperaturresponsen för borrhål i ring 1 det vill säga zon 1 redovisas i Diagram 21. På samma sätt redovisas temperaturresponsen för ring 2 och 3 i respektive Diagram 22 och Diagram 23. EED lösningen för motsvarande kvadratiske borrhålsfält (6x6) för år 15 visas som referens i samtliga sammanställningar. För de studerade styrstrategierna syns att temperaturresponsen uppvisar störst skillnad mellan fallen för ring 1. Skillnaden mellan den högsta temperaturen och den lägsta är cirka 12°C och uppstår mellan styrstrategi 4 och 3 under laddningssäsongens mitt. Skillnaden är inte oväntad då fall 4 har en mycket högre laddningseffekt som går till

borrhålen. Som konstaterats tidigare har fall 4 en mycket stor laddningseffekt per meter borrhål till borrhålen i ring 1 som kan vara svår att erhålla i praktiken. Då energi tas ur borrhålen i ring 1 under de kalla månaderna är skillnaden mellan de olika styrstrategierna mindre, bara cirka 6°C. Det visar sig även att alla fall utom 2, har högre eller samma temperatur som lösningar beräknade med EED för denna period. För ett behov av uppvärmning på vintern och kyla på sommaren kan styrstrategi 3 uppfattas som idealiskt, men det måste tas i beaktande att denna styrstrategi bygger på generellt lägre energiutbyte.

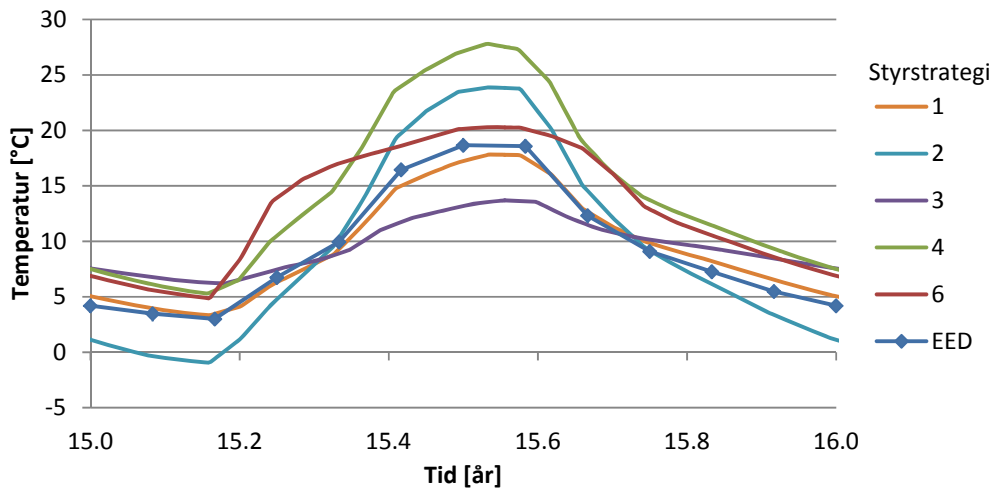


DIAGRAM 21 BORRHÅLSTEMPERATURER FÖR BORRHÅL SAMMANKOPPLADE I RING 1 FÖR DE OLIKA STYRSTRATEGIERNA.

Temperaturresponsen för borrhålen sammankopplade i ring 2 för de olika styrstrategierna har en karaktär som efterliknar referensfallet EED i stor utsträckning. De lägsta och högsta temperaturerna för respektive fall inträffar i princip samtidigt med en spridning på bara någon enstaka grad under vintern och endast ett par grader på sommaren. Det är egentligen bara styrstrategi 3 och 6 som skiljer sig nämnvärt från referensfallet. Fall 3, genom att ha den lägsta temperaturen under laddningssäsongen och fall 6 för en kraftigare temperaturökning då laddningssäsongen inleds. Den lägre temperaturen för fall 3 kan härledas till att den erhåller en lägre laddningseffekt än övriga styrstrategier.

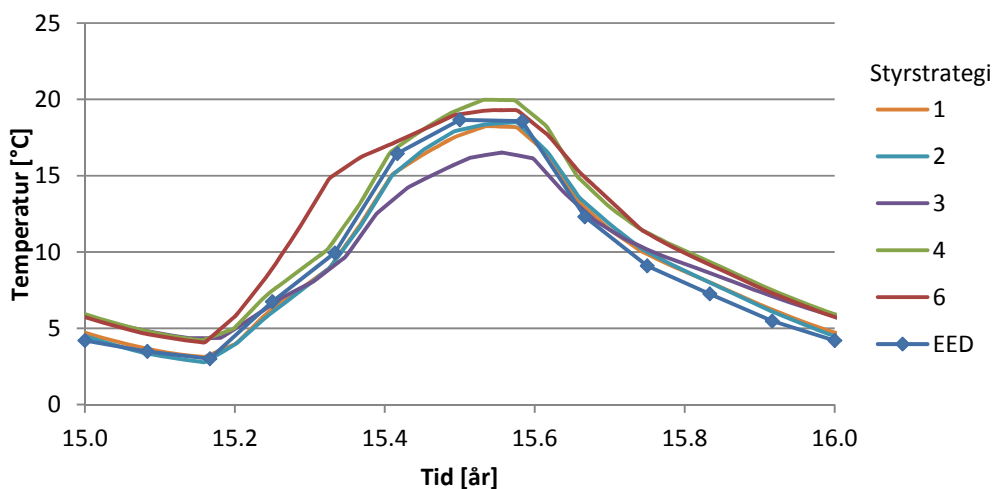


DIAGRAM 22 BORRHÅLSTEMERATURER FÖR BORRHÅL SAMMANKOPPLADE I RING 2 FÖR DE OLIKA STYRSTRATEGIERNA.

Temperaturresponserna för borrhålen i ring 3 antar sitt högsta och lägsta värde för styrstrategi 3. Detta för att strategi 3 bygger på att borrhålen i denna ring utnyttjas mest både vad gäller uttag och laddning av energi. Trots nyttjandet är temperaturen bara marginellt lägre än referensfallet under vintern. Temperaturvariationen över året för styrstrategi 2 är lägst. Det kan delvis förklaras med att energiutbytet både under laddning och uttag är lägst för strategin. De största temperaturskillnaderna som uppgår till cirka 5°C uppträder för de olika fallen under laddningssäsongen, även för ring 3. För styrstrategi 6 syns det tydligt på temperatursvaret att laddningen börjar senare på säsongen som leder till att den lägsta temperaturen på cirka 4°C varar under cirka 5 månader, betydligt längre än för övriga styrstrategier.

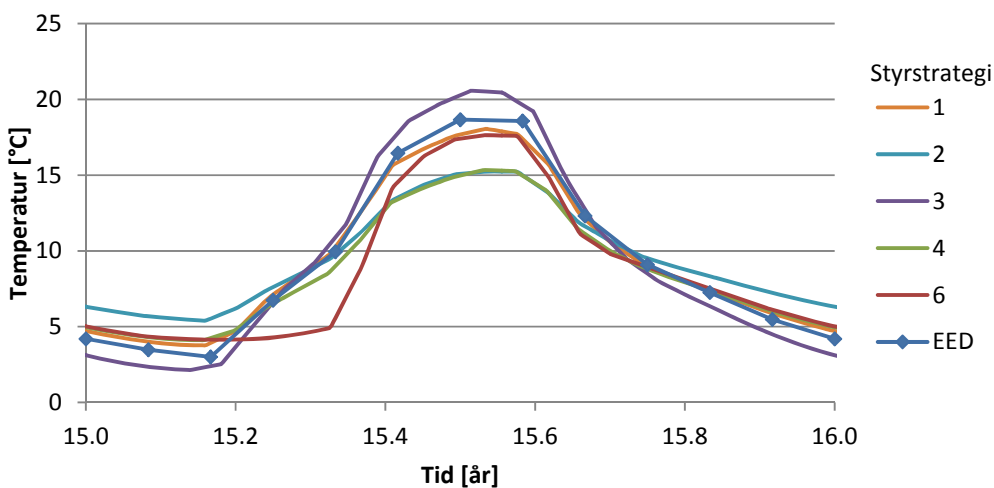


DIAGRAM 23 BORRHÅLSTEMERATURER FÖR BORRHÅL SAMMANKOPPLADE I RING 3 FÖR DE OLIKA STYRSTRATEGIERNA.

SLUTSATSER

För att undersöka och utreda den långsiktiga temperaturresponser hos ett cirkulärt borrhålsfält innehållande 36 borrhål har en metod att skapa borrhålsmodeller i COMSOL tagits fram. Värmeledning till och i borrhålen modelleras genom att utnyttja ett termiskt högt ledande material. Med metoden kan en temperaturgradient längs borrhålsdjupet åstadkommas. Den numeriska COMSOL metoden har validerats genom att ta fram ett kvadratisk borrhålsfält innehållande 6x6 borrhål som är jämförbart med accepterade numeriska och analytiska lösningar. Temperaturresponser hos den kvadratiske och cirkulära geometrin har undersökts genom att studera och jämföra respektive g-funktion. För det cirkulära borrhålsfältet tenderar g-funktionen att anta ett högre asymptotiskt värde än för det kvadratiske borrhålsfältet.

En förutbestämd årlig lastprofil med varierande effekt över året har använts för att testa möjligheten till att styra effektutbytet från tre radiella zoner i ett cirkulärt borrhålsfält innehållande 36 borrhål. Sex fall av styrningsstrategier har testats. Det är möjligt att åstadkomma och styra olika temperaturnivåer i upprättade zoner i den simulerade borrhålsfältmodellen. I framtida studier kan en optimeringsmetod för dessa temperaturzoner vara intressant att utreda.

REFERENSER

Acuña J., Distributed thermal response tests : New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes. Phd thesis. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm (2013)

Acuña J., Monzó P., Fossa M. Palm B., Numerically Generated g-functions for Ground Coupled Heat Pump Applications. *COMSOL Multyphysics Conference*, Milano, (2012).

Eskilson P. Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code. *Dept. of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology*, Lund, Sweden, (1986).

Eskilson P. Thermal Analyses of Heat Extraction Boreholes. PhD thesis. *Dept. of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology*, Lund, Sweden, (1987).

Hellstrom G, Sanner B., Earth energy designer: software for dimensioning of deep boreholes for heat extraction. *Dept. of Mathematical Physics, Lund University*, Lund (1994).

Ingersoll L, Zobel O., Heat Conduction with Engineering, Geological, and other Applications, *McGraw-Hill*, (1954).

Lamarche L, Beauchamp B., A New Contribution to the Finite Line-Source Model for Geothermal Boreholes. *Energy and Buildings* 39, (2007), 188-198.

Cimmino M., Bernier M., Adams f., A contribution towards the determination of g-functions using the finite line source. *Département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal*, Montréal (2013).

Zeng H, Diao N, Fang Z. A Finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers, *Heat Transfer-Asian Research* 31, (2002), 558-567.

Yavuzturk C., Spitler J.D., A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers. *ASHRAE Transactions* 105 (475-485), (1999).