

Energipålar

Termiskt reponstest på prefabricerad energi-
påle i betong

Simon Carlsson

Teknisk geologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

2015



Thesis work för Master of Science 30 ECTS
Engineering Geology, LTH, Lund University

Energipålar

Termiskt reponstest på prefabricerad energipåle i betong

Energy piles

A Thermal Response Test on a pre-cast concrete energy pile

Simon Carlsson

Teknisk geologi/Engineering Geology
Lunds tekniska högskola/Faculty of Engineering
Lunds universitet/Lund University

Lund 2015

ISBN: LUTVDG/(TVT—5142)/1-50/(2015)

Handledare/Supervisors

Peter Jonsson, Teknisk geologi
Philip Landkvist, Peab Grundläggning AB

Examinator/Examiner:

Jan-Erik Rosberg, Teknisk geologi

Förord

Under arbetets gång har jag fått stort stöd från många olika människor runt omkring mig. Tack alla!

Min familj och *Johanna*, som vid det här laget är trött på mitt eviga tjat om energipålar, har varit ett stort stöd från början till slut vilket jag är evigt tacksam för.

Jag vill även rikta ett stort tack till min handledare *Peter Jonsson* på Teknisk geologi vid LTH som varit till mycket stor hjälp under hela processen.

Ett särskilt tack riktas till Peab Grundläggning, framförallt min biträdande handledare *Philip Landkvist*, som gjorde examensarbetet möjligt från första början.

Tackar också *Tony Jernström* och HP-Borrningar i Klippan eftersom jag fick möjlighet att använda deras testutrustning.

Ett stort tack också till *Saqib Javed* på installations- och klimatiseringslära vid LTH som varit till stor hjälp på grund av sin expertis inom termiska responstest.

Simon Carlsson
Lund, juni 2015

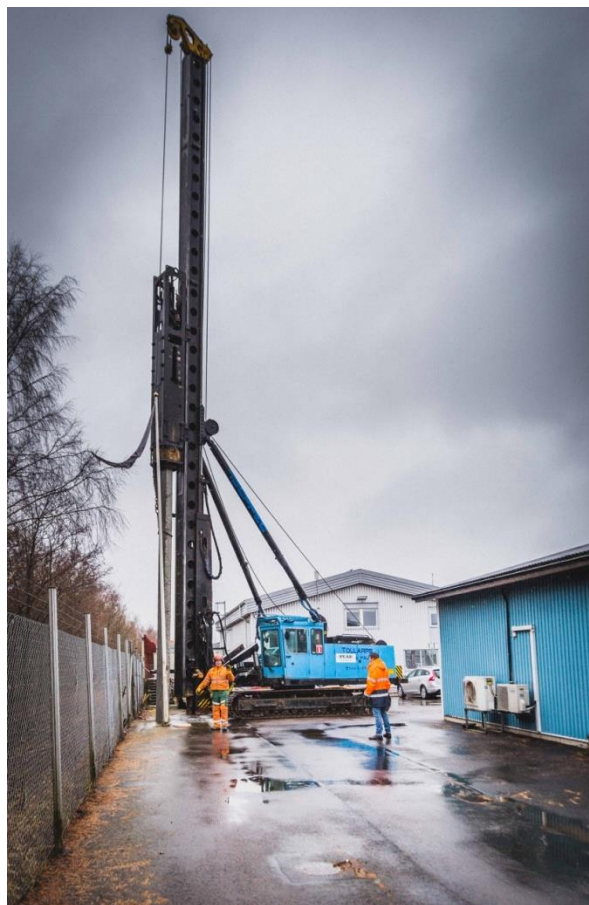


Foto: Marcus Gidekull

Abstract

Energy piles are deep foundation piles combined with collector pipes. They are used as vertical ground heat exchangers, and have been used since the 1980s in Central Europe and frequently in England. Energy piles have not yet had its breakthrough in Sweden, but right now the bigger construction companies have turned their eyes to this type of deep foundation.

One advantage with energy piles, when compared to conventional borehole heat exchangers, is that the additional cost for the heating- and cooling facilities in a building decreases, given that a foundation work with piles is planned. Energy pile systems are most in advantageous in a balanced system, where both heating and cooling are augmented with the help of ground heat exchange.

The Swedish construction company Peab Grundläggning AB has designed and manufactured three prototypes of energy piles. They are based on a 10 meter long precast Swedish standard driven pile in concrete with square cross section. The piles are designed to have an empty inner pipe in the centre of the pile, where heat collectors have been installed. The installation of the collectors take place after driving the piles into the ground, and the cavity around the collectors is then filled with cement grout. This makes it possible to more easily splice the pile, and to adapt its final length without interfering with the collector system.

As a part of this thesis, Peab Grundläggning AB and the author have installed three piles of the new design. With much appreciated assistance from the geothermal specialist company HP-Borringar i Klippan AB, the author and Peab Grundläggning have found a test location for the piles, installed collectors in two of the piles and conducted a thermal test on one of the piles. The piles are installed at a geothermal test site belonging to HP-Borringar I Klippan AB in the Filborna industrial area in Helsingborg, southern Sweden.

The main purpose of this master thesis is to investigate if Peab's new pile design has properties that justify its use as an energy pile. This is done by finding out the thermal properties of the pile. Another purpose was to evaluate and present recommended values used for design of an energy system with this type of pile and energy extraction.

To accomplish this, a thermal response test (TRT) has been conducted on a single pile. A thermal response test means that a heated fluid is circulated (by means of a pump) in the closed heat exchanger loop (the collector) in the pile. Meanwhile, the temperature is measured before the fluid enters the ground, and after it returns. The measured temperatures are plotted against time, and as the applied power on the heating device warming up the fluid is well known, the thermal conductivity of the ground can be calculated from the graph.

The most commonly used method for the evaluation of a thermal response test is the line source method, which also has been applied in this work. In this method the vertical heat exchanger is approximated with an infinitely long and thin line, with constant heat flowing radially from the line. With this method the thermal conductivity of the ground and further the thermal resistance of the heat exchanger can be calculated, which are both important design parameters for the design of an energy system.

A number of published models have been used to calculate predicted values for the energy pile tested. The largest deviation is just over 20%. The model that seemed to be the most appropriate

one for this type of pile (Remund's, chapter 2.5) gave a thermal resistance of $0.198 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$, which is close to the test result.

It should be mentioned that the evaluation of a thermal response test itself has uncertainties between 5-10% for calculating the thermal conductivity and between 10-20% for the thermal resistance.

The thermal resistance of the pile was calculated to $0.191 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$ and the thermal conductivity of the ground was calculated to $2.74 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. The model data compared to the results of the TRT and the obtained results are therefore believed to be reasonable. They also match tabulated values found in the literature study.

As mentioned, the TRT test has some uncertainties that are discussed in the thesis. After the test a coupling between the measured fluid temperatures and the ambient temperature was observed.

Another source of uncertainty is that the applied power for heating was assumed to be constant which is probably not true. If, in a subsequent experiment, the power is measured, and the line source method is used with super-positioning of all the measured power change steps, and further the evaluation is made with parameter estimation, the results of the evaluation will be more accurate. This should be the next step.

Some important practical experiences have been made. For example it is suggested in the next how to reduce the thermal resistance by using spacers between the collector pipes and thereby increase the distance between them and to keep them at the same distance over the length of the pile.

Keywords: energy pile, thermal response test, precast, thermal foundations, driven piles

Sammanfattning

Energipålar är grundläggningspålar kombinerade med kollektorslangar som används som vertikala markvärmväxlare. De har sedan 1980-talet använts i Centraleuropa, och används även frekvent i England. I Sverige har energipålar ännu inte slagit igenom, men de större byggföretagen börjar nu intressera sig för denna typ av grundläggning.

En fördel med energipålar jämfört med konventionella bergvärmebrunnar är att merkostnaden för uppvärmnings- och kylanläggningen blir mindre om ett grundläggningsarbete med pålar ändå ska utföras. Energipålar används med fördel i ett balanserat system med utvinning av både värme och kyla ur marken.

Peab Grundläggning har tillverkat tre prototyper av en typ av energipåle med en 10 meter lång prefabricerad standardpåle med kvadratisk tvärsnitt i betong som bas. Betongpålarna har gjutits med ett tomt innerrör i centrum av pålen, och kollektorer har installerats i pålen efter det att den slagits ner i marken, varefter hålrummet har cementinjekterats. Tanken med denna utformning är att pålen ska kunna skarvas utan att extra kopplingsarbete av kollektorerna tillkommer.

Inom ramen för detta examensarbete har Peab Grundläggning och författaren i samarbete utformat, gjutit och installerat tre pålar. Med ytterligare hjälp från HP-Borringar i Klippan har författaren och Peab Grundläggning funnit en testplats för pålarna, genomfört installation av kollektorerna i två av pålarna samt utfört ett termiskt test på en av pålarna. Pålarna installerades på en anläggning tillhörande HP-borringar AB i Filbornas industriområde i Helsingborg.

Syftet med examensarbetet var att undersöka om Peabs påle lämpar sig som energipåle, att ta reda på pålens termiska egenskaper och att slutligen kunna ge riktvärden för designparametrar och effektuttag.

För att åstadkomma detta har ett termiskt responstest (TRT) genomförts på en påle. Ett termiskt responstest innebär att en uppvärmd vätska tillåts cirkulera i det slutna markvärmväxlingssystemet (kollektorn i pålen). Temperaturen mäts innan vätskan går ner i marken och efter det att den kommit upp. De uppmätta temperaturerna plottas mot tiden, och då applicerad effekt på vätskevärmaren är känd kan markens värmeledningsförmåga beräknas med hjälp av grafen.

Den vanligaste utvärderingsmetoden för ett termiskt responstest, och den som tillämpats i detta försök, är den så kallade linjekälla-metoden. I denna metod antas den vertikala värmväxlaren vara en oändligt lång värmeutstrålande linje. Med denna metod kan markens värmeledningsförmåga beräknas utifrån uppmätta värden, liksom värmväxlarens termiska motstånd. Båda dessa är viktiga designparametrar när ett energisystem ska dimensioneras.

Pålens termiska motstånd beräknades till $0,191 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$ och markens värmeledningsförmåga till $2,74 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

En jämförelse mellan mätvärdet och teoretiskt beräknade termiska motstånd utifrån i litteraturen rapporterade metoder har givit att modellvärdena avviker som mest med drygt 20%, jämfört med resultatet från det termiska responstestet. Den modell som ansågs som lämpligast för denna påle (Remunds, se kapitel 2.5) gav ett predikerat termiskt motstånd på $0,198 \text{ (m}\cdot\text{K)/W}$ vilket är väl jämförbart med testresultatet.

Det är värt att notera att en utvärdering av ett termiskt responstest enligt den här använda metodiken i sig har osäkerheter vid beräkning av värmeledningsförmågan på mellan 5-10%, och på 10-20% vid beräkning av det termiska motståndet.

Då en koppling mellan uppmätt temperatur på vätskan och utelufttemperaturen kunde urskiljas efter testet, men inte kunde beräknas och klargöras med den använda utvärderingsmetoden, har resultaten osäkerheter. En analys av dessa har genomförts, och de erhållna mätresultaten bedöms vara rimliga då de stämmer bra överens med de förväntade och uppskattade värden som identifierats i en litteraturstudie.

En annan källa till osäkerhet är att den tillförda effekten antagits vara konstant, vilket troligen inte är korrekt. Om effekten mäts kontinuerligt i ett upprepat experiment, och linjekälla-metoden används med superposition av alla de uppmätta stegvisa förändringarna i tillförd effekt, samt utvärdering genomförs med parameteruppskattning, kan mer precisa och noggranna värden på både värmeledningsförmåga och det termiska motståndet beräknas. Detta bör vara nästa steg.

Även praktiska erfarenheter har dragits, exempelvis föreslås hur pålens termiska motstånd kan minskas genom att kollektorerna installeras med distanser för att öka avståndet mellan dem, och för att hålla dem på samma avstånd ifrån varandra.

Nyckelord: energipåle, termiskt responstest, prefabricerad, termisk grundläggning, slagna pålar

Beteckningar

Förkortningar

TRT	Termiskt responstest (Thermal Response Test)
COP	Värmefaktor (Coefficient of Performance)
PE	Polyeten (Typ av plast)
EED	Earth Energy Designer (Datorprogram)

Huvudsymboler

A	Area	[m ²]
c	Täckskikt betong	[m]
E ₁	Responsfunktion linjekälla-metoden	[-]
Fo	Fouriers tal	[-]
G	Temperaturresponsfunktion för cylindrisk värmekälla	[-]
H	Längd på påle (eller borrhål)	[m]
h	Värmeöverföringskoefficient	[W/m ² K]
k	Riktningkoefficient	
L	Avstånd	[m]
m	Konstantterm i ekvation (28)	
Nu	Nusselts tal, $(hL/\lambda_{\text{fluid}})$	[-]
n	Antal kollektorrör (eller konstant i ekvation 10)	
Pr	Prandtls tal, (ν/α)	[-]
Q	Effekt	[W]
q	Värmeflöde	[W/m]
R	Termiskt motstånd	[(m·K)/W]
Re	Reynolds tal, $(\rho L/\mu)$	[-]
r	Radie	[m]
S _b	Formfaktor i ekvation (17)	
S _c	Formfaktor i ekvation (20)	

$S_{c(\text{steady})}$	Formfaktor (Loveridge & Powrie)	
S_{vk}	Specifik värmekapacitet	[J/(kg·K)]
s	avstånd mellan kollektorer c/c	[m]
T	Temperatur	[°C eller K]
t	Tid	[s]
u	Flödes hastighet i rör	[m/s]
α	Termisk diffusivitet	[m ² /s]
β_0	Konstant i ekvation (16)	
β_1	Konstant i ekvation (16)	
γ	Euler-Mascheronis konstant (0,5772...)	
δ	Konstant i ekvation (31)	
Δ	Skillnad, ofta i temperatur	
λ	Värmeledningsförmåga	[W/(m·K)]
μ	Viskositet	[kg/(m·s)]
σ	Stefan-Boltzmanns konstant (5,67040·10 ⁻⁸)	[W/m ² K ⁴]
ρ	Densitet	[kg/m ³]
ν	Kinematisk viskositet	[m ² /s]
\emptyset	Diameter	[m]

Index

0	Begynnelsevärde (ostörd temperatur)
1 hr	Efter en timme
b	Borrhål eller påle (borehole)
c	Betong (concrete)
$cond$	Konduktiv
$conv$	Konvektiv
f	Vätska (fluid)

g	Mark (ground)
grout	Injektering eller betong
i	Innerdimension för rör, inre
in	Inåtgående
o	Ytterdimension för rör
p	Rör (pipe)
eff	Effektiv

Innehåll

Förord.....	II
Abstract	III
Sammanfattning.....	V
Beteckningar.....	VII
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte.....	1
1.3 Mål.....	2
1.4 Metodik	2
1.5 Avgränsningar.....	2
2 Grundläggande begrepp.....	3
2.1 Värmeöverföring	3
2.1.1 Ledning	3
2.1.2 Konvektion.....	3
2.1.3 Strålning.....	4
2.2 Värmeöverföring i mark	4
2.3 Värmeväxling i mark.....	5
2.3.1 Markvärmexlarens prestanda.....	6
2.3.2 Förutsättningar för markvärmexling i Sverige	7
2.4 Metoder för att mäta markens termiska egenskaper	7
2.5 Tillämpning av teorin på energipålar	8
2.5.1 Värmeövergång mellan mark och markvärmexlare	8
2.5.2 Termiskt motstånd	9
2.5.3 Beräkningsmetoder för termiskt motstånd i betong	11
3 Termisk grundläggning	15
3.1 Allmänt om påltyper.....	15
3.2 Utformning av energipålar	17
3.3 Energipålars termiska prestanda.....	18
3.4 Referensanläggningar.....	19
3.4.1 Hamada et al.....	19
3.4.2 Wood, Liu och Riffat	19
3.4.3 Pahud och Hubbuch	20
3.4.4 Gao et al.	20

4	Termiskt responstest	21
4.1	Linjekälla-metoden	22
4.2	Cylinderkälla-metoden	23
4.3	Andra metoder	24
4.4	Tillämpning på energipålar	24
4.5	Referensobjekt – TRT på energipålar	24
4.5.1	Lennon, Watt och Suckling	24
4.5.2	Hemmingway och Long	24
4.5.3	Brettmann, Amis och Kapps	25
4.5.4	Loveridge	25
4.5.5	Wang et al.....	25
5	Utförande av test.....	27
5.1	Energipålens utformning.....	27
5.1.1	Betongens sammansättning och egenskaper.....	28
5.1.2	Kollektorernas utformning och egenskaper.....	28
5.2	Testplats	29
5.3	Tillvägagångssätt	30
6	Resultat.....	35
6.1	Ostörd marktemperatur	35
6.2	Termiskt responstest	35
6.3	Teoretiska beräkningar av R_b med beskrivna metoder	38
6.4	Pålbetongens termiska egenskaper	39
7	Diskussion och slutsatser.....	40
7.1	Försöksrelaterad diskussion och felkällor	40
7.2	Diskussion relaterad till de i litteraturen rapporterade beräkningsmetoderna för R_b	41
7.3	Rekommendationer.....	42
7.4	Praktiska erfarenheter.....	42
7.5	Vidare studier	43
7.6	Slutsats	43
8	Bilaga 1	48
8.1	Beräkningsunderlag för energipålens effektiva radie r_b	48
8.2	Beräkningsunderlag för energipålens termiska motstånd R_b	48
8.2.1	Betongens termiska motstånd	49

Figurer

Figur 1. Markvärmesväxlingsystem med energipåle som markvärmesväxlare kopplat till värmepump för uppvärmning av byggnad, modifierad och översatt efter (Loveridge 2012). (Skissen är schematisk och energipålarna är i verkligheten oftast placerade under byggnaden som ska värmas upp).....	6
Figur 2. a) Principskiss över energipålen i genomskärning. b) Energipålens komponenters termiska motstånd, (Loveridge 2012)	9
Figur 3. a,b) Principiella skisser över en generaliserad geometri för <i>pile only model</i> och dess komponenter, (Loveridge, Powrie 2014)	13
Figur 4. Principen för gräv-pålar (borrade pålar), (Hayward Baker 2014b).....	16
Figur 5. Principen för CFA-pålar, (Hayward Baker 2014a).....	16
Figur 6. Principen för slagna pålar, (Hayward Baker 2014c).	17
Figur 7. Bilden visar en armeringskorg med fastmonterade kollektorrör som ska användas till en borrarad gräv-påle, (Brandl 2006).	18
Figur 8. Principskiss över TRT-utrustning (översatt), (Hemmingway, Long 2012).	21
Figur 9. De tre energipålarna klara att gjutas. Inuti pålen ses plaströret och närmst i bild syns pålarnas bergsko. Foto: Simon Carlsson	27
Figur 10. Mätning av betongens termiska egenskaper med Hot Disk. Foto: Simon Carlsson.....	29
Figur 11. De tre energipålarnas uppställning. Foto: Simon Carlsson	31
Figur 12. Gjutning av pålarna. Foto: Simon Carlsson	31
Figur 13. Slagning av pålarna. Foto: Simon Carlsson.....	32
Figur 14. Filmning inuti pålarna med VLT, <i>Video Logging Tool</i> . Foto: Simon Carlsson	32
Figur 15. Stillbild från VLT, <i>Video Logging Tool</i> . Botten på påle 1. Notera djupet i över högra hörnet av bilden.....	33
Figur 16. Påle 1 med installerad kollektor precis efter injektering. Foto: Simon Carlsson	33
Figur 17. TRT-mätning pågår på Påle 1. Pålen och rören är isolerade. Foto: Simon Carlsson	34
Figur 18. Visar uppmätt temperatur längs pålen.	35
Figur 19. Visar TRT-mätningen med uppmätta temperaturer på värmebärande fluiden ner i pålen respektive upp ur pålen med avseende på tiden. Uppmätt flöde och utelufttemperatur är också plottade mot tiden.	36

Figur 20. Visar medeltemperatur mellan T_{upp} och T_{ner} samt den uppmätta utelufttemperaturen..	36
Figur 21. Visar medeltemperaturen på den uppmätta värmebärarfluiden plottad mot den naturliga logaritmen av tiden i timmar.....	38
Figur 22. Visar uppmätta värden för pålbetongens värmeledningsförmåga, specifika värmekapacitet och värmediffusivitet.	39

Tabeller

Tabell 1. Typiska termiska motstånd för borrhål beroende på injektering, (Loveridge, Powrie 2014).	10
Tabell 2. Termiska motstånd för olika typer av energipålar uppmätta in-situ. Jämför kapitel 3.4.....	10
Tabell 3. Val av β_0 och β_1 beroende på kollektorkonfiguration, (Loveridge, Powrie 2014 efter Remund (1999)).	12
Tabell 4. Val av A, B, C, D, E och F i ekvation (23), beroende på antal kollektorer och värmeledningsförmåga för betong och mark, (Loveridge, Powrie 2014).	14
Tabell 5. Erhållen effekt från energipålar beroende på markens värmeledningsförmåga, (Rosén et al. 2001).....	18
Tabell 6. Erhållen effekt från energipålar beroende på typ av jord, (Rosén et al. 2001).....	19
Tabell 7. Resultatsammanställning från termiska responstest.	26
Tabell 8. Resultatsammanställning av betongens termiska egenskaper.	28
Tabell 9. Visar uppskattade termiska egenskaper för marken där pålen slogs, (Rosén et al. 2001, Loveridge 2012).	30
Tabell 10. Visar uppmätt värmeledningsförmåga för marken och pålens termiska motstånd.	37
Tabell 11. Visar resultaten över de teoretiskt beräknade termiska motstånden för pålen utifrån tidigare beskrivna metoder.	38
Tabell 12. Visar resultatet över de teoretiskt beräknade termiska motstånden för kollektorrören. ...	39

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Att kombinera grundläggningskonstruktioner i betong och utvinning av geotermisk energi för att värma upp en byggnad med hjälp av en värmepump kan vara en mycket god idé, Brandl (2006), både vad gäller miljöaspekter och ur ekonomiska perspektiv. Termisk grundläggning, som det brukar benämnas, tar sitt avstamp i början av 1980-talet och har sedan dess ökat i omfattning. I Centraleuropa har man experimenterat med olika typer av termiska grundläggningar som grundplattor, membranväggar och grundläggningspålar och använt dessa som energiutvinnare i marken. Den första grundläggningspålen avsedd för värmeväxling i mark, installerades i Österrike 1984, (Brandl 2006).

Sedan i mitten på 80-talet har dessa pålar, så kallade energipålar, installerats i ett flertal länder bl. a. Nederländerna, Belgien, Schweiz, Kina, Japan och Storbritannien (Loveridge 2012). Det råder stor variation på pålarnas utformning och tillverknings sätt, eftersom pålens huvuduppgift fortfarande är att agera som lastupptagare för ovanliggande konstruktion.

I Sverige har energipålar ännu inte slagit igenom. Anledningen är främst att de grundläggningspålar som utformas som energipålar utomlands, till största del är *in-situ*-gjutna pålar eller grävpålar. Förekomsten av dessa typer är nästintill försumbar på den svenska marknaden jämfört med prefabricerade pålar. För att energipålar ska kunna användas i Sverige enligt den utomlands använda tekniken krävs att marknaden ökar för *in-situ*-gjutna pålar eller att pållängden kan bestämmas i förväg, (Rosén et al. 2001). Ett annat alternativ är att utforma skarvbara energipålar av prefabricerade pålar på ett sätt så att inget extra kopplingsarbete för kollektorerna tillkommer vid själva installationen av pålen.

Peab Grundläggning har tagit fram en prototyp till en energipåle med en av sina prefabricerade betongpålar som bas. Då dessa typer av pålar ofta skarvas bör även energipålen utformas för att vara skarvbar, vilket Peabs system syftar till att tillåta.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att bland annat att med hjälp av ett experiment i fält undersöka om Peabs påle är en potentiellt tillräckligt bra markvärmväxlare för energiutvinning i mark.

Ytterligare ett syfte är att genom utvärdering av fältmätningar beräkna pålens termiska parametrar, vilka behövs vid design av ett energisystem. En del praktiska erfarenheter vid montering och utformning kommer också att kunna erhållas. Tre huvudfrågor har formulerats som lyder:

1. *Kan denna typ av påle användas som energipåle?*
2. *Hur stort kan energiutbytet bli?*
3. *Vad blir energipålens termiska motstånd?*

1.3 Mål

Ovanstående frågeställningar ska besvaras inom ramen för det arbete som utförs. Dessutom ställs följande mål upp:

- *Redovisa teoretiskt beräknade värden på pålens termiska motstånd utifrån i litteraturen redan framtagna metoder.*
- *Redovisa uppmätt värde på pålens termiska motstånd utifrån ett termiskt försök.*
- *Redovisa uppmätt värden på markens värmeledningsförmåga utifrån ett termiskt försök.*
- *Redovisa uppskattade värden på markens värmeledningsförmåga utifrån tabellvärden.*

1.4 Metodik

I en litteraturstudie har fall där energipålars termiska prestanda och egenskaper undersökts, studerats och redovisats. I litteraturstudien har också relevanta begrepp inom värmeöverföring och markvärmewäxling behandlats.

Ett termiskt responstest har utförts på en energipåle i fullskala. Uppmätta resultat från det termiska responstestet har jämförts med predikterade värden beräknade enligt metoder som identifierats i litteraturstudien.

1.5 Avgränsningar

Endast en typ av påle har testats, en prefabricerad påle i betong med måtten 270 X 270 mm i tvärsnittet. Pålen är en modifierad standardpåle av typen SP2, (Pålkommisionen 1996), designad och konstruerad av Peab Grundläggning AB.

Arbetet tar inte hänsyn till pålens bärförmåga och eventuell påverkan på denna, utan syftar endast till att undersöka pålens termiska egenskaper och prestanda.

Denna typ av standardpåle är skarvbar och energipålen är utformad för att den ska kunna skarvas. Skarvade pålar undersöks inte i arbetet men diskuteras.

2 Grundläggande begrepp

2.1 Värmeöverföring

Energi i form av värme, termisk energi, överförs som en följd av termodynamikens andra huvudsats alltid från en varmare till en kallare del av ett system eller från en kropp med högre temperatur till en kropp med lägre. Värme kan överföras på tre olika sätt; *ledning*, *konvektion* och *strålning*, (Sundén 2006).

2.1.1 Ledning

Värmeledning uppkommer när det finns en temperaturgradient i en kropp (vätska, gas eller fast ämne). Värmeenergi kommer då att förflytta sig från den varmare delen till den kallare. Värmen förflyttas genom att partiklar (atomer och molekyler), vilka rör sig snabbare vid högre temperatur, kolliderar och på så sätt fortplantar rörelsen (värmen) vidare. När värmeledningen antar fortvarighetstillstånd, *steady state*, är värmeflödet proportionellt mot temperaturgradienten och kan beskrivas enligt Fouriers lag:

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Där Q är värmeflödet i Watt (Joule/sekund), A är tvärsnittsarean, $\frac{dT}{dx}$ är temperaturgradienten och λ är materialets värmeledningsförmåga, värmekonduktivitet, i $W/(m \cdot K)$.

2.1.2 Konvektion

När en fluid (vätska eller gas) strömmar utmed en fast yta som har en annan temperatur än fluiden kommer värmeutbyte som sker att påverkas av fluidens makroskopiska rörelser. I och med värmeöverföringen vid kontaktytan kommer temperaturändringen i fluiden att medföra förändrad densitet, vilket påverkar fluidens makroskopiska rörelse. Detta benämns *fri* konvektion, (Sundén 2006).

Forcerad eller påtvingad konvektion förekommer också, och inträffar när en potentialskillnad i tryck finns, det vill säga när fluidens rörelse uppkommer av exempelvis en fläkt, pump eller en propeller, (Sundberg 1991). Detta är framförallt relevant vid värmeväxling med pump i ett slutet rörsystem, (Loveridge 2012).

Värmeöverföring mellan en fast yta och en fluid genom konvektion beskrivs enligt Newtons avsvältningslag:

$$\frac{Q}{A} = h(T - T_f) \quad (2)$$

Där h är värmeöverföringskoefficienten i W/m^2K som beror på både fluidens och den fasta ytans egenskaper, T och T_f är temperatur på ytan respektive vätskan, (Loveridge 2012). Värmeöverföringskoefficienten är alltså inte bara en fluidegenskap, utan beror också på hur fort fluiden strömmar förbi. Därför beror värmeöverföringskoefficienten också på vilken typ av konvektion det är frågan om, (Jönsson 2009).

2.1.3 Strålning

Värmeöverföring genom strålning kräver inget medium för fortplantning. Alla ytor med en temperatur över 0° K (-273,15° C), absoluta nollpunkten, avger energi i form av elektromagnetiska vågor. Själva värmeutbytet sker alltså genom att en yta strålar värme till en annan, (Sundén 2006).

Stefan-Boltzmanns lag beskriver hur stort energiflödet blir vid utstrålning från en ideal svartkropp:

$$\frac{Q}{A} = \sigma T^4 \quad (3)$$

Där σ är Stefan-Boltzmanns konstant ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) och T är kroppens absoluta temperatur i Kelvin, (Loveridge 2012).

2.2 Värmeöverföring i mark

Värmeöverföring i mark, både vad gäller jord och berg, sker med hjälp av alla de tre ovan beskrivna mekanismerna. Såvida inte stora grundvattenflöden förekommer är ledning dock den överföringstyp som dominerar. Konvektion och strålning kan komma att spela roll i jordar med stora kornstorlekar där porutrymmet är större. (Loveridge 2012)

Värmeledning i mark bestäms följaktligen i huvudsak av markens värmekonduktivitet, alltså värmeledningsförmåga. Värmeledningen i marken kommer huvudsakligen att ske där värmeledningsförmågan är som störst och där kornen är i kontakt med varandra. Porositeten och vatteninnehållet i porerna kommer alltså att spela roll för den totala värmeledningsförmågan, (Loveridge 2012).

Enligt Rosén et al. (2001) påverkar även marktemperaturen vilken överföringsmekanism som är den mest dominerande. Mellan 0-25°C sker värmeöverföringen i huvudsak genom ledning. Är det varmare än så, ökar andelen konvektion och ångdiffusion (se nedan), beroende på vattenmättnadsgrad.

Om porerna i en viss jordart är stora nog, förekommer fri konvektion. Finns ett betydande grundvattenflöde i en porös jord eller ett poröst berg är forcerad konvektion det som är dominerande. (Loveridge 2012)

I själva verket är konvektionen i mark en kombination av både ångdiffusion i de icke vattenmättade porerna och advektion med avseende på själva vattenströmningen i porerna, (Loveridge 2012). Advektion är den process där värme förflyttas med flödet i fluiden, medan ångdiffusion innebär att den vattenånga som bildats vid höga temperaturer, typiskt mellan 25-95° C, blandar sig med porgas och sprider ut sig i porerna (diffunderar), och på så sätt överför värmen. Ångdiffusion sker främst vid hög temperatur (25-95° C) och låg till medelhög vattenmättnadsgrad i porerna, (Rosén et al. 2001). Enligt Sundberg (1991) förekommer dock även värmetransport via ledning i vattenmättade jordar vid höga temperaturer.

2.3 Värmeväxling i mark

För att utvinna energi ur marken krävs en värmeväxlare. Värmeväxlarens uppgift är att överföra värmen från marken och därefter via någon form av transportsystem föra den vidare till en värmepump.

En markvärmeväxlare kan utformas på många olika sätt, men består i huvudsak av en eller flera kollektorslangor installerade i mark eller berg, ofta gjorda i plast, där en värmebärande vätska (värmebärande fluid) cirkulerar. Värmebärande fluiden är oftast vatten, tillsammans med någon form av frostskyddande kemikalie som till exempel etanol eller glykol. (Rosén et al. 2001)

Det finns olika typer av markvärmeväxlare, men huvudtyperna är *horisontella* och *vertikala* installationer.

Vid installation av ett horisontellt markvärmeväxlingssystem anläggs slangen ytligt, ca 1,5 m under marken, i en eller flera slingor. Nackdelen här är att en stor yta krävs för att erhålla tillräckligt med värmeenergi. Denna typ av värmesystem benämns ofta som jordvärme eller ytjordvärme. Värmeväxling i dammar och sjöar kan också ske med samma princip, (Loveridge 2012).

Vertikalt installerade markvärmeväxlare är vanligt förekommande där berggrunden ligger på relativt små djup, mindre än ca 5 m under markytan, och/eller där ytan är begränsad. Vertikala installationer kan delas in i olika undergrupper, *nedföring av slangar i jord*, *borrning i berg* och *energipålar*. Alla dessa grupper har gemensamt att kollektorn installeras vertikalt, ofta som U-rör eller ett så kallat koaxialrör. Valet av typ beror på rådande jord- och bergförhållanden. Den vanligaste typen i Sverige är den borrhåls bergvärmebrunnen, (Rosén et al. 2001).

I ett slutet markvärmeväxlingssystem, oavsett huvudtyp, cirkulerar fluiden med hjälp av en pump. Ett turbulent flöde är önskvärt för att värmeöverföringen mellan röret och vätskan ska bli så stor som möjligt, (Loveridge 2012).

I hela markvärmeväxlingssystemet ingår förutom själva kollektorslingan i marken, som ofta benämns som den primära kretsen, en värmepump och den sekundära kretsen, se figur 1.

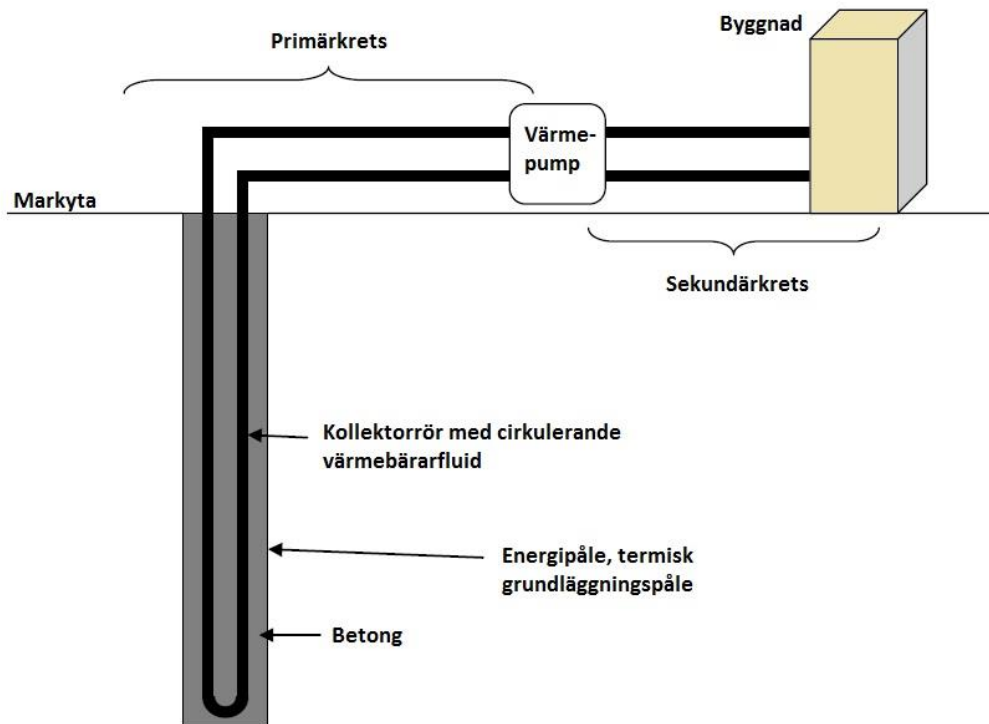
Värmepumpens uppgift är att öka temperaturen från den primära kretsen till den sekundära kretsen som utgörs av exempelvis ett radiatorsystem (eller markvärmeväxlaren, om systemet används för kylning av anläggningar).

För att sätta ett värde på värmepumpens prestanda används en så kallad COP-faktor (*Coefficient of Performance*) eller värmefaktor. Brandl (2006) rekommenderar ett COP-värde större än 4 för att det ska vara ekonomiskt lönsamt att använda värmepumpar. Om det är ekonomiskt lönsamt beror dock på kostnaden för alternativ uppvärmning, som bland annat styrs av elpris, oljepris, skatter och subventioner.

COP-faktorn beräknas enligt följande uttryck:

$$COP = \frac{\text{Energiuttag efter värmepump [kW]}}{\text{Tillsatt energi för drift [kW]}}$$

För en COP-faktor 4 innebär det alltså att $\frac{3}{4}$ av energin erhålls från marken (borrhål eller energipålar) och $\frac{1}{4}$ representeras av tillsatt energi för drift (elektricitet).



Figur 1. Markvärmväxlingssystem med energipåle som markvärmväxlare kopplat till värmepump för uppvärmning av byggnad, modifierad och översatt efter (Loveridge 2012). (Skissen är schematisk och energipålarna är i verkligheten oftast placerade under byggnaden som ska värmas upp).

2.3.1 Markvärmväxlarens prestanda

Termiska prestanda för en markvärmväxlare beror på värmeöverföringsegenskaperna mellan marken och fluiden. Värmeöverföringsförmågan beror på ett antal faktorer, (Rosén et al. 2001):

- *Utformning* (material, dimensioner, antal kollektorslangar och konfiguration)
- *Flödes hastighet* (typ av flöde, laminärt eller turbulent)
- *Kontaktmotstånd*
- *Termiska egenskaper i omgivande mark, inklusive temperatur*

För att kunna förutse och beräkna markvärmväxlarens prestanda behövs kännedom om ovanstående punkter. Så länge det finns en temperaturdifferens mellan mark och fluid kommer värme att överföras. Temperaturdifferensen är proportionell mot effektuttaget, eller effekttillförseln, per meter kollektorslang och beror på hur markvärmväxlarens ingående komponenter samverkar samt på dessa komponenters termiska egenskaper och värmeöverföringsmekanismer. Följande parametrar förklarar också ovanstående faktorer betydelse för att förutse markvärmväxlarens prestanda, (Rosén et al. 2001):

Konvektiv värmeöverföringskoefficient (R_{pconv} i figur 2b), beskriver värmeöverföringen mellan vätskan och insidan på kollektorslangen. Kännedom om kollektorns dimensioner, flödes hastighet och fluidens termohydrauliska egenskaper krävs för att bestämma denna parameter. Att åstadkomma turbulent flöde för största möjliga värmeöverföring är önskvärt.

Värmemotstånd (R_{pcond} i figur 2b) mellan insidan och utsidan på kollektorslangen bestäms av slangens dimension och dess värmeledningsförmåga.

Kontaktmotståndet (Mellan R_{pcond} och R_c i figur 2b) mellan kollektorslangens utsida och det omgivande materialet (fyllningen för borrhål, betongen för energipålar).

Värmemotståndet i omgivande material (R_c i figur 2b), beror på värmeledningsförmåga och värmekapacitet för omkringliggande material. För ett borrhål är det omgivande materialet ofta någon form av återfyllnadsmaterial (injekteringsbruk, sandblandning eller vatten). För en energipåle är detta materialet själva betongen i pålen. Betongen kommer sedan i sin tur att ha ett kontaktmotstånd mot den omkringliggande marken (R_g i figur 2b).

För konventionella bergvärmebrunnar varierar möjliga energiuttag mellan 20 och 100 W/m beroende på geologin och den ostörda marktemperaturen, (Loveridge 2012).

2.3.2 Förutsättningar för markvärmewäxling i Sverige

I Sverige är geologin mycket varierande vilket innebär att det från fall till fall måste undersökas hur förutsättningarna för värmeuttag och värmelagring är hos en viss geografisk plats (Svedinger 1981). Även förutsättningarna för att installera pålar varierar från plats till plats, och det går alltså inte att uttala sig generellt om detta.

2.4 Metoder för att mäta markens termiska egenskaper

En viktig faktor i kapitel 2.3.1 som påverkar markvärmewäxlarens prestanda är den omgivande markens termiska egenskaper. Det har stor betydelse vilken typ av jord värmewäxlaren placeras i, enligt Rosén et al. (2001). Med god kännedom om markens termiska egenskaper kan systemet dimensioneras med god noggrannhet. Viktiga parametrar, där vissa har nämnts ovan, är:

- Värmeledningsförmåga, λ [W/(m·K)] (transport av energi)
- Specifik värmekapacitet, S_{vk} [J/(kg·K)] (lagring av energi)
- Värmediffusivitet, α [m²/s] (utjämning av temperaturskillnader)

För att ta reda på dessa egenskaper kan olika typer av metoder tillämpas. Dessa metoder grundar sig antingen på tabellerade värden eller på mätning. Rosén et al. (2001) delar upp metoderna enligt följande:

- Jord- och bergartsklassificering utifrån geologiska kartor eller liknande. Tabellvärden används sedan för de olika jord- och bergarterna.
- Mätning i fält, t.ex. kärnprov eller skruvprov. Proven kan sedan undersökas och studeras i ett laboratorium.
- Fältförsök *in-situ* via installerade markvärmewäxlare. Denna typ av test kallas termiskt responstest och innebär att en uppvärmd fluid cirkulerar i systemet varvid ingående respektive utgående temperatur mäts, och utifrån uppmätta värden tillsammans med vetenskap om applicerad effekt för uppvärmningen används för att beräkna markens

värmeledningsförmåga. Med hjälp av ett termiskt responstest kan även värmväxlarens termiska motstånd beräknas, vilket är en avgörande dimensioneringsfaktor (se kapitel 2.5.2). I kapitel 4 förklaras termiskt responstest mer ingående.

- Teoretiska beräkningar utifrån kännedom om bergets och jordens uppbyggnad. Exempelvis mineralsammansättning, porvolym, densitet och vatteninnehåll. Denna metod kan med fördel kombineras med andra.

2.5 Tillämpning av teorin på energipålar

I detta kapitel tillämpas de grundläggande värmeöverföringsmekanismerna för fallet där värmeöverföring sker mellan mark och energipåle. Dessutom beskrivs energipålens ingående komponenter och hur de påverkar värmeöverföringen.

2.5.1 Värmeövergång mellan mark och markvärmväxlare

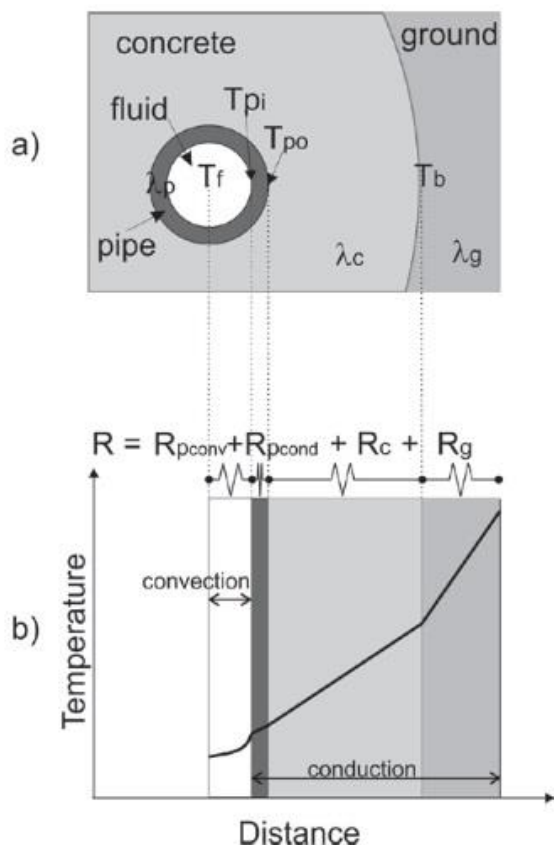
Precis som vid andra markvärmväxlingssystem överförs i en energipåle, värmen från mark till värmebärande fluid via ledning och konvektion. Alla komponenter som samverkar vid värmeöverföringen visas i figur 2a.

I figur 2b illustreras värmeöverföringen genom en energipåle i betong från mitten av värmebärande fluiden till den omkringliggande marken. På grund av flödet i kollektorröret uppstår forcerad konvektion mellan fluid och rörets innervägg, därefter sker ledning genom kollektorrörets vägg och vidare i betongen och slutligen ut i marken. I både betongen och i marken är ledning den dominerande överföringsmekanismen, men även konvektion kan vara av betydelse i marken beroende på vatteninnehåll, porstrukturer och grundvattenflöde. (Loveridge 2012)

Värmeutbytet vid konvektion mellan fluiden och kollektorrörets innervägg kan skrivas som:

$$\frac{Q}{A} = h(T_{pi} - T_f) \quad (4)$$

T_{pi} är temperaturen på rörets innervägg och resterande storheter är beskrivna i ekvation (2).



Figur 2. a) Principskiss över energipålen i genomskärning. b) Energipådens komponenters termiska motstånd, (Loveridge 2012)

Värmeutbytet via ledning i plasten på kollektorröret och genom fyllningen/betongen beskrivs med ekvation (1) (Fouriers lag) som här anpassas till vertikala markvärmväxlare enligt:

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{\Delta T}{L} \quad (5)$$

ΔT är temperaturskillnaden och L är avståndet i figur 2.

2.5.2 Termiskt motstånd

Enligt figur 2 verkar ett antal olika sorters termiska motstånd, resistanser, över pådens tvärsnitt när värme överförs. Den termiska resistansen fungerar analogt med en elektrisk resistans. Om fortvarighet, *steady-state*, antas är pådens totala resistans R_b konstant och används som designparameter för att bestämma temperaturskillnaden mellan pådens ytterkant och värmebärande fluiden enligt följande samband, (Loveridge, Powrie 2014):

$$R_b = \frac{\Delta T}{q} \quad (6)$$

Det totala motståndet R_b är en summa av alla ingående komponenters motstånd enligt följande (se även figur 2b):

$$R_b = R_{pconv} + R_{pcond} + R_c \quad (7)$$

Där R_{pconv} är motståndet på grund av konvektion mellan vätskan och rörets insida. R_{pcond} är motståndet i plasten på röret där ledning, konduktion, förekommer. R_c är således motståndet i betongen och/eller injekteringen. Bokstaven b står för borrhål eller här pålen (*borehole*), p står för kollektorröret (*pipe*) och c för betongen (*concrete*).

Loveridge och Powrie (2014) redovisar typiska värden för R_b för borrhål och energipålar. Se tabell 1 och tabell 2.

Tabell 1. Typiska termiska motstånd för borrhål beroende på injektering, (Loveridge, Powrie 2014).

Borrhål	Injektering	Termiskt motstånd
Ø 0,1-0,2m	Standard (ofta cementpasta)	0,10-0,20 (m*K)/W
	Termisk mix (tillsatt material med hög värmeledningsförmåga)	0,06-0,10 (m*K)/W

Tabell 2. Termiska motstånd för olika typer av energipålar uppmätta in-situ. Jämför kapitel 3.4.

Påltyp	Dimension	Kollektortyp	Termiskt motstånd R_b , in-situ	Källa
CFA	Ø 0,3m	Enkelt U, 32mm	0,22 (m*K)/W	(Wood, Liu & Riffat 2010)
Grävpåle, borrarad, gjuten i hålet	Ø 0,6m	Enkelt U, 20mm*	0,25 (m*K)/W	(Gao et al. 2008)
		Dubbelt U	0,175 (m*K)/W	
		Trippel U	0,15 (m*K)/W	
Prefabricerad betongpåle, kvadratisk tvärsnitt	0,27 X 0,27m	Enkelt U, 32mm	0,17 (m*K)/W	(Lennon, Watt & Suckling 2009)
Slagen stålrörspåle, med betonginjektering	Ø 0,244m	Enkelt U, 32mm	0,11 (m*K)/W	(Lennon, Watt & Suckling 2009)

*Innerdiameter.

Antas konstant temperatur på insidan av röret kan följande uttryck användas för att beräkna R_{pconv} :

$$R_{pconv} = \frac{1}{2\pi r_i n h_i} \quad (8)$$

Där n är antal kollektorrör i tvärsnittet, r_i är innerradien på kollektorröret, h_i är värmeöverföringskoefficienten, som beror på den cirkulerande fluiden och dess flödesegenskaper.

Vid forcerad konvektion, som det är frågan om här, kan man enligt Loveridge och Powrie (2014) beräkna h_i för turbulenta flöden med hjälp av Nusselts tal genom Dittus-Boelters ekvation:

$$h_i = \frac{Nu\lambda_f}{2r_i} \quad (9)$$

Nusselts tal Nu , är flödesberoende och beräknas med hjälp av Reynolds tal, Re , och Prandtls tal, Pr . För turbulenta flöden gäller följande:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^n \quad (10)$$

Reynold och Prandtls tal beräknas enligt:

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (11)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (12)$$

där u är flödeshastigheten i röret i m/s, L är rörets längd, ν är vätskans kinematiska viskositet i m^2/s och α är vätskans termiska diffusivitet i m^2/s .

Exponenten n i ekvation (10) är en konstant som beror på avkylning eller uppvärmning. Den brukar sättas till 0,3 för kylning och 0,4 vid uppvärmning, (Loveridge 2012).

Det konduktiva motståndet i kollektorrörets vägg R_{pcond} beräknas enligt ekvation (13). Sambandet beskriver det konduktiva motståndet för en ihålig cylinder (rör) med konstanta temperaturer på utsidan och insidan, där n är antal parallella rör:

$$R_{pcond} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi n\lambda_p} \quad (13)$$

Ytterradien för röret betecknas r_o .

En stor del av det totala motståndet R_b utgörs av betongens (för pålar) och injekteringens termiska motstånd R_c . Betongens eller injekteringens termiska motstånd beror i sin tur på deras värmeledningsförmåga och geometri, (Loveridge, Powrie 2014).

Betongens värmeledningsförmåga beror huvudsakligen på vilken typ av ballast som används, huvudsakligen storlek och mineralinnehåll, och på betongens vatteninnehåll. I Loveridge (2012) redovisas en tabell över värmeledningsförmågan för ett antal olika mineraler där kvarts, glimmer och fältspat har höga värden. En fuktig betong innehållande stora ballastkorn av exempelvis granit eller kvartsit ger då en god värmeledningsförmåga (ca 1,4–3,6 W/(m·K)) jämfört med cementpasta utan grovkornig ballast (ca 0,8-1,2 W/(m·K)), (Loveridge, Powrie 2014, Herlin, Johansson 2011).

2.5.3 Beräkningsmetoder för termiskt motstånd i betong

För att beräkna motståndet i betongen finns ett antal olika beräkningssätt, utformade för borrhålsvärmväxling. Loveridge och Powrie (2014) beskriver en metod, som Shonder och Beck (2000) har tillämpat, där värmväxlaren ses som en ihålig cylinder där ytterradien r_b är den totala radien på värmväxlaren. För att beräkna R_c i denna metod ansätts en inre effektiv radien som beräknas enligt följande:

$$r_{eff} = r_o\sqrt{n} \quad (14)$$

Vidare beräknas R_c enligt:

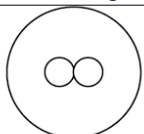
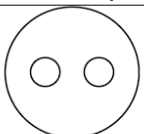
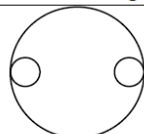
$$R_c = \frac{\ln(r_b/r_{eff})}{2\pi\lambda_c} \quad (15)$$

En annan metod för att beräkna R_c är enligt Loveridge och Powrie (2014) en metod utvecklad av Remund (1999) som använder sig av en empiriskt framtagen formfaktor S_b beroende på förhållandet mellan borrhålets och kollektorrörets radier och vilken typ av konfiguration de har. S_b anges som:

$$S_b = \beta_0 \left(\frac{r_b}{r_o}\right)^{\beta_1} \quad (16)$$

Konstanterna β_0 och β_1 är framtagna empiriskt och beror på rörens konfiguration. Värdena och de olika konfigurationerna visas i tabell 3

Tabell 3. Val av β_0 och β_1 beroende på kollektorkonfiguration, (Loveridge, Powrie 2014 efter Remund (1999)).

	Configuration A Shanks central and touching	Configuration B Intermediate position of equal shank spacing	Configuration C Shanks touching borehole edge
			
β_0	20.10	17.44	21.91
β_1	-0.9447	-0.6052	-0.3796

Vidare beräknas R_c enligt denna formel:

$$R_c = \frac{1}{S_b\lambda_{grout}} \quad (17)$$

Eftersom ovanstående metoder är anpassade för borrhål och inte för energipålar har andra metoder utvecklats för de senare. Loveridge och Powrie (2014) beskriver en tvådimensionell värmeöverföringsmodell, *pile only model*, som används i beräkningsprogrammet COMSOL. R_c beräknas även här med en formfaktor S_c som beräknas enligt:

$$S_c = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} q_{p(i)}}{\lambda_c(T_b - T_p)} \quad (18)$$

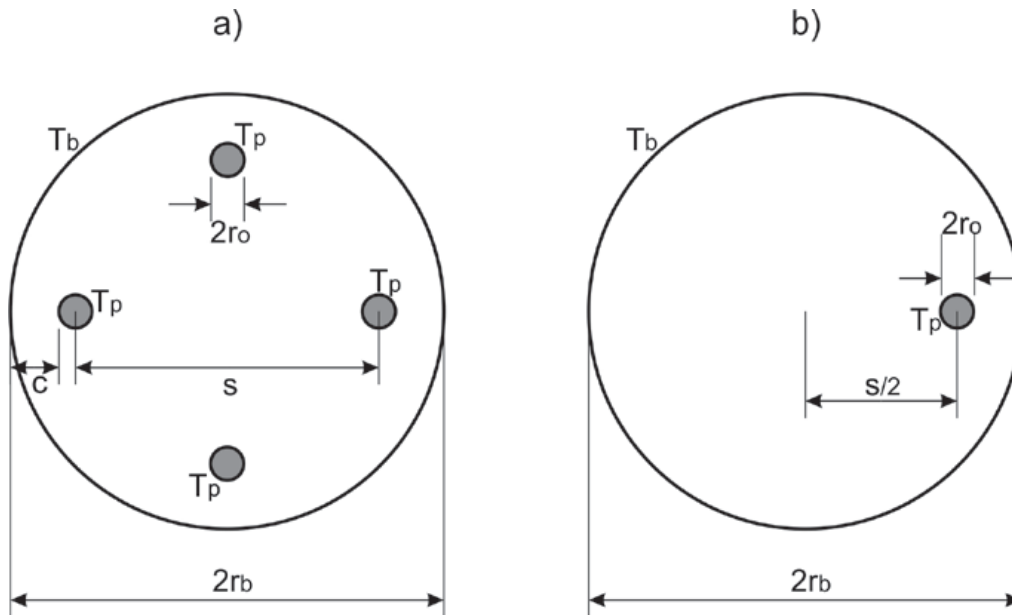
där $q_{p(i)}$ är det beräknade värmeflödet kring ett enda kollektorrör och n är antalet rör. Enligt Loveridge och Powrie (2014) kan formfaktorn beräknas analytiskt enligt:

$$S_c = \frac{2\pi}{\cosh^{-1}\left(\frac{4r_b^2 + 4r_o^2 - s^2}{8r_b r_o}\right)} \quad (19)$$

där s är avståndet mellan rören, centrum till centrum. Se figur 3.

Vidare beräknas R_c som:

$$R_c = \frac{1}{S_c \lambda_{grout}} \quad (20)$$



Figur 3. a,b) Principiella skisser över en generaliserad geometri för *pile only model* och dess komponenter, (Loveridge, Powrie 2014)

Ytterligare metoder för fallet där endast två kollektorrör är installerade beskrivs i Loveridge och Powrie (2014). En av dessa är framtagen av Sharqawy, Mokheimer och Badr (2009) och är baserad på en numerisk modellering av borrhålsvärmexlaren. Uttrycket beskrivs enligt följande:

$$R_c = \frac{1}{2\pi\lambda_c} \left[-1,49 \left(\frac{s}{2r_b} \right) + 0,656 \ln \left(\frac{r_b}{r_o} \right) + 0,436 \right] \quad (21)$$

Ett liknande samband, Hellström (1991) gäller för fallet där marken och betongen har samma värmeledningsförmåga. Det är den första i ordningen av de så kallade *multipole*-ekvationerna.

$$R_c = \frac{1}{4\pi\lambda_c} \left[\ln \left(\frac{r_b}{r_o} \right) + \ln \left(\frac{r_b}{s} \right) \right] \quad (22)$$

Loveridge och Powrie (2014) presenterar en metod (*Pile and ground model*) för att beräkna en formfaktor som både tar hänsyn till antal rör, täckningslager (c) och dimensionerna på rör och påle. Denna formfaktor kan sedan användas i ekvation (20), med $S_{c(steady)}$ istället för S_c , för att beräkna R_c . Formfaktorn $S_{c(steady)}$ beräknas här enligt:

$$S_{c(steady)} = \frac{A}{B \ln \left(\frac{r_b}{r_o} \right) + C \ln \left(\frac{r_b}{c} \right) + \left(\frac{r_b}{r_o} \right)^D + \left(\frac{r_b}{c} \right)^E + F} \quad (23)$$

Konstanterna A, B, C, D, E och F anges i tabell 4 och beror på antal kollektorrör och förhållandet mellan värmeledningsförmågan i marken och för betongen.

Tabell 4. Val av A, B, C, D, E och F i ekvation (23), beroende på antal kollektorer och värmeledningsförmåga för betong och mark, (Loveridge, Powrie 2014).

	2 pipes			4 pipes		
	$\lambda_c = \lambda_g$	$\lambda_c = 2\lambda_g$	$2\lambda_c = \lambda_g$	$\lambda_c = \lambda_g$	$\lambda_c = 2\lambda_g$	$2\lambda_c = \lambda_g$
A	4.919	4.34	4.853	3.33	3.284	3.369
B	0.3549	0.317	0.345	0.1073	0.1051	0.1091
C	-0.07127	-0.001228	-0.1676	-0.07727	-0.05823	-0.09659
D	-11.41	-10.18	-16.76	-10.9	-11.98	-11.79
E	-2.88	-2.953	-3.611	-2.9	-2.782	-3.032
F	0.06819	-0.002101	0.1938	0.1278	0.1027	0.1535

3 Termisk grundläggning

Sedan 1980-talet har geoenergi erhållits ur olika typer av modifierade grundläggningselement och användningen har sedan dess ökat i omfattning, (Brandl 2006). Termisk grundläggning är en term som ofta används för att beskriva en sådan typ av grundläggning. Innebörden är att djupa grundläggningselement, såsom pålar, spont, större grundplattor och membranväggar integreras med kollektorlangar, och på så sätt bildar en markvärmesväxlare.

Tack vare betongens goda värmeledningsförmåga och dess höga specifika värmekapacitet lämpar det sig väl att använda grundläggningselement i betong i ett sådant värmesväxlingssystem, (Brandl 2006). Typiska, praktiskt tillämpbara, tabellvärden för betongs värmeledningsförmåga och specifika värmekapacitet är $1,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ respektive $1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (Burström 2007).

Merkostnaden för installation av kollektorerna i samband med grundläggningsarbete med pålning har visat sig vara betydligt lägre jämfört med exempelvis installation av en konventionell bergvärmebrunn, eftersom grundläggningselementens primära uppgift är att bära upp konstruktionen, och kommer att anläggas ändå. (Brandl 2006)

Eftersom detta arbete inriktat sig på enbart pålar kommer de vanligaste påltyperna avsedda för grundläggning att beskrivas nedan. Det finns ett flertal olika typer av energipålar, vilka i grund och botten är grundläggningspålar vars utformning och tillverkningsprocess skiljer sig beroende på markens geologi och konstruktionen ovanför som den ska bära.

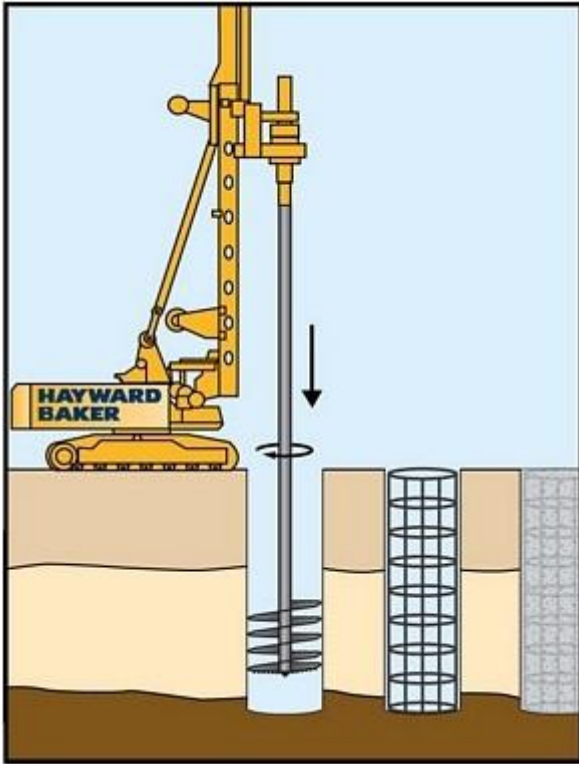
3.1 Allmänt om påltyper

Nedan följer en beskrivning av några olika påltyper som vanligen används vid grundläggningsarbeten.

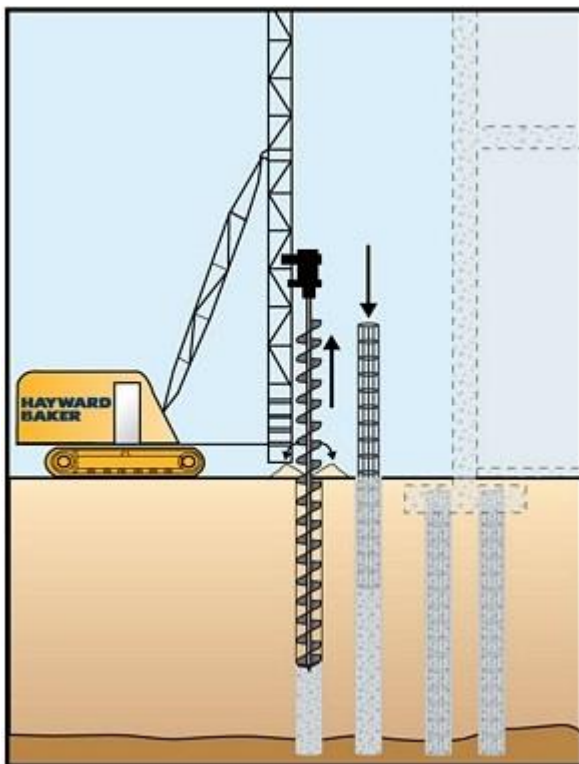
Utomlands är den så kallade grävpålen en av de vanligaste (se figur 4). En grävpåle är i princip ett borrar eller grävt hål i marken med dimensioner vanligen mellan 0,8-2 m i diameter. Påltypen är icke massundanträngande och pålen gjuts direkt i det borrarade hålet med eller utan armeringskorg.

Grävpålar kan både utformas som spetsbärande eller mantelbärande beroende på djup till jordlager med tillräcklig bärförmåga eller fast berg. En av de största fördelarna med grävpålar är att de kan överföra stora laster. I Sverige är dock grävpålen relativt ovanlig, vilket beror på svårigheten att beräkna kostnader för dem i blockiga moränjordar i kombination med grundvatten och lutande berggrundsytter, vilka ofta förekommer i Sverige. (Olsson, Holm 1993).

Den så kallade CFA-pålen, *Continuous Flight Auger*, (se figur 5) är en variant av en grävpåle där gjutningen sker in-situ direkt via jordskruven (*augern*) när den dras tillbaka, (Loveridge 2012). Enligt Olsson och Holm (1993) används metoden flitigt i Europa och är en bra metod för mantelburna pålar i homogena friktionsjordar



Figur 4. Principen för grävpÅlar (borrade pÅlar), (Hayward Baker 2014b).

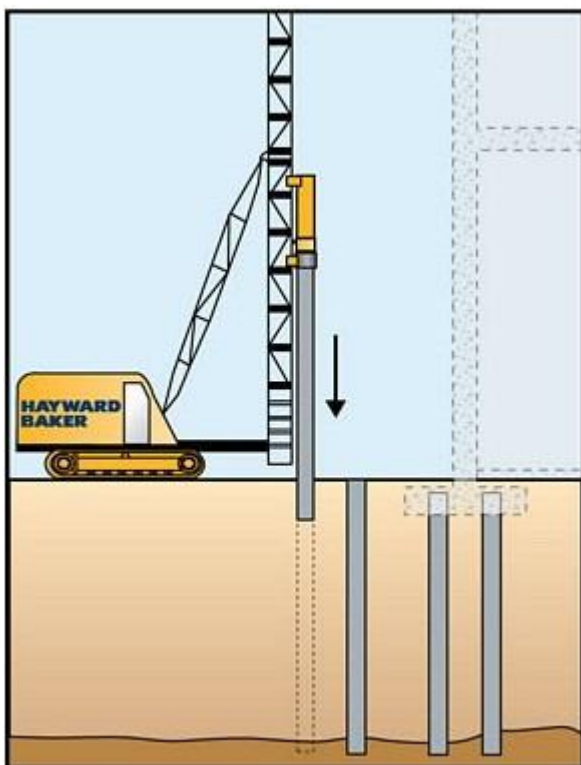


Figur 5. Principen för CFA-pÅlar, (Hayward Baker 2014a).

Grundläggningspålar av stål är också förekommande. Dessa brukar delas in i grova stålrörspålar och slanka stålrörspålar. Grova stålrörspålar kan utformas med olika diametrar från ca 0,3-1,5 m. Pålen är utrustad med en plansko eller bergsko i botten, och slås ner i marken med en pålkran (se figur 6).

Efter slagningen armeras pålen eventuellt genom nedsänkning av en armeringskorg och injekteras sedan med betong. Slanka pålar, även kallade mikropålar, används i Sverige främst vid grundläggningsförstärkning av befintliga byggnader samt som grundläggning vid nybyggnation av mindre byggnader. Typiska diametrar för slanka pålar är 60 -100 mm. (Olsson, Holm 1993)

Den vanligaste typen av grundläggningspåle i Sverige är en prefabricerad betongpåle som slås ner i marken med en pålkran. Oftast är tvärsnittet kvadratisk med standardiserade mått på 235, 270 och 275 mm. Pålen är i Sverige slakarmerad och är även skarvbar. Pålar som stoppslås ner till fast berg eller fasta jordlager har en fast monterad bergsko i spetsen. (Olsson, Holm 1993)



Figur 6. Principen för slagna pålar, (Hayward Baker 2014c).

3.2 Utformning av energipålar

Eftersom grävpålar är vanligt i övriga Europa är också de vanligaste energipålarna där utformade som grävpålar. Kollektorslangarna monteras fast i armeringskorgen (se figur 7), antingen som en slinga utmed armeringsnätet eller i pålens längdriktning. I CFA-pålar monteras kollektorslangen direkt efter gjutning i den våta betongen, ofta i pålens centrum tillsammans med en armeringsstång. Denna metod gör det svårare att positionera kollektorslangarna. (Loveridge 2012)

Stålrörspålar med ingjuten kollektorslang är också ett alternativ som energipåle (Lennon, Watt & Suckling 2009). Enligt Brandl (2006) har dessa något slankare pålar något sämre termiska egenskaper jämfört med grövre borrade energipålar som rymmer fler kollektorer.

Påltypen som behandlas i detta arbete är en prefabricerad betongpåle med kvadratisk tvärsnitt som slås ner i marken. Energipålar som är utformade på detta sätt gjuts enligt standarden, med slak- armering och byglar. Oftast är kollektorslangen utformad som ett U-rör, monterat i pålens centrum, (Lennon, Watt & Suckling 2009).



Figur 7. Bilden visar en armeringskorg med fastmonterade kollektorrör som ska användas till en borrarad grävpåle, (Brandl 2006).

3.3 Energipålars termiska prestanda

Vad gäller termiska prestanda för en energipåle beror dessa huvudsakligen på samma faktorer som för ett konventionellt borrhål. Dock kan energipålar utformas på många olika sätt både vad gäller materialval, dimension, längd och kollektorkonfiguration, vilket spelar roll vid uppskattningen av möjligt energiuttag, (Loveridge 2012).

Enligt Brandl (2006) kan som riktvärde energipålar med diameter mellan 0,4-0,5 m ge ett effektuttag på 40-60 W/m, och 35 W/m² kontaktyta med marken för pålar med diameter större än 0,6 m.

Rosén et al. (2001) refererar till Fromentin et al. (1997) där en undersökning gjorts angående energipålars termiska prestanda kopplat till ett värmepumpssystem. De fann att marken normalt måste återladdas med 70-90% av uttagen energimängd under sommarhalvåret för att motverka nedfrysning av marken kring pålarna under uppvärmningssäsongen. Att er hålla kyla ur systemet sommartid är alltså en fördel för att hålla systemet i balans temperaturmässigt. Pålarna i försöket var 0,35 m i diameter och var utrustade med två till fyra U-kollektorer och betongens värmeledningsförmåga var ca 1,8 W/(m*K). Resultaten redovisas i tabell 5.

Tabell 5. Erhållen effekt från energipålar beroende på markens värmeledningsförmåga, (Rosén et al. 2001).

Markens värmeledningsförmåga [W/(m·K)]	Värmeeffekt från mark [W/m]
1,3	25-30
2,3	30-35

Rosén et al. refererar även till Koene et al. (2000) som också anger typiska värden för möjligt energiuttag för energipålar i olika typer av jordar. Värdena redovisas i tabell 6.

Tabell 6. Erhållen effekt från energipålar beroende på typ av jord, (Rosén et al. 2001).

Typ av jord	Värmeeffekt från mark [W/m]
Torr sand	<20
Vattenmättad sand	55-65
Fuktig lera	30-40

Om ett betydande grundvattenflöde finns har detta positiv påverkan på energipålesystemets termiska prestanda. Marktemperaturen kan då bli nästintill helt återställd mellan säsongerna, både vid värmeuttag och vid värmetillförsel. Riktvärdet för värmeuttag kan då ökas till mer än 50 W/m och uttaget av frikyla kan ökas till mer än 30 W/m, (Rosén et al. 2001).

3.4 Referensanläggningar

Dokumenterade undersökningar av anläggningar kopplade till värmepump med energipålar som markvärmväxlare finns, och några sådana refereras nedan. Dessa undersökningar och försök har främst genomförts under en hel uppvärmningssäsong för en byggnad, med energipålar som grundläggning.

3.4.1 Hamada et al.

Hamada et al. (2007) undersökte effekterna av användandet av energipålar som markvärmväxlare kopplat till en värmepump. Systemets prestanda vid uppvärmning av utrymmen i en byggnad undersöktes också. Energipålesystemet bestod av totalt 26 stycken energipålar som var 9 m långa. Testet genomfördes över en hel säsong och visade att energiförsörjningen från pålarna motsvarade den förväntade förbrukningen, (Hamada et al. 2007). Beroende på typ av kollektor erhöles effektuttag för pålarna mellan 53,81-68,71 W/m pållängd. En COP-faktor på 3,9 uppnåddes för detta värmesystem.

3.4.2 Wood, Liu och Riffat

Wood, Liu och Riffat (2010) testade prestanda hos ett energipålesystem kopplat till en värmepump som försåg en byggnad med värme. Systemet bestod av 21 stycken 9 m långa betongpålar, 300 mm i diameter, med en enkel U-kollektor i varje påle. Endast 16 stycken av pålarna användes för värmeutvinning ur marken. Dessa var kopplade till värmepumpen i fyra cirkulationskretsar. Resultaten i försöket visar att energipålarna klarar av att förse byggnaden tillräckligt med värme jämfört med vad som förbrukas, och en COP-faktor på 3,62 uppnåddes vilket ligger inom rekommendationerna (3,5–4,5) enligt Wood, Liu och Riffat. Ett medelvärde för effekten som värmepumpen levererade över uppvärmningssäsongen var 5,9 kW.

Ett av huvudsyftena i försöket var att kontrollera påverkan av ytttemperaturen och temperaturen i marken, vilka varierar över säsongen vid dessa relativt små djup. För att kontrollera detta försågs marken med termistorer på bestämda avstånd från konstruktionen.

Ingen större påverkan av marktemperaturen rapporterades från ca 5 m och längre bort från de yttersta energipålarna. Dock påverkades marktemperaturen med ca 1-2,5 ° C, jämfört med vad den

annars skulle varit med hänsyn till yttemperaturen, vid avstånden 1-2,5 m från byggnaden och de yttersta pålarna.

3.4.3 Pahud och Hubbuch

Pahud och Hubbuch (2007) undersökte ett energipålesystems prestanda på Zürichs flygplats där fler än 300 energipålar kopplade till värmepump används för uppvärmning och kylning.

Mätningarna skedde under en tvåårsperiod, och systemets balans mellan värme och kyla över året undersöktes. De uppmätta resultaten jämfördes med simulerade värden som visade sig stämma väl. Simuleringsprogrammet som användes var PILESIM version 2, (Pahud, Hubbuch 2007).

Pålarna var mellan 0,9-1,5 m i diameter, var i genomsnitt 26,8 m långa och var installerade med 5 U-kollektorer i varje påle. Medelvärdet för det uppmätta effektuttaget från pålarna var 45 W/m vilket jämfördes med designvärdet 49 W/m.

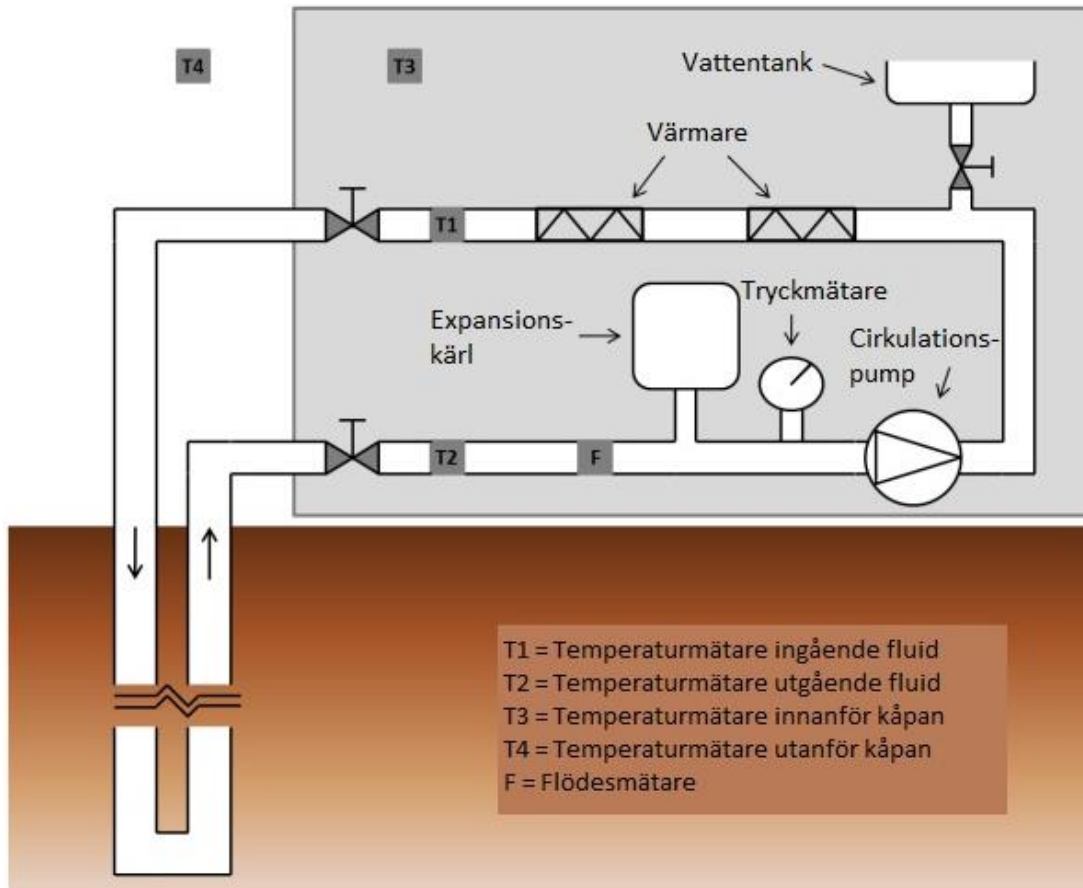
Slutsatserna som dras är att systemets täcker upp energibehovet väl och det kan även användas för direkt kylning under varmare perioder under året. Dessutom stämde simuleringen av systemet väl med uppmätta värden. Värmepumpens COP-faktor beräknades till 4,5, (Pahud, Hubbuch 2007).

3.4.4 Gao et al.

Gao et al. (2008) genomförde termiska tester på energipålar som användes för en byggnad i Shanghai. Anläggningen bestod av ett antal energipålar som var utrustade med antingen enkla eller dubbla U-kollektorer (de senare även kallade W-kollektorer). Gao et al. utförde en typ av termiskt responstest (benämns *thermal performance test* i artikeln) men använde sig istället av konstant temperatur på den cirkulerande vätskan. Detta åstadkoms med hjälp av en vattentank där väskan värmdes till en viss bestämd temperatur. Pålarnas termiska motstånd beräknades utifrån mätningen (se tabell 2) och de olika kollektorkonstellationerna jämfördes. Pålarnas uppmätta effektuttag låg mellan 58-110 W/m beroende på kollektorkonstellation och flödestyp. W-kollektorn visade sig vara mest effektiv vad gällde termisk prestanda för de flöden som vanligtvis används i dessa system. En numerisk modell jämfördes också med de uppmätta värdena vilket gav god överensstämmelse, (Gao et al. 2008).

4 Termiskt responstest

Ett termiskt responstest (TRT) utförs genom att en uppvärmd vätska tillåts cirkulera i det slutna markvärmeväxlingsystemet. Temperaturen på vätskan mäts innan den går ner i marken och när den kommit upp. Om marken är kallare än vätskan som går in i systemet kommer värme från vätskan att överföras till marken via värmeväxlarens komponenter. Den returnerande vätskan kommer då vara kallare än den inkommande, (Loveridge 2012). Då det finns mobila testutrustningar (se figur 8) för att utföra termiska responstest i fält för att mäta markens värmeledningsförmåga och markvärmeväxlarens termiska motstånd, är detta en vanligt förekommande testmetod. Dessutom är dessa testriggar inte särskilt utrymmeskrävande, vilket ofta är en fördel i fält.



Figur 8. Principskiss över TRT-utrustning (översatt), (Hemmingway, Long 2012).

Genom analys av ändringen hos skillnaden mellan in- och utgående fluidtemperatur ($T_{ner}-T_{upp}$) som funktion av tiden och med vetskap om applicerad effekt på värmaren kan markens värmeledningsförmåga, värmekonduktivitet, beräknas. Även värmeväxlarens termiska motstånd kan beräknas med hjälp av denna mätmetod, som ofta tillämpas för borrhållade bergvärmebrunnar, (Loveridge 2012).

Utomlands har termiska responstest genomförts på olika typer av energipålar där bl. a. värden på den omkringliggande markens värmeledningsförmåga och pålens termiska motstånd redovisats, (Loveridge 2012) se tabell 7.

För att utvärdera mätdata finns ett antal olika metoder. Enligt Gehlin (2002) är dessa utvärderingsmetoder aktuella för borrhåll:

- Linjekälla-metoden (*Line heat source method*)
- Cylinderkälla-metoden (*Cylinder source method*)
- Systemmodeller i 1D och 2D där parametrar beräknas med hjälp av numeriska metoder

En detaljerad beskrivning av olika utvärderingsmetoder för termiskt responstest hittas även i Javed, Nakos och Claesson (2012).

4.1 Linjekälla-metoden

Det har visats att användningen av den relativt enkla metoden, linjekälla-metoden som förklaras nedan, har jämförbara resultat med mer sofistikerade analytiska och numeriska modeller om de ingående parametrarna i linjekälla-metoden är väl kontrollerade, (Javed, Nakos & Claesson 2012, Liebel, Javed & Vistnes 2012).

På grund av sin enkelhet är denna metod som vanligt använd av professionellt praktiserande vid utvärdering av ett termiskt responstest för borrhål. Jämfört med de mer sofistikerade metoderna krävs dessutom färre ingångs-parametrar. Därför kommer det termiska responstestet i detta arbete att utvärderas med linjekälla-metoden.

Vid användning av linjekälla-metoden antas borrhålet vara en oändligt lång, värmeöverförande linje som överför värme radiellt kring en linje som representerar ett konstant injicerat värmeflöde, (Loveridge 2012). Temperaturfältet runt linjekällan beskrivs av ekvation (24) som beror på tiden t och radien r runt linjekällan vid konstant injicering av värmeflöde (q) enligt Gehlin (2002), som hänvisar ekvationen till Carslaw och Jaeger (1959). λ är markens värmeledningsförmåga.

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (24)$$

För värden större än 5 för parametern $\left(\frac{\alpha t}{r^2}\right)$ även kallad Fouriers tal F_o , kan uttrycket approximeras till:

$$E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \quad (25)$$

där γ är Euler-Mascheronis konstant (0,5772...). Det maximala felet är enligt Gehlin 10 % för $\left(\frac{\alpha t}{r^2}\right) \geq 5$ och 2,5 % för $\left(\frac{\alpha t}{r^2}\right) \geq 20$. Den termiska diffusiviteten i marken α , beräknas enligt:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho S_{vk}} \quad (26)$$

där S_{vk} är markens specifika värmekapacitet och ρ är markens densitet.

Då temperaturändringen i marken sker via en värmebärande fluid utvärderas temperaturändringen i fluiden genom att beräkna värmeändringen runt linjekällan för $r=r_b$ och att lägga till borrhålets termiska motstånd R_b . Temperaturen för fluiden som funktion av tiden kan då skrivas på följande vis:

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \left(\ln\left(\frac{4\alpha t}{r_b^2}\right) - \gamma\right) + qR_b + T_0 \quad (27)$$

där T_0 är den ostörda markens temperatur.

Enligt Gehlin används denna metod i praktiken genom att beräkna riktningskoefficienten k för medeltemperaturen hos vätskan mot den naturliga logaritmen av tiden. Uttrycket skrivs enligt följande:

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + m \quad (28)$$

där

$$k = \frac{q}{4\pi\lambda} = \frac{Q/H}{4\pi\lambda} \quad (29)$$

Vidare kan följande uttryck för värmeledningsförmågan ställas upp:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k H} \quad (30)$$

(Gehlin 2002)

Vid termiska responstest som löper under lång tid ska Fouriers tal vara större än 20, (Javed, Fahlén & Claesson 2009). För energipålar krävs längre termiska responstest då värmen ska hinna ta sig genom betongen, (Loveridge 2012).

När markens värmeledningsförmåga beräknats kan denna användas för att beräkna värmeväxlarens, borrhålets eller energipålens, termiska motstånd R_b . R_b beräknas enligt följande ekvation, (Beier, Smith 2005):

$$R_b = \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\frac{T_{f,1hr} - T_0}{k} - \ln \left(\frac{4\alpha t_{1hr}}{\delta r_b^2} \right) \right] \quad (31)$$

där δ är en konstant ungefär lika med 1,78 ($\gamma=0,5772=\ln(1,78)$). $T_{f,1hr}$ är temperaturen efter 1 timme, vilket kommer att vara m i ekvation (28) då $\ln(1)=0$. Parametern t_{1hr} är alltså tiden en timme. Värmediffusiviteten α har här enheten m^2/h .

4.2 Cylinderkälla-metoden

En liknande metod som linjekälla-metoden, cylinderkälla-metoden, kan också användas som utvärderingsmetod. Linjekälla-metoden är egentligen en förenkling av denna, där utgångspunkten är en oändligt lång cylinderkälla som ger ifrån sig ett konstant värmefflöde (kollektorrören ses här som en värmeutstrålande cylinder med en fast diameter). Temperaturen beroende av tiden och radien från cylinderns mitt beskrivs enligt denna ekvation:

$$T_g(r, t) = \frac{q}{\lambda} \cdot G(z, p) = \frac{q}{\lambda} \cdot G \left(\frac{\alpha t}{r^2}, \frac{r}{r_0} \right) \quad (32)$$

Cylinderkälla-metoden beskrivs enligt Gehlin (2002) närmare i Ingersoll, Zobel och Ingersoll (1954).

4.3 Andra metoder

Även andra metoder finns dokumenterade för att utvärdera och analysera ett termiskt responstest. Dessa metoder kan vara numeriska metoder som i Shonder och Beck (1999) och Austin (1998). Dessa har inte studerats i detta arbete.

4.4 Tillämpning på energipålar

Energipålar beter sig annorlunda som värmeöverförare jämfört med en konventionell bergvärmebrunn. Då de ovan redovisade metoderna är framtagna för borrhål, som ofta är 100 m och djupare, kan antagandet om en oändligt lång linje- eller cylinderkälla för energipålar som är omkring 10-20 m långa diskuteras. Dessutom blir inverkan från ändarna hos pålen än mer betydande.

De största avvikelserna mellan energibrunnar och energipålar är att energipålens geometri skiljer sig markant, de har större tvärsnittsarea och är mycket kortare, (Loveridge 2012). Dock har flertalet av de termiska responstest som genomförts på energipålar utvärderats med hjälp av linjekälla-metoden, (Hemmingway, Long 2013, Brettmann, Amis & Kapps 2010, Wang et al. 2013), se även kapitel 4.5. Olika metoder har testats och gett likande resultat, (Brettmann, Amis & Kapps 2010). Enligt Loveridge (2012) lämpar sig linjekälla-metoden framförallt på pålar med en diameter mindre än 300 mm.

4.5 Referensobjekt – TRT på energipålar

I litteraturen finns tester i fullskala rapporterade, där olika sorters energipålar undersökts och termiska egenskaper studerats (Lennon, Watt & Suckling 2009, Wang et al. 2013, Brettmann, Amis & Kapps 2010, Loveridge et al. 2014). I de fall som studeras här görs ofta ett termiskt responstest på pålen eller pålgruppen. I detta kapitel redovisas några sådana fall där termiskt responstest tillämpats på energipålar med lyckat resultat och där, enligt författarna, pålitliga värden på markens värmeledningsförmåga och pålens termiska motstånd redovisats. En sammanfattning av resultaten finns i Tabell 7.

4.5.1 Lennon, Watt och Suckling

Lennon, Watt och Suckling (2009) utförde ett antal termiska responstest på två olika påltyper i Skottland. Båda pålarna var av typen slagen påle, en var i betong och den andra utformad som betongfylld stålrörspåle. Pålen i betong var en prefabricerad påle med måtten 270 x 270 mm och 12 m lång, med en ingjuten U-kollektor. Stålrörspålen var 244 mm i diameter och även den försedd med en U-kollektor som installerades innan injektering med betong. Ett termiskt responstest genomfördes sedan, med känd applicerad effekt och mätning av in- och uttemperatur på fluiden som cirkulerade i kollektorröret. Dessa data användes sedan för att beräkna markens omkringliggande värmeledningsförmåga samt pålarnas termiska motstånd, vilka redovisades (se tabell 7).

4.5.2 Hemmingway och Long

Hemmingway och Long (2013) utförde på Irland ett liknande test på två olika platser med olika pålar. Pålarna var CFA-pålar, *Continous Flight Auger*, och 14,5 m respektive 6 m långa. Huvudsyftet med försöket var att undersöka tillämpbarheten av ett termiskt responstest med en testrigg som vanligen används för geotermiska borrhål. De uppmätta värdena på den omkringliggande markens värmeledningsförmåga jämfördes sedan med värden framtagna i laboratorium. Den uppmätta värme-

ledningsförmågan (se tabell 7) jämfördes även med beräknade och viktade värden från den geologiska modellen. Resultaten visar ingen större spridning på in-situ-uppmätta, i laboratorium bestämda och uppskattade värden, vilket tyder på att termiska responstest är tillämpbara på energipålar.

4.5.3 Brettmann, Amis och Kapps

Brettmann, Amis och Kapps (2010) anordnade ett test av där tre typer av energipålar tillverkades. Pålarna var så kallade APGE-pålar, *Auger Pressure Grouted Energy*, en typ av CFA-påle och gjordes till ett djup på 18,3 m. De tre pålarna arrangerades i en likformig triangel med 4,5 m mellan pålarna. I mitten av triangeln gjordes en borrhålsprovtagning, som låg till grund för den geologiska modellen. Två av pålarna tillverkades med standardcement i injekteringen med vct 0,45. Dimensionerna på dessa var 305 mm och 457 mm i diameter. Den tredje pålen tillverkades med en särskild termisk injekteringsmix bestående av silikastoft (finkornigt pulver av amorf kiseloxid, (Burström 2007)), bentonit och sand, vanligen använd i borrhål. Dimensionen på den var 305 mm. Alla pålar var utrustade med dubbla U-kollektorer som var monterade i ett armeringsstag med distanser i plast.

Ett termiskt responstest genomfördes sedan i de tre pålarna. Pålarna med standardinjekteringen testades med både enkla och dubbla U-kollektorer inkopplade. Genom en ingjuten termistor i pålen kunde temperaturmätning även ske där. Den uppmätta värmeledningsförmågan presenterades (se tabell 7) och slutsatserna som drogs var att testet är användbart för att mäta värmeledningsförmågan i omkringliggande mark trots att metoden i första hand är utformad för borrhål. En annan slutsats var att bättre resultat för värmeledningsförmågan erhöles utifrån temperaturmätning med termistorerna i pålarna, (Brettmann, Amis & Kapps 2010).

4.5.4 Loveridge

Loveridge et al. (2014) använder sig av samma pålar och testplats som i Brettmann, Amis och Kapps (2010) och utför termiska responstest på pålarna och undersöker påverkan på testresultaten beroende på pålens diameter. Val av utvärderingsmetod och testtid bör ses över vid större påldimensioner, då de skiljer sig än mer från borrhål dimensionsmässigt. Dock fungerar metoden bra för pålar med ca 300 mm i diameter. I artikeln beskrivs också en transient utvärdering av mätdata.

4.5.5 Wang et al.

Termiska responstest på energipålar i Australien, har också utförts. Wang et al. (2013) utförde tre stycken responstest på en 16,1 m djup grävpåle, 600 mm i diameter. Pålen var utrustad med tre U-kollektorslingor. Två stycken borrhål, placerade 0,5 m och 2 m från energipålen, var installerade med temperaturmätare för att mäta marktemperaturen under det termiska testet. De tre responstesterna som utfördes varade mellan 3 och 52 dagar. Det första gjordes endast i en enkel U-slinga. De andra två utfördes efter det att temperaturen återgått till ursprunget efter uppvärmningen. Alla tre U-slingorna var då inkopplade, och värmdes upp i 9 respektive 52 dagar. Däremellan 47 dagars avsvälningstid.

Resultaten utvärderades med linjekälla-metoden (se kapitel 4.1). De slutgiltiga värdena på värmeledningsförmåga blev inte konsekventa (se tabell 7). Detta troddes bero på större temperaturfluktuationer uppkomna på grund av solstrålning som värmdes upp toppen av betongpålen. Detta verkade ha påverkat värmebärandevätskan trots kollektorslangarna var väl isolerade från toppen av pålen till testriggen. (Wang et al. 2013)

Tabell 7. Resultatsammanställning från termiska responstest.

Påtyp	Dimension [mm]	Kollektortyp	Markens värmeledningsförmåga λ_g [W/(m*K)]	Energipålens termiska motstånd R_b [(m*K)/W]	Källa
Prefabricerad betongpåle, kvadratisk tvärsnitt	270 x 270	Enkelt U, 32 mm	2,56	0,17	(Lennon, Watt & Suckling 2009)
Slagen stålrörspåle, med betonginjektering	Ø 244	Enkelt U, 32 mm	2,37	0,11	(Lennon, Watt & Suckling 2009)
CFA	Ø 250	Enkelt U	3,23	-	(Hemmingway, Long 2013)
CFA 2 st i grupp	Ø 300	Enkelt U	2,87	-	(Hemmingway, Long 2013)
APGE	Ø 300	Enkelt U/ Dubbelt U	2,98/ 2,91	-	(Brettmann, Amis & Kapps 2010)
APGE	Ø 450	Enkelt U/ Dubbelt U	3,27/ 2,92	-	(Brettmann, Amis & Kapps 2010)
Termisk mix	Ø 300	Dubbelt U	2,32	-	(Brettmann, Amis & Kapps 2010)
Grävpåle	Ø 600	Enkelt U/ 3U kort tid/ 3U lång tid	4,19/ 4,99/ 3,75	-	(Wang et al. 2013)

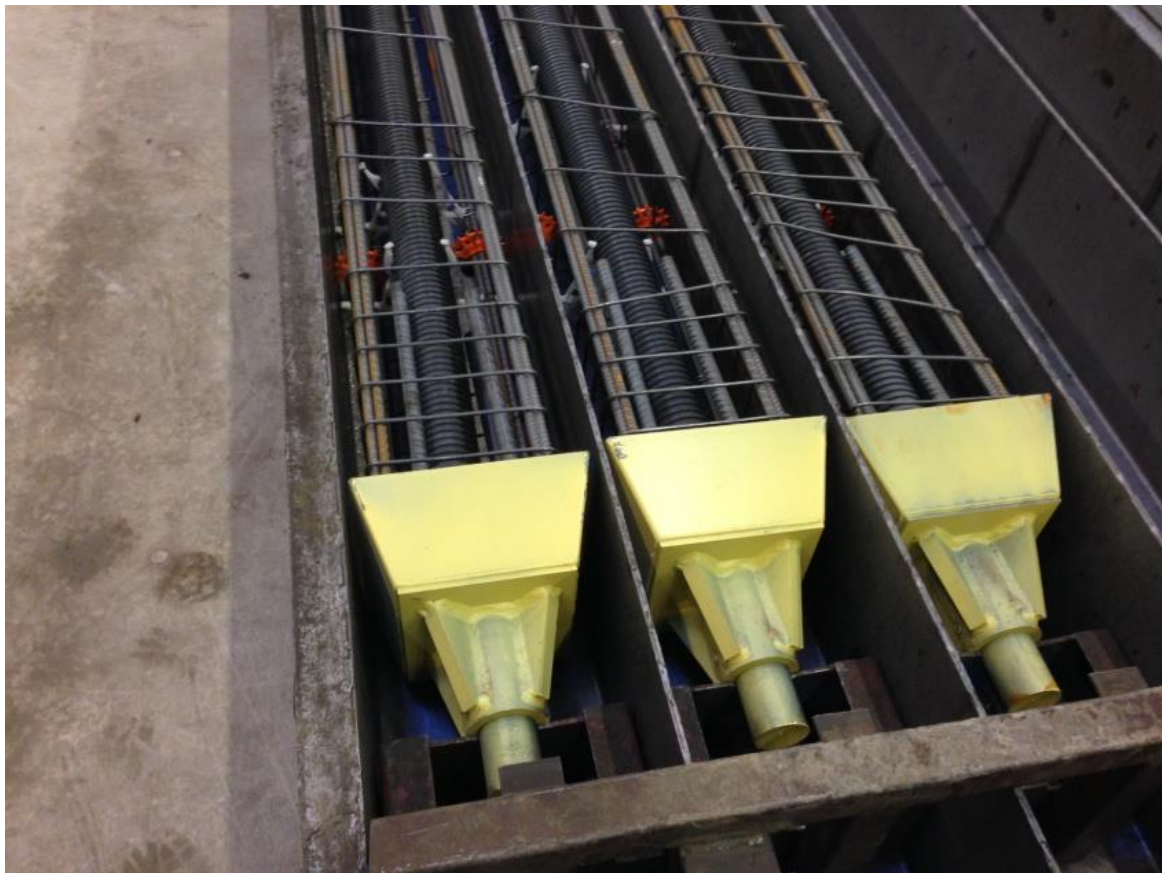
5 Utförande av test

5.1 Energipålens utformning

De pålar som Peab lät tillverka för testet var tre stycken modifierade standardpålar SP2 i betong med kvadratisk tvärsnitt med dimensionerna 270 X 270 mm (se figur 9).

Pålarna utformades med ett plaströr, 75 mm i diameter, i pålens centrum. Röret sträckte sig längs hela pålens längd, som var 10 m. För att hålla röret på plats i centrum av pålen under gjutning användes speciella distanser som både såg till att röret hölls i centrum och dessutom motverkar att det flyter upp under själva gjutningen. Förutom detta är pålen utformad enligt standard både vad gäller armering och betongkvalitet. En utförligare beskrivning av pålstandarder finns i Pålkommisionen (1996). Pålen utrustades även med bergsko då den skulle slås till fast jordlager eller berggrund.

Anledningen till att plaströret gjutits in i pålens centrum är att kollektorerna ska kunna installeras och hålrummet injekteras efter slagning. Denna utformning medför att pålen kan skarvas vid behov om de utrustas med skarvar i ändarna. Det är då viktigt att röret verkligen hamnar i centrum, framförallt i ändarna av pålen, så att kollektorn kan föras ner utan bekymmer i efterhand. Pålarna i detta försök skarvades inte och därmed har denna princip inte prövats i praktiken.



Figur 9. De tre energipålarna klara att gjutas. Inuti pålen ses plaströret och närmst i bild syns pålarnas bergsko. Foto: Simon Carlsson

5.1.1 Betongens sammansättning och egenskaper

Betongen som energipålarna gjuts med är samma typ av betong som används när vanliga standard-pålar gjuts. Betongblandningen innehåller ballast i form av grus 0-8 mm och makadam 16-22 mm. Ballasten är bruten och krossad i Önnestad stenbrott, där berggrunden främst är granit enligt SGU:s berggrundskartor, (SGU 2015a). Vanligt standard Portlandcement användes samt tillsatsmedel i form av flytmedel. Hållfasthetsklassen på betongen är C50/60. Betongens vct har beräknats utifrån erhållet recept från tillverkaren, och är ca 0,41–0,43. Betongens densitet beräknades också utifrån betongreceptet och är 2365 kg/m³.

Tre stycken testkuber göts med samma betongsats som den som användes till pålarna. En av dessa kuber har använts för att mäta betongens värmeledningsförmåga, specifika värmekapacitet och diffusivitet, med hjälp av en så kallad Hot Disk, (Hot Disk 2014).

Betongkuben våtsågades på mitten och en dubbelsidig mätning med Hot Disken gjordes därefter (se figur 10). Totalt gjordes sju mätningar med viss återhämtningstid på två olika mätytor. Först gjordes tre mätningar med ca 20 minuters återhämtningstid. Nästa mätning gjordes tre timmar senare. Därefter ett dygn senare. Efter det gjordes ytterligare två mätningar med en annan mätyta på kuben. Medelvärden av de uppmätta värdena för de olika parametrarna beräknades och sattes som betongens termiska egenskaper, se tabell 8. Mätning nummer ett plockades bort då den skiljde sig mest från övriga mätningar. Detta troddes bero på att provet fortfarande var något fuktigt efter våtsågningen.

Tabell 8. Resultatsammanställning av betongens termiska egenskaper.

Typ	Värmeledningsförmåga [W/(m·K)]	Specifik värmekapacitet [MJ/(m ³ ·K)]	Termisk diffusivitet [m ² /s]
Uppmätt	2,82	1,84	1,55E ⁻⁶
Tabellvärden (Burström 2007)	1,7	2,3	7,39E ⁻⁷

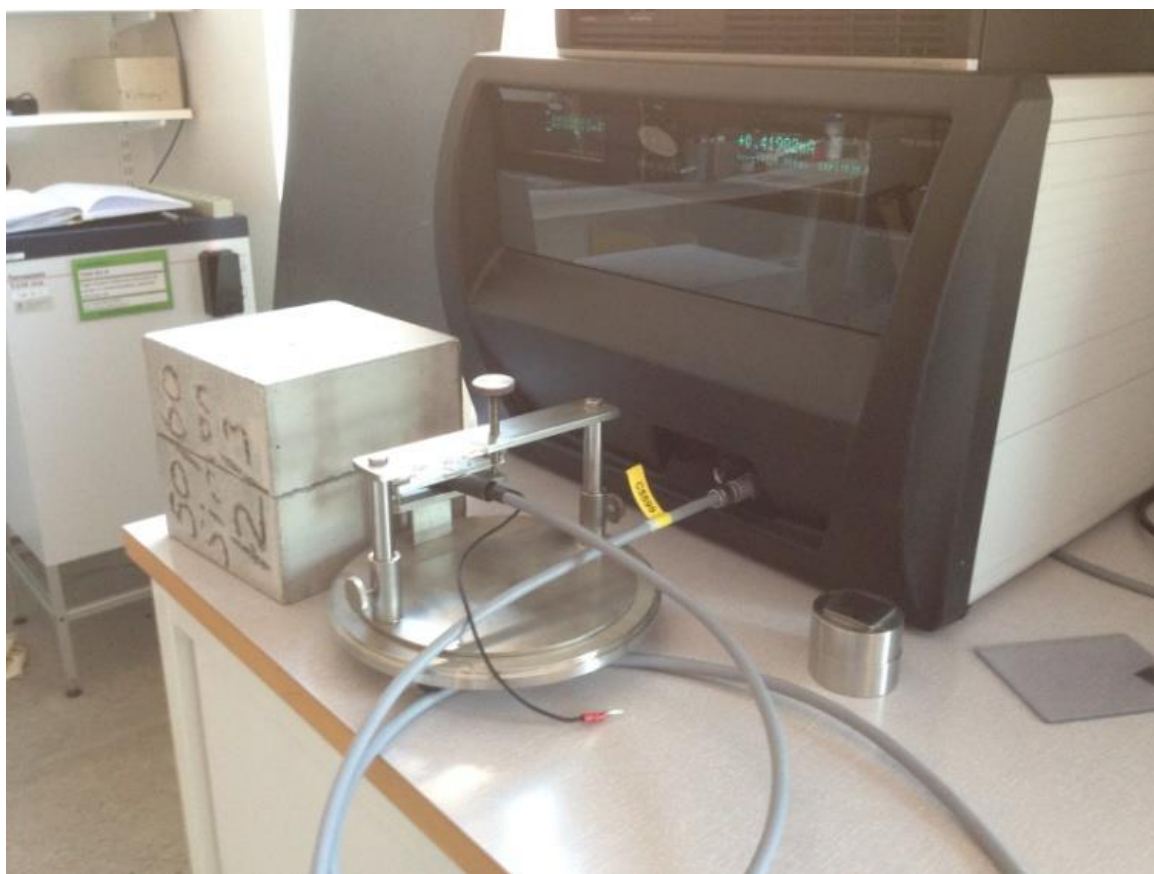
Med hjälp av betongens densitet kunde betongens specifika värmekapacitet beräknas till 770 J/(kg·K) vilket liknar praktiskt tillämpbara tabellvärden (1000 J/(kg·K)), (Burström 2007).

Alla mätresultat för pålbetongens termiska egenskaper kan ses i figur 22 i kapitel 6.

5.1.2 Kollektorernas utformning och egenskaper

Kollektorerna består av en enkel U-slinga i polyeten-rör (PE-rör) med ytterdiameter 32 mm. Rörväggens tjocklek är 3 mm. Kollektorerna är av samma typ som används i konventionella bergvärmebrunnar.

Värmeledningsförmågan för kollektorer av denna typ är ca 0,4 enligt simuleringsprogrammet EED (*Earth Energy Designer*) som används för att simulera borrhålsvärmexlare, (EED 2010).



Figur 10. Mätning av betongens termiska egenskaper med Hot Disk. Foto: Simon Carlsson

5.2 Testplats

Platsen där testet utfördes var lokaliserad i industriområdet Filborna i Helsingborg. Ca 100 m ifrån slagplatsen fanns sedan tidigare fem stycken borrhål, varav ett ca 340 m djupt. Enligt av borrharen erhållen borrhålsdata var jordlagerföljden 10 m sand och grus, därefter ca 4 m lerblandad sand. Med hjälp av information om jordlagerföljd från borrhålen kunde slutsatsen dras att pålarna kunde slås på platsen då djupet till fast berg inte skulle nås innan hela pållängden var nere i marken. Dock fanns inga data för markens geotekniska egenskaper, så jordens hållfasthet var inte känd. Enligt SGU:s karttjänst ska toppskiktet vara morän, (SGU 2015b). Då testplatsen var en del av en asfaltsbelagd tomtyta finns med största sannolikhet ett ca 50-60 mm tjockt bärlager med 0-50-grus under asfalten.

Tre pålar av samma typ som beskrivits i 5.1 installerades under en dag. Avståndet mellan påle 1 och påle 2 var 3 m. Avståndet mellan påle 2 och 3 var 0,6 m c/c. Det antas att påle 1 inte influeras av något annat än marken den själv trängt undan. Under testets gång bör alltså värmen bara överföras genom pålen och ostörd mark.

Innan försöket gjordes en beräkning av markens termiska egenskaper. Denna uppskattning gjordes med stor osäkerhet då kännedomen om testplatsens geologi inte var helt klar. Det antogs dock att det från markytan (under det förmodade bärlagret) var ca 10 m sand och grus. Under slagning noterades att jorden var mycket hård. Troligtvis berodde detta på att jorden är väl konsoliderad. Möjligtvis påträffades sandsten eller lersten.

Markens beräknade termiska egenskaper utifrån tabellvärde från Rosén et al. (2001) och Loveridge (2012) redovisas i tabell 9.

Tabell 9. Visar uppskattade termiska egenskaper för marken där pålen slogs, (Rosén et al. 2001, Loveridge 2012).

Uppskattade värden (tabellvärden) för	Sand/Grus/Lerblandad
Värmeledningsförmåga	2-2,5 W/(m·K)
Specifik värmekapacitet	1000 J/(kg·K) (densitet ca 1700 kg/m ³)
Värmediffusivitet	1,5·10 ⁻⁶ m ² /s (0,005 m ² /h)

5.3 Tillvägagångssätt

De tre pålarna göts samtidigt med samma sats betong (se figur 12) och fick härda i 19 dagar innan de slogs ner i marken med pålkran (se figur 13). Påle 1 slogs ner hela sin längd. När påle 2 och 3 slogs fick slagningen avbrytas innan hela pållängden var nere i marken, då marken var för hård och pålarna riskerade att slås sönder. Påle 2 och 3 kunde bara slås ner 8,2 respektive 8,6 m. De delar av pålen som stack upp ovan mark kapades i samma nivå som påle 1, dvs. ca 0,4 m över markytan. Figur 11 visar pålarnas uppställning.

13 dagar efter pålarna slagits ner i marken utfördes en inspektion av pålarna. Hållrummet i pålen, som under mellantiden varit täckt i toppen för att förhindra att regnvatten skulle kunna ta sig in i pålen, filmades med VLT-utrustning (*Video Logging Tool*), se figur 14. Med hjälp av filmningen kunde det antas att påle 1 förmodligen inte var helt intakt i botten och vatten hade dessutom trängt in. Av totalt 10 meters pållängd var 8 m intakt. På 8 meters djup hade innerröret deformerats och troligen hade även pålen förstörts i botten, se figur 15.

Påle 2 verkade vara intakt hela vägen till botten, dock stod det vatten i den vilket indikerar på att pålen kan ha gått sönder i botten då den var täckt och vattentät i toppen.

Påle 3 var helt intakt av filmningen att döma, och dessutom fri från vatten.

Dagen efter (14 dagar efter slagning) installerades kollektorerna i påle 1 och 3 samt injekterades med en cement- och vattenblandning (se figur 16). Till injekteringsbruket användes ett vanligt byggcement som blandades med vatten, vct ca 0,4-0,5. I påle 1 som var delvis fylld med vatten fick injekteringen ske från botten vilket gjordes med en PEM-slang och en trätt där injekteringen hölldes. Kollektorn trycktes sedan ner i hålet som då var fyllt med injekteringsbruk.

Påle 3, som var fri från vatten, kunde injekteras från toppen med kollektorn redan installerad. Teoretiskt rymde det ungefär 30 liter injekteringsbruk per påle, vilket också motsvarade den praktiska volymen förhållandevis väl. Påle 2 är inte injekterad.

För att kunna uppskatta ett värde på markens ostörda temperatur fylldes kollektorerna med vatten innan de installerades. Temperaturen på vattnet kunde sedan mätas innan testet påbörjades, då vattnet hunnit anta den omkringliggande markens temperatur. Marktemperaturen bestämdes till 8,3 °C som ansätts som ett medelvärde för hela pållängden i påle 1, se kapitel 6.1.

Testet påbörjades 9 dagar efter injekteringen.

TRT-riggen som användes för testet är en mobil utrustning byggd på ett personbilsläp med plastkåpa. Kåpan är isolerad och riggen är uppbyggd enligt principen i figur 8.

Testet som utfördes på påle 1 pågick i 275 timmar, alltså lite drygt 11 dygn. Applicerad effekt var ca 500 W (ca 60 W/m påle) och cirkulationspumpen ställdes in på ett flöde om ca 0,6 l/s, vilket motsvarar 36 l/min.



Figur 11. De tre energipålarnas uppställning. Foto: Simon Carlsson



Figur 12. Gjutning av pålarna. Foto: Simon Carlsson



Figur 13. Slagning av pålarna. Foto: Simon Carlsson



Figur 14. Filmning inuti pålarna med VLT, Video Logging Tool. Foto: Simon Carlsson



Figur 15. Stillbild från VLT, *Video Logging Tool*. Botten på påle 1. Notera djupet i över högra hörnet av bilden.



Figur 16. Påle 1 med installerad kollektor precis efter injektering. Foto: Simon Carlsson



Figur 17. TRT-mätning pågår på Pål 1. Pålen och rören är isolerade. Foto: Simon Carlsson

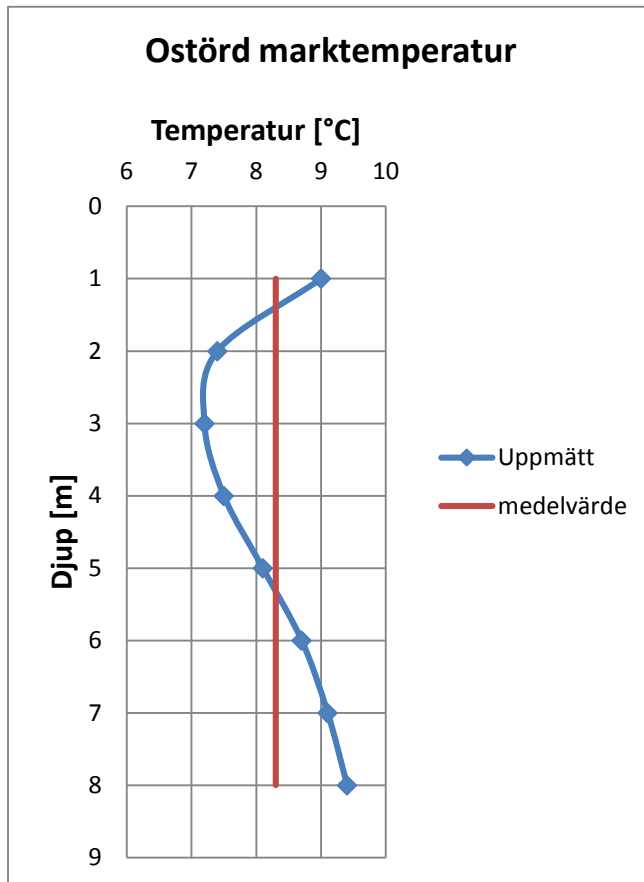
6 Resultat

I detta kapitel redovisas mätdata från det termiska responstestet och resultat från relaterade mätningar. Resultaten från beräkningen av pålens termiska motstånd utifrån rapporterade metoder i litteraturen redovisas också.

6.1 Ostörd marktemperatur

Temperaturen uppmättes med en meters intervall längs djupet i de vattenfyllda kollektorerna, vilket ansågs ge ett representativt värde på markens ostörda temperatur. Den uppmätta temperaturprofilen redovisas nedan i figur 18.

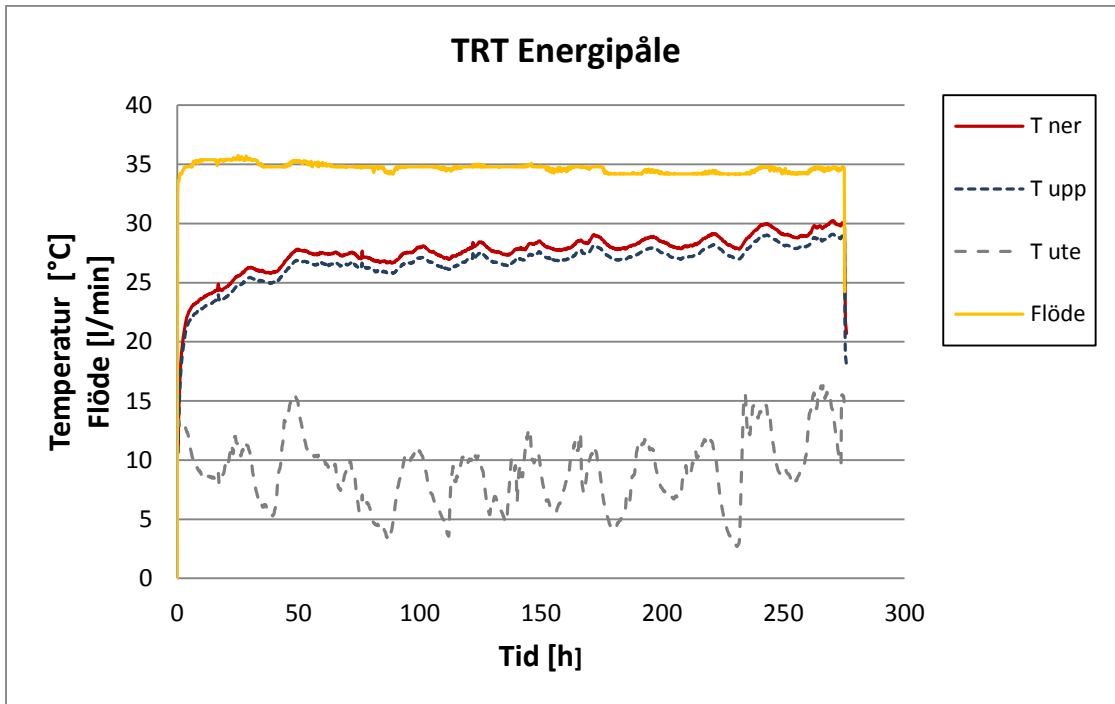
Medelvärdet längs hela pållängden beräknades till 8,3° C.



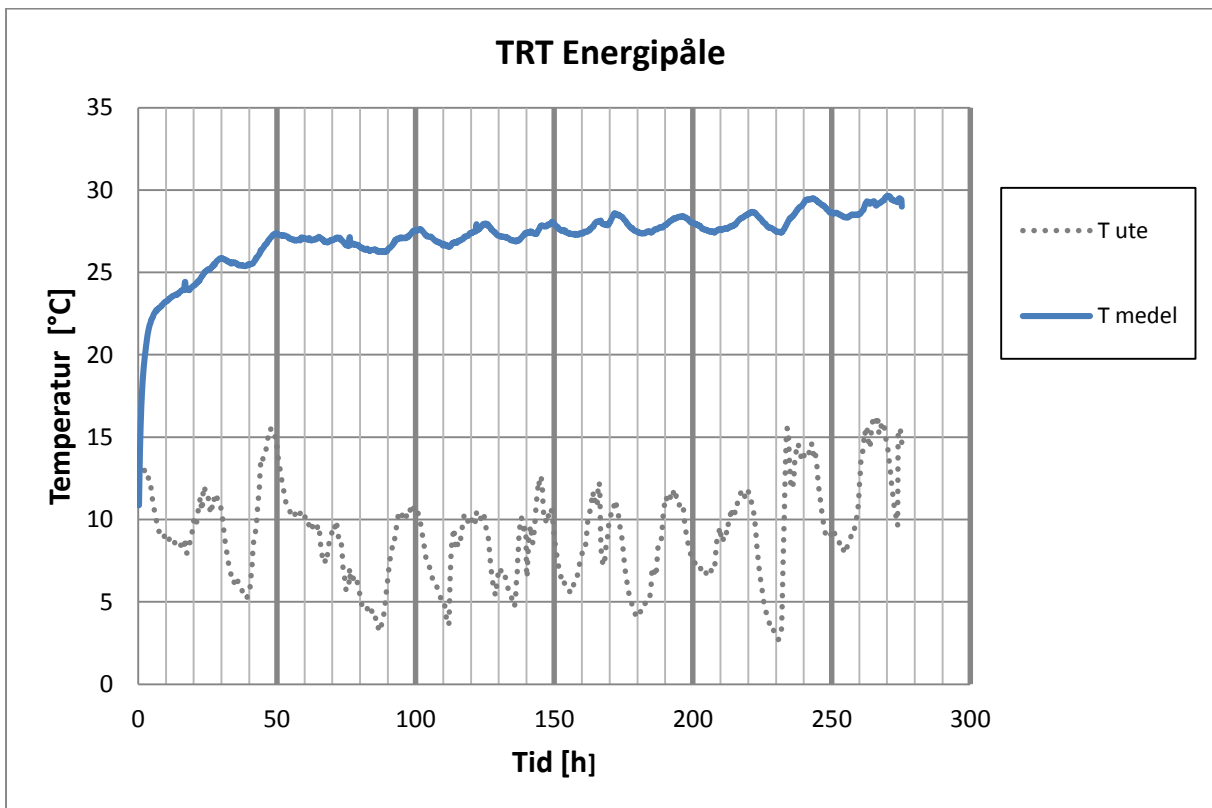
Figur 18. Visar uppmätt temperatur längs pålen.

6.2 Termiskt responstest

TRT-mätningen redovisas i figur 19 där temperaturerna för nergående (T_{ner}) och uppkommande (T_{upp}) flöden plottas mot tiden i timmar. T_{ute} är den uppmätta utomhustemperaturen. Uppmätt flöde presenteras också i diagrammet. Efter ca 80-90 timmar ses tydliga cykliska variationer i T_{ner} och T_{upp} . Jämförs detta med utetemperaturens variationer tycks detta ha en koppling med viss fördröjning, se figur 20.



Figur 19. Visar TRT-mätningen med uppmätta temperaturer på värmebärarfluiden ner i pålen respektive upp ur pålen med avseende på tiden. Uppmätt flöde och utelufttemperatur är också plottade mot tiden.



Figur 20. Visar medeltemperatur mellan Tupp och Tner samt den uppmätta utelufttemperaturen.

För att lösa ut k enligt ekvation (27) plottas medelvärdet av T_{ner} och T_{upp} mot den naturliga logaritmen av tiden i timmar. Resultatet redovisas i figur 21 nedan.

Tre tydliga partier kan urskiljas i diagrammet vilka indikerar värmens successiva utbredning genom pålens komponenter. Iakttagelse av sektionen från ca 80 timmar från start till och med testets slut, har värmen högst troligt nått den omkringliggande marken. Ekvationen för trendlinjen för sektionen 80-265 timmar (fet heldragen linje) blev $y=1,7737x+18,694$ vilken beräknades med hjälp av linjära trendlinjefunktionen i Excel.

Enligt ekvation (28) är då $k=1,7737$. Att denna trendlinje väljs och ligger till grund för beräkning av markens värmeledningsförmåga beror på en avvägning som gjorts och att variationerna stabiliserats efter 80 timmar, vilket tyder på att värmen bör ha nått marken. Fouriers tal är ca 20, jf. (RW.ERROR - Unable to find reference:74).

Ca 10 timmar innan testets slut observeras något som gör att temperaturen fluktuerar oregelbundet fram till testets slut, som ses både i diagram 2 och 4. Detta är anledningen till att trendlinjen slutar vid ca 265 timmar, alltså ca 10 timmar innan testets egentliga slut.

Medelvärdet på applicerad effekt var 489 W vilket ger ett värmeflöde q på 61,13 W/m då pålens längd är 8 m.

Insättning i ekvation (30) ger då resultatet för värmeledningsförmågan i marken enligt följande.

$$\lambda = \frac{489}{4\pi \cdot 1,7737 \cdot 8} = 2,74 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

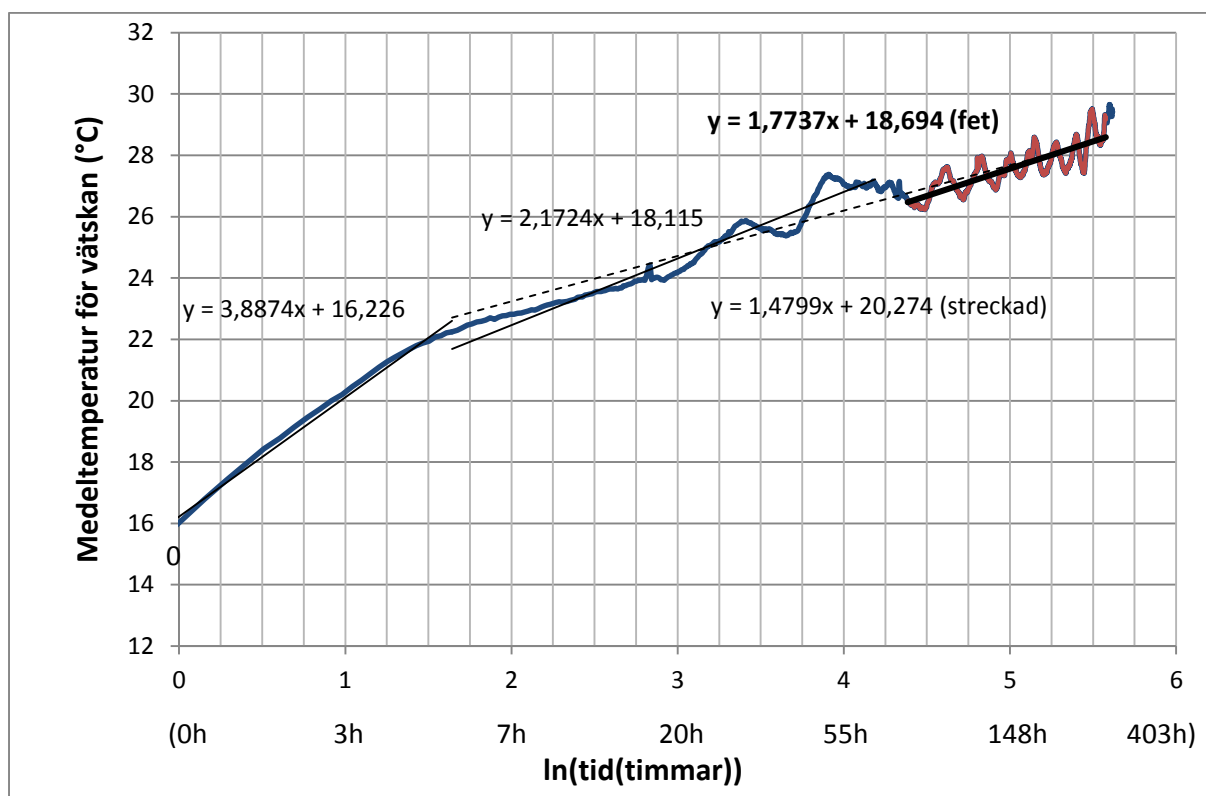
Vid jämförelse av uppskattat värde på markens värmeledningsförmåga (tabell 9) kan erhållet resultat från det termiska responstestet anses som rimligt.

Enligt ekvation (28) och ekvation (31) är $T_{f, 1\text{hr}}=m$. Då blir $T_{f, 1\text{hr}}=18,694$. Värmediffusiviteten α hämtas från tabell 9. Insättning i ekvation (31) ger följande resultat för R_b :

$$R_b = \frac{1}{4\pi \cdot 2,74} \left[\frac{18,694 - 8,3}{1,7737} - \ln \left(\frac{4 \cdot 0,005}{1,78 \cdot 0,152^2} \right) \right] = 0,191 \text{ (m} \cdot \text{K)}/\text{W}$$

Tabell 10. Visar uppmätt värmeledningsförmåga för marken och pålens termiska motstånd.

Markens värmeledningsförmåga	2,74 W/(m·K)
Energipålens termiska motstånd	0,191 (m·K)/W



Figur 21. Visar medeltemperaturen på den uppmätta värmebärarfluiden plottad mot den naturliga logaritmen av tiden i timmar.

6.3 Teoretiska beräkningar av R_b med beskrivna metoder

R_b har beräknats enligt ekvation (7) där R_c beräknats med tidigare beskrivna metoder. Beräkningarna har gjorts för en påle där de ingående parametrarna som använts hämtats från utformning och kollektorkonfiguration för påle 1. För beräkningsunderlag se bilaga 1. Resultaten för de olika beräknade R_b redovisas i tabell 11.

Tabell 11. Visar resultaten över de teoretiskt beräknade termiska motstånden för pålen utifrån tidigare beskrivna metoder.

Metod	Hollow cylinder (Shonder & Beck, 2000) (15)	Remund (1999) fall A (17)	Pile only model (20)	Sharqawy et al. (2009) (21)	Line source Hellström (1991) (22)	Loveridge & Powrie (2014) (23+20)
Termiskt motstånd R_b [m*K/W]	0,157	0,198	0,176	0,148	0,154	0,146

Medelvärdet beräknades till 0,163.

Vid jämförelse av från TRT-mätningen uppmätt resultat på R_b och de teoretiskt beräknade värdena för R_b så stämmer Remunds metod bäst. Då den i examensarbetet undersökta pålen utifrån sitt tvärsnitt kan liknas vid ett injekterat borrhål med kollektorrören placerade i centrum, lämpar sig metoden väl då den är framtagen för just injekterade borrhål.

Anledningen till att övriga metoder ger ett lägre värde på R_b än Remunds metod beror troligtvis på avståndet mellan kollektorerna, som förmodligen varierar längs pålen eftersom de installerades i efterhand utan distanser mellan dem. De kan alltså i värsta fall vara i kontakt med varandra längs hela pållängden vilket ger ett högre R_b .

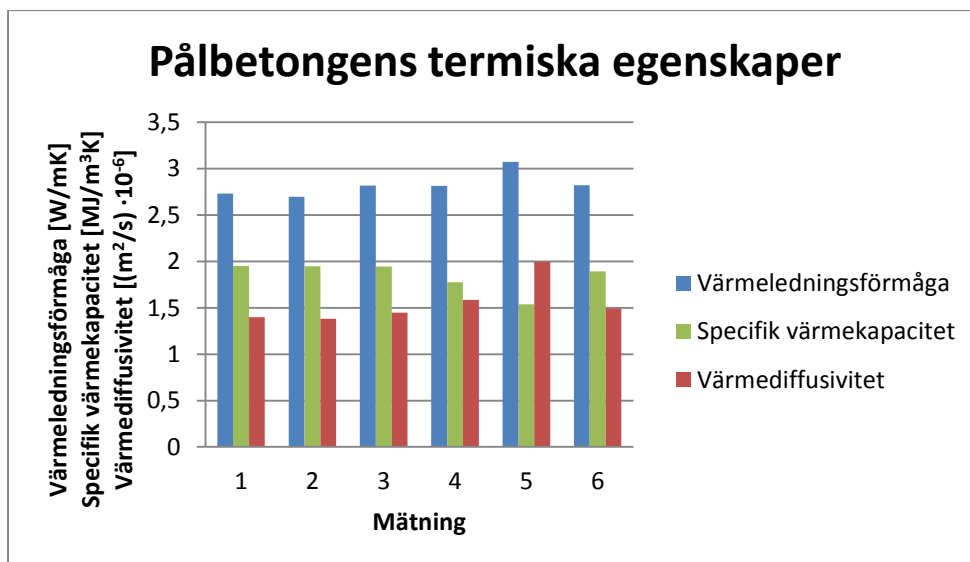
Beräkningar av R_{pconv} och R_{pcond} gjordes enligt ekvation (8) och ekvation (13). De ingående parametrarna hämtades från påle 1 och de ingående flödes- och fluidegenskaperna var de som användes vid testet för pålen. Resultaten redovisas i tabell 12.

Tabell 12. Visar resultatet över de teoretiskt beräknade termiska motstånden för kollektorrören.

R_{pconv} [m ² K/W]	0,002
R_{pcond} [m ² K/W]	0,047

6.4 Pålbetongens termiska egenskaper

Resultaten över delmätningarna på kuben av pålbetongen redovisas i figur 22. Jämför kapitel 5.1.1.



Figur 22. Visar uppmätta värden för pålbetongens värmeledningsförmåga, specifika värmekapacitet och värmediffusivitet.

7 Diskussion och slutsatser

7.1 Försöksrelaterad diskussion och felkällor

Ett termiskt responstest har utförts på Peab Grundläggningens energipåleprototyp. Detta är det första termiska test som utförts på denna påle. Enligt rekommendationer i litteraturen, vad gäller mättid för termiska responstest på energipålar, har testet pågått under en längre tid ca 11 dygn för att låta värmen nå marken.

Vid utvärdering av ett termiskt responstest för borrhål har det visats att värden på uppmätt värmeledningsförmåga har osäkerheter på mellan $\pm 5-10\%$ och att borrhålets beräknade termiska motstånd har osäkerheter mellan $\pm 10-20\%$, (Witte 2013, Javed, Fahlén 2011, Javed, Spitler & Fahlén 2011). Med detta menas att utvärdering av ett idealiskt genomfört termiskt responstest i sig har dessa osäkerheter.

Det har också noterats i Javed (2013) att osäkerheterna är något högre vid användning av linjekälla-metoden, som i detta fall. Om linjekälla-metoden används med superpositionsprincipen och utvärdering genomförs med parameteruppskattning minskar osäkerheten för både markens värmeledningsförmåga och det termiska motståndet. Detta skulle vara en naturlig fortsättning på arbetet och bör vara nästa steg men kräver ytterligare försök med mer kontrollerade ingångsvärden som exempelvis applicerad effekt mot tiden.

En koppling mellan fluidens temperatur och utelufttemperaturen kan urskiljas i mätningen, se figur 20. Högst sannolikt beror denna variation på att utelufttemperaturen, dygnsvariationen, på något sätt påverkar fluidtemperaturen. Denna koppling kan inte helt klargöras och beräknas utan kräver numeriska beräkningsmetoder och ytterligare försök, där applicerad effekt bör loggas med tiden. Detta innebär en osäkerhet för testresultaten.

Då toppen av pålen ovan mark, rören fram till testriggeren och själva testriggeren ansågs vara väl isolerade (se figur 17) borde kopplingen mellan utetemperaturen och fluidtemperaturen inte vara allt för påtaglig. En förklaring till att kopplingen ändå går att urskilja kan vara att temperaturen nära markytan i princip är lika med utetemperaturen. Då pålen är kort jämfört med ett borrhål kan temperaturändringen i marken påverka en relativt stor del av pålen, vilket påverkar fluiden som cirkulerar i den.

En annan förklaring kan vara att isoleringsmaterialet, kring pålen, längs rören eller i riggen inte isolerar tillräckligt bra och medför värmeläckage.

Eftersom utvärderingsmetoden, som användes för utvärdering av det termiska responstestet, är framtagen och avsedd för djupa borrhål bör pålens längd vara så lång som möjligt för att få goda resultat. Då pålen som mätningen utfördes på var förhållandevis kort innebär detta en felkälla. Antagandet om en oändligt lång linje enligt linjekälla-metoden blir alltså ett mindre bra antagande i detta fall.

Då pålen sannolikt gick i sönder i botten under slagningen gjorde detta att det inte var möjligt att föra ner kollektorerna till pålens botten. Det innebär att den effektiva längden på energipålen blev kortare än planerat, vilket var en nackdel för försöket eftersom pålen blev kortare än planerat.

Trots viss osäkerhet i det redovisade termiska motståndet för pålen från mätningen ger det relativt referensobjekten jämförbara värden. Dessutom stämmer det förhållandevis väl överens med värdena beräknade utifrån de rapporterade metoderna.

Den uppmätta värmeledningsförmågan är med hänsyn till geologin inte orimlig jämfört med predikterat värde och i litteraturen uppgivna nivåer på värmeledningsförmågan. Det ska dock tilläggas att det råder viss osäkerhet hos testplatsens geologiska modell.

I och med att testet varade i ca 11 dygn var det möjligt att göra bedömningen att värmen nått marken efter ca 80 timmar då temperaturvariationerna hos fluiden stabiliserat sig, vilket syns i både figur 20 och 21. En mer representativ trendlinje kunde då också dras eftersom sektionen där värmen nått marken (80 timmar till testets slut) blev längre. Dessutom är även Fouriers tal större än 20 efter ca 80 timmar, jf. 4.1.

7.2 Diskussion relaterad till de i litteraturen rapporterade beräkningsmetoderna för R_b

Resultaten av de beräknade termiska motstånd R_b utifrån de olika i litteraturen rapporterade metoderna (kapitel 2.5.3) varierar något. Medelvärde för de beräknade värdena på R_b är 0,163, med största avvikelser på 10% neråt ($R_b=0,146$) och 20% uppåt ($R_b=0,198$). Jämförs dessa med det uppmätta värdet på R_b från det termiska responstestet (0,191) är avvikelsen mot de modellerade värdena som mest drygt 20% neråt. Med tanke på osäkerheterna i ett termiskt responstest i sig kan detta anses rimligt.

Trots att det i litteraturen finns flera olika metoder för att beräkna R_b för borrhål, en del speciellt anpassade för energipålar, finns ingen metod som särskilt är gjord för just den typ av energipåle som testet utförts på. Det förefaller dock som om Remunds metod vid fall A (ekvation 17) är en bra approximation till hur pålen är utformad.

Då pålen är relativt slank, jämfört med de gräv- och CFA-pålar som beräkningsmetoderna ofta är utformade för, kan den sannolikt relativt väl modelleras på ett liknande sätt som ett injekterat borrhål med kollektorerna i centrum. De avvikelser i geometri som finns (exempelvis kvadratisk tvärsnitt istället för cirkulärt) kan möjligen hanteras genom att införa en ny modifierad formfaktor i ekvation (17), vilket dock inte har studerats.

En av de faktorer som troligtvis starkt påverkar resultatet för de beräknade värdena för R_b enligt de olika metoderna är att avståndet mellan kollektorerna i praktiken inte kan bestämmas. Då det i modellerna antas att de håller samma avstånd från varandra längs hela pållängden, vilket troligtvis inte är fallet i praktiken, överskattas värdet för R_b i framförallt ekvation (21) och ekvation (22). I Remunds metod fall A, där kollektorerna antas vara i kontakt med varandra hela längden, kan däremot R_b underskattas.

Kortslutning mellan kollektorer innebär att kollektorerna stjälar värme ifrån varandra, särskilt om de är i kontakt med varandra. Detta kan bidra till att värme som annars skulle överförts till marken inte gör det, vilket påverkar resultatet.

7.3 Rekommendationer

För att få det termiska motståndet R_b så litet som möjligt är betongens och injekteringens värmeledningsförmåga en viktig del. För att förbättra denna kan till exempel kvartsrik ballast med så stora kornfraktioner som möjligt användas. Kortslutning mellan kollektorerna bör också undvikas. De ska helst vara så långt ifrån varandra som möjligt.

Kollektorslangarna i den testade pålen skulle kunna separeras med hjälp av distanser och på så sätt hålla kollektorerna på ett mer konstant avstånd från varandra. Geometrin blir därmed enklare att modellera och upprepade mätningar i olika installationer bör bli mer lika varandra. Detta har inte heller kunnat testas, men är en naturlig fortsättning på arbetet.

Att prova större dimensioner på innerröret och på så sätt kunna öka avståndet mellan kollektorerna och medföra ett lägre termiskt motstånd skulle också vara intressant. Det är då viktigt att ha pålens bärande egenskaper i åtanke då injekteringen inte har samma hållfasthetsklass som betongen.

För ett framtida försök hade bättre kännedom om geologin varit en fördel för bättre uppskattning av markens termiska egenskaper, för att kunna jämföra med uppmätta resultat. Med bättre vetskap om geotekniska förhållanden hade slagbarheten bättre kunnat bedömas och det hade sannolikt kunna undvikas att spräcka pålen i botten.

7.4 Praktiska erfarenheter

Betongens värmeledningsförmåga har konstaterats vara hög ($2,82 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) jämfört med tabellvärden. Detta ger ett lägre R_b i de teoretiska beräkningarna, men det uppmätta torde ändå vara representativt då pålen står i mark och betongen bör ses som vattenmättad även i driftstillståndet.

Vad gäller produktionen av energipålen har det under arbetets gång noterats att extra arbetsmoment tillkommer i samband med utformning och produktion av pålen jämfört med en standardpåle. För att hålla innerröret på plats i centrum krävs montering av extra distanser och innerröret behöver även hakas fast för att undvika att det flyter upp under gjutningen av pålen. Detta kan eventuellt medföra en fördyring, vilket måste beaktas vid beräkningar av metodens lönsamhet.

Vid slagning av pålen bör man se till att inget faller ner i innerröret för att så småningom kunna få ner kollektorena utan problem. Dessutom bör pålarna täckas i toppen för att undvika att de vattenfylls om de ska stå en längre tid innan injektering och kollektorinstallation utförs. Uppfylls detta bör kollektorerna vara förhållandevis enkla att installera.

Kollektorerna som installerades för detta försök kunde föras ner utan större problem, dock försvårades installationen för pålen som var vattenfylld.

Skarvning av påle har inte testats, men bör kunna ske om innerröret i pålarna hamnar i centrum.

7.5 Vidare studier

Fler tester bör göras på den testade pålen eller på påle 2 och påle 3 i mätområdet, där alla ingångsparametrar är väl kontrollerade och att effekten loggas med tiden. Detta för att kunna bestämma ett noggrannare värde på R_b samt för att bättre kunna förklara variationerna hos fluidtemperaturen.

Eventuellt kan termistorer för temperaturmätning inuti pålen installeras i den påle som inte injekterats (påle 2), då litteraturstudien tyder på att ett mer representativt värde på värmeledningsförmågan och det termiska motståndet då kan erhållas, se kapitel 4.5.

7.6 Slutsats

Huvudfrågorna som sattes upp har besvarats. Peabs energipåle kan användas för utvinning av geoenergi och ett rimligt värde för pålens termiska motstånd har presenterats utifrån det termiska responstestet.

Att bestämma ett exakt värde för energiuttag är inte möjligt. Nämda riktvärden i litteraturstudien i kapitel 3.3 kan dock ses som lämpliga.

Det uppmätta termiska motståndet är förhållandevis likt det som gäller för ett injekterat borrhål, möjligtvis något högre. Anledningen till det relativt låga termiska motståndet beror på att pålen är förhållandevis slank och gjuten med en betong med god värmeledningsförmåga.

Med hjälp av redovisade värden på pålens termiska motstånd och med kännedom om en den aktuella markens termiska egenskaper samt värmelasten för byggnaden kan ett simuleringsprogram, exempelvis EED eller PILESIM, användas för att dimensionera en anläggning för energiuttag.

För energipålar är en balans mellan värmeuttag och värmeåterladdning under ett år att föredra, då marken omkring aldrig får frysa för att pålen ska kunna behålla sina bärande egenskaper, enligt litteraturstudien (kapitel 3.3). Ett lägre termiskt motstånd bidrar positivt till detta då fördröjningen för värmen att ta sig genom pålen blir mindre.

Referenser

- Austin, W. A. 1998, *Development of an in situ system for measuring ground thermal properties*. Diss. Oklahoma State University.
- Beier, R.A. & Smith, M.D. 2005, "Analyzing Interrupted In-Situ Tests on Vertical Boreholes", *ASHRAE Transactions*, vol. 111, no. 1, pp. 702-713.
- Brandl, H. 2006, "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique*, vol. 56, no. 2, pp. 81-122.
- Brettmann, T., Amis, T. & Kapps, M. 2010, "Thermal conductivity analysis of geothermal energy piles", *Proceedings of the geotechnical challenges in urban regeneration conference, London UK*, pp. 26.
- Burström, P.G. 2007, *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, 2nd edn, Studentlitteratur, Lund.
- Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C. 1959, *Conduction of heat in solids*, Clarendon Press Oxford.
- EED 2010, *Eart Energy Designer - EED Demo*, 3.16th edn, Blocon Sweden, Lund.
- Fromentin, A., Pahud, D., Jacquier, C. & Morath, M. 1997, *Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. Empfehlungen für Energiepfahlsysteme*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. & Yang, J. 2008, "Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application", *Applied Energy*, vol. 85, no. 10, pp. 901-910.
- Gehlin, S. 2002, *Thermal response test method development and evaluation*, Doctoral Thesis, Luleå tekniska universitet.
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H. & Ochifuji, K. 2007, "Field performance of an energy pile system for space heating", *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 5, pp. 517-524.
- Hayward Baker 2014a, *Augercast Piles* [Homepage of Hayward Baker Geotechnical Construction], [Online]. Available: <http://www.haywardbaker.com/WhatWeDo/Techniques/StructuralSupport/AugercastPiles/default.aspx> [2015, 28/5].
- Hayward Baker 2014b, *Drilled Shafts* [Homepage of Hayward Baker Geotechnical Construction], [Online]. Available: <http://www.haywardbaker.com/WhatWeDo/Techniques/StructuralSupport/DrilledShafts/default.aspx> [2015, 28/5].
- Hayward Baker 2014c, *Driven piles* [Homepage of Hayward Baker Geotechnical Construction], [Online]. Available: <http://www.haywardbaker.com/WhatWeDo/Techniques/StructuralSupport/DrivenPiles/default.aspx> [2015, 28/5].

- Hellström, G. 1991, *Ground heat storage: Thermal analyses of duct storage systems*, Lund University.
- Hemmingway, P. & Long, M. 2013, "Energy piles: site investigation and analysis", *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, vol. 166, no. 6, pp. 561-575.
- Hemmingway, P. & Long, M. 2012, "Design and development of a low-cost thermal response rig", *Proceedings of the ICE-Energy*, vol. 165, no. 3, pp. 137-148.
- Herlin, A. & Johansson, G. 2011, *En studie av möjligheten att öka den värmelagrande förmågan hos betong (Examensarbete)*, LTH, Lund.
- Hot Disk 2014, *TPS 2500 S* [Homepage of Hot Disk AB], [Online]. Available: <http://www.hotdiskinstruments.com/products/instruments-for-thermal-conductivity-measurements/tps-2500-s.html> [2015, 05/19].
- Ingersoll, L.R., Zobel, O.J. & Ingersoll, A.C. 1954, *Heat conduction : with engineering, geological, and other applications*, Madison, Wis. : Univ. of Wisconsin Press, 1954; Rev. ed.
- Javed, S. 2013, "Thermal Response Testing: Results and Experiences from a Ground Source Heat Pump Test Facility with Multiple Boreholes", *Proceedings of 11th REHVA World Congress (Clima 2013), June 16–19, Prague, Czech Republic*.
- Javed, S. & Fahlén, P. 2011, "Thermal response testing of a multiple borehole ground heat exchanger", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 141-148.
- Javed, S., Fahlén, P. & Claesson, J. 2009, "Vertical ground heat exchangers: A review of heat flow models", *Effstock 2009-Stockholm, Sweden, 2009-06-14--17.Proceedings vol.CD-proceedings*.
- Javed, S., Nakos, H. & Claesson, J. 2012, "A method to evaluate thermal response tests on groundwater-filled boreholes", *ASHRAE Transactions*, vol. 118, no. 1, pp. 540-549.
- Javed, S., Spitler, J.D. & Fahlén, P. 2011, "An experimental investigation of the accuracy of thermal response tests used to measure ground thermal properties", *ASHRAE Transactions*, vol. 117, no. 1, pp. 13-21.
- Jönsson, G. 2009, *Fysik i vätskor och gaser*, 8th edn, Teach Support, Lund.
- Koene, F., van Helden, W. & Romer, J. 2000, "Energy piles as cost effective ground heat exchangers", *Proceedings of TERRASTOCK*, pp. 227.
- Lennon, D.J., Watt, E. & Suckling, T.P. 2009, "Energy piles in Scotland", *Deep Foundations on Bored and Auger Piles - Proceedings of the 5th International Symposium on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, BAP 5, , no. -, pp. 349-355*.
- Liebel, H.T., Javed, S. & Vistnes, G. 2012, "Multi-injection rate thermal response test with forced convection in a groundwater-filled borehole in hard rock", *Renewable Energy*, vol. 48, pp. 263-268.
- Loveridge, F., Brettmann, T., Olgun, C.G. & Powrie, W. 2014, "Assessing the applicability of thermal response testing to energy piles", *Global Perspectives on the Sustainable Execution of*

- Foundations Works*, [Online], pp. 2015-02-04-10 pp. Available from:
<http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/361725>.
- Loveridge, F. 2012, *The thermal performance of ground piles used as heat exchangers in ground energy systems*, University of Southampton.
- Loveridge, F. & Powrie, W. 2014, "2D thermal resistance of pile heat exchangers", *Geothermics*, vol. 50, no. 0, pp. 122-135.
- Melinder, A. 1997, "Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants; Proprietes thermophysiques des frigoporteurs liquides" .
- Olsson, C. & Holm, G. 1993, *Pålgrundläggning*, AB Svensk Byggtjänst och Statens geotekniska institut, Stockholm.
- Pahud, D. 2007, "PILESIM2: Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Energy Piles or multiple Borehole Heat Exchangers. User Manual", *Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, Lugano, Switzerland*.
- Pahud, D. & Hubbuch, M. 2007, "Measured thermal performances of the energy pile system of the dock midfield at Zurich Airport", *Proceedings European geothermal congress*.
- Pålkommisionen 1996, *Standardpålar av betong – lastkapacitet och geoteknisk bärförmåga*, Ingenjörsvetenskapsakademien Rapport 94, Linköping.
- Remund, C. P. 1999, Borehole thermal resistance: laboratory and field studies. *ASHRAE Transactions*, vol. 105, pp. 439-
- Rosén, B., Gabrielsson, A., Fallsvik, J., Hellström, G. & Nilsson, G. 2001, "System för värme och kyla ur mark-En nulägesbeskrivning", *Linköping: Statens Geotekniska Institut*, no. 511.
- SGU 2015a, , *Kartvisare - berggrundskarta* [Homepage of Sveriges Geologiska Undersökning], [Online]. Available: <http://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-berggrund-1-miljon-sv.html> [2015, 29/5].
- SGU 2015b, *Kartvisaren - jordartskarta* [Homepage of Sveriges Geologiska Undersökning], [Online]. Available: <http://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-jordarter-1-miljon-sv.html?zoom=-505468.439247,5821303.08703,1701155.369176,7141573.207417> [2015, 28/5].
- Sharqawy, M.H., Mokheimer, E.M. & Badr, H.M. 2009, "Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers", *Geothermics*, vol. 38, no. 2, pp. 271-277.
- Shonder, J.A. & Beck, J. 2000, *Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole resistance*.
- Shonder, J.A. & Beck, J. 1999, "Determining effective soil formation thermal properties from field data using a parameter estimation technique", *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS*, vol. 105, pp. 458-468.
- Sundberg, J. 1991, *Termiska egenskaper i jord och berg*, Statens geotekniska institut.

Sundén, B. 2006, *Värmeöverföring*, Studentlitteratur, Lund.

Svedinger, B. 1981, *Värme i jord, berg och vatten*, Statens råd för byggforskning, Stockholm.

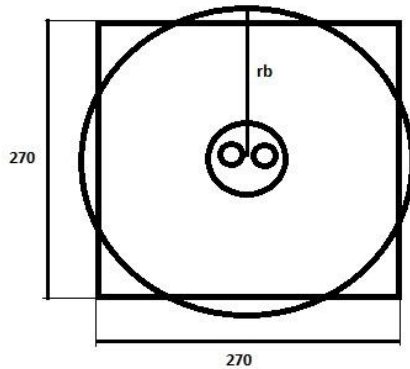
Wang, B., Bouazza, A., Singh, R., Barry-Macaulay, D., Haberfield, C., Chapman, G. & Baycan, S. 2013, "Field investigation of a geothermal energy pile: Initial observations", *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

Witte, H.J. 2013, "Error analysis of thermal response tests", *Applied Energy*, vol. 109, pp. 302-311.

Wood, C.J., Liu, H. & Riffat, S.B. 2010, "Comparison of a modelled and field tested piled ground heat exchanger system for a residential building and the simulated effect of assisted ground heat recharge†", *International Journal of Low Carbon Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 137-143.

8 Bilaga 1

8.1 Beräkningsunderlag för energipålens effektiva radie r_b



Då pålens tvärsnitt är kvadratisk och metoderna avser cirkulära tvärsnitt beräknas radien r_b för pålen med avseende på tvärsnittsradien enligt:

$$A = 0,27 \cdot 0,27 = 0,0729 \text{ m}^2$$

Arean för en cirkel skrivs enligt:

$$A = \pi r^2$$

Med avseende på pålens kvadratiske tvärsnittsarea beräknas en fiktiv radie för pålen enligt:

$$r_b = \sqrt{\frac{0,0729}{\pi}} = 0,15233 \text{ m}$$

8.2 Beräkningsunderlag för energipålens termiska motstånd R_b

$$R_b = R_{pconv} + R_{pcond} + R_c$$

R_{pconv}	0,001536276 mK/W
Antal rör (n)	2 st
Innerradie rör (r_i)	0,013 m
Värmeöverföringskoefficient (h_i)	3986,554191 W/m ² K
Nusselts nummer (Nu)	233,9738351
Vätskans värmekonduktivitet (λ_{fluid})	0,443 W/mK
Reynolds tal (Re)	14592
Prandls tal (Pr)	85,47646927
Vätskans densitet (ρ)	958 kg/m ³

Vätskans hastighet (u_m)	1,130667471	m/s
Vätskeflöde	0,0006	m ³ /s
Area (A)	0,00053066	m ²
Vätskans dynamiska viskositet (μ)	0,00193	kg/ms
Vätskans diffusivitet (α)	2,36322E-08	m ² /s
Vätskans kinematiska viskositet (ν)	0,00000202	m ² /s

<u>Rpcond</u>	0,047233704	mK/W
Ytterrädie rör (r_o)	0,016	m
Värmekonduktivitet rör (λ_{pipe})	0,35	W/mK

8.2.1 Betongens termiska motstånd

		<u>Rb</u>
<u>Rc Remund (1999) A,B, C (17)</u>	0,14931738	0,1981
Formfaktor (S_b)	2,391837146	
Värmekonduktivitet injektering (λ_{grout})	2,8	W/mK
Pålens ytterrädie (r_b)	0,1523	m
β_o	20,1	
β_i	-0,9447	
Kollektorposition A=1, B=2, C=3	1	
<u>Rc med Sc Pile only model (20)</u>	0,127356208	0,1761
Formfaktor (S_c)	2,804283069	
Avstånd mellan kollektorer (s)	0,0355	m
<u>Rc Shargawy et al. 2009 (21)</u>	0,098981285	0,1478
<u>Rc Hellström 1991 (22)</u>	0,105481776	0,1543
<u>Rc Hollow Cylinder (Shonder & Beck) (15)</u>	0,108433232	0,1572
r_{eff}	0,022627417	
<u>Ny formfaktor Loveridge (23+20)</u>	0,09700333	0,1458
S_c steady	3,681758729	
A	4,919	
B	0,3549	
C	-0,07127	
D	-11,41	
E	-2,88	
F	0,06819	
Täckning (c)	0,11855	m

Värmebärarfluidens egenskaper

	<u>Etanol 25%</u>
Densitet [kg/m ³]	958
Värmekonduktivitet [W/(mK)]	0,443
Specifik värmekapacitet [J/(kgK)]	4301
Viskositet, kinematisk [m ² /s]	0,00000202
Viskositet, dynamisk [kg/sm]	0,00193
Diffusivitet [m ² /s]	2,36322E-08

(Melinder 1997)