



Termisk analys av kompakta jordvärmesystem

Sensitivitetsanalys och korrektions
faktorer baserat på fältmätningar i referensanläggningar
i Östergötland

**INSTITUTIONEN FÖR FYSIK
AVDELNINGEN FÖR MATEMATISK FYSIK**

Datum: 2006-09-28

Examensarbetare: Samuel Lindskog

Handledare: Lektor, docent, Göran Hellström, LTH

Bihandledare: Civilingenjör, Bengt Rosén, SGI

Examinator: Gunnar Ohlén

Förord

Denna rapport är resultatet av mitt examensarbete utfört vid avd. för Matematisk Fysik, Lunds Tekniska Högskola (LTH) och i samarbete med Statens Geotekniska Institut (SGI) i Linköping. Examensarbetet var inte utannonserat, utan jag fick det efter att ha kontaktat SGI med några förslag på ämnen som jag var intresserad av att studera. Problemformuleringen och utförandet klargjordes i samtal med mina handledare Bengt Rosén (SGI) och Göran Hellström (LTH). Jag vill delge min glädje över att få göra ett examensarbete inom ett utvecklingsprojekt, där mina resultat kommer att få en praktisk tillämpning. Det har varit lärorikt att självständigt få strukturera och driva ett större projekt. Målgrupp för rapporten har varit studenter och yrkesverksamma personer med grundläggande tekniska och geologiska kunskaper. Målgruppen är tänkt att syssla med konstruktion eller utveckling av markvärmearläggningar. Jag är tacksam och mycket glad för den hjälp som jag har fått från mina handledare Bengt och Göran under våra många och ibland långa diskussioner. Jag vill också tacka för den hjälp som övriga medarbetare vid SGI har bidragit med.

Summary

Chapter 1 defines the aim of the project and gives a general orientation about ground heat extractors. In chapter 2 physical processes that could be expected to be involved in the heat transport around a ground heat exchanger are discussed. It is shown from a literature study what amount of moisture transport due to thermal gradients there could be expected in a ground heat exchanger. The conclusion is drawn that the moisture gradient (S_r) is of same magnitude as the driving temperature gradient ($^{\circ}\text{C}$). At the expected amount of increased moisture around the pipes the moisture transport could be considered to have a little effect on the brine temperature. In Chapter 3 and 4 the circumstances are described at the analysed systems respectively the applied methods of measurements. In chapter 5 a computer model named SEBAM2D is described and calibrated. Results from the temperature sensitivity re some environmental conditions are described in chapter 6. The factors that most strongly affect the brine temperature are soil porosity, field capacity, and geographical position. Design factors for the pipe length in the compact systems relatively the system with one pipe/ditch are developed. The factors are presented in chapter 7 and were developed in order to get a medium brine temperature of -3°C during the period 1 December - 1 March. It should be said that the factors are supposed to be used individually and show the relative influence of each environmental factor upon the brine temperature. In chapter 8 some conclusions are presented and discussed. It is observed that the brine temperatures in the compact systems, compared to the one-pipe system, are more sensitive to the environmental conditions. Therefore, it could be expected that the compact systems compared to the one-pipe system are more profitable in soils with good environmental factors. Used data for the computer model is presented in chapter 9 and the literature references the report is based on are given in chapter 10.

Titel: Termisk analys av kompakta jordvärmesystem - Sensitivitetsanalys och korrektionsfaktorer baserat på fältmätningar i referensanläggningar i Östergötland

Handledare: lektor, doc. Göran Hellström, Inst. för Fysik, avd. för Matematisk fysik, LTH

Bihandledare: civilingenjör Bengt Rosén, avd. för Miljöteknik, Statens Geotekniska Institut.

Problemställning: Studera känsligheten för brinetemperaturen, med avseende på relevanta miljöfaktorer, i jordvärmesystem med markvärmeväxlare med en slang, två

slangar och slinky installerade i diken. Utgå från referensanläggningarna i Flistad och Motala.

Vilka värden på jordmaterials värmekonduktivitet kan väntas när jordart och nivåer för vattenmättnadsgrad (S_r), torrdensitet och kvartshalt varierar?

I vilken grad kan ett termiskt fuktflöde förväntas i markvärmeväxlare, och vad är dess inverkan på brinetemperaturen?

Utveckla korrektionsfaktorer för slanglängd i kompakta jordvärmesystem relativt enslangssystemet med avseende på relevanta miljöfaktorer.

Syfte: Skapa förståelse för temperaturkänsligheten i brinen med avseende på relevanta miljöfaktorer. Det är en förstudie till dimensioneringsnormer för kompakta jordvärmesystem i svensk miljö.

Metod: Litteraturstudium, fältmätningar i referensanläggningar och datorsimulering.

Slutsatser: Brinetemperaturen i systemen är mycket känsliga för markvattennivåer, grundvattennivåer, torrdensitet i jorden och geografiskt läge. Brinetemperaturen i de kompakta systemen verkar mer känsliga för aktuella miljöfaktorer relativt systemet med en slang/dike.

Nyckelord: jordvärme, fukttransport, sensitivitetsanalys, brinetemperatur, datormodell

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	5
1.1	BAKGRUND TILL EXAMENSARBETET.....	5
1.2	PROBLEMFORMULERING FÖR EXAMENSARBETET.....	5
1.3	UTFÖRANDE AV EXAMENSARBETET.....	6
1.4	DEFINITIONER.....	6
1.5	BETECKNINGAR	11
2	TEORI FÖR TERMISK ANALYS AV JORDVÄRMESYSTEM	12
2.1	TEORI FÖR TEMPERATURUTVECKLING I JORDMATERIAL OCH I JORDVÄRMESYSTEM	12
2.2	TEORI FÖR TERMISKA EGENSKAPER OCH PROCESSER I JORDMATERIAL	14
2.2.1	Värmekonduktivitet, λ (W/mK), i jordmaterial	15
2.2.2	Specifik värmekapacitet, c_p (MJ/m ³ K), och latent värme, c_L (MJ/m ³), i jordmaterial	18
2.2.3	Nivåer för markvatten och grundvattenyta i mark.....	18
2.2.4	Tjälning av jordmaterial.....	19
2.2.5	Termisk fukttransport i jordmaterial.....	20
2.3	ERFARENHETER AV TERMISK MARKVATTENTRANSPORT I JORDVÄRMESYSTEM.....	22
2.4	ERFARENHETER AV TEMPERATURUTVECKLING I JORDVÄRMESYSTEM.....	26
2.5	ERFARENHETER AV DATORMODELLER AV JORDVÄRMESYSTEM.....	26
3	UTVÄRDERADE REFERENSANLÄGGNINGAR.....	30
3.1	GENERELLA FÖRUTSÄTTNINGAR I UTVÄRDERADE REFERENSANLÄGGNINGAR.....	30
3.2	FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR REFERENSANLÄGGNINGEN I FLISTAD.....	32
3.3	FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR REFERENSANLÄGGNINGEN I MOTALA	34
3.4	JÄMFÖRELSE AV NÅGRA MARKVÄRMEVÄXLARE	36
4	MÄTNINGAR I REFERENSANLÄGGNINGAR	37
4.1	MÄTNING AV NIVÅ FÖR GRUNDVATTENYTA	37
4.2	MÄTNING AV MARKVATTENNIVÅER	37
4.3	MÄTNING AV TEMPERATURNIVÅER I JORD.....	39
4.4	MÄTNING AV TEMPERATURNIVÅER I LUFT OCH I VÄRMEPUMP	40
5	DATORMODELL FÖR TERMISK ANALYS AV MARKVÄRMEVÄXLARE.....	41
5.1	FYSIKALISK MODELL AV TERMISKA PROCESSER I MARKVÄRMEVÄXLARE.....	42
5.2	DATORMODELLEN SEBAM2D FÖR TERMISK ANALYS AV MARKVÄRMEVÄXLARE	46
5.3	VERIFIERING AV DATORMODELLEN SEBAM2D	48
5.4	DATORMODELLEN SEBAM2D AV REFERENSANLÄGGNINGARNA.....	49
6	TERMISK SENSITIVITETSANALYS.....	62
6.1	FÖRUTSÄTTNINGAR VID TERMISK SENSITIVITETSANALYS.....	62
6.2	RESULTAT FRÅN TERMISK SENSITIVITETSANALYS	66
7	KORREKTIONSFAKTORER FÖR KOMPAKTA MARKVÄRMEVÄXLARE	86
8	DISKUSSION.....	96
8.1	SLUTSATSER	96
8.2	FÖRSLAG PÅ UTVECKLINGSARBETE MED SYSTEMEN.....	97
9	BILAGOR	98
10	REFERENSER	109

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund till examensarbetet

Vid Statens Geotekniska Institut (SGI) pågår projektet ”Effektivare elanvändning” under åren 2000-2006. Syftet med projektet är att utveckla jordvärmesystem för reduktion av den markyta som krävs för att utvinning av värme och kyla ur mark. Vid värmeutvinning ur mark kopplas en värmepump till ett markvärmesystem. Elanvändningen blir effektivare jämfört med direktverkande el då systemen levererar 3-5 gånger mer värmeeffekt jämfört med tillförd eleffekt till värmepumpen. Finansierare till projektet är SGI, Formas/Byggnadsnämnden, Energimyndigheten och IVT Linköpings värmepumpscentral.

Syftet med projektet har preciserats i följande punkter:

- ” – sammanställning av tekniskläge och behov,
- förbättring av potentialen för jordvärmeteknik inom tätbebyggda områden,
- utveckling av system med återladdning,
- demonstration av kostnadseffektiva system” (1)

Jordvärmesystem har i dagsläget en relativt liten marknadsandel (ca 25%) bland de tekniker som används för utvinning av markvärme. Den låga marknadsandelen kan förklaras med att den yta av 300-400 m² som åtgår till en markvärmeväxlare för att värma en villa i många fall är större än den tillgängliga arean vid fastigheten, vilket särskilt gäller i tätorter. Om markvärmeväxlare till jordvärmesystem utformas mer kompakt kan systemen bli attraktiva för fler fastighetsägare. Byggnaderna kan därmed få tillgång till billig och miljövänlig energi för kyl- och uppvärmningsbehov.

I jordvärmesystem installeras i dagsläget normalt en slang per dike. Inom projektet ”Effektivare elanvändning” studeras i tre fullskaleanläggningar tre olika installationstekniker där antalet slangar per dike är högre än normalt. Utvinningsbar energimängd per jordvolym stiger med tätheten för slangarna. Med större slangtäthet kan dimensionerande dikeslängd och markyta för markvärmeväxlaren reduceras. De studerade referensanläggningarna ligger i Flistad (Linköpings kommun), Motala och Lidingö. Denna rapport baseras endast på anläggningarna i Flistad och Motala. Avsikten är att kunna rekommendera en dimensionering av de kompakta markvärmeväxlarna utifrån miljöfaktorer som ort, jordart, och mark- och grundvattennivåer med slanglängd och c/c-avstånd för diken, så att systemen kräver mindre markyta jämfört med en konventionell installation (Rosén, 2001). De kompakta systemen kan förväntas visa annan termisk känslighet relativt slangsystemet, varför de kan visa olika konkurrenskraft beroende på lokala förutsättningar. Det ska nämnas att den mest fördelaktiga installationsmetod för en anläggning bör bedömas med en ekonomisk kalkyl utifrån markpris, materialkostnad och installationskostnad.

1.2 Problemformulering för examensarbetet

- Att studera känsligheten för brinetemperaturen, med avseende på relevanta miljöfaktorer, i jordvärmesystem med markvärmeväxlare med en slang, två slangar och slinky installerade i diken. Utgå från referensanläggningarna i Flistad och Motala.
- Att studera vilka värden av värmekonduktivitet i olika jordmaterial som kan förväntas vid som funktion av jordart, nivåer för vattenmättnadsgrad (S_r), torrdensitet och kvartshalt?

- Att studera i vilken grad kan ett termiskt fuktflöde kan förväntas i markvärmewäxlare, och dess inverkan på brinetemperaturen.
- Att utveckla korrektionsfaktorer för slanglängden i kompakta jordvärmesystem med avseende på relevanta miljöfaktorer.

1.3 Utförande av examensarbetet

I projektet ingår att genomföra fältmätningar av nivå för grundvattenyta med grundvattenrör, SMR-utrustning för att undersöka hur fuktförhållanden utvecklas vid två referensanläggningar med jordvärmesystem i Flistad, Linköpings kommun och Motala, Östermalmsgatan 67. Arbetet utförs i samarbete med Statens Geotekniska Institut (SGI) i Linköping inom projektet "Effektivare Elanvändning".

Utifrån mätningar redovisade i rapporten "Varmeövergångsforhold omkring jordslanger" (Porsvig, 1986) och doktorsavhandlingen (Sundberg, J, 1988) beskriva värmeledningsförmågan (λ) som funktion av vattenmättnadsgrad (S_r) och torrdensitet (ρ_{torr}) i några jordarter. Undersöka om värmekonduktiviteten för jordprover med olika torrdensitet från samma jordart är likformigt beroende av vattenmättnadsgrad.

Utvärdera genom litteraturstudium förväntad termisk uppfuktning omkring kollektorslangar i markvärmewäxlare.

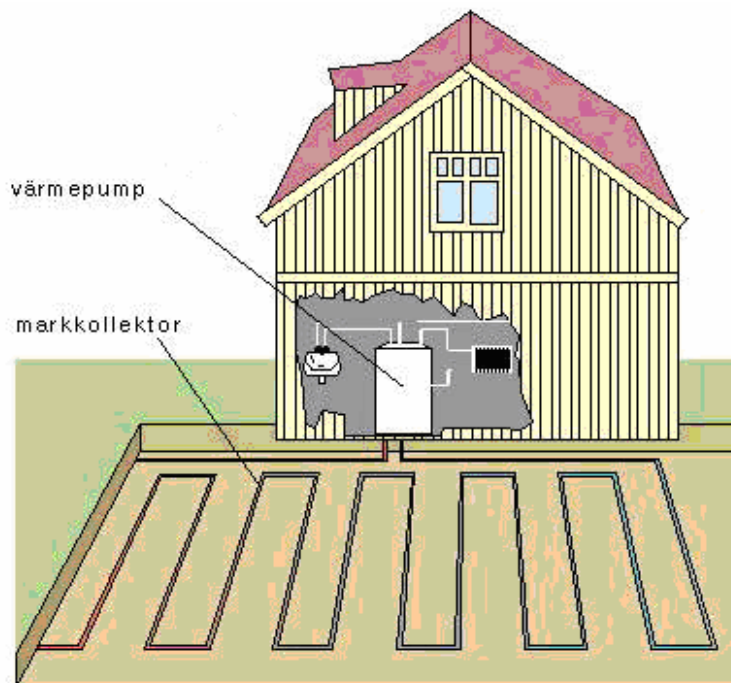
Utveckla en datormodell för kompakta jordvärmesystem. Datormodellen kalibreras mot mätdata från referensanläggningarna. Mätdata från referensanläggningarna är hämtade under perioden 2003-09-05 till 2004-09-30. Mätresultat från referensanläggningar i projektet "Effektivare Elanvändning" används.

Utför en sensitivitetsanalys för brinetemperaturen i de kompakta jordvärmesystemen och systemet med en slang/dike med avseende på relevanta miljöfaktorer.

1.4 Definitioner

Albedovärde	Faktor (0,0-1,0) som multipliceras med värdet för kortvågig inkommande strålning och ger nivå för reflekterad strålning.
Brine	Cirkulerande vätska (köldbärarvätska) i slangar som transporterar termisk energi från en markvärmewäxlare (markkolektor) till en värmepump. I rapporten betecknas brinetemperatur T_b .
DUT (°C)	Dimensionerande utomhustemperatur. Den lägsta utomhustemperatur som uppvärmningssystemet i en byggnad dimensioneras för. Systemet ska vid denna temperatur klara av att värma upp byggnaden till en given behaglig rumstemperatur, t.ex. 21 °C.
Effekttäckning (%)	Andel av total tillförd värmeeffekt som tillförs en byggnad vid DUT, vilken kommer från en viss energikälla. I denna rapport avses effekttäckning för värmepump och återstående tillförd värmeeffekt kommer vanligen från en eller flera elpatroner.

Energibalans	Beräkning av energiutveckling för entalpinivå (H , J/m^3) i en materialvolym. Energibalansen styrs av randflöden, initial H och värmemotstånd i materialet. Till respektive entalpinivå för volymen beräknas en ekvivalent temperatur. En stor materialvolym kan indelas i flera delvolym för separata energibalanser och temperaturer i volymerna. Datormodellen SEBAM2D som används inom examensarbetet tillämpar en energibalans på de analyserade jordvärmesystemen. (se avsnitt 5.1 och 5.2)
Fältkapacitet, FK (%)	Vattenmättnadsgrad (S_r) i jord ovan GVV efter fri dränering.
Förångare	Kalla sidan av en värmepump där köldmediet upptar värme från brinen.
Graderingstal (C_u)	Beskrivning av spridningen för kornstorleken i en jord, vilken kan anges med formeln nedan. $C_u = d_{60} / d_{20}$ där C_u = graderingstal d_{60} = kornstorlek då 60 % av de mest finkorniga kornen har passerat ett siktmått d_{20} = kornstorlek då 20 % av de mest finkorniga kornen har passerat ett siktmått
Grundvattenyta, GVV (m)	Högsta nivå i mark där jordens porer är vattenmättade och hydrostatiskt tryck för markvattnet är 1 atmosfär. Nivå för grundvattnets yta mäts vanligen med ett perforerat rör nedsänkt i jord. Röret vattenfylls i permeabla jordar upp till nivån för GVV.
Islins	Jordvärmesystem dimensioneras normalt så att jorden runt slangarna fryser och en islins bildas runt dessa.
Jordvärmesystem	Markvärmesystem där en markkollektor är kopplad till en värmepump i syfte att utvinna termisk energi från en jordvolym för att avge denna vid en önskad avgivningsplats. Utvunnen termisk energi är främst passivt lagrad solenergi. Markkollektorn kan vara installerad horisontellt eller vertikalt i marken. I Figur 1 visas en markvärmeväxlare med en slang/dike.



Figur 1, Schematisk illustration av uppbyggnaden för ett jordvärmesystem. (3)

Kapillaritet

Vatten förekommer i jord vid undertryck ovan GVV. Vattnet sägs då vara kapillärt bundet till jordkornen. Nivån för den vattenhalt som jorden kan hålla trots gravitationskraften varierar beroende på jordart och porositet. Sambandet beskrivs i s.k. pF-kurvor.

Kapillärvattenzon

Område ovan GVV med nära vattenmättade förhållanden (se Figur 4).

Kompakta jordvärmesystem

Jordvärmesystem med markvärmesväxlare med mer än en slang/dike. De kompakta jordvärmesystem som avses i denna rapport har två slangar (Motala) och slangar av slinkymodell (Flistad) installerade i diken.

Kondensor

Vid kondensorn på varm sida av en värmepump kondenserar köldmediet och avger värme till värmebärarfluiden.

Köldbärare

Vätska (även kallad brine) som cirkulerar i slangar i ett jordvärmesystem. Den transporterar termisk energi från markvärmesväxlaren till värmepumpen. Brinetemperatur betecknas i rapporten med T_b .

Köldmedium

Fluid som cirkulerar i en värmepump mellan dess kondensor och förångare. Fluiden växlar mellan vätske- och gasfas och transporterar värmeenergi från förångaren till kondensorn.

Latent värme, c_l (MJ/m³K)

Den energimängd i en materialvolym som kan frigöras när dess vatteninnehåll fryser till is. Latent värme (c_l) för vatten är mycket stor, 330 MJ/m³, jämfört med dess specifika värmekapacitet (c_p) 4,20 MJ/m³K.

Markvatten

Vatten i omättad zon ovan GVV.

Markvärmesystem

Samlingsbegrepp för system vilka utvinnet termisk energi från jord eller berg och överför denna till en plats som ska värmas eller kylas. I systemen utvinns både värme och

	kyla ur mark, oftast med hjälp av en värmepump. Utvinning av värmeenergi är i dagsläget dominerande i Sverige.
Markvärmeväxlare	En markvärmeväxlare består av slangar installerade i mark (jord eller berg). Vid värmeuttag ur mark håller brinen i slangsystemet lägre temperatur jämfört med omgivande mark, varför värmeledning sker mot slangarna (se avsnitt 5.1). Vid uttag av kyla ur marken är fallet det motsatta.
Menisk	Liten porvolym mellan två mineralkorn, vilken bildar en smal passage mellan större porer. Utrymmet vätskefylls tidigt när jorden uppfuktas.
Meteonorm[®]	Databas för generering av klimatdata ett normalår i en stor mängd orter över hela världen.
Permafrost	Tillstånd då en markprofil är tjälad på någon nivå under minst två år.
Porositet, θ (%)	Volymandel i ett material tillgänglig för gas eller vätska.
Horisontprofil (°)	Vinkel ovan markyta upp till vilken den visuella horisonten är täckt av träd och/eller dylikt. Skuggningen på en plats ökar med en ökande horisontprofil.
Slinky	En typ av markvärmeväxlare där spiralformade slangar har installerats i jord. Slinkymodellen som studeras i denna rapport har ligger horisontellt i diken på nivån 1 m under markytan (se avsnitt 3.2).
Specifik värmekapacitet	c_p (MJ/ m ³ K) Energimängd som krävs för att värma upp 1 m ³ av ett material 1K.
Temperatur, T (°C)	Kvantitativt mått på graden av värme i ett material.
Vattenkvot, w (%)	Kvot mellan massa för vattenfas och fast fas i en materialvolym ges av formeln nedan.
	$w = m_w/m_s$
	där m_w = massa för vattenfas i en jordvolym (kg) m_s = massa för den fasta fasen i en jordvolym (kg)
Vattenmättnadsgrad, S_r (%)	Andel av porvolymen i ett material vilken är vattenfylld ges av formeln nedan:
	$S_r = (V_w/V_{\text{tot por}}) \cdot 100$
	där S_r = vattenmättnadsgrad i en jordvolym (%) V_w = volym vatten (m ³) $V_{\text{tot por}}$ = total porvolym (m ³)
Värmebärande fluid	Fluid som transporterar termisk energi från en värmepump till önskad plats (t.ex. radiatorer och varmvattenberedare).
Värmefaktor, η (-)	Värmefaktorn, eller verkningsgraden, mäter effektiviteten hos en värmepump. Faktorn ligger vanligen i intervallet 3-4 och ges nedan.

$$\eta = Q/W$$

där
 η = värmefaktor (-)

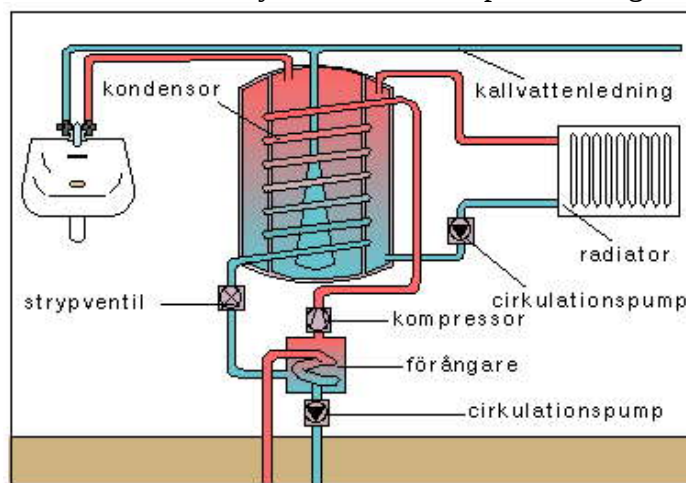
Q = avgiven värmeeffekt från värmepump (kW)
 W = tillförd eleffekt till kompressor i värmepump (kW)

Värmekonduktivitet, λ (W/mK) Mått på förmågan hos ett material att transmitta värmeenergi vid en temperaturgradient. λ definieras som överförd energimängd (J) per sekund och 1 m^2 över en 1 meter tjock platta under en temperaturgradient av 1 K/m i värmeströmmens riktning.

Värmemotstånd Egenskap hos ett material som bestämmer värmeflödet vid en viss temperaturskillnad. Minskar med λ och ökar med dess utsträckning i värmeströmmens riktning.

Värmepump (VP) I en värmepump kan värmeenergi transporteras från en kall till en varmplats. En värmepump består av en varm (kondensor) och en kall (förångare) sida och mellan dessa cirkulerar ett köldmedium (se Figur 2). I värmepumpen överförs värme från brinen på dess kalla sida till värmebärarfluiden på dess varma sida. Brinetemperaturen sänks vanligtvis ca 3°C vid värmeväxling mot värmepumpens förångare.

Vid cirkulationen i värmepumpen passerar köldmediet en strypventil, så att dess tryck sänks, innan värme växlas mot brinevätskan på den kalla sidan vid förångaren. Köldmediet går därmed från vätskefas till gasfas och upptar ångbildningsvärme från brinen. Efter passage av förångaren passerar köldmediet en kompressor så dess tryck och temperatur höjs. Ett elektricitetstillskott behövs för att driva kompressorn i systemet. Köldmediet kondenserar vid kondensorn så att ångbildningsvärme avges till värmebärarfluiden vid den varma sidan av värmepumpen. Från den varma sidan av värmepumpen transporteras värmeenergin med byggnadens distributionssystem till önskad plats för avgivning.



Figur 2, Illustration av uppbyggnad för en värmepump. (3)

1.5 Beteckningar

c_L (MJ/m ³)	Specifik smältbildningsvärme i ett material
c_P (MJ/Km ³)	Specifik värmekapacitet i ett material
DUT (°C)	Dimensionerande Utomhus Temperatur för en byggnad
ES	Markvärmeväxlare med En Slang/dike
GVY (m)	Nivå för GrundVattenYta under markyta
H (MJ/m ³)	Entalpinivå i ett material
K_s (m/s)	Hydraulisk Konduktivitet
L	Lera
Lu	Luleå
M	Morän
Ma	Malmö
Molnighet (%)	Andel av himmelen vilken är molntäckt
No	Norrköping
Re	Reynolds tal, $Re > 2300$ vid turbulent stömning annars laminär sådan
RF (%)	Relativ Fuktighet
S	Siltig sand
SL	Markvärmeväxlare med SLinky installerad i diken
S_r (%)	Vattenmättnadsgrad för porer i ett material
T (°C)	Temperatur
Tb-medel (°C)	Medel Temperatur för brinen under perioden 1/12-1/3.
Tb-min (°C)	Minimum Temperatur för brinen under simulerad period.
TS	Markvärmeväxlare med Två Slangar/diken
VU	VärmeUttag i ett jord jordvärmesystem
VP	Värmepump
w (m ³)	Vattenkvot
Δ	Differens
λ (W/mK)	Värmekonduktivitet
θ (%)	Porositet
ρ_{torr} (kg/m ³)	Torrdensitet

2 TEORI FÖR TERMISK ANALYS AV JORDVÄRMESYSTEM

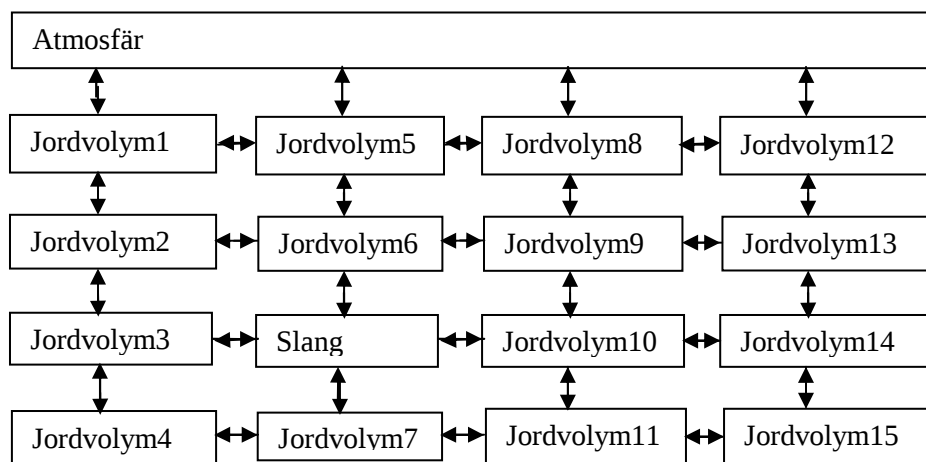
2.1 Teori för temperaturutveckling i jordmaterial och i jordvärmesystem

Jord kan betraktas som ett trefasssystem bestående av mineralpartiklar, vatten och luft. Proportionerna mellan dessa delar och mineralpartiklarnas kornfördelning avgör en jords termiska egenskaper. Temperaturutvecklingen i marken, utan värmeuttag (VU) med slang, kan sammanfattningsvis sägas bero på jordens termiska egenskaper och områdets klimat. När VU från marken sker med slang styrs temperaturutvecklingen i marken även av prestanda för det tekniska systemet. Dessa styrande miljöfaktorer diskuteras i avsnitt 2.2.

Temperaturnivåer i mark varierar naturligt över året enligt en termisk jämvikt som funktion av förutsättningarna vid den aktuella marken. Temperaturen i mark följer lufttemperaturen över året med en fördröjning i tiden och dämpning i amplitud. Under den kalla årstiden är temperaturen högre i marken än i atmosfärluften vilket ger upphov till värmetransport från mark till atmosfär. Marken värmer därför utomhusluften under den kalla årstiden. Under den varma årstiden är fallet det motsatta. Temperaturfluktuation i marken under året når normalt i Sverige ungefär ner till nivå 10 m under markytan. Mark bidrar därmed till sänkta temperaturfluktuationer i luft under ett år och kan därför betraktas som ett värmelager från sommar till vinter. Lufttemperaturen fluktuerar, som bekant, inte bara över året utan även under dygnet. Därför förekommer motsvarande termiska process mellan dag och natt som mellan sommar och vinter. Temperaturfluktuation under ett dygn når endast ca 0,3 m under markytan. Dygnsfluktuationen för lufttemperaturen når normalt inte de djup på 0,5-1,5 m där slangarna är installerade i marken. Värmetransport sker i mark med värmestrålning, värmeledning och värmekonvektion varav bidragen från värmekonvektion och strålning ofta kan anses försumbar. Snö har lägre värmeledningsförmåga (λ) än jord. Därför kan ett snötäcke på marken under den kalla årstiden betraktas som värmeisolering mot luften för marken. Medeltemperaturen under denna period ökar därför med tjocklek för snötäcket. Vanligtvis samvarierar lufttemperatur och snötäcke under den kalla årstiden. En kall vinter innebär ofta ett tjockare snötäcke. Mark kan sammanfattningsvis betraktas som en "termisk köl" för ett landområde.

Entalpinivån i en jordvolym beror av dess temperaturnivå och termiska egenskaper som porositet och vatteninnehåll. Randflöden till volymen är drivande för dess temperatur- och entalpiutveckling. Känslighet i jordvolymen med avseende på randvärden beror av dess värmemotstånd och entalpinivå. Vid värmeuttag ur jord med ett slangsystem beror jordtemperaturen dessutom av tekniska parametrar för systemet. Värden hos värmemotstånd, entalpinivå och tekniska parametrar bestämmer tidskonstanten för jordvolymen. Med tidskonstant avses tidslängd för systemet att komma i termisk jämvikt vid konstanta indata. Ett jordvärmesystem med lång tidskonstant är trögt ur termisk synvinkel och påverkas för en given tidsperiod lite vid värme- och kylalaster. Lång tidskonstant tyder på bra egenskaper i systemet i syfte att lagra värme eller kyla. Det är väsentligt i ett jordvärmesystem vilken mängd värmeenergi som kan lagras från

varm till kall årstid. I Figur 3 ges en konceptuell modell av energiflöden och energireservoarer i ett jordvärmesystem.



Figur 3, Konceptuell illustration av ett jordvärmesystem. I figuren visas energireservoarer (atmosfär, jordvolym 1-15 och slang) som rektanglar och flöden som pilar mellan dessa. Väsentliga faktorer som kan väntas styra temperaturutvecklingen i systemet är randflöden i markyta, värmemotstånd respektive entalpinivå i jorden och prestanda för det tekniska slangsystemet. I avsnitt 5.1 visas termiska egenskaper för energireservoarerna och styrande faktorer för dessa.

Temperaturen i markvärmväxlare kan förenklat sägas följa den naturliga temperaturfluktuationen i marken över året, men med en överlagrad nedkylning på upp till 2-3 °C vid området för slangarna. Ett jordvärmesystem, utan värmeåterföring, utviner delar av den termiska energi som lagras i marken under den varma årstiden. Resultatet blir temperaturgradienter mellan slangarna och omgivande jord. Nedkylning av jorden orsakat av värmeuttag minskar med ökande avstånd från slangarna. Ett jordvärmesystem dimensioneras utifrån dess miljöförutsättningar så att återladdning av jorden sker sommartid och en rimlig förväntad T_b under vintern. I avsnitt 5.2 visas formler för förväntad nivå hos värmeflödet. Det är proportionellt mot aktuell temperaturgradient. Värmeflödet blir därför större till de mer nedkylda jordvolymerna. Den nedkylda jorden absorberar, eller "suger" åt sig, mer värme från atmosfärluften jämfört med en motsvarande opåverkad. Det möjliggör en termisk återladdning av jorden. Därför blir temperaturen i en korrekt dimensionerad markvärmväxlare samma som en motsvarande opåverkad jord i slutet av den varma årstiden. Huruvida återladdning av markvärmväxlaren sker är en mycket viktig indikator för att upptäcka om värmeuttaget ur jorden är för stort. Om värmeuttaget är för stort flera år i rad kan permafrost bildas på djup under slangnivå.

2.2 Teori för termiska egenskaper och processer i jordmaterial

Temperaturnivå för brinen i ett jordvärmesystem, utan värmeåterföring till marken, beror av en rad faktorer hos jorden och klimatet i området.

Tabell 1, Illustration för några miljöfaktorerers inverkan i ett konstant jordvärmesystem på brinetemperatur, entalpinivå (H), värmemotstånd i mark och randflöden till mark från atmosfär. Känsligheten hos brinetemperaturen som funktion av dessa miljöfaktorer analyseras i kapitel 6.

Faktor	Förändring av faktor	Förändring av T_b	Förändring av H	Förändring av värmemotstånd för mark	Förändring av randflöde till mark från atmosfär
Värmeuttag	+	-			
Slanglängd	+	+			
c/c-avstånd för diken	+	+			
Värmekonduktivitet (λ)	+	+		-	
Specifik värmekapacitet c_p	+	+ samt lägre och fördröjda T fluktuationer	+		
Uppfuktning vid slang	+	+	+	-	
Jordart	Mer grovkornig kornfraktion	-		-	
Porositet (θ)	+ och S_r konstant	-	-	+	
Kvartshalt i jord	+	+		-	
FK	+	+	+	-	
Soltimmar	+	+			+
T_{luft}	+	+			+
Snödjup	+	+		+	-
Horisontprofil ovan markyta	+	- vintertid, + sommartid			-

2.2.1 Värmekonduktivitet, λ (W/mK), i jordmaterial

Värmekonduktivitet (λ) för ett material mäter förmågan hos ett material att transmitta värmeenergi genom värmeledning vid en temperaturgradient. När λ ska bestämmas för en jord behövs mätningar göras eller en teoretisk beräkning utifrån känd torrdensitet, S_r och kvartshalt. I Sundberg (1988) har värden för λ tagits fram genom sammanvägning mellan mätresultat och en teoretisk beräkningsmodell. Studien bygger på mätningar av λ hos över 900 jordprover med olika torrdensitet, S_r och kvartshalter. Varje jordprov har analyserats vid minst två olika S_r . Jordmaterial med moränkaraktär är underrepresenterade i studien eftersom jordarten även är underrepresenterad i anslutning till bebyggelseområden. Den teoretiska beräkningen av λ bygger på en modell formulerad i Karsten (1949) och som är vidareutvecklad i Johansson (1975). Modellen innebär en interpolation mellan λ i torrt och vattenmättat tillstånd.

Formel 1 och Formel 2 används för beräkning av λ då $0 < S_r < 10$ respektive $10 \leq S_r < 100$.

Formel 1 $\lambda = \lambda_t + (\lambda_m - \lambda_t) \cdot (1-a)/0,1 \cdot (S_r)$ gäller då $0 < S_r \leq 10$

Formel 2 $\lambda = \lambda_t + (\lambda_m - \lambda_t) \cdot ke(S_r)$ gäller då $10 < S_r \leq 100$

där

λ (W/(mK)) = förväntad λ i aktuell jord

$\lambda_t = 0,034 \cdot n^{-2,1}$ torr λ , används vid normal n

$\lambda_m = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)}$ λ i jord vid vattenmättad

$\lambda_s = \lambda_{qz}^{qz} \cdot \lambda_r^{(1-qz)}$ λ för mineralpartiklar

$ke = S_r$ i fryst tillstånd

$ke = a^{10} \cdot \log S_r + 1$, i ofryst tillstånd

där

qz = kvartsandel från mellan 0 och 1

λ_w = λ för vatten eller is (W/(mK))

λ_{qz} = λ för kvarts

λ_r = λ för resterande materialpartiklar

n (-) = porositet i jord

$a = 0,94$ och $0,68$ för grovkorniga resp. finkorniga jordarter

ρ_{torr} (kg/m³) = torrdensitet i jordmaterial

I den anpassade modellen för bestämning av λ har parametern a och kornkonduktiviteten antagits som konstanta i varje jordart, med undantag för sandmaterial där olika kornkonduktivitet har antagits för olika jordprover. Den kornkonduktivitet som har antagits för lera, silt/sand och morän i såväl fruset som ofruset tillstånd är 3,08/4,28/4 W/mK. En gemensam kornkonduktivitet i alla jordprover av samma jordart innebär naturligtvis en svaghet i modellen.

Linjär och radiell värmeledning behandlas i avsnitt 5. 1 (se Formel 7 respektive Formel 8). Drivande potential vid värmeledning är en temperaturgradient mellan ytorna där värmeledning sker. λ i ett jordmaterial är en funktion av flera variabler. Förenklat kan λ beskrivas som ett viktat medelvärde av λ i de tre materialfaser som jorden består av. λ i de flesta mineralpartiklar är 2-3 W/mK, medan mineralet kvarts skiljer sig avsevärt från dessa med $\lambda = 7,8$ W/mK. λ i en jord stiger därför kraftigt med dess kvartshalt. Vatten har $\lambda = 0,56$ W/mK, vilket är lägre jämfört med värdet i mineralpartiklar, men betydligt högre än luft med $\lambda = 0,025$ W/mK. Luft kan därför betraktas som ett isolerande material. När en jord uppfuktas och dess

vattenmättnadsgrad (S_r) ökar ersätts luften i dess porer med vatten, varför λ i jorden då ökar. Vid uppfuktning av jord ökar S_r i materialet. Vattnet fördelas då i första hand vid partikelytor och i menisker mellan mineralpartiklarna. Det innebär att kontaktytan mellan mineralpartiklarna ökar snabbare vid låga S_r jämfört med höga. Därför ökar även λ snabbare vid låga S_r jämfört med vid höga S_r . Vid omkring $S_r = 30\%$ är majoriteten av meniskerna i jorden vattenfyllda vilket resulterar i en brytpunkt där för λ -kurvan. Det innebär att λ är känsligare med avseende på S_r vid låga jämfört höga S_r .

Bilaga 4-

Bilaga 9 redovisar förväntade λ -värden från Sundberg (1988) för jordarterna lera, silt/sand, och morän i fruset och ofruset tillstånd. Kurvorna är isolinjer med konstant torrdensitet (ρ_{torr}). I Bilaga 10 redovisas λ i en siltig sandjord som funktion av dess kvartshalt, S_r och ρ_{torr} . Vid ofruset tillstånd, $S_r=100\%$ och $\rho_{\text{torr}}=1600 \text{ kg/m}^3$ är ungefär $\lambda = 1,6/1,8/2,15 \text{ W/mK}$ vid kvartshalterna 35, 55 och 75 %. Vid fruset tillstånd, $S_r=100\%$ och $\rho_{\text{torr}}=1600 \text{ kg/m}^3$ är $\lambda = 2,75/3,25/3,80 \text{ W/mK}$ vid kvartshalterna 35, 55 och 75 %. λ ökar med ca 35 % när kvartshalten ökar från 35 till 75 %. Diagrammen gäller vid temperaturer upp till rumstemperatur, eftersom inverkan av strålning och konvektion då kan anses vara försumbar.

När porositeten i jorden sjunker ökar dess volymsandel med mineralpartiklar. Med konstant S_r ökar därför λ med sjunkande porositet. Is har $\lambda = 2,0 \text{ W/mK}$ vilket är högre än λ för vatten. Därför har frusen jord högre λ jämfört med ofrusen jord. När det naturliga tjäldjupet ökar minskar mängden tillämpligt vatten i närheten av slangerna. Det är därför önskvärt att slangarna läggs på tjälfritt djup under markytan. En markvärmeslag dimensioneras normalt så att en islin bildas runt slangarna. Detta är mycket fördelaktigt för värmeutbytet i systemet eftersom vattnets stora smältbildningsvärme (333 MJ/m^3) då kan utvinna. Dessutom blir λ större och säkrare i kontaktytan mellan slang och jord. För nordliga områden med mycket låga tjäldjup, t.ex. i omättade tjäljordar, kan detta önskemål vara svårt att realisera och motverkas delvis av att möjligheten till passiv återladdning under sommaren minskar med djupet.

λ för lera ligger i intervallet $0,9\text{--}1,7 \text{ W/(mK)}$ vid $S_r = 80\%$ och för silt ligger λ -intervallet något högre, $1,2\text{--}2,0 \text{ W/(mK)}$. Vad gäller sand har λ uppmätts och beräknats för hela intervallet $0 \leq S_r \leq 100\%$. Vid $S_r = 80\%$ ligger λ i intervallet $1,3\text{--}2,1 \text{ W/(mK)}$, vilket är något högre jämfört med motsvarande värde för silt. Vid uppfuktning av jord fuktas i första hand menisker och mineralpartiklars ytor. Kompakta jordmaterial med hög torrdensitet får en tydligare brytpunkt i λ -kurvan vid $S_r = 20\text{--}40\%$, jämfört med jordmaterial med låg torrdensitet. λ -kurvorna för en jordart, med olika torrdensitet, har ett nära nog likformigt utseende då S_r varierar. Tabell 2 ger en översikt för värmekonduktiviteten hos dessa jordar i den anpassade modellens i Sundberg (1988) vid $S_r = 20\%$ respektive 100% och vid några typiska värden för torrdensiteten för varje jordart. Som framgår av tabellen blir λ högre då torrdensiteten ökar och då jorden blir mer grovkornig. Morän har lägre λ jämfört med silt och sand. Vid mycket låga S_r blir λ lägre i fryst tillstånd jämfört med ofruset tillstånd. Vid normala och höga nivåer för S_r blir fallet det motsatta.

Tabell 2, Sammanställning av värmekonduktivitet för några jordarter vid $S_r=20$ och 100 % illustrerat i

Bilaga 4 från Sundberg (1988).

Jordart	Porositet (%)	Torrdensitet (kg/m^3)	λ (W/mK) vid $S_r=20$ %, fruset tillstånd	λ (W/mK) vid $S_r=20$ %, ofruset tillstånd	λ (W/mK) vid $S_r=100$ % i fruset tillstånd	λ (W/mK) vid $S_r=100$ % i ofruset tillstånd
Humus	92	200	0,40	0,17	1,80	0,65
Lera	51	1300	0,55	0,64	2,34	1,28
Silt och sand	40	1600	0,87	0,83	2,95	1,87
Morän	40	1600	0,70	0,55	2,38	1,64

Som framgår av Tabell 2 ovan har humusjord hög porositet. Därför får materialet mycket låga λ -värden vid låg S_r , medan dess λ -värden vid hög fuktighet konvergerar mot λ -värden i vatten. Kompaktdensitet i humusjord har antagits vara 2000 kg/m^3 . Lera har generellt sett lågt λ jämfört med andra jordmaterial. Det beror på att lera är ett poröst jordmaterial, men även att dess kvartsinnehåll är lågt. För silt och sand är λ formulerat gemensamt. I silt- och sandjordar kan kvartsinnehållet anses vara högre jämfört med t.ex. lera. Därför har kornkonduktiviteten antagits högre. Det bidrar till att silt- och sandjordar har den högsta förväntade värmekonduktiviteten i studien. Moränjordar kan enligt studien förväntas visa något lägre λ -värden jämfört med silt- och sandjordar.

I Porsvig (1986) redovisas en studie av λ i nio olika jordar. Sex av dessa jordar är sandmaterial. Resterande jordar är silt, moränlera och lera. För att bedöma teoretisk värmekonduktivitet användes i studien Formel 1-Formel 2, vilken även användes i Sundberg (1986). I Bilaga 11-Bilaga 13 redovisas uppmätta och beräknade värden för λ i de 9 sandmaterialen. Uppgifter om graderingstal (C_u), porositet (θ), och torrdensitet hos jordmaterialen framgår i bilagorna. Överlag är de uppmätta värdena högre jämfört med de beräknade. För sandmaterialen är de uppmätta λ -värdena i genomsnitt 12 % eller $0,16 \text{ W/(mK)}$ högre än de beräknade. Vid $S_r=100$ % är λ som högst för materialet kallat "3 Grovsand" med $\lambda = 3$ och som lägst för "2 Mellansand" med $\lambda = 2,2$. Vid lägre grader av vattenmättnad tenderar avvikelserna att vara stora, vilket kan antas bero på svårigheter med att modellera placering av vattnet i porerna. För sandjordarna verkar det finnas ett samband mellan torrdensitet (ρ_{torr}) och λ . Jordarna benämnda "1 Grovsand", "2 Mellansand", "4 Grovsand" och "5 Mellansand" med ρ_{torr} -värden 1570 kg/m^3 har konsekvent lägre värmekonduktivitet jämfört med de båda jordarna benämnda "3 Grovsand" och "6 Grovsand" med ρ_{torr} -värden på ca 1800 kg/m^3 . För jordarna med ca högre torrdensitet är λ omkring $0,4\text{-}0,8 \text{ W/mK}$ högre jämfört med jordarna med lägre torrdensitet. Det verkar rimligt eftersom kornkonduktiviteten är lägre i mineralkorn jämfört med luft eller vatten. I Tabell 3 jämförs värden av förväntad λ i Porsvig (1986) med värden i Sundberg (1988). Värdena från Sundberg (1988) avser både silt och sandmaterial. Av Tabell 3 framgår att λ -värdena i Sundberg (1988) konsekvent blir lägre jämfört med värdena i Porsvig (1986) vilket skulle kunna förklaras med att silt som är ett finkornigare material än sand reducerar värdena i Sundberg (1988).

Tabell 3, Jämförelse mellan förväntad värmekonduktivitet (λ , W/mK) i Porsvig (1986) och Sundberg (1986) vid $S_r=100$ % (

Bilaga 4-Bilaga 13).

Torr densitet (kg/m^3)	1570	1570	1570	1570	1780	1820
λ i Porsvig, (1986) - jordart och Graderingstal (C_u)	2,6- Grovsand och (1,23)	2,4- Grovsand och (1,27)	2,4- Mellansand och (1,38)	2,3- Mellansand och (1,40)	3,2- Grovsand och (4,53)	3,3- Grovsand och (4,53)
λ i (Sundberg, 1988)	1,85	1,85	1,85	1,85	2,2	2,2

2.2.2 Specifik värmekapacitet, c_p ($\text{MJ/m}^3 \text{ K}$), och latent värme, c_L (MJ/m^3), i jordmaterial

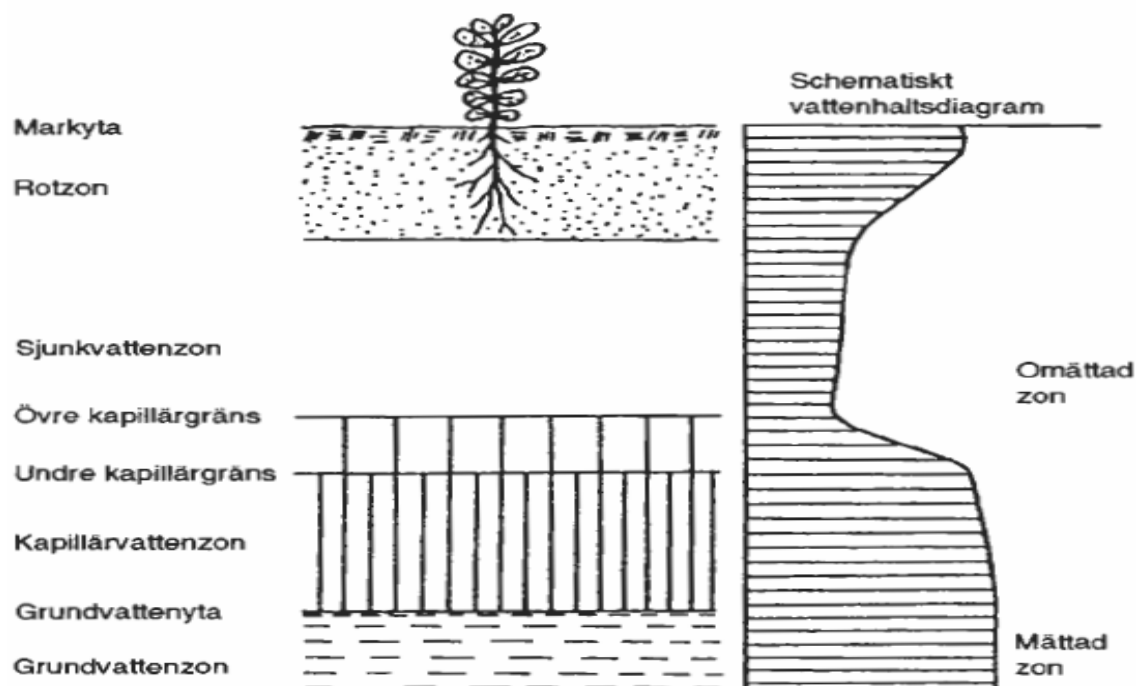
Entalpinivå (H) i ett jordmaterial beskriver dess termiska energimängd. Entalpinivå i en jord bestäms med hjälp av dess specifika värmekapacitet (c_p) och dess latent värme (c_L) (se avsnitt 5.1). c_p för en jord kan beräknas som ett viktat medelvärde av c_p för dess beståndsdelar. Vatten har högre ($c_p=4,2$) jämfört med is ($c_p=2,04$). Därför blir c_p för jord högre i ofruset tillstånd jämfört med fruset tillstånd. c_p beror inte av vattnet placering i jordens porer, varför c_p beror linjärt av S_r . Förväntade nivåer för c_p från Sundberg (1988) redovisas i Bilaga 15. Vid $\rho_{\text{torr}}=1600 \text{ kg/m}^3$ i ofruset tillstånd ökar c_p från 1,15 till 2,85 ($\text{MJ/m}^3 \text{ K}$) när S_r stiger från 0 till 100 %. c_p har, i motsats till λ , lägre värden i fruset än i ofruset tillstånd.

Latent värme (c_L , MJ/m^3) i jord finns bunden till dess vatteninnehåll. Därför är nivå för c_L direkt proportionellt mot S_r . I Bilaga 16 visas att c_L ökar linjärt från 0 till 135 (MJ/m^3) med $\rho_{\text{torr}}=1600 \text{ kg/m}^3$ och S_r stiger från 0 till 100 %. Vid normala fuktnivåer i jord (t.ex. $S_r = 40-70$ %) och vid temperaturändringar mellan några minusgrader upp till normal årsmedeltemperatur i jorden bidrar c_L med större delen av jordens entalpiinnehåll. Därför är jordtemperaturen mycket känslig mot mängd ofruset vatten i jorden.

2.2.3 Nivåer för markvatten och grundvattenyta i mark

Grundvattenytan (GVY) fluktuerar enligt Knutsson, Morfeldt, (2002) under ett år ungefär två meter i moränjord, en meter i sandjord och några centimeter i grusjord. Dess högsta nivå under ett år inträffar vanligtvis under tidig vår i samband med snösmältningen. Under växtsäsongen sjunker normalt grundvattenytan successivt och dess lägsta nivå antas normalt under sensommaren. Det ska nämnas att amplituden för den årliga fluktuationen hos grundvattenytan ökar med längd för snötäckning av markytan. Under den kalla årstiden fylls grundvattenmagasinen inför kommande växtsäsong. Vanligtvis ligger högsta nivå för grundvattenytan under ett år mindre än en meter under markytan. Det innebär att S_r på slangnivå i många jordvärmesystem varierar under ett år.

Figur 4 visar schematiskt nivån för vattenhalt i omättad zon i jorden. I rotzon nära markytan infiltrerar nederbörd från markytan. Här varierar S_r kraftigt över tiden beroende på nivåer hos serier av nederbörd och avdunstning. I sjunkvattenzonen under rotzonen kan S_r betraktas som konstant med djupet och över tiden. S_r är här ungefär lika med jordens fältkapacitet. Höjden på sjunkvattenzonen varierar kraftigt över året beroende på grundvattenytans fluktuation. Under sjunkvattenzonen är markvattnet kapillärt bundet till jordkornen. I kapillärvattenzonen nära grundvattenytan ligger S_r nära 100 %.



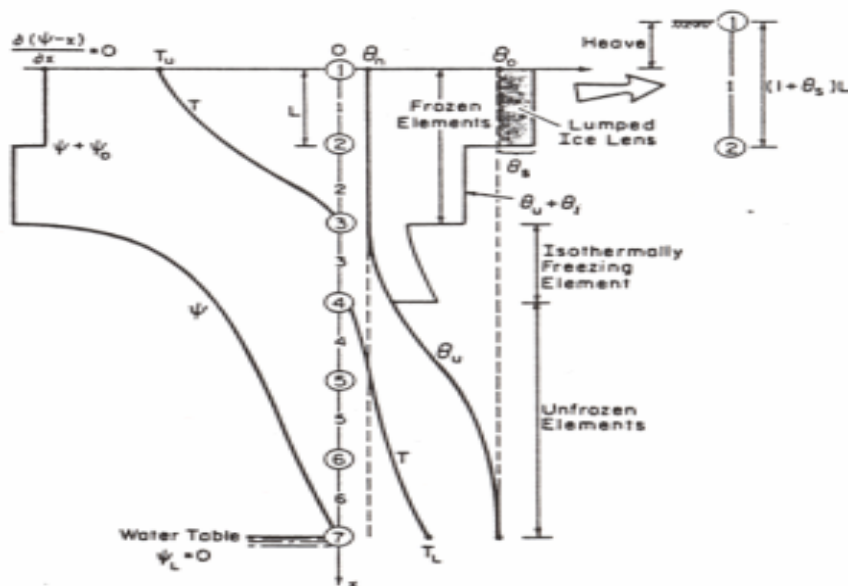
Figur 4, Zon för vattnets fördelning med djupet i en markprofil (Knutson, G. Morfeldt, C. O., 2002).

Fukt i markens omättade zon ovan grundvattenytan benämns markvatten och är bundet med undertryck till mineralkornen. I finkorniga jordar är vattnet starkare bundet till kornen än i grovkorniga jordar. Den nederbörd som infiltrerar ner genom markytan kan antas ha en temperatur något lägre än lufttemperaturen. Nettoeffekten under ett år blir att nederbörden tillför marken kyla konvektivt, och speciellt under den kalla årstiden. Jorden och därmed även grundvattnet kan antas vara varmare utanför markvärmväxlaren under större delen av ett år. I markvärmväxlare med ett grundvattenflöde kan det antas förekomma en konvektiv värmetransport från omgivande jord till markvärmväxlaren. Fetter (2001) beskriver grundvattenflöde enligt Darcy's lag. Storleken på denna värmetransport beror på omsättningstiden för grundvattenmagasinet i markvärmväxlaren. Omsättningstiden ges av den hydrauliska gradienten i området och jordmaterialets hydrauliska konduktivitet. När omsättningstiden minskar närmar sig brinetemperaturen motsvarande ostörda jordtemperatur. Temperatursänkningen jämfört med omgivande jord normalt är ca 1-2 °C. Det ska nämnas att värmekonvektion med infiltrerande nederbörd och grundvattenflöde kan normalt antas vara av marginellt inflytande på systemets värmeutbyte.

2.2.4 Tjälning av jordmaterial

I Figur 5 illustreras schematiskt fördelningen för porvattenundertryck, temperatur och vattenhalt med djupet i en tjälad markprofil. Några förväntade fysikaliska processer visas i 6 zoner från markyta till grundvattenyta. I zon 1 och 2 är jorden tjälad med temperaturnivå under 0°C och konstant porvattenundertryck. I zon 1 närmast markytan kan tjällyftning väntas. I zon 3 ökar andelen ofruset vatten successivt med djupet och jorden övergår så från fruset till ofruset tillstånd. P.g.a. frigörelsen av smältbildningsvärmen vid frysning av vattnet är temperaturen i zonen fixerad vid fryspunkten. I zon 4 till 6 ökar nivån för parametrarna från frysfronten ner till grundvattenytan.

θ_u	volymetrisk ofrusen vattenhalt	(m^3/m^3)
θ_m	volymetrisk ofrysbar vattenhalt	(m^3/m^3)
θ_i	volymetrisk frusen vattenhalt	(m^3/m^3)
θ_s	volymetrisk segregerad is (bidrar till tjällyftning, se figur 10.1)	(m^3/m^3)
ρ_w	vattnets densitet	(kg/m^3)
ρ_i	isens densitet	(kg/m^3)
λ	$=\lambda(\theta, T)$ värmekonduktivitet för jord + vatten + is	$(\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C}))$
c_w	$=c_w(T)$ volymetrisk värmekapacitet för vatten	$(\text{J}/(\text{m}^3\text{C}))$
c	$=c(\theta, T)$ volymetrisk värmekapacitet för jord + vatten + is	$(\text{J}/(\text{m}^3\text{C}))$
L_a	latent värmet för vattnet, volymetriskt	(J/m^3)
q_w	flödes hastighet (vätska)	(m/s)
K_{ψ}	$=K(\psi)$ hydraulisk konduktivitet	(m/s)



Figur 5, Schematisk illustration av fördelningen för temperatur, porvattenundertryck och vattenhalt över djupet i en tjälad markprofil ovan grundvattenytan (Rhen, 1989).

2.2.5 Termisk fukttransport i jordmaterial

I jord förekommer fukt i flera olika former. De kan vara som ånga i porer, kemiskt bundet vatten till mineralpartiklar, absorberat med elektriska krafter till partikelytor,

allmänt absorberat i jordens kornskelett och i frusen fas. Fukttransport i jord betraktas som en komplicerad process, vilken kan drivas av en rad mekanismer.

Några viktiga former för fukttransport i jordmaterial är:

1. Serier av övergångar mellan vätske- och ångfas i porer och vid partikelytor. Fukttransporten sker då genom förångning och kondensation vid porernas ytor.
2. Påtvingad konvektion av vattenånga orsakad av lufttrycksgradient.
3. Rörelse hos isfasen.
4. Kapillär väsketransport, orsakas av skillnader i jords kapillärsugningsförmåga vid olika temperaturer.
5. Ångdiffusion enligt Formel 3
6. Vätskediffusion enligt Formel 4

Huvuddelen av förväntad fukttransport i porösa material kan beskrivas med Philip och de Vries lag (Philip och de Vrie 1957). Med lagen kan fukttransport analyseras i såväl ångfas (se Formel 3) som vätskefas (se Formel 4) under både temperaturgradienter (isobar fukttransport) och ångtrycksgradienter (isoterm fukttransport).

Formel 3
$$q_v = -\rho_w \times (D_{Tv} \times \nabla T + D_{\theta v} \times \nabla \theta)$$

Formel 4
$$q_l = -\rho_w \times (D_{Tl} \times \nabla T + D_{\theta l} \times \nabla \theta + K \times i)$$

där

q_v = ångflöde mellan två parallella ytor ($\text{g/cm}^2\text{s}$)

q_l = vätskeflöde mellan två parallella ytor ($\text{g/cm}^2\text{s}$)

ρ_w = densitet för vatten (kg/cm^3)

D_{Tv} = konstant för isobar diffusion i ångfas (cm^2/s)

D_{Tl} = konstant för isobar diffusion i vätskefas (cm^2/s)

$D_{\theta v}$ = konstant för isoterm diffusion i ångfas (cm^2/s)

$D_{\theta l}$ = konstant för isoterm diffusion i vätskefas (cm^2/s)

∇T = termisk gradient mellan ytor för fuktflöde ($^\circ\text{C}$)

$\nabla \theta$ = fuktgradient mellan ytor för fuktflöde (g/cm^3)

K = hydraulisk konduktivitet, beroende av η och S_r (m/s)

i = gradient beroende av gravitation, ($i=1$ i z-led och 0 i x och y-led. z -r vertikal och positiv uppåt) (-)

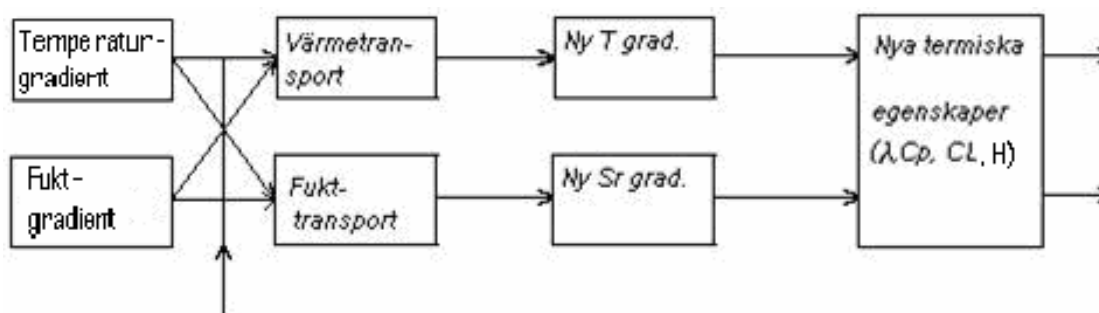
Såväl isoterm som isobar fukttransport kan ske i vertikal och horisontell led. Philip och de Vrie (1957) hävdar att vid relativt låga S_r sker fukttransport främst i ångfas. Det orsakas av att det då saknas sammanhängande vätskebryggor i kornskelettet och markvattnets hårda bindning till kornen vilket försvårar fukttransport i vätskefas. Vid höga nivåer för S_r finns en kontinuerlig vätskefas i jordens porer och jordens menisker är vätskefyllda. Det saknas då en sammanhängande luftvolym i jorden. I det läget sker fukttransport främst i vätskefas.

I markvärmewäxlare uppstår temperaturgradienter vilket kan orsaka fukttransport. Det kan resultera i uppfuktning vid slangarna. När jord tjälas kan fukttransport mot tjälfronten ske, vanligtvis från nivåer under tjälkroppen. Fuktvandringen ökar vatteninnehållet i tjälkroppen och bidrar till dennas tillväxt. Vid tjälning av jord sker ofta tjällyftning i marken. Det är vanligt förekommande i vägar. Möjlighet till kapillärsugning mot tjälfront styrs av faktorer som jordtemperatur, kapillärstigningshöjd och kapillärstigningshastighet, avstånd ovan grundvattenyta. När frysning eller smältning av jord sker förflyttas frysfronten. En komplex jämvikt uppstår vad gäller

markens fukt- och energibalans (se Figur 6). Det kan vara fördelaktigt för värmeutbytet i systemet eftersom jordens entalpinivå och värmekonduktivitet då ökar, samtidigt som slangens kopplas starkare termiskt till lufttemperaturen.

Konvektiv värmetransport kan även ske med fukttransporten till följd av en temperaturgradient mellan slang och dess omgivning. Enligt Farouki (1986) och Sundberg (1988) kan dock denna värmekonvektion väntas vara försumbar vid temperaturnivåer upp till rumstemperatur. Vid höga temperaturer, över 50°C, kan det dock enligt de Vries (1952) väntas ansenlig värmekonvektion. Sundberg (1988) visar att vid låga termiska gradienter kan det inte väntas avsevärda fuktgradienter. Stora temperaturgradienter orsakade t.ex. av elkablar eller värmeläger i mark kan dock enligt rapporten ge ansenliga fuktgradienter.

Ovanstående formler visar på den dynamiska jämvikt som uppstår mellan temperatur- och fuktnivåer (se Figur 6). Vid fukttransport minskar den drivande fukt eller temperaturgradienten. Vid ändrat fukthinnehåll i jord ändras även dess termiska egenskaper varvid förutsättningarna för värmetransport ändras (Farouki, 1986). Vid en utförlig termisk analys av jordvärmesystem bör därför värme- och fukttransport betraktas som en kopplad och cyklisk process vilket illustreras i Figur 6. En temperatur och/eller en fuktgradient orsakar värme och/eller fukttransport, vilket ger upphov till en ny temperaturgradient och/eller fuktgradient. Det nya tillståndet ger jorden nya termiska egenskaper som λ , C_p , C_L och entalpinivå (H). Förändringen av jordmaterialets parametrar ger i sin tur nya förutsättningar för vidare värme- och fukttransport.



Figur 6, Illustration av den kopplade och cykliska processen för värme- och fukttransport mellan två punkter i jorden.

Arfvidsson (1999) beskriver en metod för analys av fukttransport i porösa material med en fukt- och temperaturgradient som funktion av endast en potentialskillnad. Philip och de Vries lag förutsätter en materialparameter och en drivande potentialskillnad i fukt- och/eller temperaturnivå. Potentialnivån beräknas och är en funktion av materialparametrar, fukt och temperaturgradient.

2.3 Erfarenheter av termisk markvattentransport i jordvärmesystem

Dunand (1982) presenterar en datormodell för simulering av kopplad värme- och fukttransport i en markvärmeväxlare med en slang/dike. Simuleringen baseras på en referensanläggning i Frankrike. Simuleringsperioden för jordarna var 6 - 31 dagar lång. Porositet i de studerade jordarna var 41-50 % och K_s antogs vara i intervallet $4 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-7} m/s. Värme- och fukttransport beräknades mot slang från ett område med radien=0,50 m runt slang där hydrostatiska förhållanden antogs. Värmeuttaget var 30 W/m slang. I rapporten redovisas simuleringsresultat för förväntad utveckling av

temperatur- och fuktnivåer i fyra grovkorniga jordar. ΔT förväntas vara mellan -10 och -13°C mellan slang och radien 0,5 m runt slang. Motsvarande fuktskillnad förväntas enligt simuleringarna vara $\Delta S_r = 0,12-0,76$ %. Enligt rapporten kan det alltså i de studerade markvärmeväxlarna endast förväntas en marginell fuktvandring även vid en hög relativ temperaturgradient.

Rhen (1989) utgör slutrapport till projektet "Ytjordvärme för 22 småhus i Orsa, Sandhed – Geologisk påverkan" från Geologiska Institutionen vid CTH. I rapporten redovisas mätningar av temperatur och fuktskillnader i några markvärmeväxlare. Fuktmätningarna utfördes med kapacitiva mätare i ofruset tillstånd. Vid frusen jord skedde mätningarna med gravimetrisk provtagning och neutronsond i fruset tillstånd. Tabell 4 och Tabell 5 visar förutsättningar för mätning och mätresultat i studien.

Tabell 4, Beskrivning av markvärmeväxlaren i Rhen (1989)

Faktor	Jordart	Torrdensitet (kg/m ³)	Kvartshalt (%)	Slangdiameter (mm)
Värde	Mellansand	1600	55-75	40

Tabell 5, Uppmätta fukt- och temperaturgradienter mellan slang och dess omgivning i Rhen (1989).

Slangnivå (m)	S_r nära slang (%)	S_r horisontellt 0,25 m från slang (%)	ΔS_r (%)	ΔT (°C)
1,05	50	38	12	7,0

Som framgår av tabellen kunde det observeras en förhöjd S_r på 12 procentenheter vid ΔT på 7°C. Enligt sensitivitetsanalysen inom examensarbetet i Kapitel 6 kan det vid denna fuktgradient förväntas en förhöjd brinetemperatur på omkring 1°C. I rapporten påpekas det att uppfuktning runt slang är en process som är mycket svårt att förutsäga. Därför bör processen inte räknas med vid dimensionering av slangsystemet. Däremot kan uppfuktning runt slang räknas som en säkerhetsmarginal.

Rhen et al (1989) redovisar fukt- och temperaturförhållanden vid slangar i ett jordvärmesystem med en slang/dike under perioden 860625-860903. Slangarna hade diametern 40 mm, c/c-avstånd 1 m och var installerade på ca nivå 1 m under markytan i mellansand. GVV låg ca 1,7 m under markytan. Porositet (θ) för jorden var omkring 44, 37 och 40 % i lägena 0,30 m ovan och under slangnivå samt på slangnivå. Värmeuttaget var så stort som 28 W/m slang och brinetemperaturen blev därför extremt låg, ca -16°C. Jordtemperaturen precis vid slangarna var -14°C under större delen av mätperioden. Efter omkring 30 dagar med värmeuttag hade tjälkropparna för de parallellt installerade slangarna vuxit samman.

Nivåer för uppmätta S_r visas i Tabell 6. Värdena ska jämföras med mätvärden på motsvarande nivå i referensprofilen. I referensprofilen har det skett en viss uppfuktning på nivå 0,30 m ovan slangnivå och en uttorkning 0,30 m under slangnivå. Förutsättning för fukttransport mot slang beror på hydraulisk konduktivitet i omättad zon. Enligt rapporten var K_s ovan grundvattenytan jämfört med under denna, reducerad till 50 %, 2 % och 0,04 % på nivåerna 0,05 och 0,25 och 0,55 m ovan grundvattenytan. Det innebär att markvattnets bindning till mineralpartiklarna ökar med höjden över grundvattenytan. Därmed reduceras möjligheterna till fukttransport mot slangarna då

avståndet till grundvattenytan ökar. Det är endast på nivån 0,30 m under slang vid 0,10 och 0,30 m vid sidan av slang som det har skett en tydlig uppfuktning relativt referensmätpunkten under mätperioden. 0,10 m vid sidan av slang är ökning av S_r relativt referensmätpunkten på 6,4/46 och 16,2 procentenheter. Det ska observeras att i det studerade systemet är brinetemperaturen exceptionellt låg och därför kan uppfuktningen här betraktas som ett extremvärde. På avståndet 0,50 m vid sidan av slang var uppfuktningen relativt referensmätpunkten i stort sett obefintlig. Tabellen visar även på tydliga fuktskillnader i horisontalled.

Tabell 6, S_r på nivåerna 0,3 m ovan respektive under slang och på slangnivå i profilerna 0,10/0,30/0,50 m från slang samt i en referensprofil. Värdena gäller jordvärmesystemet i Rhen, Jonasson, Andersson (1989). Tabellen avser antal dagar efter 860625.

Dagar efter mät-periodens början	0,10 m vid sidan av slang -0,30 m ovan slang / 0,30 m under slang / på slangnivå (%)	0,50 m vid sidan av slang - 0,30 m ovan slang/ 0,30 m under slang/ på slangnivå (%)	Referensprofil - 0,30 m ovan slangnivå/ 0,30 m under slangnivå och på slangnivå (%)
0	17/ 64,3/16,2	10,3/75/16,2	17/82,6/24,3
70	27/ 82,6/32,4	17/ 55,1/16,2	20,6/ 55,1/24,3
Nettoökning av S_r från dag 0 till dag 70 (%-enheter)	13-6,9 = 6,4 / 18,3- (-27,5) = 46/ 16,2-0 = 16,2	4-6,9 = -5/ -18,4-(-27,5) = 9/ 0-0 = 0	6,9-6,9 = 0 -27,5-(-27,5) = 0 0-0 = 0

Tarnawski et al (1990) utvärderar med hjälp av två datormodeller den kopplade processen för värme och fukttransport i ett högtempererat markvärmelager (70-90°C i initieff temperatur). Fukttransport från slangarna sänker jordmaterialets värmekonduktivitet och därmed ökar ΔT mellan slangarna och deras omgivning. Verifierande fysikaliska mätningar saknas. Studien avser tre jordarter. c/c avståndet för slangarna är 1,5 m och dessa ligger på 1,5 m djup. Jorden betraktas som homogen. Slangsystemet täcker en yta av 20·10 m². Tabell 7 ger indata och beräkningsresultat för simuleringsfallen. Tabellen visar att S_r -skillnader om 20-30 procentenheter kan förväntas då temperaturgradienterna är stora (50 °C). Vid slangar i ett högtempererat värmelager kan ansefflig fukttransport förväntas, som kan påverka systemets värmeutbyte.

Tabell 7, Data och resultat för simuleringsfallen i Tarnawski, Leong, Wagner, Reuss, Schulz (1990).

Jordmaterial	Sand	Silt	Siltig lera	Siltig lera
Torrdensitet(kg/m ³)	1670	1500	1610	1610
Porositet, Θ (%)	38	44	40	40
Initieff S_r (%)	26	57	92	92
T vid slang/0,25 m horisontellt från	89/36/52	90/36/54	85/28/57	70/25/45

slang / ΔT ($^{\circ}\text{C}$)				
S_r vid slang/0,25 m horisontellt från slang/ ΔS_r (%)	5/26/-21	22/54/-32	38/68/-30	87/97/-10
Simulerad period (h)	47	42	120	120

Inom examensarbetet utfördes mätningar av S_r och marktemperatur med mätstavar benämnda SMR1, SMR2 och SMR3 (se Figur 10 och Figur 12 för placering av mätstavarna på fastigheterna). SMR1 ger mätvärden på djupet 0,83 m under markytan i Flistad. SMR2 ger mätresultat på djupet 0,9 m under markytan på ett avstånd av 0,4 m horisontellt från slang. SMR3 ger mätningar intill slang på djupet 0,55 m under markytan. Figur 13 illustrerar mätutrustningens uppställning i Motala i sektion A-A. Mätresultaten visas i Bilaga 2. Diagrammet visar att temperaturskillnad i Motala mellan slang och ett avstånd om 0,4 m horisontellt från denna är omkring 7°C i juli 2004. Motsvarande temperaturgradient uppmättes till $1,5^{\circ}\text{C}$. Den uppmätta fuktgradienten kan anses relativt stor. Nivåskillnad under markyta för de två fuktmätningarna var 0,35 m, varför de två mätningarna kan sägas utgå från något olika villkor. Det råder därför viss osäkerhet om den uppmätta fuktgradienten kan anses bero på en termisk gradient. I Tabell 8 nedan visas en sammanställning av resultaten från litteraturstudien för fukttransport i jordvärmesystem. Från litteraturstudiet avseende erfarenheter av termisk fukttransport i markvärmeväxlare kan slutsatsen dras att förväntad ΔS_r (%) normalt är av samma storleksordning som drivande ΔT ($^{\circ}\text{C}$).

Tabell 8 Översikt för resultat från litteraturstudie om erfarenheter av termisk fukttransport i ett jordvärmesystem.

Rapport	Jordart	Värmeuttag (W/m)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$) (s-h)	ΔP (Pa) (s-h)	ΔS_r (%) (s-h)
Dunand (1982)	Grovkornig jord	30	-13	-	0,12-0,76
Rhen (1989)	Sand	-	-7	-	12
Rhen et al (1989)	Mellansand	28	-	-0,26	16
Tarnawsky et al (1990)	Sand/Silt/(torr lera)/(fuktig lera)	-	62/63/63/43	65,8/68,5/68,5/28,4	-21/-32/-30/-5,4
Motala 2004 (Mätning inom examensarbetet) ¹	Siltig sand	11	-1,5	-151	-7

s = slang

$h = 0,5$ m horisontellt från slang

¹ = fukt- och temperaturskillnad är uppmätta över ett avstånd om 0,4 m från mars till sept 2004.

2.4 Erfarenheter av temperaturutveckling i jordvärmesystem

Processen med termisk energiutvinning ur mark har studerats i en rad arbeten som Rhen (1982;1984;1989), Rosén (2001) samt Claesson och Dunand (1983). Ahlkrona och Mogensen (1987) utvärderar funktionen för sju jordvärmesystem i Sverige. I systemen används en slang/dike. I Tabell 9 redovisas uppgifter om driftsdata, tekniska och geologiska data samt lägsta uppmätta brinetemperatur i de utvärderade systemen. Av tabellen framgår att låga brinetemperaturer erhålls i de anläggningar (Karlstad och Djursholm) som har högt markenergiuttag (kWh/m). I Eda uppmättes låg brinetemperatur troligen orsakat av den låga GVV i systemet.

Tabell 9, Översiktlig beskrivning av sju jordvärmesystem utvärderade i Ahlkrona och Mogensen (1987).

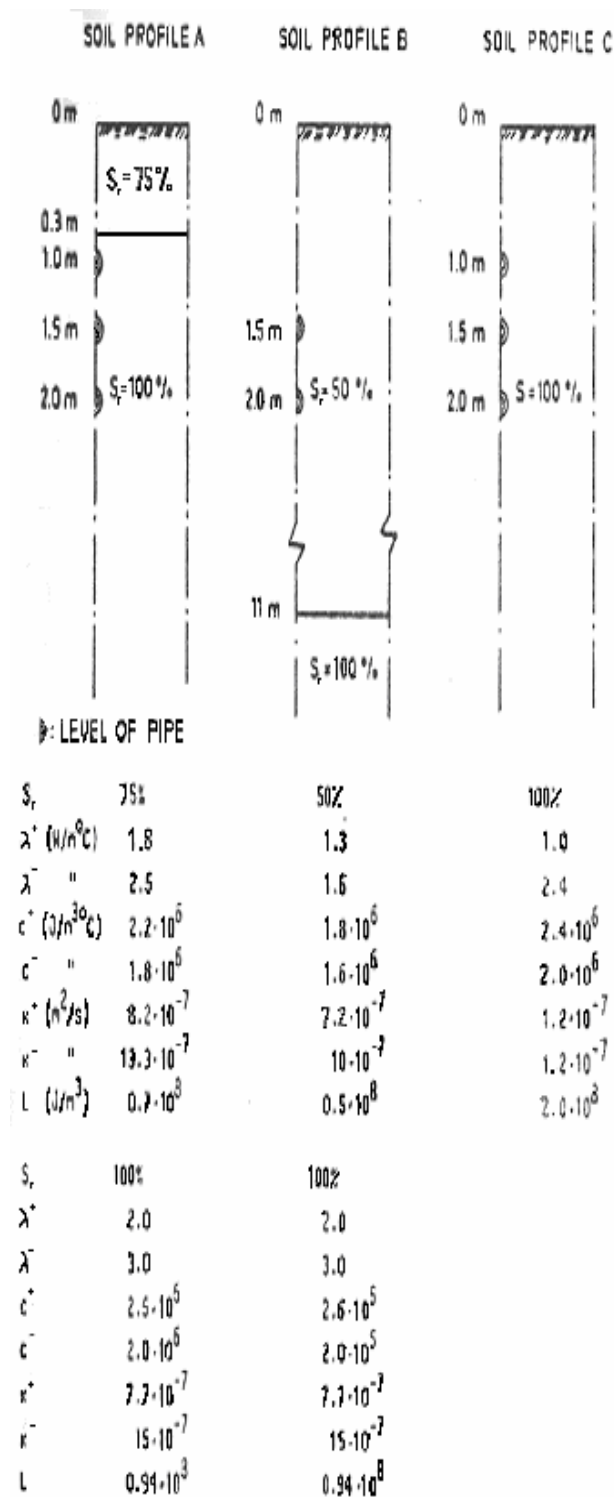
Miljöfaktor	Luleå	Umeå	Eda	Arvika	Karlstad	Djurs-holm	Kungälv
T_{luft} ett normalår (°C)	2,0	3,2	4,8	5,6	5,9	6,6	7,2
Slanglängd (m)	500	480	575	319	490	280	483
Slangdjup (m)	1,0	0,9	1,0	0,8	0,9	0,6	1,8
Energiuttag/m slang (kWh/m)	28	25	29	28	45	73	29
Effekttag/m slang (W/m)	10	9	9	15	9	16	11
Jordart	Finsand	Friktions-jord och dytorv	Mellansand	Lerig silt	Siltig finsand	Mellan lera	Mellanlera
GVV (m)	1,5	1,0	6,0	1,0	3,0	1,0	0,5
Lägsta T_{brine} under mätperioden (°C)	-2	-1,5	-6,0	-2	-5	-7	-2

2.5 Erfarenheter av datormodeller av jordvärmesystem

I Ahlkrona och Mogensen (1987) har en datorberäkning av brinetemperaturen utförts för jordvärmesystemet i Djursholm. I datormodellen har det tillämpats förenklingar av den fysikaliska verkligheten genom att anta en isoterm slang, konstant drift, inget kontaktmotstånd, markvattenflöde utan konvektiv värmetransport, ingen fuktvandring mot slang och försummade ändeffekter. Rapportförfattarna påtalade erfarenheten av komplexiteten i datorsimuleringar av jordvärmesystem. Under vintern 1980/81 beräknades lägsta brinetemperatur till -6°C under början av mars månad, vilket stämmer väl överens med det lägsta uppmätta värdet. Under vintern 1981/82 simulerades lägsta brinetemperatur även då till ca -6°C , medan motsvarande uppmätta värde låg på $-2,5^{\circ}\text{C}$. Avvikelsen det andra året förklaras i rapporten med att modellen möjligen underskattar snötäckets isolerande förmåga, att markvattnet inte antas transportera värme konvektivt och att fuktvandring mot slang inte antas förekomma i modellen. Vid

datorsimuleringarna stiger brinetemperaturen de två åren över 0°C omkring 2 juni och 10 juni. Det är 2 respektive 4 veckor senare än de uppmätta värdena. I rapporten redovisas ingen parameterstudie av aktuella indata.

Rhen, Sundberg, Wilén (1984) redovisar resultat från datorsimuleringar av ett jordvärmesystem i Minnesota, USA. Området har ett typiskt inlandsklimat, och studien utreder effekten av värmeuttag under den kalla årstiden och kylauttag under den varma årstiden. I Figur 7 visas geologiska och hydrologiska förutsättningar i tre jordar som studeras i sensitivitetsanalysen. I Tabell 10 visas aktuella driftsförhållanden samt temperaturresultat från datorsimuleringarna. Tabellen ger en indikation av temperaturkänsligheten i ett jordvärmesystem, med avseende på faktorer som jordart, grundvatten, markvatten, värmeuttag, artificiell återladdning, slangdjup, c/c-avstånd för slangarna. Simuleringsfall B1 och C3 har identiska indata förutom att de antar "SOIL PROFILE B" respektive "SOIL PROFILE C". Som framgår av tabellen blir förväntade minimum brinetemperaturnivåer vintertid -12,4 °C och -7,7°C. Jord B är avsevärt torrare än jord C, vilket verkar orsaka den lägre simulerade brinetemperaturen.



S_r : degree of saturation

λ : thermal conductivity

c : heat capacity

κ : thermal diffusivity

L : latent heat

subscript +: unfrozen values

subscript -: frozen values

Figur 7, Termiska egenskaper för datorsimuleringar redovisade i (Rhen, Sundberg, Wilén, 1984)

Tabell 10, Resultat och villkor för datorsimuleringar redovisade i Rhen, Sundberg, Wilén (1984).

Number	Depth (m)	Pipe spacing (m)	Winter Heat extrac- tion rate (W/m)	Summer Cooling rate (W/m)	Summer Cooling rate (W/m ²)	Max. brine temperature °C	Min. brine temperature °C	date
A1	2.0	1.5	48.9	20	13.3	9.3	-18.6	10 Mar
A1S	2.0	-	48.9	20	-	19.9	-13.3	15 Feb
A2	1.0	1.5	24.5	10	6.7	18.5	- 7.1	20 "
A3	1.5	1.0	24.5	10	10	11.3	- 9.9	10 Mar
A4	2.0	0.7	24.5	10	14.3	7.5	-15.1	10 "
A5	2.0	1.5	24.5	10	6.7	12.2	- 6.7	10 Feb
A5S	2.0	-	24.5	10	-	16.8	- 5.2	10 "
A6	1.5	1.0	16.3	6.7	6.7	14.8	- 4.3	5 "
A7	2.0	1.0	16.3	6.7	6.7	11.7	- 4.3	25 Jan
B1	2.0	1.5	24.5	10	6.7	9.3	-12.4	5 Feb
B2	1.5	1.0	16.3	6.7	6.7	12.4	-12.1	5 Mar
B3	2.0	1.0	16.3	6.7	6.7	8.2	- 9.6	20 "
B4	2.0	1.5	16.3	6.7	4.5	12.6	- 7.2	10 Feb
B4D	2.0	1.5	16.3	13.3	8.9	17.4	- 7.0	10 "
C1	1.0	1.5	24.5	10	6.7	14.7	- 7.4	20 Jan
C2	1.5	1.5	24.5	10	6.7	6.7	- 7.5	1 Feb
C2S	1.5	-	24.5	10	-	17.2	- 6.7	15 "
C2D	1.5	1.5	24.5	20	13.3	15.4	- 7.5	1 "
C3	2.0	1.5	24.5	10	6.7	4.3	- 7.7	15 "
C4	1.5	1.0	16.3	6.7	6.7	6.3	- 4.8	1 "
C4D	1.5	1.0	16.3	13.3	13.3	12.8	- 4.7	1 "
C5	1.0	1.0	16.3	6.7	6.7	13.5	- 4.8	20 Jan

3 UTVÄRDERADE REFERENSANLÄGGNINGAR

3.1 Generella förutsättningar i de utvärderade referensanläggningarna

De två referensanläggningar vars funktion utvärderas inom projektet "Effektivare Elanvändning" har ett flertal likartade förutsättningar. I båda anläggningarna har markvärmeväxlarna horisontellt installerade slangar. Båda systemen försörjer enfamiljshus med värmeenergi till radiatorer och tappvarmvatten. Inget av systemen utvinner kyla från marken. Jordart och klimat är även likartade vid de båda jordvärmesystemen. Försöksanläggningarna skiljer sig dock åt vad det gäller utformning av markvärmeväxlare, energibehov, effekttäckning och därmed kapacitet hos värmepumparna. I båda systemen utförs en rad mätningar i syfte att utvärdera dess funktion och temperaturutvecklingen i jorden. Avståndet mellan diken i systemen är överdimensionerat för att med god marginal undvika permafrost i systemen. Tabell 11 visar översiktligt förutsättningarna för referensanläggningarna. I kapitel 4 beskrivs de mätningar som utfördes i jordvärmesystemet.

Tabell 11, Översiktlig beskrivning av referensanläggningarna med jordvärmesystem i Flistad och Motala.

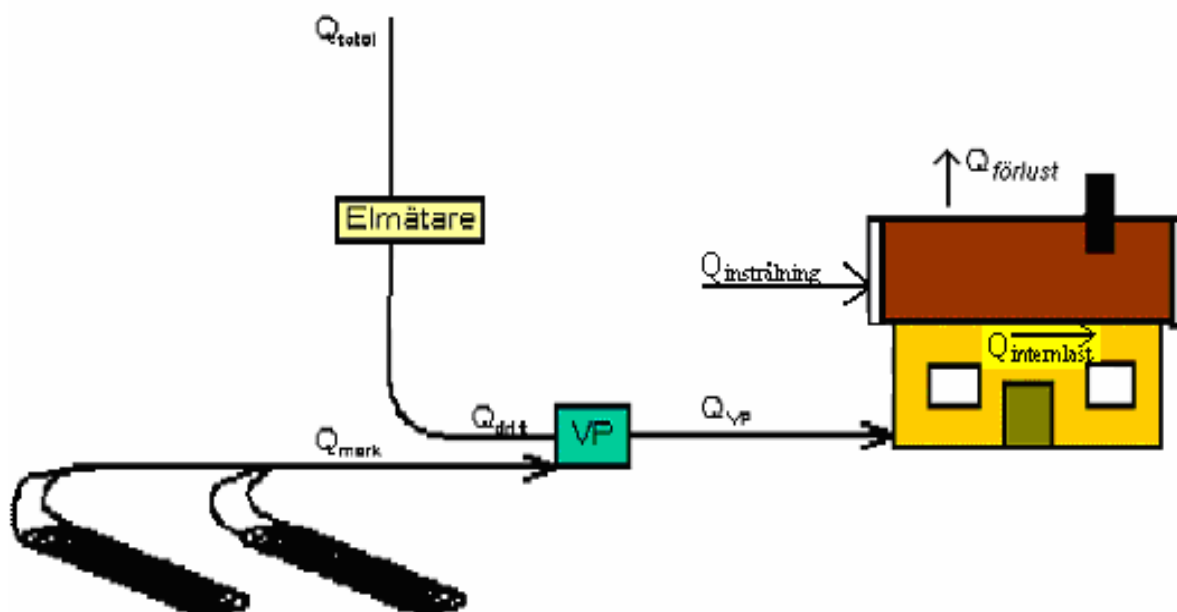
Attribut	Flistad	Motala
Jordart	sandig lerig silt. Rosén (2006)	siltig sand. Rosén (2006)
Årsmedeltemperatur (C°) (enligt databasen Meteororm [®])	6	6
DUT (C°) och nivå för GVV	-20 och se Bilaga 1	-16 och se Bilaga 1
Markvärmeväxlare	Slinky - spiraler placerade horisontellt i diken	Två slangar horisontellt placerade på olika djup i en plöjd slits.
Slanglängd (m)	1800 med slinky och 112 i två slangar/dike	500
Slangnivå under markyta (m)	1,0	0,58 och 1,08 i medeltal
Dikeslängd (m)	215	250
c/c-avstånd mellan diken (m)	4	1,8 m mellan 5 diken 1,5 m mellan 3 diken
Markarea för markvärmeväxlare (m ²)	730m ² (35,8·20,9 m)	370 m ² (29·12,6 m ²)
Energibehov radiatorer/år (kWh)	55800	26000
Energibehov/år ² till uppvärmning av tappvarmvatten (kWh)	5000	5000
Maximalt värmeeffektbehov (kW)	17	7,5
Fabrikat på värmepump	IVT Greenline E11	IVT Greenline E7
Totalt värmeenergiebehov/år (kWh)	60800	31000

Avgiven värmeeffekt från VP vid 0/35 ¹ C°	11,2 kW	7,8 kW
Tillförd eleffekt till VP vid 0/35 ¹ C°	3,0 kW	1,9 kW
Tillförd eleffekt till VP vid 0/35 ¹ C°	3,0 kW	1,9 kW
Köldmedium vikt (kg) och namn	1,6 och R407c	1,7 och R407c
VP dimensioneras för effekttäckning	60 %	90 %

¹Där 0 C° avser temperaturen hos inkommande köldbärare (brine) och 35 C° temperaturen hos utgående värmebärare.

²Energibehovet är antagit som ett schablonvärde.

I Figur 8 visas schematiskt värmeflöden i ett jordvärmesystem kopplat till en byggnad. Markvärmeväxlaren i illustrationen är av slinkymodell. Byggnadens behov av värmetillförsel bestäms av balansen mellan tillförd och avgiven värme vid en given inomhustemperatur. Värmeförlusterna ($Q_{\text{förlust}}$) består huvudsakligen av transmissionsförluster och luftläckage (inkl. självdragsventilation) genom byggnadens skal. Storleken för dessa förluster är ungefärligen proportionella mot differensen mellan inomhustemperatur och utomhustemperatur, vilken bestäms av det lokala klimatet. Byggnaden tillförs även värme med solinstrålning ($Q_{\text{instrålning}}$) och den så kallade internlasten ($Q_{\text{internlast}}$, hushållsel, belysning, människor etc.). Värmeförlusten är lika stor som instrålad värme och internlast vid en viss utomhustemperatur, den s.k. balanstemperaturen, vilken varierar under året p.g.a. årstidsberoende variationer av instrålad solenergi och behov av belysning. När utomhustemperaturen understiger balanstemperatur uppstår ett behov av att tillföra värme. Det maximala värmebehovet, dimensionerande effekt, bestäms vid dimensionerande utomhustemperatur (DUT). Värmepumpen (VP) dimensioneras av ekonomiska skäl normalt inte för att täcka hela effekten. Det är vanligt att värmepumpens effekt uppgår till 60-70 % av dimensionerande effekt, vilket ger ca 90 % av erforderlig energi för uppvärmning. Under kalla perioder behövs då förutom värmepumpens effekt (Q_{VP}) ytterligare ett effekttillskott ($Q_{\text{tillskott}}$). Det sker vanligen med en elpatron, som är inbyggd i värmepumpskabinettet. Värmepumpen behöver ett eltillskott (Q_{drift}) för att värmeenergi (Q_{mark}) från kall mark ska transporteras till en varm byggnad. I byggnaden behövs uppvärmningsenergi förutom till radiatorer även till beredning av tappvarmvatten.



Figur 8, Schematisk illustration av energiflödena i ett jordvärmesystem kopplat till en byggnad (Rosén, 2005).

3.2 Förutsättningar för referensanläggningen i Flistad

Markvärmewäxlare av slinkymodell består av slangar formade till spiraler som är installerade i diken i jorden. Tekniken utvecklades i Kanada i slutet av 1980-talet. Markvärmewäxlare med slinkyinstallation är idag en etablerad teknik i Nordamerika, delar av Europa, och delar av Asien. Den har inte tillämpats tidigare i Sverige. Goda erfarenheter från platser med liknande klimat tyder på att installationen är användbar även i Sverige. Det finns en uppsjö av installationstekniker för dessa markvärmewäxlare. Spiralerna kan t.ex. ligga horisontellt, stå vertikalt eller stå tredimensionellt i diken (Rosén, 2001). Eftersom den utsträckta slangen är mycket kortare än den spiralformade slangen i diket blir den termiska influensen mellan ingående och utgående slang. I Flistad används en horisontellt liggande slinky. Markvärmewäxlaren i principskissen för ett jordvärmesystem i Figur 9 är av slinkymodell.

Några av fördelarna med en spiralformad markvärmewäxlare är:

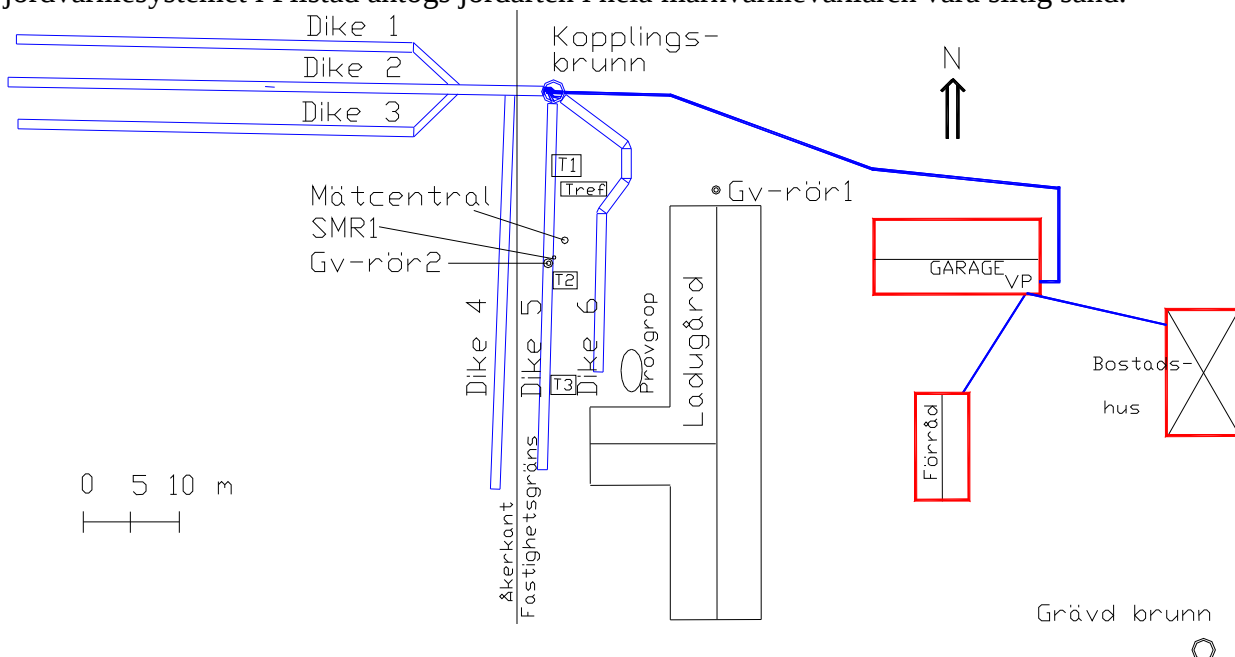
- Antalet meter slang per meter dike ökar avsevärt, vilket ger större kontaktyta mellan slang och jord. En större jordvolym aktiveras för värmeutbyte.
- Den totala kontaktytan med omgivande jord kan justeras genom att variera tätheten hos spiralerna.

Referensanläggningen med jordvärmesystem i Flistad, Linköpings kommun som studeras i denna rapport finns på en fastighet med adress Kättstorp 2, 590 76 Vreta Kloster.



Figur 9, T.v illustration av slinkyssystemets möjlighet utsträckning eller förkortning. T.h. illustration från installation av slangarna i Flistad i dike nr 5.

Jordprover har tagits på djupen 1 och 1,5 meter vid lägena för mätprofilerna T1 och T2. Figur 10 visar mätprofilernas placering på fastigheten. Laboratorieanalys av proverna utfördes för att bestämma jordart och vattenkvot. Graderingstalet, C_u , beräknades i mätprofilerna på djupet 1,5 m till 20. När C_u överstiger 15 kan jordarten betraktas ha moränkaraktär. Vid T1 bedömdes jordarten vara sandig siltig lera och sandig lerig silt på 1 resp. 1,5 m djup. På båda djupen 1 och 1,5 m i provgrop T3 bedömdes jordarten vara sandig lerig silt. Vid Kalibrering av datormodellen SEBAM2D för jordvärmesystemet i Flistad antogs jordarten i hela markvärmeväxlaren vara siltig sand.



Figur 10, Illustration av jordvärmesystemet i Flistad. Placering av mätutrustning och mätprofilerna T1, T2, T3, SMR1, Gv-rör1 och Gv-rör2 framgår av skissen.

I systemet är slang- och dikeslängd med slinkyform 1800 respektive 215 m. En matarledning med fram och returledning i 52 m dike (120 m dubbelslang) förbinder slinkydikena vid fördelningsbrunnen med garaget där värmepumpen finns. Det motsvarar 240 m slinky slang eller 30 meter dike. I datormodellen för anläggningen antas därför slanglängden vara 2040 m. Slangdiametern är 25 mm. Systemet har 8,4 m slang per meter dike. I syfte att få lagom stora tryckfall i systemet är systemet uppdelat i sex slingor på omkring 300 m slang vardera. En slinga är sträckt i ett dike. Slingorna är anslutna till en kopplingsbrunn. Dike nr 1-4 är belägna i åkerjord och dike nr 5 och 6

finns mellan åkern och logen. Dikena har något olika längder eftersom deras avstånd till fördelningsbrunnen är olika. Rosén (2005) ger vidare upplysningar om referensanläggningen. Spiralerna i systemet formades manuellt i en träform. Buntband fixerade avståndet mellan spiralerna. I syfte att förbättra värmeledningen i slangens närhet fylldes diket med kabelsand, med goda värmeöverförande egenskaper, 5 cm under spiralerna och 10 cm ovanför dessa. Totalt krävdes 35 m³ kabelsand som återfyllnadsmaterial till hela markvärmeväxlaren. Ledningar är sträckta mellan garage och förråd och mellan garage och bostadshus. Förråd och garage uppvärms endast så att de frostskyddas. Den sammanlagda uppvärmda ytan är 285 m² varav 150 m² endast frostskyddas.

3.3 Förutsättningar för referensanläggningen i Motala

Referensanläggningen i Motala med ett kompakt jordvärmesystem vilken avses i denna rapport finns i trädgården till en fastighet på Östermalmsgatan 67 i tätorten. Figur 11 visar två bilder från installationen av slangarna i systemet. Figur 12 visar jordvärmesystemets sträckning över fastigheten. I Figur 13 visas markvärmeväxlaren i sektion A-A från Figur 12.



Figur 11, Överst visas en bild med plöjning av diken i markvärmeväxlaren. I den nedre bilden visas plog för slanginstallation.

I det aktuella jordvärmesystemet är två slangar installerade på olika nivåer under markytan i en plöjd slits. Vid mätprofil T1 bedömdes jordart efter laborationsanalys vara siltig sand på djupet 0,6 m och grusig siltig sand på djupen 0,85 och 1,5 m. I mätprofil T3 bedömdes jordarten vara siltig sand på alla tre djupen. Figur 12 visar läget för provgroparna på fastigheten. I Rosén 2006 redovisas kurvor med kornfraktioner från laboratorieanalys av jordproverna i Motala.

Markvärmeväxlaren i systemet består av två slangar på olika nivåer i 250 meter plöjda slitsar. c/c-avstånd mellan fem av diken är 1,8 m och 1,5 m för två av dessa. Total slanglängd är 500 meter som upptar 370 m² (29•12,6 m²) markyta. Vid en konventionell slanginstallation med en slang/dike hade dimensionerande slang och dikeslängd blivit 350 m. Slangarna är förlagda i medeltal på nivåerna 0,58 m och 1,08 m under markyta (se Figur 13). Ytterdiameter för slang är 40 mm med godstjocklek 3,7 mm. Slangen är tillverkad av PEM-plast med fabrikat Uponor Upoten och den tål 10kPa inre övertryck. Installation av slang skedde i jorden med en s.k. statisk plog (Rosén, 2001). Det är en grävmaskin med en förskärare monterad på en teleskopisk arm som skar upp en skåra av önskat djup i jorden. Slangen placerades sedan i diket med en s.k. läggbox vilken består av två stålplåtar, mellan vilka slang matades ner i jorden.

3.4 Jämförelse av några markvärmeväxlare

Rosén (2001) redovisar allmänna korrektionsfaktorer för slanglängden i markvärmeväxlare med två slangar/dike och slinky relativt systemet med en slang/dike. Rapporten rekommenderar att för tvåslangs- och slinkysystemet antas slanglängd till 1,3 respektive 3 multiplicerat med dimensionerande slanglängd för en slang/dike under aktuella förutsättningar. Med två slangar/dike och slinky blir därför dikeslängden ½ respektive 1/8 jämfört med aktuell slanglängd. I Tabell 12 visas dimensionerande markyta med respektive markvärmeväxlare. Dimensionerande slanglängd är antaget som standardvärden från Prestige 2.0 (Svep, 2004). I kapitel 5 redovisas kalibrering av en datormodell mot referensanläggningarna. Korrektionsfaktorer för de kompakta systemen relativt systemet med en slang/dike redovisas i kapitel 7. Faktorerna beror på värden för klimat, geologi, grundvatten och markvatten.

Tabell 12, Jämförelse mellan geometrier med dimensioneringsregler från Rosén (2001) för markvärmeväxlare med en slang/dike, två slangar/dike och slinkysystemet för ett standardhus i Norrköping ett normalår.

Markvärme växlare	Slanglängd (m)	Dikeslängd (m)	c/c-avstånd diken (m)	Markyta (m ²)
En slang/dike	350•1,0 = 350	350	1	19•18,4 = 350
Två slangar/dike	350•1,3 = 455	228	1	15•15,0 = 228
Slinky	350•3,0 = 1050	131	2	15•14,0 = 210

4 MÄTNINGAR I REFERENSANLÄGGNINGAR

I syfte att utvärdera effekten av värmeuttaget i referensanläggningarna har en rad mätningar utförts såväl inom projektet ”Effektivare Elanvändning” som i examensarbetet. Det har skett omkring varannan vecka mellan 2004-03-31 och 2004-10-01. Placering av mätutrustningen på fastigheterna framgår av Figur 14 och Figur 15. Följande mätningar har utförts i referensanläggningarna:

- Jordart
- Nivå för markvatten
- Nivå för grundvattenyta
- Jordtemperaturer i markvärmeväxlaren
- Fluidtemperaturer till och från värmepump
- Temperatur i atmosfärsluft

4.1 Mätning av nivå för grundvattenyta

Nivån för grundvattenytan under markytan (GVY) i de analyserade markvärmeväxlarna har uppmätts med mätlod i grundvattenrör. I Flistad mättes GVY i Gv-rör 1, Gv-rör 2 och i Motala med Gv-rör 3 och Gv-rör 4. Mätresultaten redovisas i Bilaga 1. Mätningarna gjordes 2003-09-05 i Gv-rör 1 och omkring varannan vecka från 2004-03-31 till 2004-09-30. Mellan september 2003 och mars 2004 finns alltså inga mätuppgifter om nivån för grundvattenytan. Sveriges Geologiska Undersökning redovisar (2) uppgifter månadsvis om nivå och utveckling för grundvattensytan i Sverige. Utifrån de uppgifterna togs det fram en rimlig utveckling av GVY i Gv-rör 1, Gv-rör 2 mellan sep-03 och mars -04. I datormodellen antas Gv-rör 2 och 3 ge representativa grundvattennivåer för Flistad respektive Motalaanläggningen. Under perioden 2004-06-01 till 2004-07-02 låg GVY vid Gv-rör 2 djupare än rörbotten. Därför kunde ingen mätning göras där under perioden, varför GVY där fick antas under perioden.

I Motalasystemet har GVY mätts i två lägen, benämnda Gv-rör 3 och Gv-rör 4. I sept 2003 installerades Gv-rör 3. Det nådde endast ca 0,77 m under markytan. Under perioden 2003-09-05 till 2004-05-17 nådde GVY endast upp till denna nivå vid ett mättillfälle. 2004-05-17 byttes därför röret mot ett längre som nådde djupet ca 1,9 m. Mellan maj 2004 och sept 2004 låg GVY i Gv-rör 3 kontinuerligt ca 0,30 m under nivån Gv-rör 1. Nivån i Gv-rör 3 antas därför ha legat 0,3 m under nivån i Gv-rör 1 även i sept -03. För Gv-rör 3 interpolerades utvecklingen av förväntad GVY på samma sätt som för Gv-rör 1 och 2. Gv-rör 4 i Motala installerades först 2004-06-01. Det gjordes för att få kännedom om lutning för GVY i markvärmeväxlaren. Nivån i Gv-rör4 låg under sommarmånaderna 2004 0,1-0,5 m över Gv-rör3. I Bilaga 1 redovisas mättnivåer för i mätrören i referensanläggningarna i Flistad och Motala. Knutsson, Morfeldt (2002) redovisar uppgifter om att en grundvattenyta kan antas fluktuera ca 2 m per år i moränjordar och 0,5 m i sandjordar, vilket betyder att mätresultaten kan anses som normala.

4.2 Mätning av markvattennivåer

I syfte att studera nivåer av markvatten (S_v) i jordens omättade zon ovan GVY i jorden har en sk. SMR-utrustning använts (Soil Moisture and Resistivity measurements).

Mättekniken marknadsförs av: Vertek, 415 Waterman Road, South Royalton, Vermont 05068, USA. SMR-utrustningen är en uppföljare till den konventionella TDR-tekniken och består av en 1 meter lång stav som installeras i jorden där fuktigheten ska mätas. Installationen är stationär och tänkt att ske under en längre period om minst några månader. Avläsning i referensanläggningar gjordes med en portabel dator kopplad till staven. Inom projektet användes tre mätstavar, benämnda SMR-1, SMR-2, SMR-3. Mätstav SMR-1 var placerad i Flistad vars placering framgår av Figur 10. Placering för SMR-2 och SMR-3 i Motalasystemet visas i Figur 12 och Figur 13. Mätstav SMR-3 installerades 2004-06-01 i Motala på 0,55 m djup intill en slang. SMR-2 avläser jordens fuktighet 0,40 m ifrån samma slang på djupet 0,9 m under markytan. Placering av utrustningen i markvärmväxlarna visas översiktligt i Figur 12 och mer detaljerat i Figur 13. I Bilaga 2 visas resultaten från mätningar med SMR-utrustning. Mellan slangarna gavs med SMR-2 $S_r=50$. I slangens närhet med SMR-3 värdet för S_r till ca 57 %. Olika nivåer under markytan för mätning med SMR-2 och SMR-3 ger viss osäkerhet angående horisontell fuktgradient.

Fuktigheten i marken har även analyserats med jordprover från provgropar vid markvärmväxlarna. Bilaga 17 redovisar vattenkvot (w) från jordprover, samt datum och lägen för provgropar. På nivån ca 0,25 under markytan i Flistad uppmättes w till 18, 17 och 20 % vid Dike 4, SMR1 och T2. Dike 1 ligger nära ett dräneringsdike i åkerkanten, vilket kan förklara dess låga vattenkvot på 10 %. Vid provtagningarna observerades ett översta jordlager som bestod av en större andel humusjord jämfört med underliggande mineraljord. Det översta jordlagret sträckte sig ner till nivåerna 0,45-0,60 m under markytan beroende på provgrop. Gränsen mellan jordlagren kunde anses skarp.

I Motala uppmättes höga vattenkvoter i det övre jordlagret. I provgropen benämnd "1 m NNV från SMR-3" på nivån 0,3 m under markytan uppmättes vattenkvoten till 30 %. I provgrop kallad "1,5 m NNO från SMR-3" på djupen 0,3 och 0,4 m under markytan uppmättes vattenkvoten till 29 respektive 34 %. Övriga mätresultat av w i Motala låg mellan 16 och 21 %. I provgrop benämnd "1,5 m NNO från SMR-3" uppmättes en skrymdensitet på tre nivåer genom provtagning med en hylsa. Skrymdensiteterna på 0,4/0,7 och 0,75 meters djup uppmättes till 1,66/2,05 och 2,08 ton/m³. De värdena kan anses vara något överskattade p.g.a. att proverna väntas ha kompakterats vid provtagningen. Det är trots allt värdefullt att se skillnaden på 0,4 ton/m³ i mätresultaten över och under jordlagergränsen vid nivån 0,45 m under markytan. Beräkning av S_r utifrån w och ρ_{torr} och ρ_{skrym} kan göras med Formel 5.

Formel 5

$$S_r = \frac{w}{\frac{1}{\rho_{\text{torr}}} - \frac{1}{\rho_{\text{kompakt}}}}$$

där

S_r = vattenmättnadsgrad (%)

w = vattenkvot (%)

ρ_{torr} = torrdensitet (ton/m³)

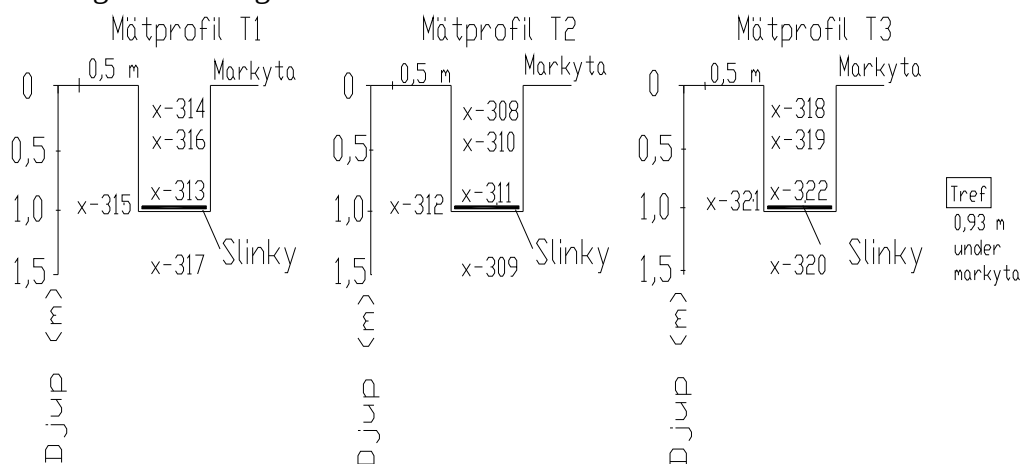
ρ_{skrym} = skrymdensitet (antas till 2,7 ton/m³)

Vid högsta mätta w på 34 % blir enligt Formel 5 $S_r = 100$ % vid en $\rho_{\text{torr}} = 1,4$ ton/m³. Då S_r inte kan överstiga 100 % kan den maximala ρ_{torr} anses vara 1,4 ton/m³ i det övre jordlagret. Vid provtagningen ansågs inte jorden vara i vattenmättat tillstånd, utan S_r

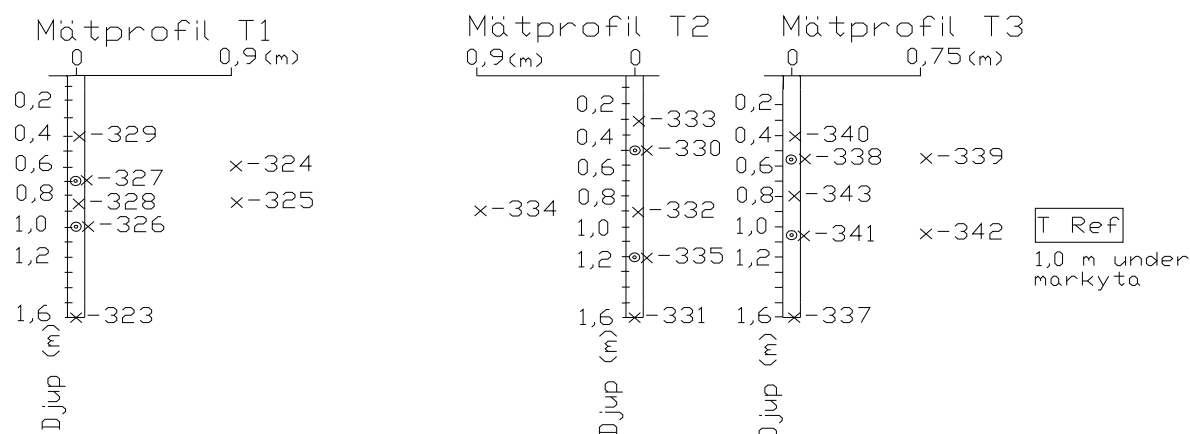
bedömdes okulärt ligga i intervallet 50-70 %. Vid $\rho_{\text{torr}} = 1,2 \text{ ton/m}^3$ och $w = 30 \%$ blir $S_r = 65 \%$, vilket kan anses vara ett rimligt värde. Vattenkvoterna i det nedre jordlagret är 16-20 %. ρ_{torr} kan där som mest vara $1,75 \text{ ton/m}^3$ vid $S_r = 100 \%$ och $w = 20\%$. Med $\rho_{\text{torr}} = 1,60 \text{ ton/m}^3$ och $w = 18 \%$ blir $S_r = 71 \%$ vilket är rimligt med tanke på det okulärt observerade värdet. I sjunkvattenzonen har S_r antagits vara konstant med djupet och över tiden. I rotzonen varierar S_r kraftigt över tiden. I beräkningsmodellen sätts dock S_r till samma nivå i rotzonen som i sjunkvattenzonen. Med SMR-utrustningen gavs mätresultaten 50 och 57 % i sjunkvattenzonen under sommaren 2004. S_r har antagits till ett gemensamt anpassat värde från mätning med SMR och i jordprover. Det gav $S_r = (51 + 71)/2 = 61\%$, vilket har antagits vid kalibreringen av datormodell för referensanläggningarna.

4.3 Mätning av temperaturnivåer i jord

I syfte att utvärdera effekten av värmeuttaget med slangarna mäts jordtemperaturer i de studerade systemen. Givarna är placerade på olika avstånd horisontellt och vertikalt från slangarna. I Flistad och Motala är 16 respektive 21 temperaturgivare installerade i tre mätprofiler (T1, T2, T3). Figur 14 visar givarnas lägen i Flistad i förhållande till slangarna i slinkyn. I figuren har slinkyn approximerats till en platta. Figur 15 visar givarnas lägen i Motala i förhållande till de två slangnivåerna. I Motala är temperaturgivarna i de olika mätprofilerna installerade på olika djup och avstånd från slangarna. Därför har profilerna vägs samman och en genomsnittlig mätprofil har tagits fram, vilken används vid kalibreringen av datormodellen för anläggningarna. I båda systemen mäts jordtemperaturen i en referenspunkt, som kan väntas vara ostörd av värmeuttaget med slangarna.



Figur 14, Flistad. Placering för temperaturgivare i markvärmväxlaren. Figur 10 visar lägena på fastigheten för profilerna T1, T2 och T3.



Figur 15, Motala. Placering för temperaturgivare i markvärmeväxlaren. Figur 12 visar lägena på fastigheten för mätprofilerna T1, T2 och T3.

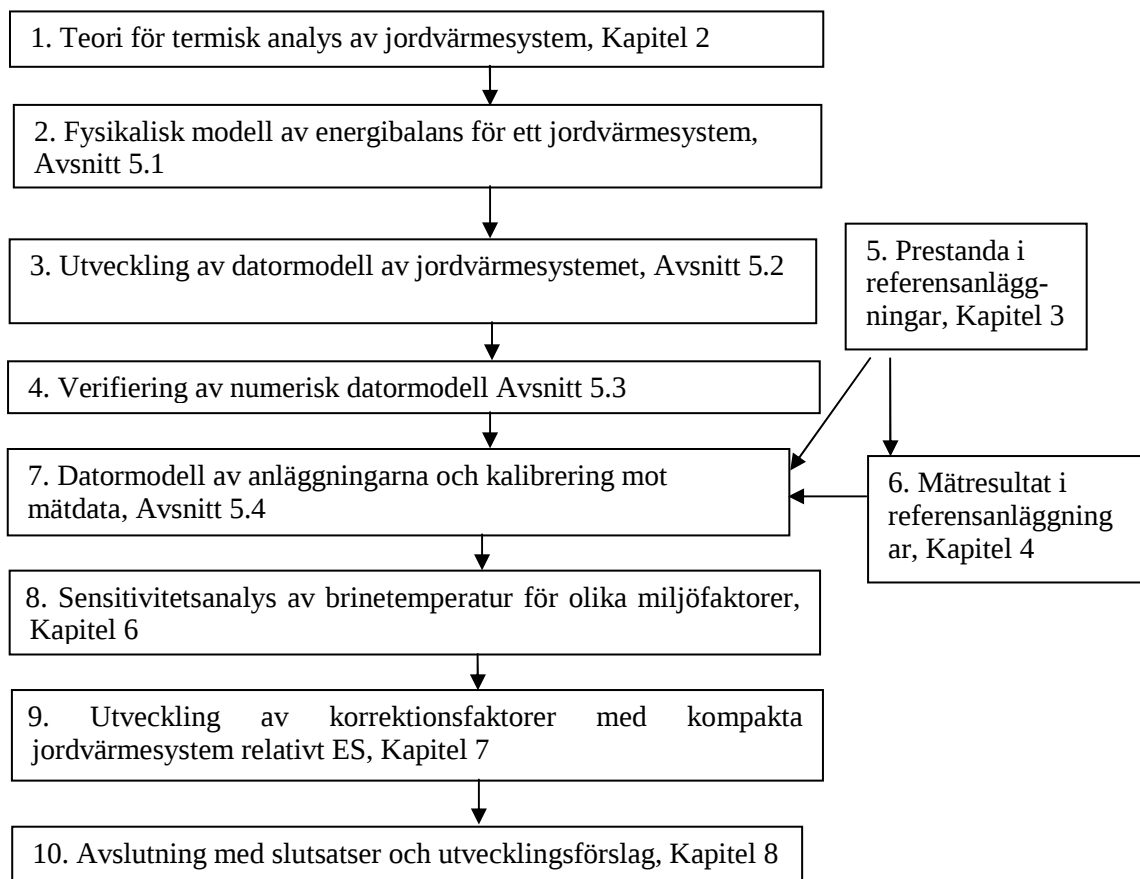
Kablar är dragna från temperaturgivarna i systemen till en mätcentral vilken registrerar mätvärden från givarna med två timmars intervall. Mätcentralerna i systemen är anslutna till ett mobiltelemodem, vilket överför insamlade data till en logger vid SGI en gång per dygn. Mätningarna av jordtemperaturerna påbörjades i Flistad i nov 2002 och i Motalasystemet i jan 2003. Mätningarna slutfördes under hösten 2004. Avbrotten i mätningarna har varit få och de påverkar inte datautvärderingen. Mätnoggrannheten bedöms vara $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. I Diagram 10 och Diagram 9 med kalibreringsresultat visas temperaturutveckling för genomsnittliga mätprofiler i Flistad och Motala. Övriga mätresultat av jordtemperaturer i anläggningarna redovisas i Rosén, (2006).

4.4 Mätning av temperaturnivåer i luft och i värmepump

Resistansgivare, PT100, mäter temperaturen på inkommande och utgående fluid på både den kalla och den varma sidan av värmepumpen. Mätningar utförs med intervall om fem och tre minuter i Flistad respektive Motala. Registrering görs huruvida kompressorn är påslagen eller inte. Lufttemperaturen utomhus mäts med samma intervall. Uttagen värmeeffekt från värmepump och tillförd eleffekt till denna beräknas med formler framtagna vid laboriemätningar på IVT. Variabler i dessa formler är temperaturer på inkommande fluid på den kalla sidan och utgående fluid på den varma sidan. Uttagen värmeeffekt från mark ges av differens mellan uttagen effekt från värmepumpen och tillförd eleffekt till kompressorn. Mätningarna på värmepumpen i Flistad har haft ett flertal avbrott. Det gäller perioderna 030908-031001, 031214-031222, 040115-040321, 040410-040426 och 040521-040624. I Motala har motsvarande mätsystem endast haft avbrott under perioden 040622-040704. Under dessa perioder är uttagen värmeeffekt från värmepumpen antagen. Rosén, (2006) redovisar mätresultat av tillsatt eleffekt till kompressorn och uttagen värmeeffekt från mark och värmepump.

5 DATORMODELL FÖR TERMISK ANALYS AV MARKVÄRMEVÄXLARE

I syfte att ta fram dimensioneringsnormer för kompakta jordvärmesystem har det varit nödvändigt att studera känsligheten hos brinetemperaturen med avseende på relevanta miljöfaktorer i markvärmeväxlaren. En datormodell kallad "SEBAM2D" (SoilEnergyBalanceModel2Dimensions) har därför utvecklats. En sensitivitetsanalys av förväntad brinetemperatur har genomförts med datormodellen. Modellen är skriven i språket Pascal Borland 5.5. Stommen till modellen är framtagen av Göran Hellström vid avd. för Matematisk Fysik, LTH. I beräkningsmodellen tillämpas en s.k. explicit numerisk differensmetod. Modellen verifieras genom att jämföra den numeriska modellen med en analytisk lösning. Modellen har kalibrerats mot uppmätta data så att den kan förväntas vara "fysikaliskt försvarbar" och simulera de verkliga fysikaliska processerna i jordvärmesystemen. I Figur 16 visas schematiskt arbetsmomenten i examensarbetet.



Figur 16, Schematisk beskrivning av arbetsmomenten i examensarbetet. Skissen visar utvecklingen och användning av datormodellen SEBAM2D i examensarbetet samt dess relation till referensanläggningarna.

Inom examensarbetet har det utvecklats korrektionsfaktorer för optimal slanglängd med de kompakta jordvärmesystemen relativt systemet med ett en slang/dike. Utvecklingen av dessa korrektionsfaktorer är en förstudie vid upprättandet av slutliga dimensioneringsnormer inom projektet "Effektivare Elanvändning".

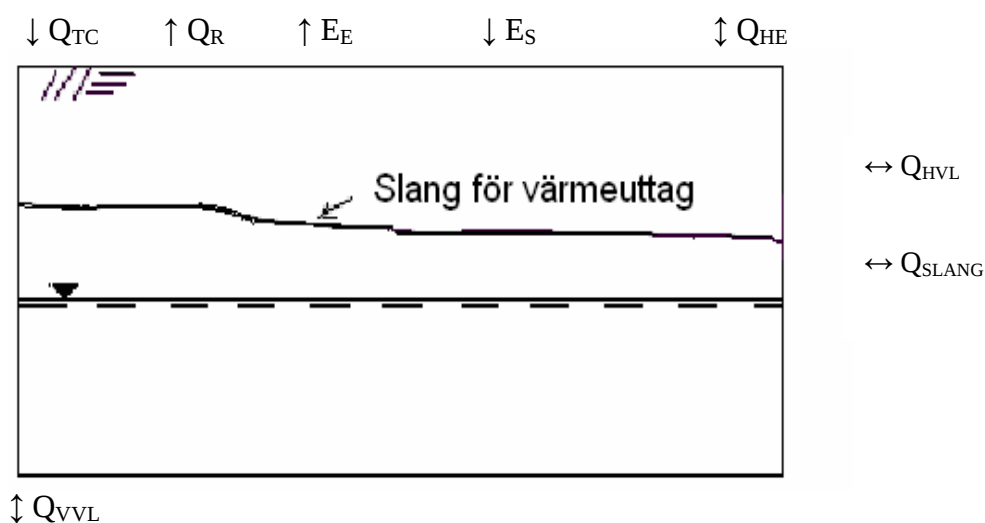
5.1 Fysikalisk modell av termiska processer i markvärmeväxlare

Ett jordvärmesystem kan beskrivas ur fyra aspekter. De anges nedan och inom parantes visas vilka av miljöfaktorerna vid sensitivitetsanalysen i kapitel 6 som kan väntas påverka respektive aspekt.

1. Prestanda för det tekniska systemet (värmeuttag med slang)
2. Randvilkor i markyta (geografiskt läge, horisontprofil, snötäckning)
3. Entalpinivå (H) och värmemotstånd i jord (FK, GVV, C_p , jordart och uppfuktning vid slang)
4. Villkor för slang som värmemotstånd, nivå under markyta och c/c-avstånd i slang (λ , FK, GVV, uppfuktning, jordart och snödjup)

Termisk utveckling i ett jordvärmesystem orsakas av en känslig dynamisk jämvikt som funktion av nämnda aspekter. Det tekniska slangsystemet dimensioneras så att det under givna fysikaliska förutsättningar kan väntas klara uppställda krav på T_b och återladdning. De kompakta jordvärmesystemen har en högre värmeväxlande yta per m^3 . Värmemotståndet mellan brinevätska och markyta kommer då i större grad att bestämmas av markens egenskaper än av slangens dito vid jämförelse med ES. Därför kan de kompakta systemens termiska beteende väntas vara annorlunda relativt ES. Syftet med denna rapport är att utreda problemet med dimensionering av kompakta jordvärmesystem så att markvärmeväxlaren upptar mindre markyta och installationskostnaden reduceras jämfört med traditionella system.

I Figur 17 illustreras schematiskt energibalansen för en markvärmeväxlare (Lunardini, 1981). Den översta delen av rotzonen i markytan och luften närmast mark kan betraktas som ett gränsskikt mellan jord och atmosfär. Egenskaper för gränsskiktet beror på dess sammansättning såsom jordart och vegetation, och styr randvilkoren för jordvolymen.



Figur 17, Schematisk illustration av energibalansen för en jordvolym i en markvärmeväxlare.

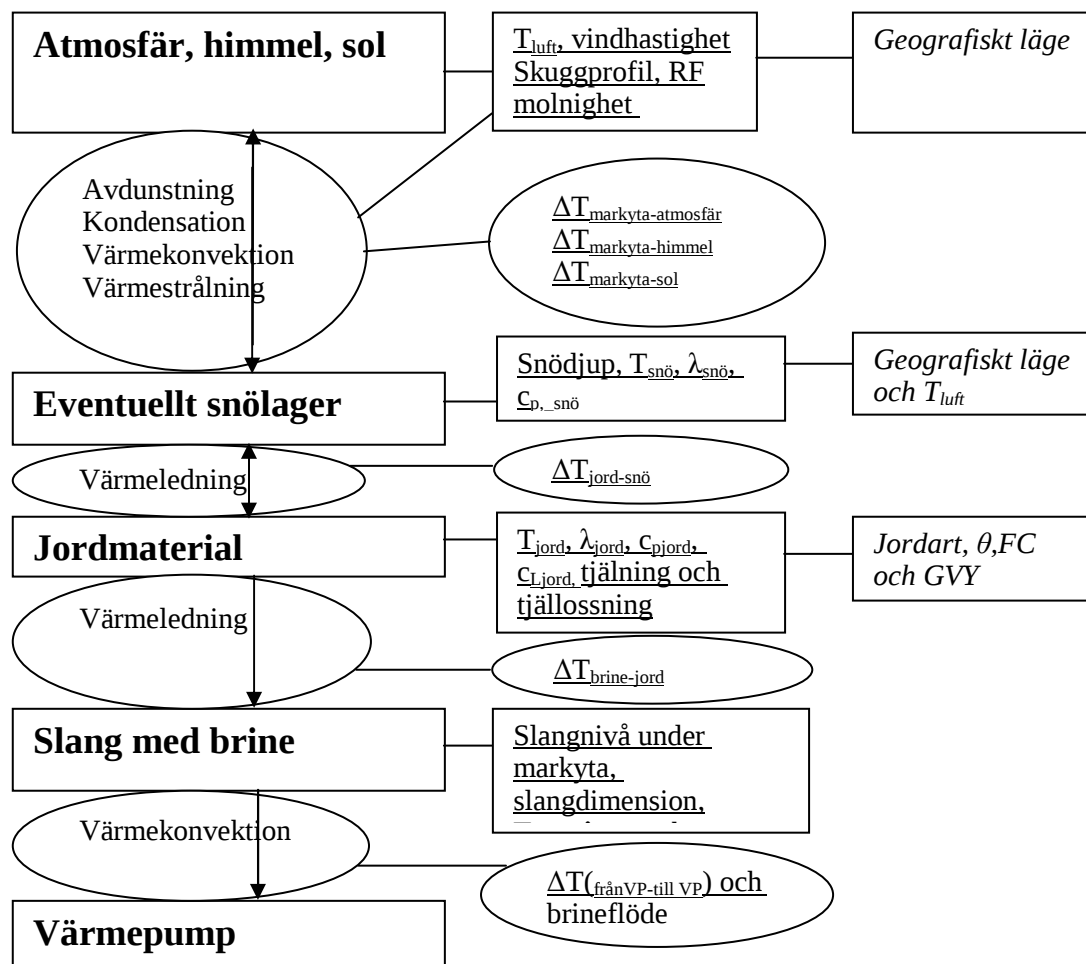
Värmeflöden som randvärden (W/m^2) i markytan betecknas:

- Q_{TC} = kortvågig ($0,15-4,0 \mu m$) strålning från sol och himmel
- Q_R = reflekterad del av kortvågig inkommande strålning
- E_E = långvågig ($4,0-120 \mu m$) utgående strålning från mark
- E_S = långvågig inkommande strålning från atmosfär
- Q_{HE} = avdunstning, kondensation och konvektion (se Formel 9)

Värmeflöden i jorden betecknas:

- $Q_{SLANG}(W/m)$ = värmeuttag/slangmeter från jordvolymen
- $Q_{HVL} (W/m^2)$ = horisontell värmeledning till och från jordvolymen
- $Q_{VVL} (W/m^2)$ = vertikal värmeledning mellan jordvolymen och djupare jordlager

Ett jordvärmesystem bygger på en termisk jämvikt mellan några energireservoarer och värmeflöden mellan dessa. Termiska egenskaper i reservoarerna tillsammans med aktuella drivande potentialer styr nivån hos värmeflödena. I Figur 18 visas schematiskt struktur för energireservoarer, värmeflöden och drivande potentialer. Faktorer som kan väntas styra värmeflöden och termsika egenskaper visas också.



Figur 18, Illustration av värmeflöden och energireservoarer i ett jordvärmesystem utan artificiell återladdning. I figuren representeras värmereservoarer med rektanglar och värmeflöden med pilar i vänster kolumn. Termiska egenskaper för energireservoarerna (rektanglar) och drivande potentialer för värmeflödena

(ellipser) ges i mittenkolumnen. Styrande faktorer för de termiska egenskaperna ges i höger kolumn.

Energiniivå i en jordvolym kan beskrivas med dess entalpinivå (H) (Lunardini, 1981). Förändringen av energiinnehållet i en jordvolym under ett godtyckligt tidssteg kan beräknas genom att addera alla förändringar av entalpinivå under tidssteget till jordens befintliga entalpinivå. Förändringar i entalpinivå för jorden ges av produkten mellan följande faktorer.

- Specifik värmekapacitet för jorden, temperaturdifferens och jordvolym.
- Randflöden och aktuellt tidssteg.
- Förändringar i jordens ofrusna vattenvolym, och vattens specifika smältvärme.

Energibalansen för ett jordvärmesystem kan formuleras matematiskt med Formel 6.

Formel 6

$$H(t_{i+1}) = H(t_i) + \iiint c_{pofruset} \cdot dT \cdot dx \cdot dy \cdot dz + \iiint c_{pfruset} \cdot dT \cdot dx \cdot dy \cdot dz + \iiint c_L \cdot (V_{of} - V_f) / V_{tot} \cdot dx \cdot dy \cdot dz + A \cdot Q_{rand} \cdot (t_i - t_{i+1}) + Q_{slang} \cdot (t_i - t_{i+1})$$

där

$H(t_i)$ (MJ) = Entalpinivå för en jordvolym vid tiden t_i

$c_{pofruset}$ och $c_{pfruset}$ (MJ/m³K) = Specifik värmekapacitet för jorden i ofruset resp. fruset tillstånd.

T (°C) = Jordtemperatur

c_L (MJ/m³) = Vattens specifika smältvärme

Q_{rand} (W/m²) = Randflöden i markyta

Q_{slang} (W) = Värmeuttag med slang

A (m²) = Area över vilken värme flödet sker

V_{of} (m³) = Volym ofruset vatten

V_f (m³) = Volym fruset vatten

Följande fysikaliska processer i jorden påverkar dess termiska parametrar:

- Fasövergångar mellan is, vatten och vattenånga, så att smält- och ångbildningsvärme avges eller upptas av jorden.
- Förändringar av fuktnivåer i jorden. Fuktnivåer beror på nivåer för grundvatten och markvattnet.

Värmetransport kan ske genom konvektion, strålning och ledning. Värmekonvektion innebär transport med en fluid i vätske- eller ångfas. Linjär värmeledning i ett material kan analyseras med Formel 7 (Jönsson, 1998).

$$Q = \frac{\lambda \times A \times (T_1 - T_2)}{L}$$

Formel 7

där

Q (W) = Värmeledning mellan två parallella ytor med arean A (m²) kallade y_{ta1} och y_{ta2} . I det fall då $T_1 > T_2$ sker värmeledningen från y_{ta1} till y_{ta2} .

λ (W/mk) = Värmeledningsförmåga hos materialet.

A (m²) = Tvärsnittsarea vinkelrät mot värmeströmmens riktning över vilken värmeledningen sker.

L (m) = Längd parallellt med värmeströmmens riktning över vilken värmeledningen sker.

$T_1 - T_2$ (K) = Temperaturdifferens mellan yta1 och yta2

L (m) = Avståndet mellan yta1 och yta2.

Radiell värmeledning över en slangvägg med en temperaturgradient kan analyseras med Formel 8 (Jönsson, 1998). Om brineflödet i slangens kan antas vara turbulent blir hastighetsprofilen för brinen konstant vinkelrätt dess flödesriktning. Brinetemperaturen vid slangvägg kan då anses vara lika för övrig brinetemperatur.

Formel 8

$$Q = \frac{L \times (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1) / 2\pi\lambda + R_p}$$

där

Q (W) = Värmeledning över en rörvägg

λ (W/mk) = Värmekonduktivitet hos materialet

R_p (K/(W/m)) = Värmemotstånd för slang

r_1 och r_2 (m) = Radie från slangcentrum till inner respektive yttervägg för slang

$T_1 - T_2$ (K) = Temperaturdifferens mellan brine vid slangvägg och jord vid slang

L (m) = Slanglängd.

Förväntad värmetransport med konvektion, avdunstning och kondensation i markyta kan beräknas med Formel 9 (Johansson och Josefsson, 1995).

Formel 9

$$Q_{HE} = (1,7 \cdot V_{vind} + 7,5) \cdot (P_y - P_a)$$

där

V_{vind} (m/s) = Vindhastighet på höjden 10 meter ovan mark

P_y (Pa) = Vattens ångtryck i markyta, RF=100% antas

P_a (Pa) = Vattens ångtryck i luft ovan mark (Pa)

Reflekterad strålning (Q_R) från en markyta ges av produkt mellan albedovärdet för markytan och nivå för inkommande kortvågig strålning. Albedovärdet kan variera från 0 för en sk."svart kropp" till 1 för ett helt reflekterande material. Ljusa ytor reflekterar en stor del av inkommande kortvågig strålning och får därför värden för albedo nära 1. Albedovärde för snö som funktion av lufttemperaturen kan beräknas med Formel 10. Inkommande (E_S) och utgående (E_E) kortvågig strålning i en snötäckt markyta kan beräknas med Formel 11 respektive Formel 12.

Formel 10

$$\text{Albedo} = 0,423 - 0,042 \cdot T_{\text{luft}}$$

Om $T_{\text{luft}} < -9^\circ\text{C}$ blir Albedo=0,8

Formel 11

$$E_S = 1,02 \cdot \sigma \cdot (273 + T_{\text{luft}})^4 + 71 \cdot \text{molnfaktor} / 8 - 92$$

Formel 12

$$E_E = \sigma \cdot (273 + T_{\text{snö}})^4$$

där

E_S (W/m²) = Långvågig (4,0-120µm) inkommande strålning

T_{luft} (°C) = Lufttemperatur

Molnfaktor(1/8) = Andel av himmelen vilken kan väntas vara molntäckt

E_E (W/m²) = Långvågig utgående strålning från marken

$$\sigma \text{ (W/}^\circ\text{C}^4\text{m}^2) = 5,67 \cdot 10^{-8}, \text{ Stefan Boltzmanns konstant}$$

$$T_{\text{snö}} \text{ (}^\circ\text{C)} = \text{Temperatur i snö}$$

5.2 Datormodellen SEBAM2D för termisk analys av markvärmeväxlare

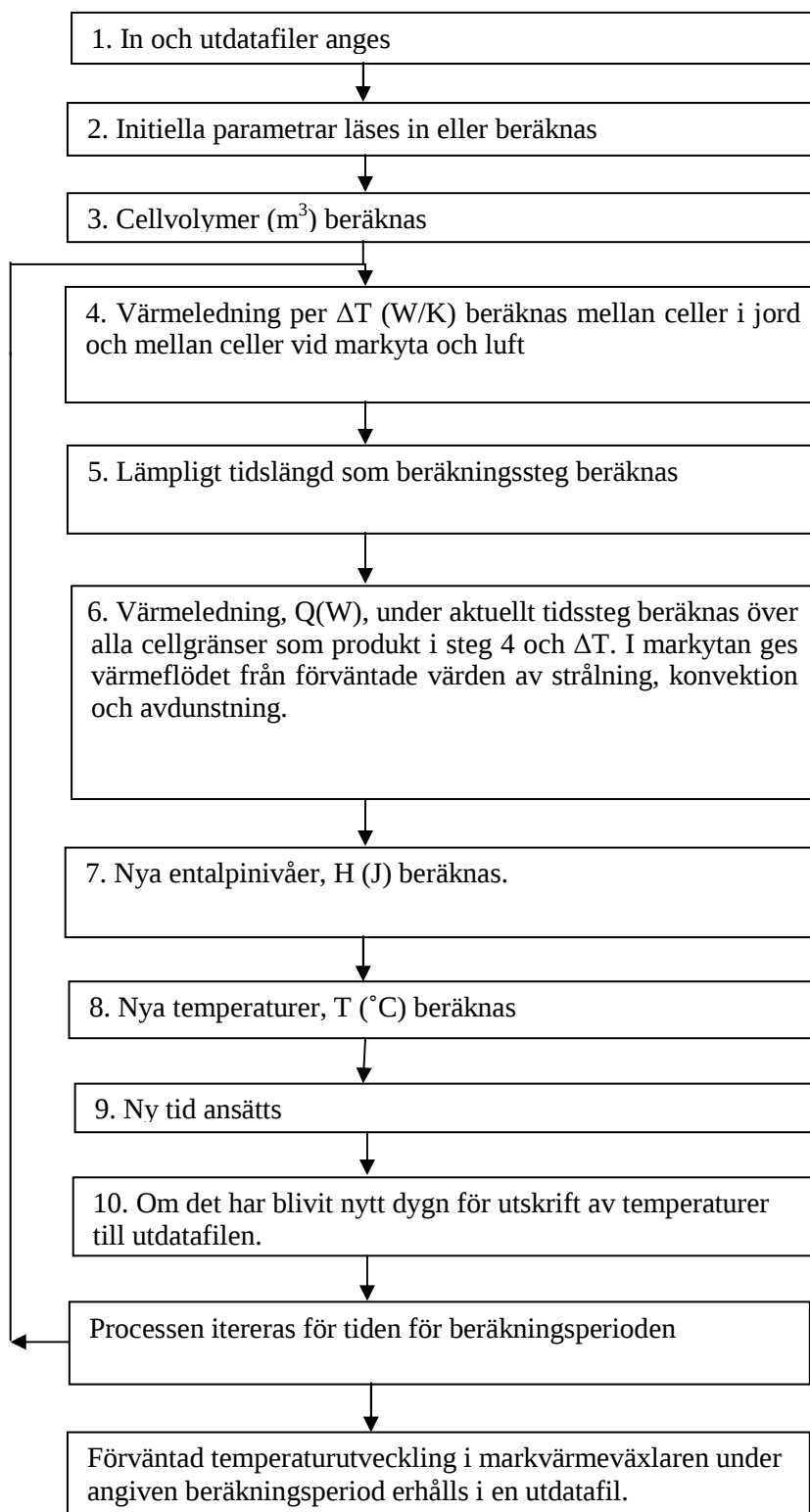
Datormodeller för simulering av termiska processer i jordvärmesystem presenteras i Dunand (1982) samt Ahlkorna och Mogensen (1987). Datormodellen SEBAM2D som tillämpas vid analysen i detta examensarbete bygger vidare på dessa modeller. Enligt Göran Hellström, handledaren för examensarbetet, kan den tillämpade datormodellen SEBAM2D betraktas som den mest kvalificerade modellen för simulering av termiska processer i marknära jordvärmesystem där fukttransport kan försummas. Tidigare modeller innehåller större förenklingar jämfört med denna. Modellen består av en källkodsfil som läses in och kompileras av en pascalkompilator. Indata vilka är konstanta över tiden för systemet finns angivna i programkoden medan tidsberoende värden, som termiska egenskaper i atmosfären, ges av två indatafiler. Utifrån givna förutsättningar beräknas sedan förväntad temperaturutveckling i systemet, vilket skrivs till en utdatafil. Modellen har alltså inte något användargränssnitt i t.ex. Windowsmiljö. I programmet beräknas temperaturutvecklingen 2-dimensionellt i en zon som kan väntas vara representativ för hela markvärmeväxlaren. I beräkningskoden har formler angetts för de termiska processerna enligt avsnitt 5.1. För den numeriska analysen tillämpar datormodellen en så kallad explicit numerisk differensmetod.

De termiska processerna i markvärmeväxlaren simuleras i tidssteg om 80-300 sekunder. En temperaturskillnad (ΔT_i), tid tiden t_i , mellan en cell och dess granncell ger upphov till värmetransporten Q_i mellan dessa. Värmebalansen ger en ny entalpinivå (H_i) i cellen och därmed en ny temperaturdifferens mellan cellerna (ΔT_{i+1}). I Figur 19 nedan visas förenklat förloppet för den numeriska beräkningen av temperaturutvecklingen i simuleringszonen från tiden t_1 till t_5 .

Tid= t_1		$[H_1 \rightarrow \Delta T_1 \rightarrow Q_1]$
Tidssteg-a	↓	
Tid= t_2		$[H_2 \rightarrow \Delta T_2 \rightarrow Q_2]$
Tidssteg-b	↓	
Tid= t_3		$[H_3 \rightarrow \Delta T_3 \rightarrow Q_3]$
Tidssteg-c	↓	
Tid= t_4		$[H_4 \rightarrow \Delta T_4 \rightarrow Q_4]$
Tidssteg-d	↓	
Tid= t_5		$[H_5 \rightarrow T_4 \text{ och } H_5]$

Figur 19, Illustration av det termiska förloppet som under fyra tidssteg i en cell under perioden t_1 - t_5 utvecklas från (T_1 och H_1) till (T_5 och H_5).

Temperaturutvecklingen i markvärmeväxlaren simuleras med datormodellen som en iterativ process illustrerat i Figur 20.



Figur 20, Illustration av beräkningsprocessen för termisk analys med SEBAM2D.

Datormodellen SEBAM2D tillämpar en modell för snötäcket där snöskiktet bildar en extra rad celler ovan jordvolymen. I modellen antas att snöytan bildar randvärde mot atmosfärluften och att värmeledning sker till och från snötäcket så att dess temperatur

är i jämvikt med omgivningen. Vid snötäckning av marken krävs andra värden på albedo och för inkommande och utgående långvågig strålning än vid barmark. Under perioden med snötäckning antas temperatur i snölagret vara 0°C eller lägre. I snömodellen antas att c_p för snö är 0,48 MJ/m³. Modellen antar att snön inte tar upp smältbildningsvärme vid smältning.

Enligt Rhen (1982) kan frysning av jorden väntas ske med successivt sjunkande fryspunkt enligt en logaritmisk funktion från 0°C. Nedsättningen av fryspunkten orsakas av markvattnets elektriska bindningar till mineralpartiklarna. Vid -0,1°C och -1,0°C kan ca 30 respektive 8 % av markvattnet i en jordvolym antas vara i vätskefas. I datormodellen SEBAM2D har frysningen antagits ske linjärt från 0°C till -1°C.

5.3 Verifiering av datormodellen SEBAM2D

Temperaturutvecklingen som funktion av djupet i marken kan beräknas exakt analytiskt vid homogena förhållanden och enklare randvillkor. Därför har den numeriska beräkningsmodellen i SEBAM2D verifierats mot en sådan analytisk lösning. Vid verifieringen antas jorden vara homogen och vattenmättad, indata konstanta och randvillkor i markytan är konstant temperatur. Initiell jordtemperatur är 1 och 10 C° vid linjär respektive radiell värmetransport. Lufttemperatur är 10 C° i båda fallen. Värmeuttaget är 0 och 5 W/meter slang i fallet med linjär respektive radiell värmetransport. Vid beräkningarna stämde den numeriska modellen mycket väl med den analytiska lösningen och SEBAM2D kan därför antas räkna rätt numeriskt för värmeledningen i marken. Redovisningen av resultaten är inte medtagen i denna rapport.

I Diagram 2 visas energibalansen för kalibreringen av datormodellen i Motala. Största differens mellan momentan H och för summan av initieell H och produkt för randflöden och tidssteg inträffar i januari och är (2530,3156-2530,112854) = 0,2027 MJ. Det motsvarar ungefär en felberäkning av temperaturen på 0,05°C från markyta och ner till djupet 2 m. Verifiering har även gjorts för energibalans i slang på motsvarande vis, vilket ges av Diagram 1. Enligt verifiering av modellen med en energibalans kan slutsatsen dras att modellen ger tillförlitliga beräkningsvärden. Kalibreringen av modellen mot mätdata från referensanläggningarna visar i vilken mån programmet kan simulera de verkliga fysikaliska processerna i en markvärmesväxlare.

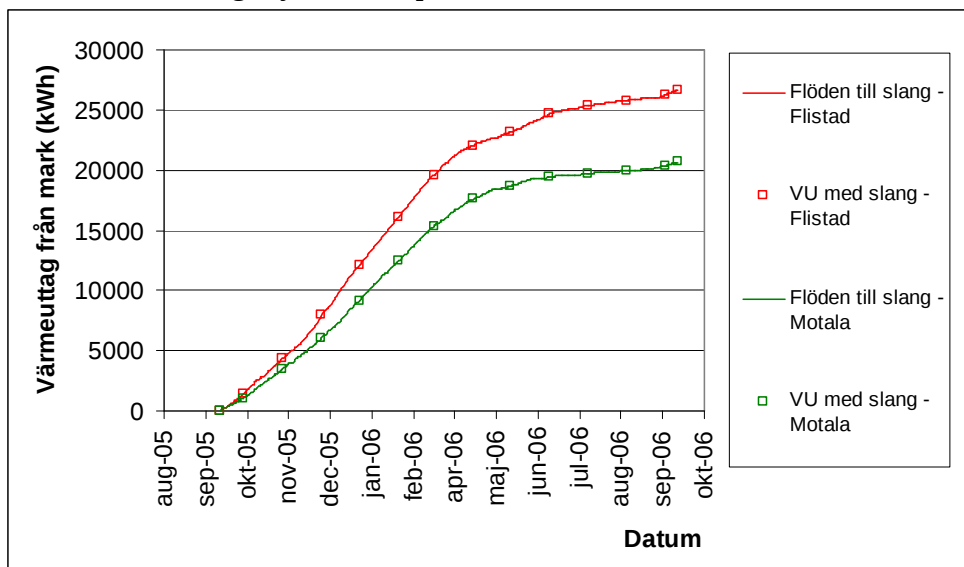


Diagram 1, Illustration av energibalans för slangen i datormodellen. Energiflödet till slangen i datormodellen är lika stort som önskat värmeuttag från indata

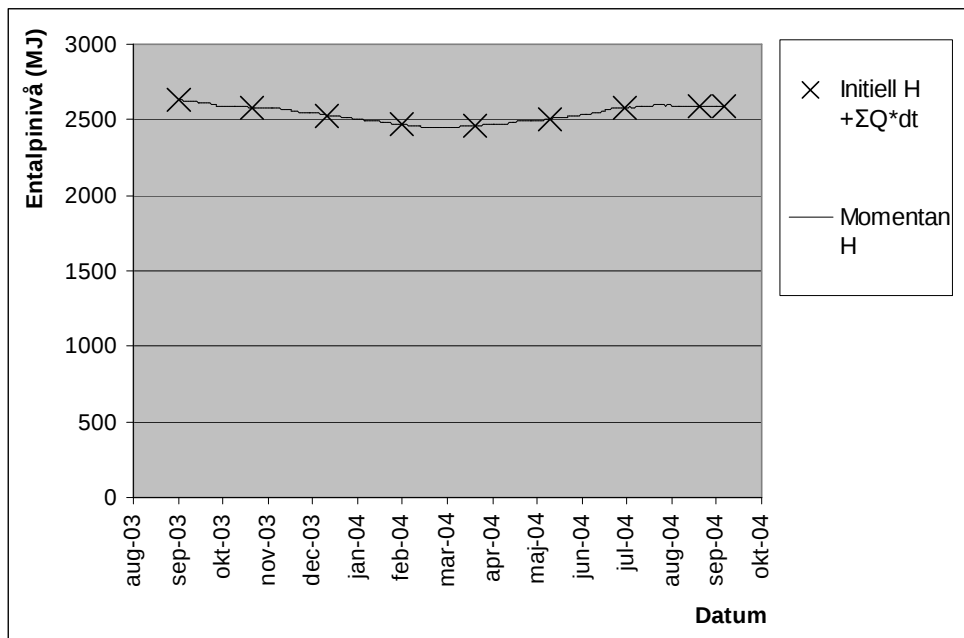
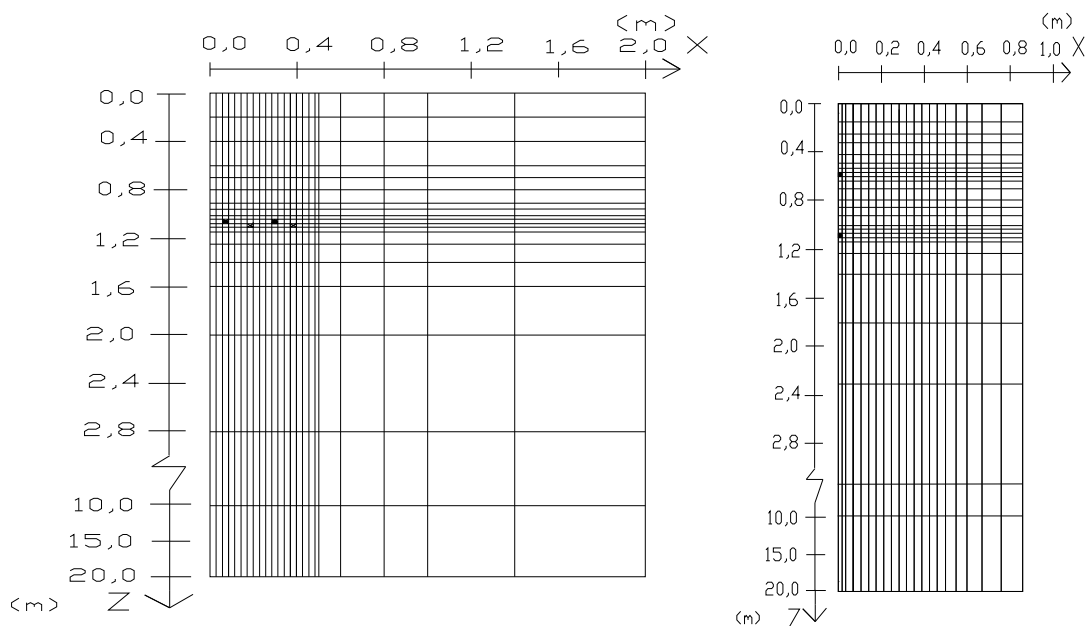


Diagram 2, Illustration av energibalans för den tillämpade beräkningszonen i datormodellen för referensanläggningen i Motala. I Diagrammet visas dels entalpinivån i zonen momentant och som summering av energiflöden till den initiella entalpinivån. Energiflödet till slangen i datormodellen är lika stort som önskat värmeuttag från indata

5.4 Datormodellen SEBAM2D av referensanläggningarna

Den jordvolym, en zon, som energibalansen utförs på ska vara representativ för hela markvärmesväxlaren. I Figur 21 visas zonen med dess cellindelning för simuleringsprocessen i sektion motsvarande vertikalled och vinkelrätt med slangarna. Zonen har antagits vara så djup att temperaturen i den nedersta cellen inte förändras över året. Djupet har antagits vara av geometrin 20 m djup (t.v. och t.h. för Flistad respektive Motala i Figur 21), 1 m i slangens riktning (inte synligt i Figur 21) och 0,5 c/c-avstånd horisontellt och vinkelrät med slangerna. Figur 10 och Figur 12 visar markvärmesväxlarnas sträckning i Flistad och Motala.



Figur 21, En zon med celler 2-dimensionellt. Till vänster visas slinky i Flistad och till höger visas tvåslangsystemet i Motala. X-axeln visar avståndet vinkelrätt ut från slangarnas symmetrilinje till halva c/c-avståndet mellan slangarna. Z-axeln visar nivå under markytan.

I syfte att få en rimligt hanterbar beräkningsmodell har en rad antaganden gjorts om förenklingar av de fysikaliska egenskaperna och processerna i systemen:

- Ingen värmeledning sker från jorden utanför markvärmväxlaren till markvärmväxlaren.
- Ingen värmeledning sker från större djup än 20 m under markytan till markvärmväxlaren.
- Kalibrering av datormodellen görs utifrån mätdata från referensanläggningarna under perioden 031001-040930 respektive 030926-040925.
- Zonen betraktas som en i två lager homogen jordvolym med lika egenskaper horisontellt och vertikalt.
- Inget kontaktmotstånd antas mellan slang och jord.
- Brineflödet i slangsystemet antas ske med turbulent strömning vid $Re > 2300$.
- Grund- eller markvattenflöde antas inte ge konvektiv värme- eller kyltransport.
- Ingen förhöjd fuktighet runt slang antas.
- I markvärmväxlaren av slinkymodell är slangarna placerade som överlappande spiraler i ett osymmetriskt mönster, medan datormodellen för systemet antar en installation med parallellt liggande horisontella slangar.
- Homogena villkor antas råda längs med slangarna.
- I Flistad har den spiralformade slinkyen med 8,4 m slang/m dike approximeras med 8 parallella slangar vilket ger 8,0 m slang/m dike i datormodellen. Approximationen bedöms ge en underskattning av T_b med ca $0,1^\circ\text{C}$.

Indata i datormodellen är antagna till sådana värden som kan förväntas i de fysiska jordvärmesystemen. Antagandena baseras på uppgifter redovisade i kapitel 3 och 4 och från litteraturstudier. I Tabell 13 beskrivs antagna värden för indata vid kalibreringen av datormodellen SEBAM2D för referensanläggningarna i Flistad och Motala.

Tabell 13, Förutsättningar och indata vid kalibrering av datormodellen SEBAM2D för referensanläggningarna i Flistad och Motala.

Faktor	Värden för referensanläggningen i Flistad	Värden för referensanläggningen i Motala
Ort	Flistad, Linköpings kommun	och Motala
Period för kalibrering av datormodellen SEBAM2D	031001-040930 och	030926-040925
Slangtyp	Material är PEM-plast och tryckklass är 10	Material är PEM-plast och tryckklass är 10
Slangdiameter (mm)	25 respektive 40	40
Slangnivå under markyta (m)	I Flistad 1 och i Motala 0,58 respektive 1,08	0,58 och 1,08 m
Godstjocklek slang (mm)	2,3 respektive 3,7	3,7
Initiell marktemperatur	se Diagram 3.	se Diagram 3.
Jordart	Siltig sand (se avsnitt 3.2-3.3) med utpräglad organisk karaktär ned till nivån 0,47 m under markytan.	
Dikeslängd (m)	215 respektive 250 (se avsnitt 3.2-3.3)	250
Slanglängd (m) och slangtyp	2040 (med slinky och dubbelslang) respektive 500 (dubbelslang)	500
Slanglängd/dikesmeter	8 respektive 2	2
Värmeuttag från mark till värmepump (kWh) under simulerad period	26640 respektive 20700	20700
Värmeuttag från värmepump (kWh) under simulerad period	42850 respektive 31000	31000
Värmeuttag/m slang (kWh) per år	24 respektive 41	41
Värmeuttag/m ² markyta (kWh) per år	39 respektive 56	56
Maximalt effektuttag/m slang (W/m) under kall årstid	4,1 respektive 11,3	11,3
ρ_{torr} (kg/m ³) och θ (%) i jorden	1600 respektive 40	40
Värmeövergångsmotstånd för slang (mK/W)	0,0935 respektive 0,0908	0,0908
c_L (MJ/m ³) för vatten och jord	330 respektive värden i Bilaga 16	330 respektive värden i Bilaga 16
c_p (MJ/m ³ K) för jord vid $S_r=60$ i ofruset och fruset tillstånd	2,25 respektive 1,68. Ned till nivån 0,47 m under markytan bedömdes jorden vara av utpräglad organisk karaktär, med högre S_r , varför c_p i ofruset tillstånd ökas med 7%.	Se Flistad

Forts på tabell 13 Faktor	Värden för referensanläggningen i Flistad	Värden för referensanläggningen i Motala
λ (W/mK) för jord vid $S_r = 60$ i ofruset och fruset tillstånd	1,56 respektive 2,05 Ned till ca 0,47 m under markytan bedömdes jorden vara av utpräglad organisk karaktär. Därför reducerades λ till 66 och 83 %, i ofruset respektive fruset tillstånd, som ett medelvärde mellan en organisk jord och mineraljords förväntade värden. Reduktionen höjer lägsta T_b med ca 0,2°C vid värmeuttag i systemen. Värden för λ ges i Bilaga 6 och Bilaga 7	Se Flistad
c_p (MJ/m ³ K) för brinen och snö	4,05 respektive 0,48	Se Flistad
λ (W/mK) för snö	0,20	Se Flistad
Höjd för zon med kapillärstigning (m)	0,25	Se Flistad
Fältkapacitet (FK) i omättad zon, S_r (%)	60	Se Flistad
Nivå för grundvattenyta under markyta (m)	Visas i Diagram 2, Antagan grundvattenyta baseras på mätresultat redovisat i Bilaga 1.	Se Flistad
Snödjup (cm)	I Flistad antogs snödjupet till 5 cm i perioden 23/12-4/1, 29/1-6/3 och 20 cm under perioderna 8/12-15/12 och 5/1-22/1. I Motala antogs snödjupet till 5 cm under perioderna 20/10-2/12, 28/12-1/2, 9/2-21/3, och 20 cm under perioden 16/12-26/12. Värdena är antaget som medelvärde av mätdata från SMHI redovisat i Rosén (2006).	Se Flistad
Albedo för gräs och snö	0,20 respektive värde från Formel 10	Se Flistad
T_{luft}	Från mätdata redovisat i Rosén (2005)	Se Flistad
Skuggning	Antagna horisontprofiler visas i och Figur 22 och Figur 23	Se Flistad

Forts. Faktor	Värden för referensanläggningen i Flistad	Värden för referensanläggningen i Flistad
Randflöden i markyta	Konvektion, kondensation och avdunstning (W/m^2) beräknas med Formel 9. Värden på strålningsvärden för Q_{TC} , Q_R , E_E , E_S , Q_{HE} (W/m^2) redovisas i Diagram 6. Förväntade värden för vindhastighet (m/s), RF (%), konvektion, kondensation och avdunstning ges i Diagram 7. Värdena är antagna som normalårsvärden från databasen Meteonorm [©]	Se Flistad
$c_p(\text{MJ/m}^3\text{K})$ för jord vid $S_r = 60$ i ofruset och fruset tillstånd	2,25 respektive 1,68. Ned till nivån 0,47 m under markytan bedömdes jorden vara av utpräglad organisk karaktär, med högre S_r , varför c_p i ofruset tillstånd ökas med 7%.	Se Flistad
λ (W/mK) för jord vid $S_r = 60$ i ofruset och fruset tillstånd	1,56 respektive 2,05 Ned till ca 0,47 m under markytan bedömdes jorden vara av utpräglad organisk karaktär. Därför reducerades λ till 66 och 83 %, i ofruset respektive fruset tillstånd, som ett medelvärde mellan en organisk jord och mineraljords förväntade värden. Reduktionen höjer lägsta T_b med ca $0,2^\circ\text{C}$ vid värmeuttag i systemen. Värden för λ ges i Bilaga 6 och Bilaga 7	Se Flistad
$c_p(\text{MJ/m}^3\text{K})$ för jord vid $S_r = 60$ i ofruset och fruset tillstånd	2,25 respektive 1,68. Ned till nivån 0,47 m under markytan bedömdes jorden vara av utpräglad organisk karaktär, med högre S_r , varför c_p i ofruset tillstånd ökas med 7%.	Se Flistad
λ (W/mK) för jord vid $S_r = 60$ i ofruset och fruset tillstånd	1,56 respektive 2,05 Ned till ca 0,47 m under markytan bedömdes jorden vara av utpräglad organisk karaktär. Därför reducerades λ till 66 och 83 %, i ofruset respektive fruset tillstånd, som ett medelvärde mellan en organisk jord och mineraljords förväntade värden. Reduktionen höjer lägsta T_b med ca $0,2^\circ\text{C}$ vid värmeuttag i systemen. Värden för λ ges i Bilaga 6 och Bilaga 7	Se Flistad

Forts. Faktor	Värden för referensanläggningen i Flistad	Värden för referensanläggningen i Flistad
c_p (MJ/m ³ K) för brinen och snö	4,05 respektive 0,48	0,48
λ (W/mK) för snö	0,2	0,20
Höjd för zon med kapillärstigning (m)	0,25	0,25
Fältkapacitet (FK) i omättad zon, S_r (%)	60	60
Nivå för grundvattenyta under markyta (m)	Visas i Diagram 2, Antagan grundvattenyta baseras på mätresultat redovisat i Bilaga 1.	Se Flistad
Snödjup (cm)	I Flistad antogs snödjupet till 5 cm i perioden 23/12-4/1, 29/1-6/3 och 20 cm under perioderna 8/12-15/12 och 5/1-22/1. I Motala antogs snödjupet till 5 cm under perioderna 20/10-2/12, 28/12-1/2, 9/2-21/3, och 20 cm under perioden 16/12-26/12. Värdena är antaget som medelvärde av mätdata från SMHI redovisat i Rosén (2006).	Se Flistad
Albedo för gräs och snö	0,20 respektive värde från Formel 10	Se Flistad
T_{luft}	Från mätdata redovisat i Rosén (2005)	Se Flistad
Skuggning	Antagna horisontprofiler visas i och Figur 22 och Figur 23	Se Flistad
Randflöden i markyta	Konvektion, kondensation och avdunstning (W/m ²) beräknas med Formel 9. Värden på strålningsvärden för Q_{TC} , Q_R , E_E , E_S , Q_{HE} (W/m ²) redovisas i Diagram 6. Förväntade värden för vindhastighet (m/s), RF (%), konvektion, kondensation och avdunstning ges i Diagram 7. Värdena är antagna som normalårsvärden från databasen Meteonorm [©] .	Se Flistad

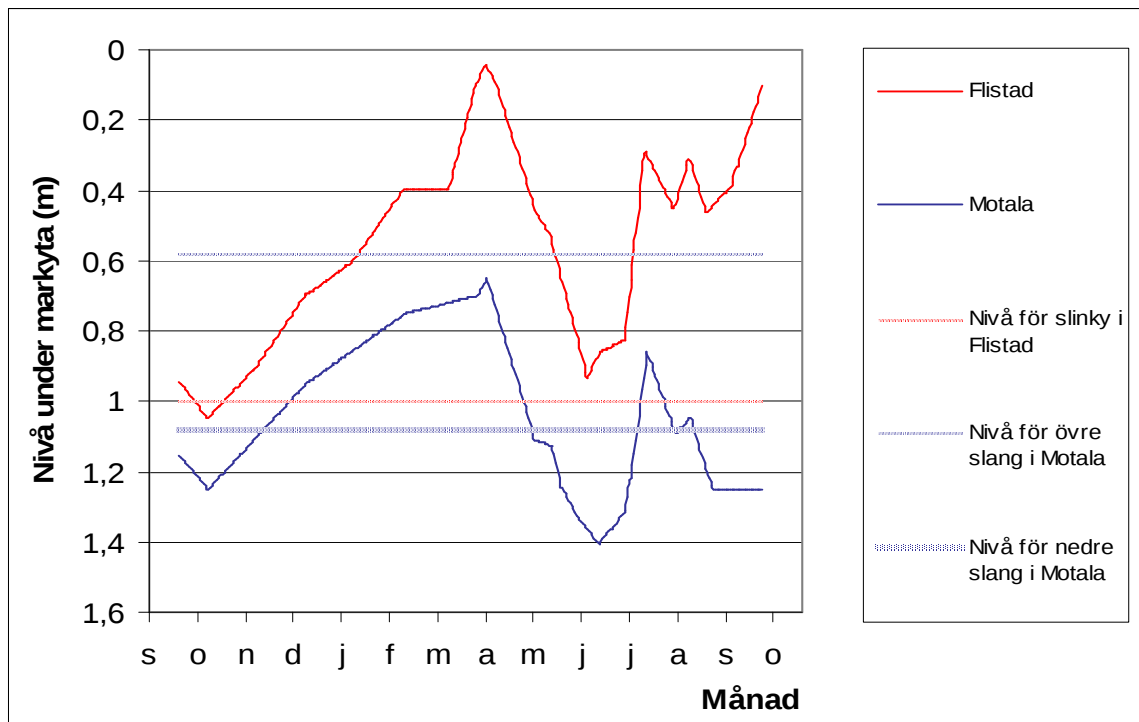


Diagram 2, Nivå för antagen genomsnittlig GVV samt slangnivåer i referensanläggningar i Flistad och Motala.

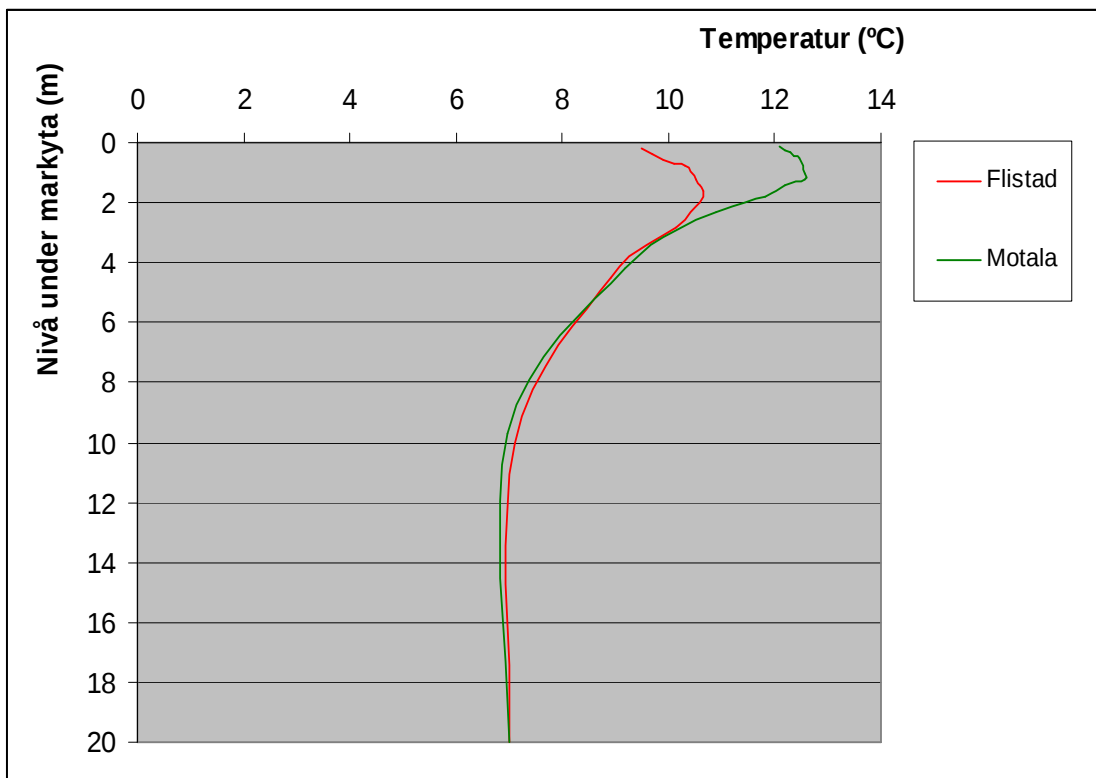
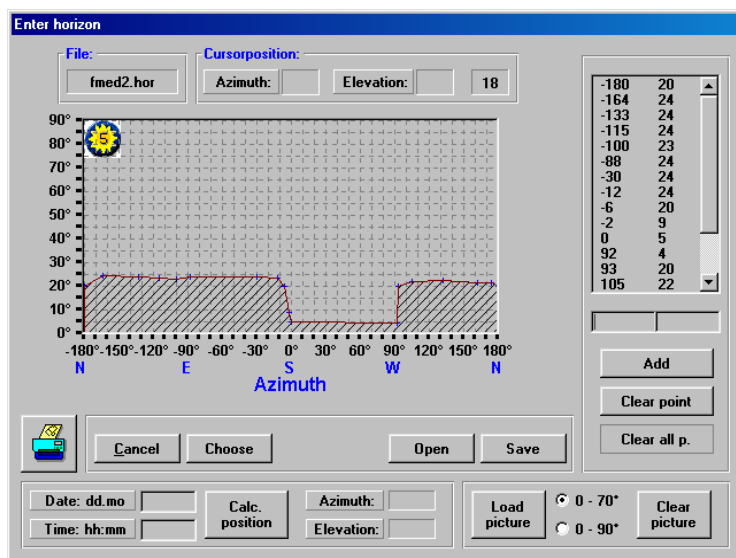
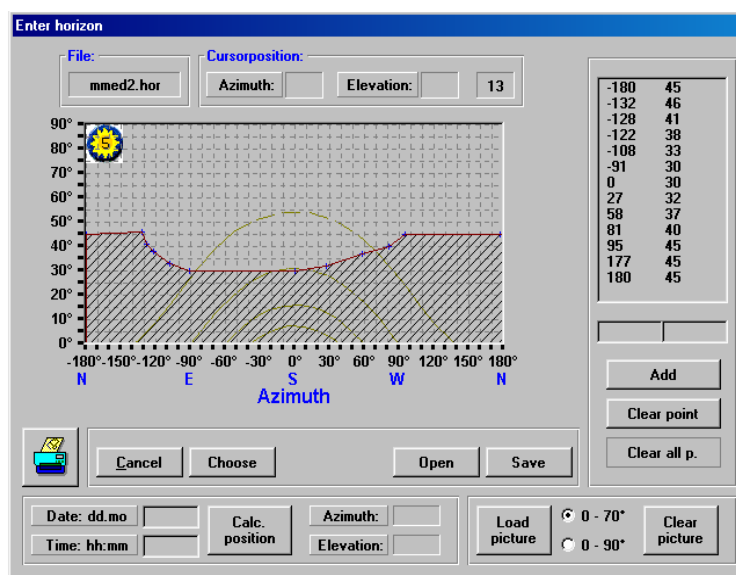


Diagram 3, Initiala jordtemperaturer i markvärmväxlarna som funktion av djupet under markytan i Flistad (031001) och Motala (030926).



Figur 22, Användargränssnitt i databasen Meteonorm[®] för generering av klimatdata. Rektangeln inuti programfönstret visar genomsnittlig lutning (°) ovan mark för horisontprofil vid markvärmesväxlaren i Flistad.



Figur 23, Användargränssnitt i databasen Meteonorm[®] för generering av klimatdata. Rektangeln inuti programfönstret visar genomsnittlig lutning (°) ovan mark för horisontprofil vid markvärmesväxlaren i Motala.

Värmelagrande förmåga i en jordvolym styr energimängd som kan lagras och möjlig tidsperiod för lagringen. Generellt kan sägas att värmelagrande förmåga ökar i en jord med ökad volym och H. Värmelagring sker över en tidsperiod i en jord från en varm till en kall tid. Det kan endast ske fram till att en ny termisk jämvikt har ställts in mot omgivningen. Tidskonstanten för systemen anger den tid som systemet behöver för att komma i termisk jämvikt mot dess omgivning. I Diagram 4 och Diagram 5 visas tidskonstant för systemen i Flistad och Motala samt indata för beräkning av denna.

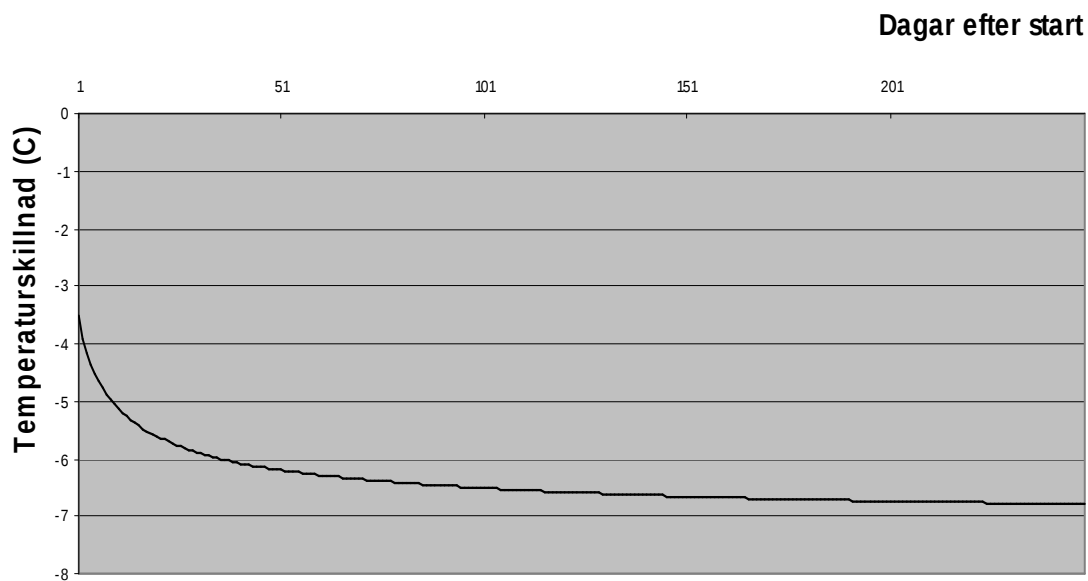


Diagram 4, Illustration av beräknad temperaturskillnad i brinen för metalssystemet för fallen med inget värmeuttag med slang och med konstant värmeuttag=5kW för brinen. Hela jorden är vattenmättad och homogena egenskaper antas. Endast värmeledning räknas som randvärde i markyta.

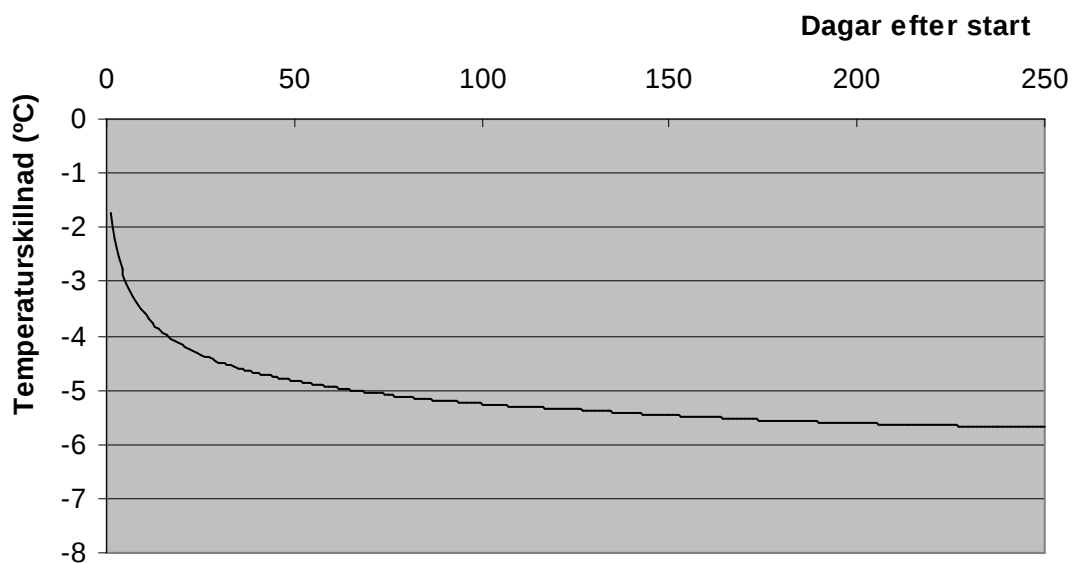


Diagram 5, Illustration av beräknad temperaturskillnad i brinen för flistadsystemet för fallen med inget värmeuttag med slang och med konstant värmeuttag=5kW för brinen. Hela jorden är vattenmättad och homogena egenskaper antas. Endast värmeledning räknas som randvärde i markyta.

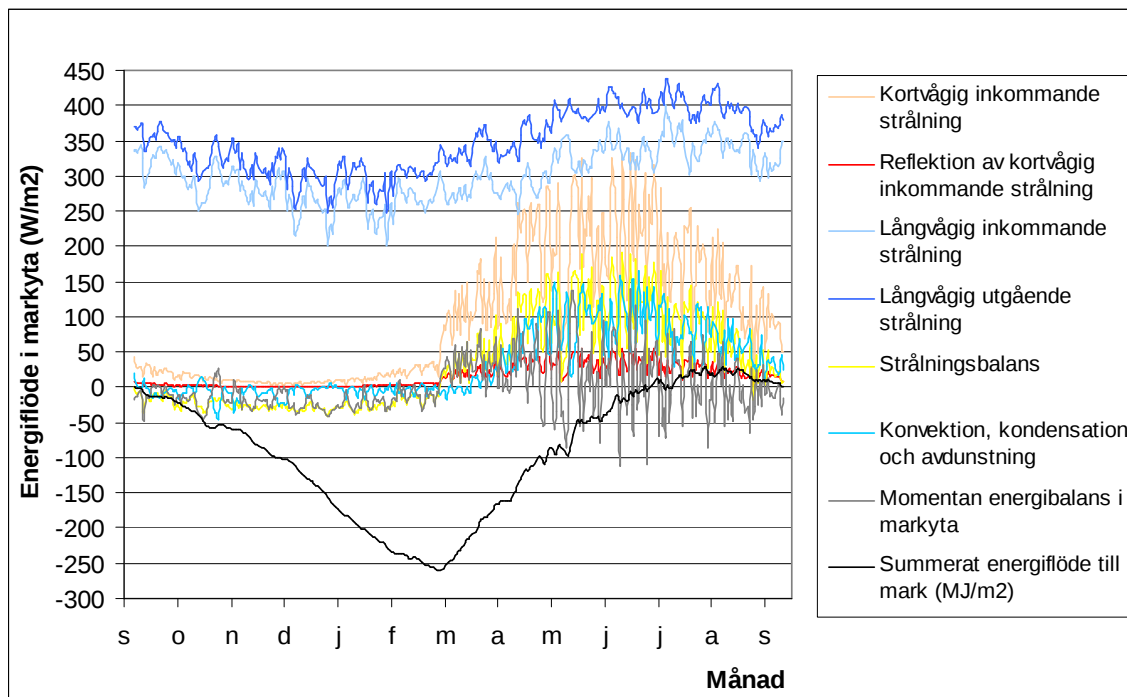


Diagram 6, Strålningsbalans i markyta ett normalår i Norrköping med horisontprofil 30° över horisont från databasen Meteonorm®.

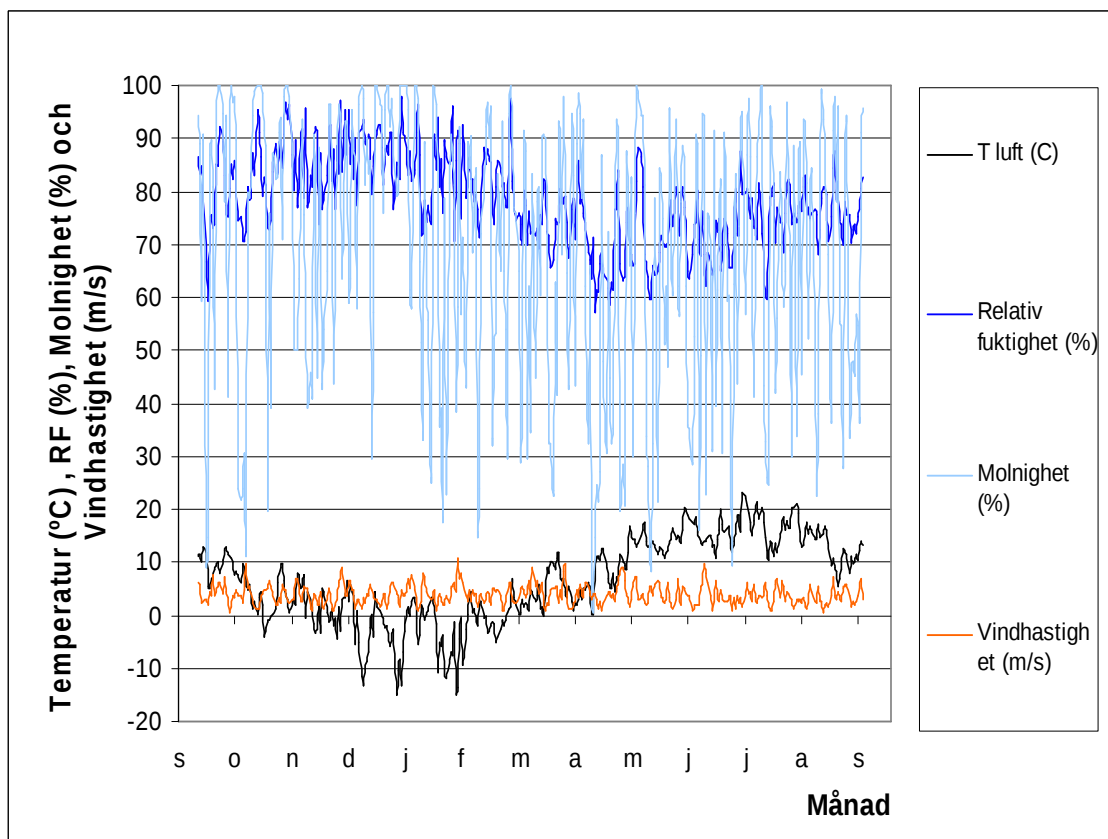


Diagram 7, Förväntade klimatvärden ett normalår i Norrköping med horisontprofil 30° ovan horisont från databasen Meteonorm®. Molnigheten anger andel av himmelen vilken kan väntas vara molntäckt.

Systemen kalibrerades för ett referensfall utan värmeuttag med slang, i syfte att "nollställa" modellen utifrån den naturliga temperaturutvecklingen i jorden. I Flistad och Motala var nivån för mätning och beräkning av referenstemperatur 0,93 m respektive 1,0 m under markytan. Det ska nämnas att generellt blev kalibreringsresultaten likartade i Motalasystemet och Flistadsystemet. I Diagram 8 visas temperaturnivåer från den bästa kalibreringen som kunde fås med SEBAM2D-modellen med och utan värmeuttag genom slang i jordvärmesystemet i Flistad. Som framgår av diagrammet gav temperaturberäkningen för referensfallet utan värmeuttag på 0,93 m under markytan god överensstämmelse mot mätdata under den kalla årstiden. Under sommaren överskattas däremot temperaturen med ca 3-4°C i datormodellen för referensfallet. Temperaturerna för brinen och i jorden på slangnivå i beräkningsmodellen blir ca 1-2°C lägre under den kalla årstiden jämfört med mätresultaten. Under slangnivån, 1,5 m under markytan, verkar jordtemperaturen beräknas relativt väl under den kalla årstiden, men tjälas något djupare och tjällossningen sker senare jämfört med motsvarande mätresultat. På övriga nivåer ges relativt god överensstämmelse under den varma årstiden.

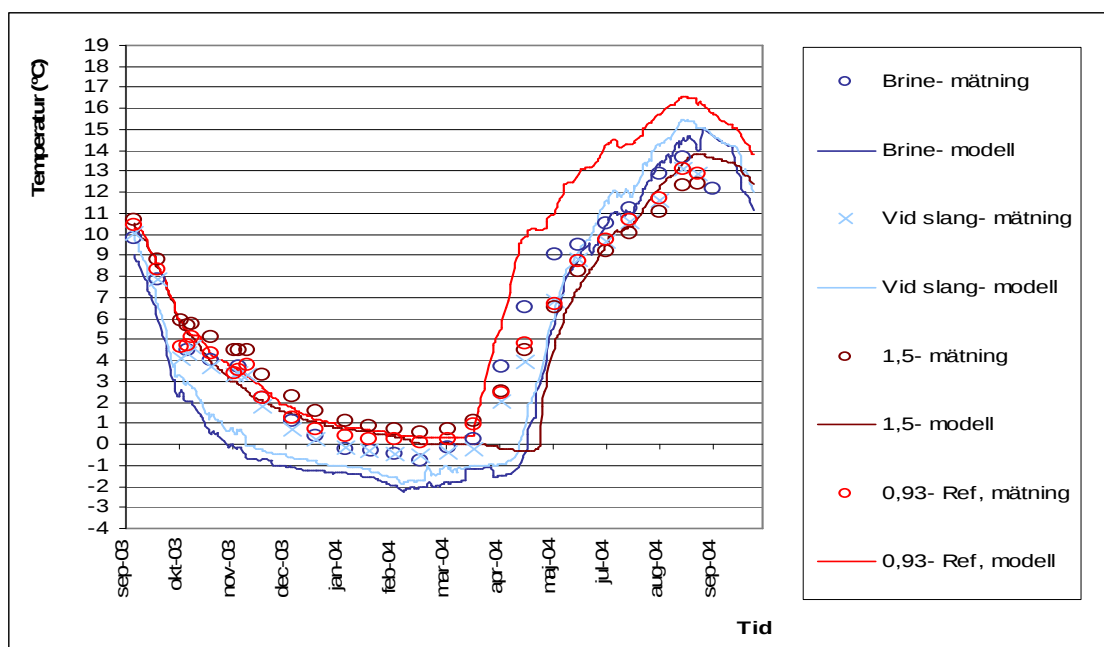


Diagram 8, Resultat från kalibrering av datormodellen SEBAM2D mot mätdata för referensanläggningen med slinksystem i Flistad.

I Diagram 9 visas temperaturnivåer från kalibreringen av SEBAM2D-modellen för jordvärmesystemet i Motala. För referensfallet i Motala utan värmeuttag blev jordtemperaturerna under den kalla årstiden på nivån 1 m under markytan ca 1°C kallare i modellen jämfört med motsvarande mätresultat. Brinetemperaturen blir i modellen ca 2°C lägre jämfört med uppmätta data under den kalla årstiden. Jordtemperaturer vid den övre slangens beräknas till 1-2°C lägre i modellen jämfört med motsvarande mätresultat. Under den varma årstiden visar datormodellen för referensfallet mycket god överensstämmelse med uppmätta resultat.

Avvikelsen i datormodellen för jordvärmesystemen i Flistad och Motala följer likartade mönster, och verkar därför orsakas av liknande fenomen. I början av detta avsnitt redovisas de förenklingar av den fysiska verkligheten som har införts i datormodellen SEBAM2D. De har i flera fall effekten att modellen beräknar fram en lägre temperatur

än vad som kan väntas den fysiska verkligheten. Vidare verkar det som att största temperaturdifferens erhålls för i och omkring slang. Vid beräkningarna med datormodellen tjälades jorden från markytan ända ner till slangnivå. Eftersom det inte ges någon kontinuerlig temperaturprofil med djupet från mätningarna har det varit svårt att bedöma om jorden i referensanläggningarna tjälades ner till slangnivå. Enligt mätresultaten var lägsta temperatur under kalibreringsperioden i Flistad på nivån 0,5 m under markytan i mätprofil T1, T2 och T3 $-0,3/-0,81$ och $0,39^{\circ}\text{C}$. Jorden tjälades alltså helt säkert inte till slangnivå i en mätprofil i Flistad, och möjligen också inte i flera. Vid referensanläggningen i Motala låg översta slang relativt ytligt, varför det är troligt att jorden tjälades ner till slangnivå i systemet. Enligt Rosén (2001) bör jordvärmesystem dimensioneras så att jorden inte blir genomtjälad från markyta ner till slangnivå. När all jord mellan markyta och slangnivå tjälas blir tillgängligt ofruset vatten kraftigt reducerad i slangens omgivning, vilket kan väntas förklara de underskattade temperaturnivåerna i datormodellen.

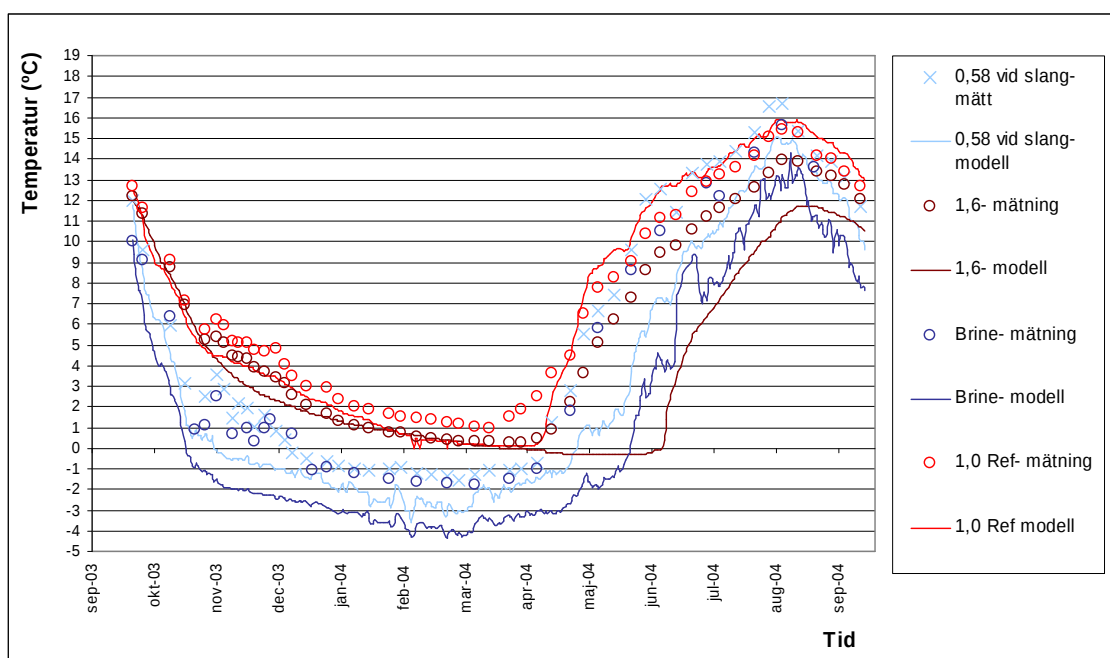


Diagram 9, Resultat från kalibrering av datormodellen SEBAM2D mot mätdata för referensanläggningen med två slangar/dike i Motala.

I Tabell 14 redovisas en jämförelse mellan kalibreringsresultat med SEBAM2D och mätresultat för de studerade systemen. I tabellen redovisas T_b -värden med och utan värmeuttag. T_b anges som minimumvärde under året och medelvärde för perioden 1/12-1/3. Som framgår av tabellen blir T_b -medel med värmeuttag $2,13^{\circ}\text{C}$ och $2,34^{\circ}\text{C}$ lägre i beräkningsmodellen jämfört med mätresultat från referensanläggningarna i Flistad respektive Motala. Utan värmeuttag (VU) blir T_{ref} medel $0,04^{\circ}\text{C}$ och $1,02^{\circ}\text{C}$ lägre i beräkningsmodellen jämfört med vid mätning i Flistad respektive Motala. Underskattningen av T_b vid VU kan alltså väntas innehålla en överlagrad underskattning av jordtemperaturen från nollställningen av modellen. Nettodifferensen för T_b -medel med VU jämfört med T_{ref} medel utan VU ($^{\circ}\text{C}$) blir $-2,09^{\circ}\text{C}$ och $-1,32^{\circ}\text{C}$ i Flistad respektive Motala. Den alltför stora beräknade temperatursänkningen orsakat av värmeuttaget blir således mindre när den överlagrade effekten från nollställningen räknas bort. Syftet med denna rapport är att studera temperaturkänsligheten i brinen med avseende på vissa miljöfaktorer och speciellt att jämföra känsligheten i de kompakta systemen med ett traditionellt enslangssystem. Därför kan det antas att

överskattningen av effekten av VU för de slutliga korrektionsfaktorerna är mindre relevant eftersom detta är en relativ jämförelsestudie.

Tabell 14, Jämförelse av temperaturnivåer från mätningar och datormodellen SEBAM2D vid kalibrering av datormodellen SEBAM2D för Tb vid VU och Tref utan VU. I tabellen visas även differens mellan mätresultat och modellresultat samt nettodifferens mellan Tb och T_{ref} i modellen och vid mätningarna.

	Flistad			Motala		
Jämförelsefall	Modell	Mätresultat	Differens Modell-Mätning	Modell	Mätresultat	Differens (Modell - Mätning)
Vid VU Tb medel (C°)	-1,51	0,62	-2,13	-3,15	-0,81	-2,34
Vid VU Tb min (C°)	-2,38	1,26	-1,58	-4,37	-1,8	-2,57
Utan VU Tref medel (C°)	1,22	0,11	-0,04	1,69	2,71	-1,02
Utan VU Tref min (C°)	0,3	-	0,19	0,1	0,94	-0,84
Nettodifferens för Tb medel med VU jämfört med Tref medel utan VU (C°)	-	-	-2,09	-	-	-1,32
Nettodifferens för Tb min med VU jämfört med Tref min utan VU (C°)	-	-	-1,77	-	-	-1,73

6 TERMISK SENSITIVITETSANALYS

I syfte att studera vilka miljöfaktorer som kan antas styra brinetemperaturen (T_b) har en omfattande sensitivitetsanalys genomförts. En majoritet av simuleringarna avsåg förväntade termiska processer under ett år och några avsåg processer under fem års drift. Vid analysen studerades inverkan av ca tretton miljöfaktorer på T_b med och utan VU i jordvärmesystemen. T_b har simulerats vid 3-10 olika nivåer för varje miljöfaktor i systemen. Analyserade miljöfaktorer är värmeuttag (VU), slangdjup, snödjup, c/c-avstånd för diken, uppfuktning runt slang, fältkapacitet (FK), grundvattennivå (GVY), skuggning, värmekonduktivitet (λ), värmekapacitet (c_p), jordart, torrdensitet i jorden och ort i Sverige. Simuleringarna är genomförda i 23 serier och redovisas i lika många diagram i avsnitt 0. Sammanlagt har 908 datorsimuleringar genomförts. I diagrammen framgår vilken miljöfaktor som har varierats, så att beräknad temperaturdifferens för fallen endast kan hänföras till en parameter. Några miljöfaktorer har studerats ur flera synvinklar, i syfte att skapa förståelse för brinetemperaturens känslighet för synergieffekter. De två kompakta systemen med två slangar/dike (TS) och slinky (SL) har jämförts med ett jordvärmesystem med en slang/dike (ES). Ett referensfall med ES utan VU har även simulerats, i syfte att beräkna temperaturnivå i brinen under naturliga förutsättningar vid olika miljöfaktorer. Det ska nämnas att datormodellen SEBAM2D inte har kalibrerats mot mätdata i referensanläggning med ES. Simulering av T_b under fem år har även genomförts för en matriskombination för VU med 50, 75 och 100 % av referensuttag vid c/c-avstånden 100, 136, 172, 208, 244, 280 cm.

6.1 Förutsättningar vid termisk sensitivitetsanalys

Utförda datorsimuleringar har utgått från ett referensfall bestående av en villa i Norrköping med klimatdata för ett normalår och med indata antagna så allmänna som möjligt. I Tabell 15 till

Tabell 18 beskrivs några förutsättningarna under vilka sensitivitetsanalysen har genomförts. Slanglängder i systemen är antagna från databasen "Prestige 2.0" (SVEP, 2004). Beräkning av temperaturnivå som funktion av djupet under markyta den 26/9 gjordes med formel tagen från Hellström (1991) och med indata enligt Tabell 18.

Tabell 15, Illustration av indata som referensfall och variationsvärde vid sensitivitetsanalys av jordvärmesystem med ES, TS och SL. Varje rad ger förutsättningar för en serie av simuleringar för en miljöfaktor. I tabellen anges även diagram för respektive simulerings-resultat.

Miljöfaktor	Referensvärde	Variationsvärde	Resultat ges i
c_p (MJ/m ³ K)	Förväntade värden ges i Bilaga 15. Nivå för skuggprofil är antaget till 30° ovan horisont.	Vid c_p -analysen varierar c_p till 60,80,100,120 och 140 % av av referensvärdet.	Diagram 22
λ (W/mK)	Förväntade värden ges i Bilaga 4.- Bilaga 7. Nivå för skuggprofil är antaget till 30° ovan horisont.	Vid λ -analysen varierar λ till 60,80,100,120 och 140 % av referensvärde.	Diagram 23

Forts Miljöfaktor	Referensvärde	Variationsvärde	Resultat ges i
Avstånd mellan övre och undre kapillärgräns (m)	0,10	Varieras ej	-
S _r vid övre och undre kapillärgräns (%)	60 respektive 90	Varieras ej	-
FK i rot och sjunkvattenzon, S _r (%)	60. G _{VY} antas till 1 och 2 m under markyta	10, 20, 40, 50, 60, 70, 80, 90	Diagram 24- Diagram 25
Uppfuktning runt slang	Antas inte förekomma vid referensfallet. G _{VY} antas till 1,5 m under markytan.	Från FK vid 20/40 och 60 % till S _r =90%. Sträckning för uppfuktad zon i ES och TS är från 0,42 m under markytan ner till 1,23 m och 0,27 m horisontellt från slang. I SL är zonens utbredning 0,85-1,15 m vertikalt under markytan och 0,65 m horisontellt från symmetrilinje för slangar.	Diagram 26- Diagram 28
G _{VY} (m)	1	0,5/1,0/1,5	-
Snödjup (cm)	15	0,00/3,75/7,50/11,25/15,00/ 18,75/22,50/26,25	Diagram 29
Albedovärde för gräs och snö	0,20 och värde från Formel 10	Albedo för snö på 0,6/0,7/0,8	-
T _{luft}	Diagram 7	En funktion av ort	-
Lutning för skuggprofil ovan markyta (°)	20, Vid C _p - och λ-analysen antas värdet 30°.	0, 10, 20, 30, 40, 50	Diagram 30
Randflöden i markyta	Konvektion, kondensation och avdunstning, (W/m ²) beräknas med Formel 9. Förväntade värden för konvektion, kondensation och avdunstning beräknas med Formel 9. Förväntade värden för vindhastighet (m/s), RF (%) ges i Diagram 7. Värden på strålningsvärden för Q _{TC} , Q _R , E _E , E _S , Q _{HE} (W/m ²) redovisas i Diagram 6. Värdena är antagna	En funktion av skuggprofil, albedovärde, geografiskt läge och snötäckning. Varieras ej	-

	som normalårsvärden från databasen Meteonorm.		
Geografiskt läge	Norrköping, jordvärmesystemet konstant som funktion av ort	Malmö, Växjö, Göteborg, Karlstad, Stockholm, Borlänge, Östersund, Umeå, Luleå, klimatfil och därmed värmeuttag varierar.	Diagram 31.

Tabell 16, Illustration av indata som referensvärde och variationsvärde vid sensitivitetsanalys av jordvärmesystem med ES, TS och SL. Varje rad ger förutsättningar för en serie av simuleringar för en miljöfaktor. I tabellen anges även diagram för respektive simuleringsresultat.

Miljöfaktor	Referensvärde	Variationsvärde	Resultat ges i:
Simuleringsperiod	26/9-25/9 under ett antaget normalår	1 och 5 år	Diagram 10- Diagram 31 respektive Diagram 32- Diagram 34
Synergieffekt för: ort och GVV (m)	Norrköping och 1	Malmö/Norrköping/ Luleå och 0,5/1,0/1,5	Diagram 10- Diagram 18
Jorddata vid synergianalys: Jordart, ρ_{torr} (kg/m^3), Θ (%) och FK (S_r ,%)	siltig sand, 1600, 40, 60	L, 900, 67, 84 L, 1100, 59, 87 L, 1500, 44, 90 S, 1400, 48, 55 S, 1600, 40, 60 S, 2000, 26, 65 M, 1600, 40, 70 M, 1800, 30, 72 M, 2000, 26, 75	
Slanglängd med ES, TS och SL (m)	I Norrköping 350 (=1,0·350), 455 (=1,3·350) och 1050 (=3,0·350)	I Malmö 300 (=1,0·300), 390 (=1,3·300) och 900 (=3,0·300). I Luleå 640 (=1,0·640), 832 (=1,3·640) och 1920 (=3,0·640).	
Dikeslängd för ES, TS och SL (m)	I Norrköping 350, 227 och 131	I Malmö 300, 195 och 113. I Luleå 640, 420 och 240.	
Markyta med kvadratisk markvärmeväxlare för ES, TS och SL (m^2)	I Norrköping 602, 391 och 525.	I Malmö 523, 335 och 452. I Luleå 1101, 722 och 960.	
Värmeuttag (VU) med ES, TS och SL (kWh)	I Norrköping ca 17080 Beräknas med en modell för värmepumpen med	I Malmö ca 16860, I Luleå 22880	

	indata enligt Tabell 18		
VU från mark (kWh/år)	100 %	0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 % av referensvärde	Diagram 19
VU från mark (kWh/m ² år)	28,4/ 43,6/ 32,5	I Malmö 32,2/ 50,2/ 37,3. I Luleå 20,8/ 31,7/ 23,8.	-
c/c-avstånd	1,72 m för ES och TS. 4 m för SL	1,32/1,72/2,12/2,52/ 2,92/3,32/3,72/4,12	Diagram 20
Slangnivå under markyta (m)	1,0	0,8/1,0/1,2/1,4/1,6/1,8/2,0/2,2	Diagram 21
Slanglängd per m dike med ES, TS och SL (-)	1, 2, 8	konstant	-

Tabell 17, Illustration av indata vid synergianalys med jordvärmesystem anpassat till ort.

Faktor	Malmö	Norrköping	Luleå
DUT (C°)	-10	-23	-30
Dim. värmeeffekt till tappvarmvatten (kW)	0,5	0,5	0,5
Balanstemperatur (C°)	17	17	17
Dim. värmeeffekt (kW)	7,3	9,4	11,7
Effekttäckning (%)	74	74	58
COP=3,3 för VP ned till T _{luft} (°C)	-2	-11	-9

Tabell 18, Illustration av snö- och marktermiska villkor på några orter i Sverige. Statisk marktemperatur avser temperaturnivå på nivåer >20 m under markyta och som inte fluktuerar över året.

Ort	Snödjup (cm)	Antal snö dagar /år	Första dag med snötäckning	T _{luft} (årsmedel) (°C)	Statisk marktemperatur (°C)	Amplitud för T i markyta över ett år (°C)	Värmeuttag (kWh/år)
Malmö	3,75	25	30/1	8,00	8,38	9,07	15600
Växjö	13,50	80	15/12	6,50	7,80	10,20	17200
Göteborg	6,00	45	25/1	7,10	7,78	9,60	16290
Karlstad	13,50	90	25/12	5,40	6,75	10,83	18430
Stockholm	11,25	90	4/1	6,60	7,95	10,26	17020
Norrköping	15,00	100	25/12	6,60	8,10	10,00	17060
Borlänge	18,75	145	15/12	4,10	6,28	11,23	20020
Östersund	22,50	170	15/11	2,50	5,05	10,43	21660
Umeå	24,00	150	1/12	2,60	4,85	10,70	21340
Luleå	28,50	170	6/12	1,70	4,25	12,10	22070

6.2 Resultat från termisk sensitivitetsanalys

I kapitel 2 diskuteras inverkan på Tb av några olika miljöfaktorer i jordvärmesystem och i Tabell 3 visas huruvida faktorerna väntas höja eller sänka denna. I Diagram 10 till Diagram 34 till redovisas simuleringsresultaten från sensitivitetsanalysen i examensarbetet. Tabell 21 ger en översiktlig numerär sammanfattning av simuleringsresultaten och i Tabell 22 kommenteres resultaten.

I Tabell 19 visas simulerade nivåer av Tb för referensfallet beskrivet i avsnitt 6.1. Detta är ett jordvärmesystem där indata skall efterlikna normal dimensionering. Vissa serier av simuleringar antar referensfallet någon gång. I tabellen visas även temperaturdifferens med värmeuttag (VU) jämfört med fallet utan VU med ES. Simuleringar av λ , c_p , uppfuktning vid slang och fältkapacitet med nivå för grundvattenyta 2 m under markyta samt simuleringar på andra orter än Norrköping antar inte vid något fall indata enligt referensfallet.

Tabell 19, Illustration av resultat från sensitivitetsanalysen enligt referensfallet. Resultaten avser medel och minimum brinetemperaturer (Tb) med värmeuttag (VU) för ES-, TS- och SL-systemen. Termisk effekt av VU visas även som differens mellan fallen utan och med VU i ES.

Referens fall	Tbmedel ES utan VU	Tb-min ES utan VU	Tb-medel ES	Tb-min ES	Tb-medel TS	Tb-min TS	Tb-medel SL	Tb-min SL
Utan VU	1,67	0,27	1,67	0,27	1,59	0,31	1,89	0,45
Med VU	1,67	0,27	-2,30	-3,98	-2,37	-4,42	-1,72	-3,87
Differens	0,00	0,00	-3,96	-4,25	-3,96	-4,73	-3,61	-4,32

Vid sensitivitetsanalysen för Tb i Luleå antogs första snödag till 6/12, vilket kan betraktas som något sent för en ort långt norrut i Sverige. I Tabell 20 visas en jämförelse mellan simulerade temperaturnivåer med antagen första snödag den 6/12 eller tre veckor tidigare 16/11. Tabellen ger en bild av känsligheten i modellen i norra Sverige för tidpunkt av första snödag. Antalet snödagar är 170 i båda fallen. Tb blir omkring 1°C kallare med snötäckning från 6/12 jämfört med 16/11. Det kan förklaras med att randvärden i markytan blir annorlunda med snö jämfört med barmark. Nivåer för långvågig strålning i markytan är beroende av markmaterial, varför det blir annorlunda med snötäckning jämfört med gräs. Ljusa ytor har som bekant större reflekterande förmåga. Därför blir albedovärdet högre för snötäckt mark jämfört med grästäckt mark. λ är dessutom lågt för snö, vilket ger snötäcket en isolerande förmåga och ökar värmemotståndet i marken. Det ska observeras att temperatursänkningen blir något mindre med VU jämfört med utan VU. Vid VU blir systemet kallare jämfört med dess naturliga jämviktstillstånd. Därför kan atmosfärsluften vid en markvärmeväxlare betraktas som en värmekälla för systemet även under den kalla årstiden.

Tabell 20, Känslighet hos Tb för första dag med snötäckning vid referensfallet i Luleå.

Första snödag	TB-medel ES utan VU	Tb-min ES utan VU	TB-medel ES	TB-min ES	TB-medel TS	TB-min TS	TB-medel SL	TB-min SL
6/12	-0,79	-2,27	-3,36	-5,25	-3,89	-6,45	-3,42	-5,42
16/11	0,06	-1,28	-2,55	-4,56	-2,79	-5,38	-2,36	-4,52
Differens	-0,85	-0,99	-0,81	-0,69	-1,11	-1,06	-1,06	-0,90

Reflektion av kortvågig strålning från markytan till atmosfär ges av produkten mellan inkommande kortvågig strålning och albedovärde för markytan. Känsligheten hos Tb var enligt sensitivitetsanalysen mycket liten för albedovärdet hos snön vintertid. Tb-medel sjunker i alla system vid VU med 0,03°C när albedovärdet för snö ökar från 0,5 till 0,8. Enligt Diagram 6 är kortvågig strålning liten vintertid, vilket kan förklara den låga termiska känslighet i marken för nivåer av albedovärde och strålningsreflektion vintertid. Diagram 10 till Diagram 18 ger simuleringsresultat för förväntad Tb som funktion av en matriskombination mellan jordart (Lera, Silt/Sand, Morän), torrdensitet, grundvattenyta (0,5/1,0/1,5 m under markyta) och ort (Malmö, Norrköping, Luleå). I dessa diagram visas synergieffekter med miljöfaktorerna. Observera att vid synergianalysen har jordvärmesystem på orterna Malmö, Norrköping och Luleå dimensionerats för det lokala klimatet, dvs. värmepumpseffekt och slanglängd är olika.

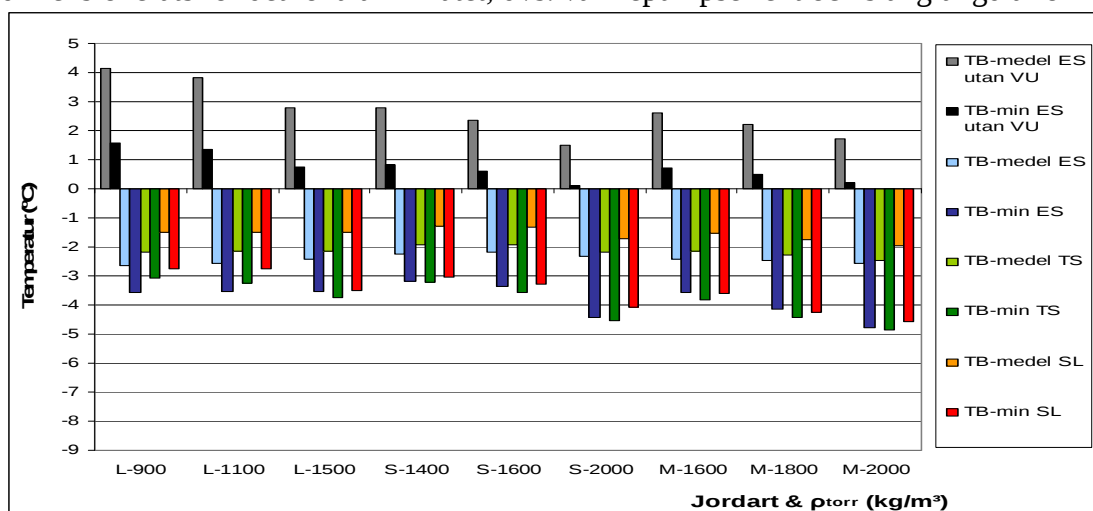


Diagram 10, Beräkningresultat från analys av synergieffekt på förväntad Tb som funktion av jordart och torrdensitet. Ort är Malmö och nivå för GVV antas till 0,5 m under markyta.

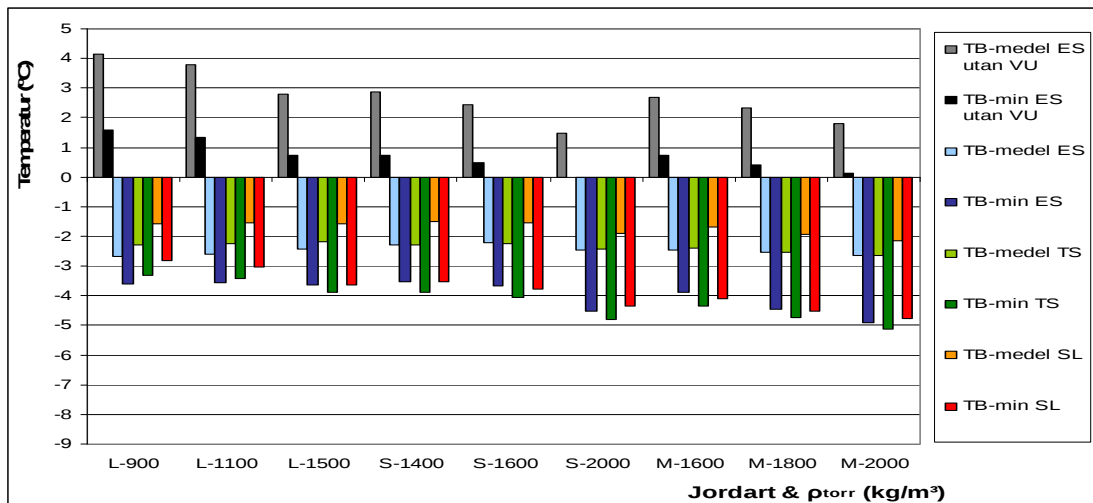


Diagram 11, Beräkningresultat från analys av synergieffekt på förväntad Tb som funktion av jordart och torrdensitet. Ort är Malmö och nivå för GVV antas till 1,0 m under markyta.

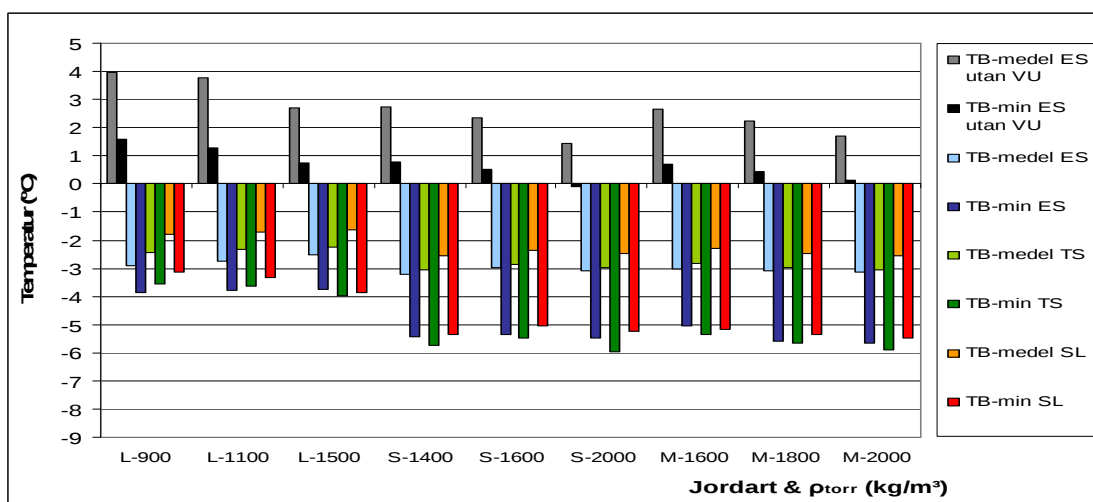


Diagram 12, Beräkningresultat från analys av synergieffekt på förväntad Tb som funktion av jordart och torrdensitet. Ort är Malmö och nivå för GVV antas till 1,5 m under markyta.

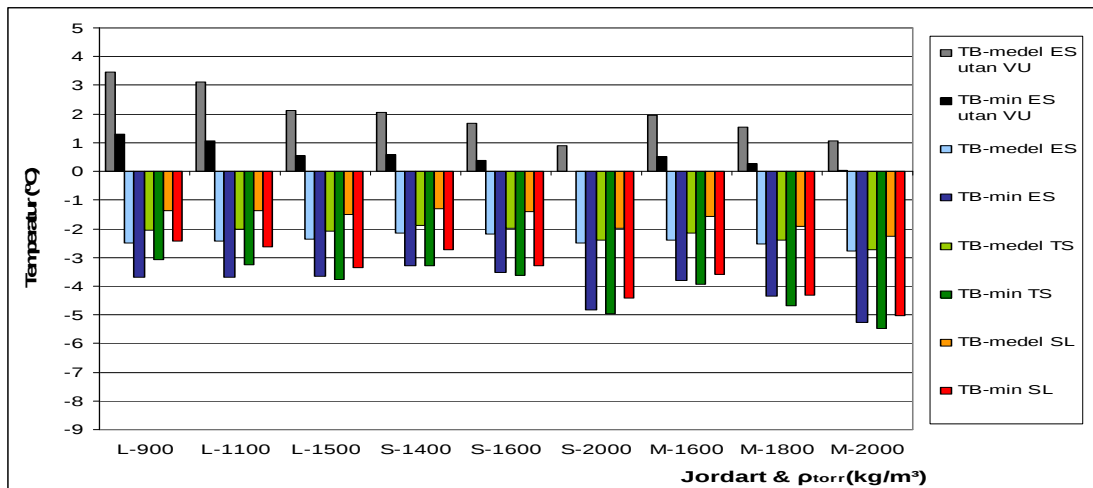


Diagram 13, Beräkningresultat från analys av synergieffekt på förväntad Tb som funktion av jordart och torrdensitet. Ort är Norrköping och nivå för GVV antas till 0,5 m under markyta.

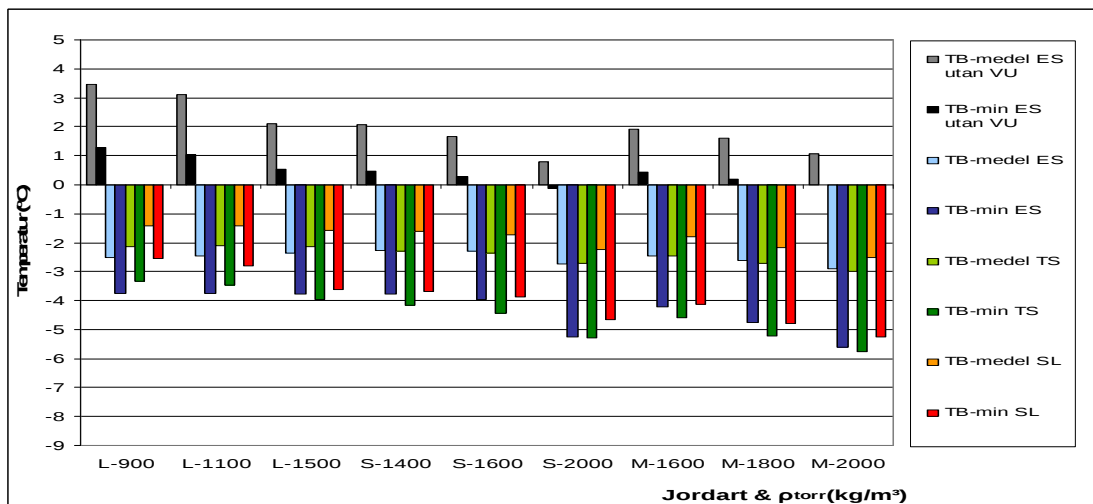


Diagram 14, Beräkningresultat från analys av synergieffekt på förväntad Tb som funktion av jordart och torrdensitet. Ort är Norrköping och nivå för GVV antas till 1,0 m under markyta.

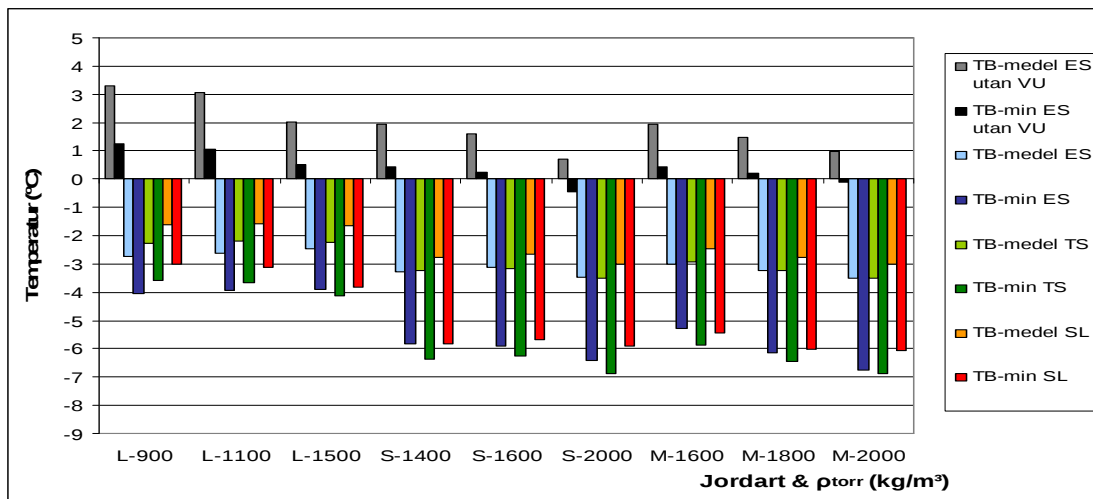


Diagram 15, Beräkningresultat från analys av synergieffekt på förväntad Tb som funktion av jordart och torrdensitet. Ort är Norrköping och nivå för GVV antas till 1,5 m under markyta.

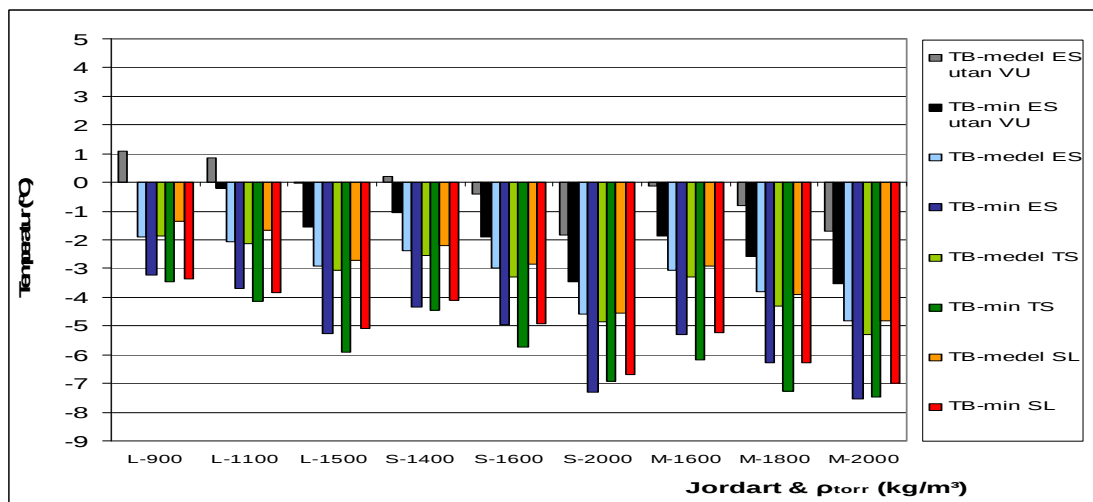


Diagram 16, Beräkningresultat från analys av synergieffekt på förväntad Tb som funktion av jordart och torrdensitet. Ort är Luleå och nivå för GVV antas till 0,5 m under markyta.

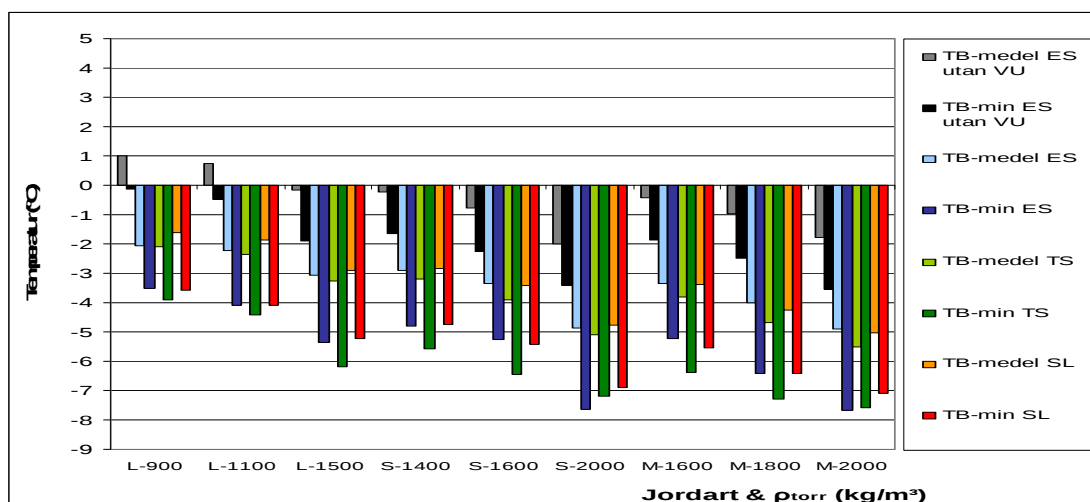


Diagram 17, Beräkningresultat från analys av synergieffekt på förväntad Tb som funktion av jordart och torrdensitet. Ort är Luleå och nivå för GVV antas till 1,0 m under markyta.

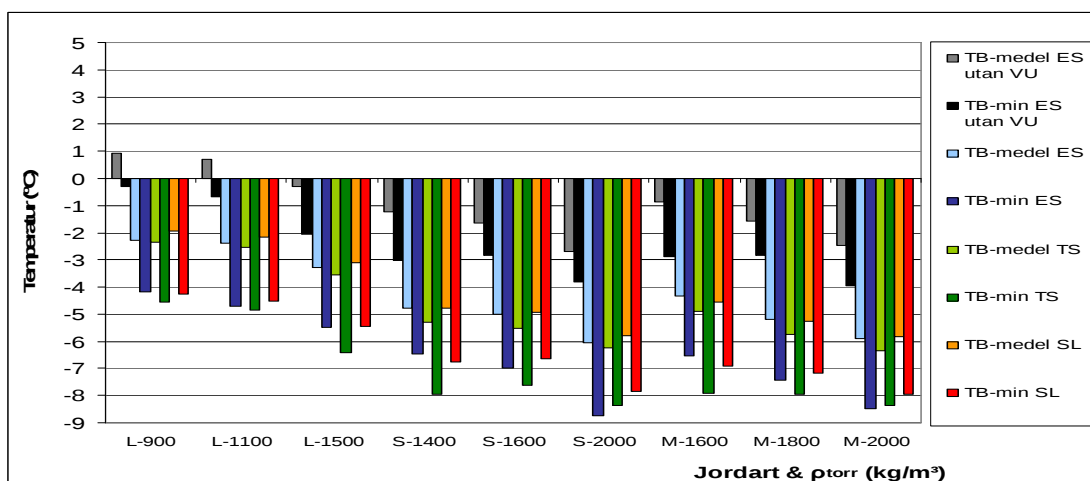


Diagram 18, Beräkningresultat från analys av synergieffekt på förväntad Tb som funktion av jordart och torrdensitet. Ort är Luleå och nivå för GVV antas till 1,5 m under markyta.

Resultaten från analysen av synergieffekter har sammanfattats i följande punkter. Resultaten gäller referensfallen i Malmö (Ma), Norrköping (No) och Luleå (Lu).

- I Ma, No respektive Lu utan VU i ES förväntas Tb-medel bli 2,45/1,67/-0,79°C.
- I Ma med VU i ES/TS/SL blir Tb-medel -2,22/-2,25/-1,55°C.
- I No med VU i ES/TS/SL blir Tb-medel -2,3/-2,3/-1,72°C.
- I Lu med VU i ES/TS/SL blir Tb-medel -3,36/-3,89/-3,42°C.
- Tb-medel med VU blir 1,14/1,64/1,87°C i ES/TS/SL lägre i Lu jämfört med Ma.
- Utan VU blir Tb-medel 3,24°C lägre i ES i Lu jämfört med Ma.
- I Ma och No och Lu med VU med blir Tb-medel 0,80/0,93/1,02°C och 0,93/1,17/1,22°C och 2,0/2,22/2,08 °C högre med GVV=0,5 m jämfört med GVV=1,5 m.
- I Ma med VU i ES/TS/SL med blir Tb-medel 0,80/0,93/1,02°C högre med GVV=0,5 m jämfört med GVV=1,5 m.
- I No vid VU i ES/TS/SL med blir Tb-medel 0,93/1,17/1,22°C högre med GVV=0,5 m jämfört med GVV=1,5 m.

- I Lu vid VU i ES/TS/SL med blir Tb-medel 2,0/2,22/2,08 °C högre med GVV=0,5 m jämfört med GVV=1,5 m.

Differensen mellan GVV=1,5 m och GVV=0,5 m är att Tb-medel blir ca 1°C i södra Sverige medan den är ca 2°C i norra Sverige. Det verkar som att en viss synergieffekt uppstår med flera temperatursänkande faktorer. Systemen visar liknande känslighet för grundvattennivåer i olika orter, men ES verkar minst känsligt. Temperaturdifferensen mellan Luleå och Malmö blir alltså väsentligt mindre i ES-systemet med VU jämfört med fallet utan VU. Tb verkar enligt synergianalysen variera lite som funktion av jordart vid konstant torrdensitet. Däremot kan det väntas låg torrdensitet i lerjord. Jordart har därför en sekundär inverkan på förväntad Tb. Torrdensiteten har enligt analysen en betydande inverkan på förväntad Tb i de simulerade fallen. Det kan antas att flera negativa miljöfaktorer ger större effekt jämfört med summan av dessa individuellt. Det kan då sägas att temperaturen inte beror linjärt på ansatta indata för miljöfaktorerna. Med den preliminära dimensioneringen som beräkningarna bygger på verkar det alltså som att de kompakta jordvärmesystemen relativt ES bättre kan tillgodogöra sig det varmare klimatet i södra Sverige jämfört med det i norra Sverige. Geografiskt läge inverkar betydligt mindre på Tb-medel med VU jämfört med utan VU. Det kan förklaras med att värmemotståndet i de kompakta jordvärmesystemen är mer i jorden än i slangen relativt ES-systemet. I Diagram 19 redovisas förväntade Tb-värden som funktion av värmeuttagets andel av referensvärdet. Tb-medel sjunker i systemen i stort sett linjärt från ca 1,5 °C till ca -6 °C när VU ökar från 0 till 200 % av referensuttaget. Nivån för värmeuttaget inverkar naturligtvis starkt på förväntad Tb-nivå.

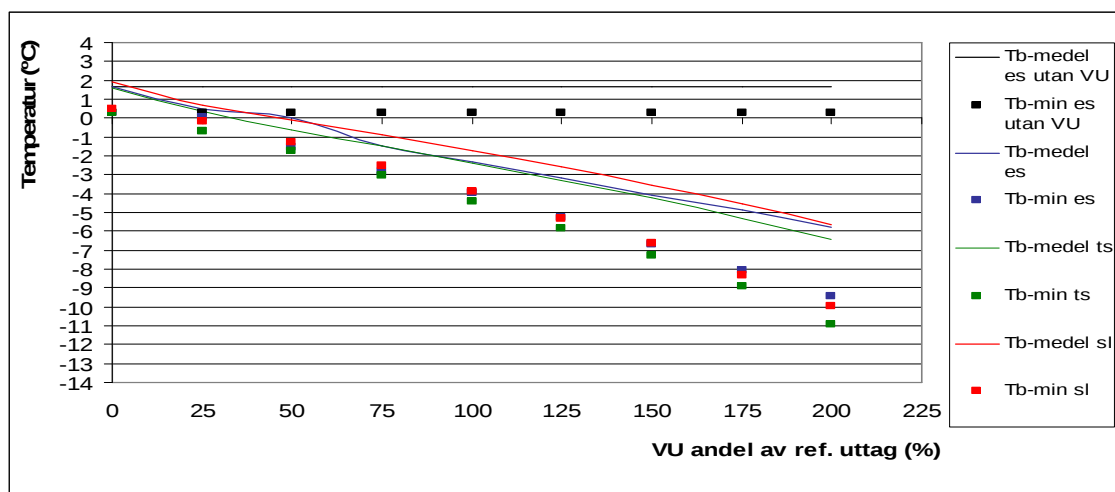


Diagram 19, Förväntad Tb som funktion av värmeuttag jämfört med referensuttag.

I Diagram 20 redovisas förväntade Tb-värden som funktion av c/c-avstånd för diken med slangar. Förväntade Tb-värden beror starkt av c/c-avståndet då detta understiger ett visst avstånd. Gränsen tycks ligga vid c/c-avstånd på omkring 1,5/1,5 och 2 m för ES-, TS-, och SL-systemen. Brytpunkten i grafen kan förklaras med att vid låga c/c-avstånd är jorden mellan slangarna genomfrost och det saknas då tillgängligt ofruset mark- eller grundvatten i slangens omgivning. När c/c-avståndet överstiger brytpunktsavståndet blir den termiska influensen mellan slangarna obetydlig. Diagram 32 till Diagram 34 visar förväntade temperaturvärden, från en femårig simulering, under den femte vintern vid tre olika nivåer för värmeuttag och c/c-avstånd.

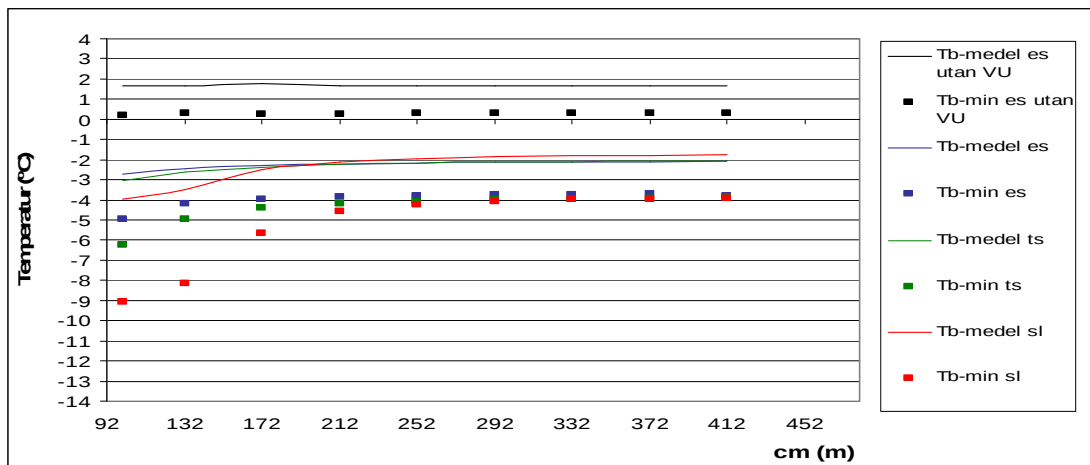


Diagram 20, Förväntad Tb som funktion av antaget c/c-avstånd mellan slangar.

I Diagram 21 ges Tb som funktion av slangnivå under markytan. Som framgår av diagrammet stiger Tb-medel utan VU i ES med ca 4,4°C då slangdjupet ökar från 0,8 till 2,2 m under markytan. Med VU ökar Tb-medel i alla systemen vid motsvarande fall med drygt 2°C. Den grundläggande mekanism som styr jordtemperaturen är dess termiska jämvikt med lufttemperaturen och den statiska marktemperaturen på stora jorddjup. Därför kunde det som väntat konstateras att slangdjupet har en relativt stor inverkan på Tb. Vid slanginstallation på större jorddjup än normalt kan det väntas bli problem med termisk återladdning av jorden.

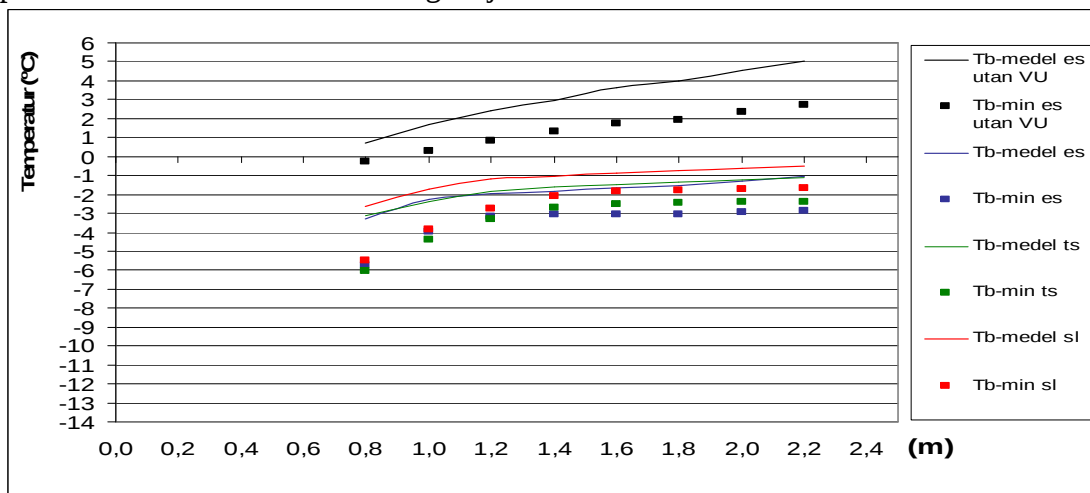


Diagram 21, Förväntad Tb som funktion av slangnivå under markyta.

I Diagram 22 redovisas beräknade Tb-värden som funktion av c_p . Utan VU stiger Tb-medel med ca 2°C när c_p ökar från 60 till 140 % av referensvärdet. Det kan förklaras med att H för jorden stiger med ökande c_p och att ett givet värme flöde därmed ger en lägre temperaturändring. Med VU blir Tb-medel vid motsvarande fall i stort sett oförändrad med ES, TS och SL-systemen. En svacka kan väntas vid $100\% < c_p < 120\%$ av referensvärdet.

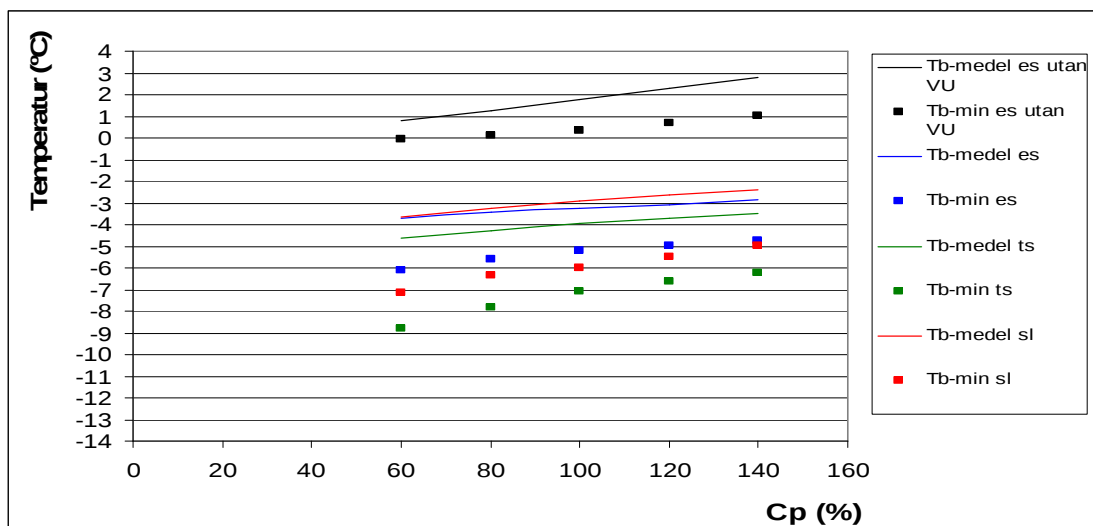


Diagram 22, Förväntad Tb som funktion av c_p -värde för jorden relativt referensvärdet. Vid serien av simuleringar är nivån för horisontprofilen antagen till 30° ovan horisont.

I Diagram 23 redovisas förväntade Tb-värden som funktion av λ . Utan VU sjunker Tb-medel med ca 1,7°C när λ ökar från 60 % till 140 % av referensvärdet p.g.a. värme flödet till markytan ökar och att tidskonstanten för denna process minskar. Marktemperaturen får en starkare koppling till markytans temperaturvariation. Med VU för motsvarande fall stiger Tb-medel med ca 1°C ES, TS och SL trots en lägre referenstemperatur för det ostörda fallet utan värmeuttag. Högre värmeledningsförmåga innebär att det krävs en lägre temperaturgradient för att erhålla samma värme flöde runt slangen. Det framgår tydligt av figuren att temperaturskillnaden med och utan VU minskar med ökande λ .

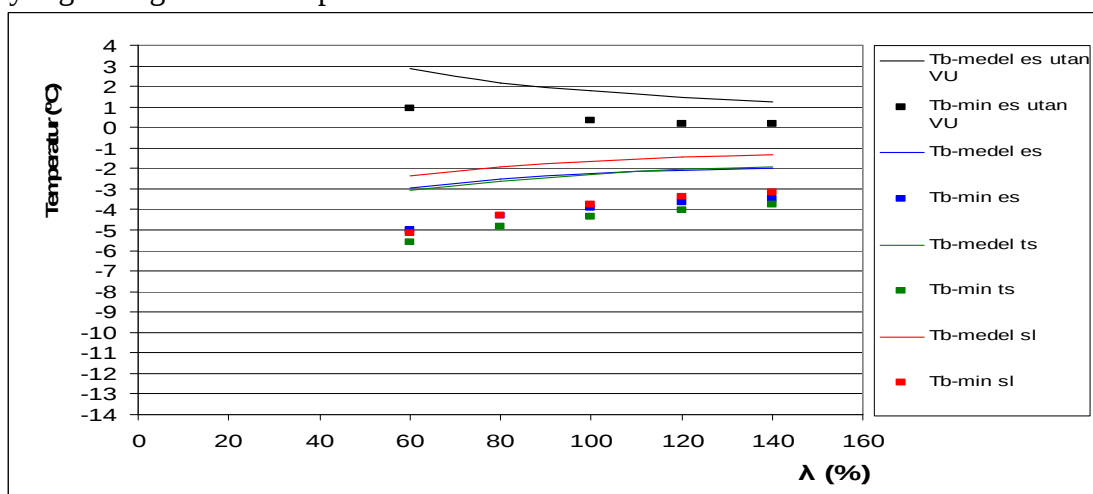


Diagram 23, Förväntad Tb som funktion av λ -värde för jorden relativt referensvärdet. Vid serien av simuleringar är nivån för horisontprofilen antagen till 30° ovan horisont.

I Diagram 24 och Diagram 25 redovisas förväntade Tb-värden som funktion av antagen FK mellan 10 % och 90 % med GVV 1 och 2 meter under markyta. Med ES utan VU är Tb-medel överlag oberoende av FK. Vid ökad FK ovan GVV verkar det som att det stigande H i jorden tar ut effekten av sjunkande värmemotstånd. Diagram 24 visar att med VU och med nivån för grundvattenytan 1 m under markytan förblir Tb-medel för ES, TS och SL i stort sett oberoende av FK. Det kan förklaras med att jorden på slangnivå är vattenmättad oberoende av nivån för FK.

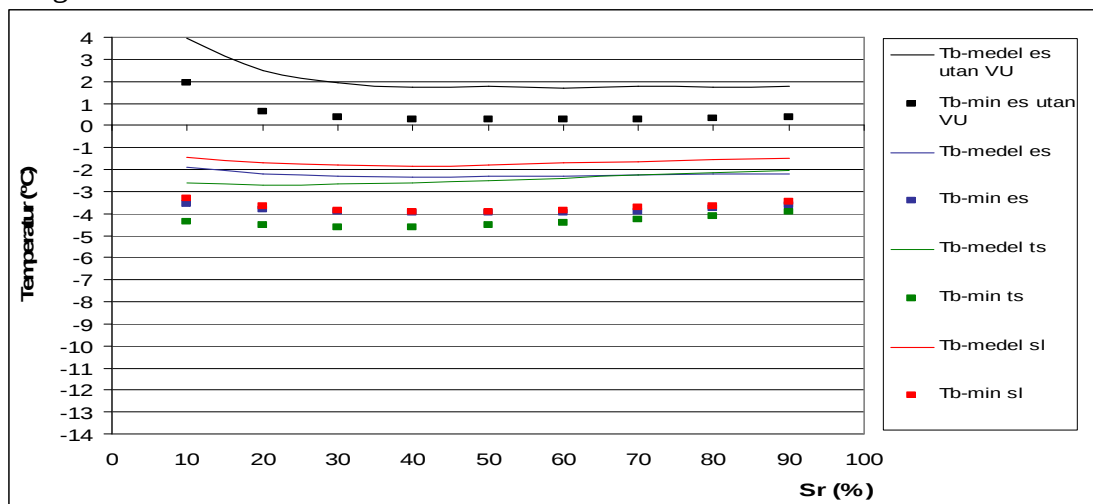


Diagram 24, Förväntad Tb som funktion av fältkapacitet (FK) i markens omättade zon. Nivån för GVV är 1,0 m under markyta.

Diagram 25 visar att Tb-medel stiger från -12 till -2°C när FK ökar från 10 % till 90 % vid låg GVV. Vid fallet med låg FK och låg GVV kan låga nivåer av H i jorden kombinerat med dess höga värmemotstånd antas orsaka de förväntat mycket låga Tb. När FK successivt ökar liknar förhållandena i systemen alltmer referensfallet både hydrogeologiskt och termiskt.

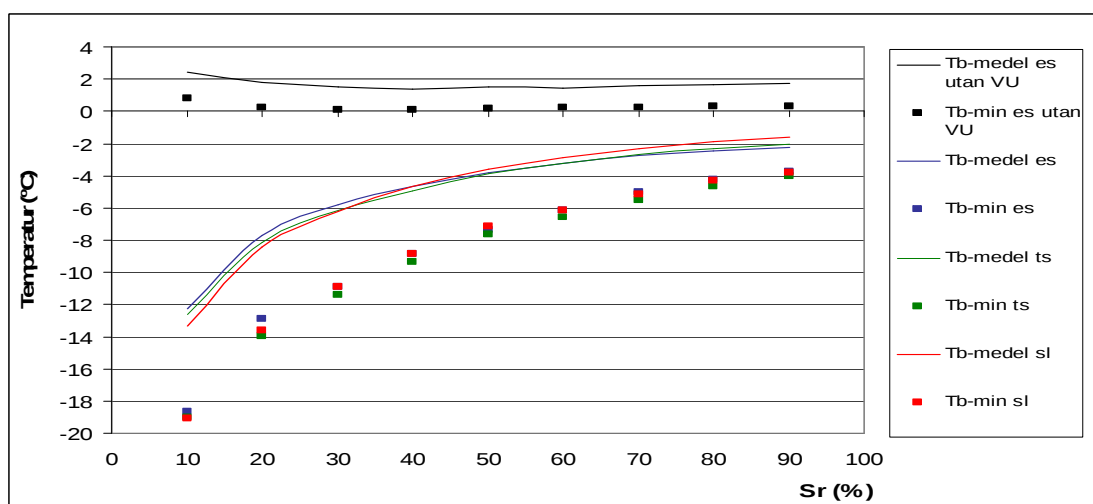


Diagram 25, Förväntad Tb som funktion av fältkapacitet i markens omättade zon. Nivån för GVV är 2,0 m under markyta.

I Diagram 26 till Diagram 28 redovisas förväntade Tb-värden som funktion av uppfuktning runt slang vid antagna FK om 20, 40 och 60 %. Utan VU är Tb-medel i ES vid FK=20, 40 och 60 % i stort sett oförändrad då S_r ökar från antagen fältkapacitet till 90 %. Vid uppfuktning av jord vid slangar sjunker värmemotståndet för jorden

samtidigt som H vid slangarna stiger. I jordvärmesystem utan VU verkar de båda processerna i viss mån ta ut varandra.

Med VU stiger T_b -medel i alla systemen vid uppfuktning runt slangarna. Med $FK=20\%$ stiger T_b -medel i de tre systemen med ca $3,5-4,7\text{ }^\circ\text{C}$ när S_r ökar från 20 till 90 %. Med $FK=60\%$ stiger T_b -medel i systemen endast med ca $0,6-0,8\text{ }^\circ\text{C}$ när S_r vid slang ökar från 60 till 90 %. Marken har i det fallet en stor naturlig fuktighet. Sjunkande värmemotstånd och stigande H vid uppfuktning kan förklara de höjda T_b -nivåerna. Enligt litteraturstudiet i avsnitt 2.3 kan fuktgradients förväntas i jordvärmesystem av samma storleksordning som den drivande temperaturgradienten. I de studerade referenssystemen kunde det sommartid observeras fuktgradients sommartid runt slangerna på upp till sju procentenheter (S_r) vid $FK=60\%$. Det kan betraktas som en stor fukttransport. Enligt nedanstående analys skulle inte detta inverka nämnvärt på erhållen brinetemperatur vintertid. Vid låg FK kan däremot uppfuktning vid slang väntas ge ansenligt ökande T_b -nivåer. I de situationerna skulle det kunna vara lönsamt att skapa artificiell uppfuktning runt slang genom att installera en plastduk i diken under och omkring slangarna. När nederbörden infiltrerar i marken uppfuktas jorden runt slangarna till vattenmättnad. En slags bassäng skapas i jorden omkring slangarna. För att skapa artificiell uppfuktning med plastduk krävs att slangsystemet installeras i diken och inte i plöjda slitsar.

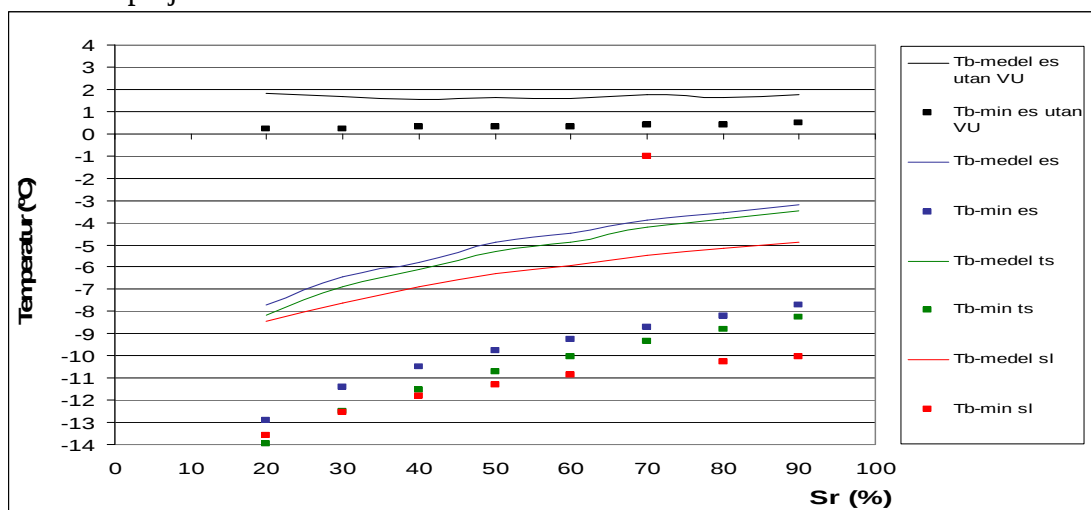


Diagram 26, Förväntad T_b som funktion av uppfuktning runt slang, $FK = 20\%$. $GVY=1,5\text{m}$

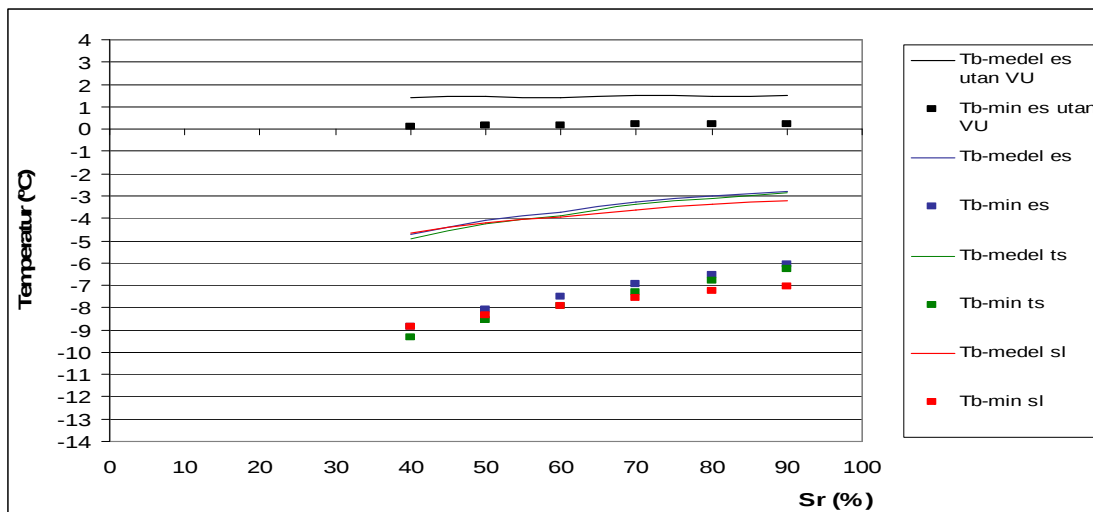


Diagram 27, Förväntad Tb som funktion av uppfuktning runt slang, FK = 40 %. GVV=1,5m

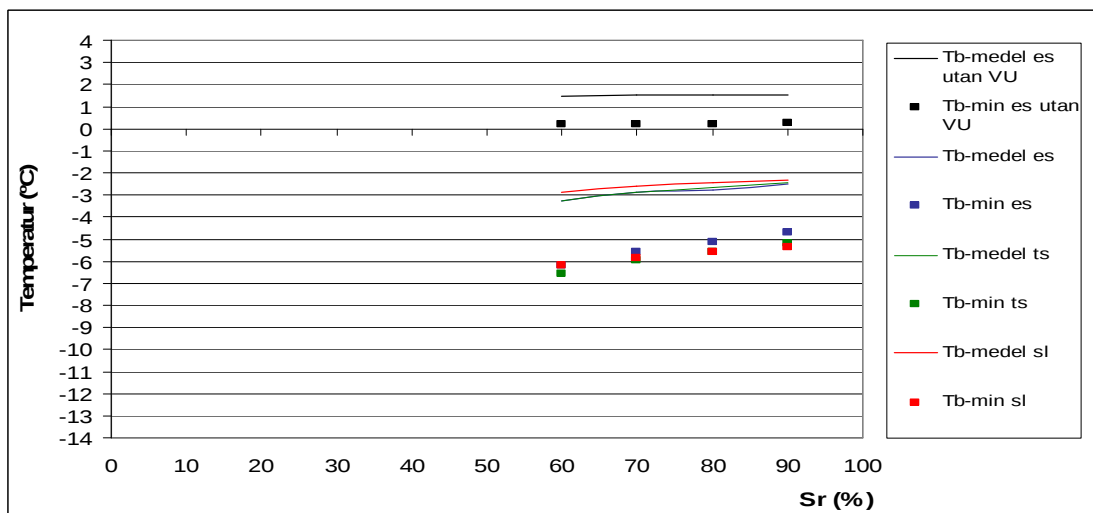


Diagram 28, Förväntad Tb som funktion av uppfuktning runt slang, FK = 60 %. GVV=1,5m

I Diagram 29 redovisas förväntade Tb-värden som funktion av snödjup. Med ES utan VU blir differens för Tb-medel med snödjup 0 och 26,25 cm 0,6°C. Med VU blir motsvarande differens för ES, TS och SL ca 1°C. De termiska effekterna kan förklaras som att med ökat snödjup stiger värmemotståndet för marken och randflöden från marken vintertid minskar. Temperaturen i de kompakta systemen visar här något större känslighet med avseende på snödjup jämfört med ES.

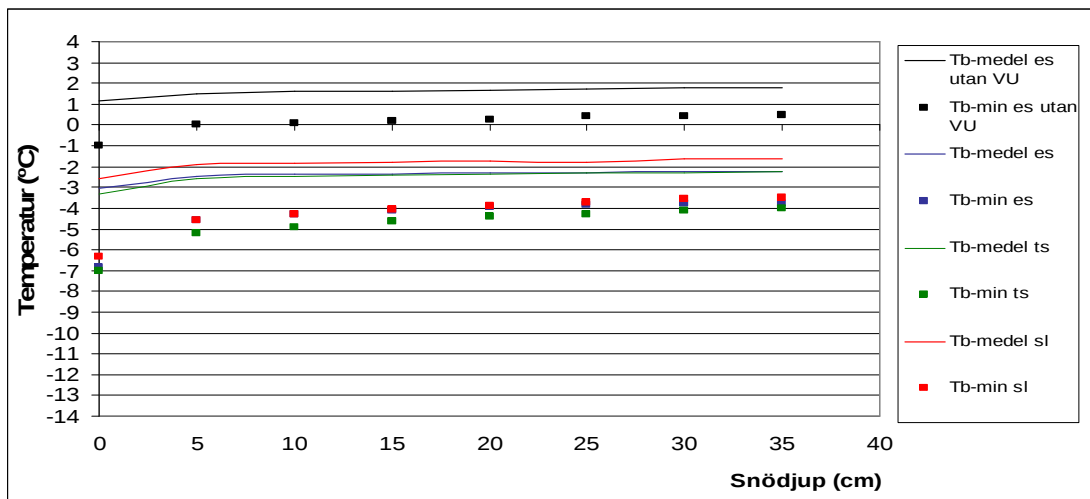


Diagram 29, Förväntad Tb som funktion av snödjup. Perioden med snötäckning av 25/12-3/4.

I Diagram 30 redovisas förväntade Tb-värden som funktion av lutning för horisontprofilen över horisonten. Med ES utan VU blir Tb-medel i stort oförändrad då lutningen ökar från 10 till 50°. Med VU blir Tb-medel för ES, TS och SL något högre, ca 0,2°C, vid låg horisontprofil (0-20°) jämfört med en hög (30-50°). Det kan troligtvis förklaras med att en högre horisontprofil minskar markens strålningsunderskott vintertid. Överlag verkar det som att Tb är relativt okänslig för lutning över horisonten hos horisontprofilen.

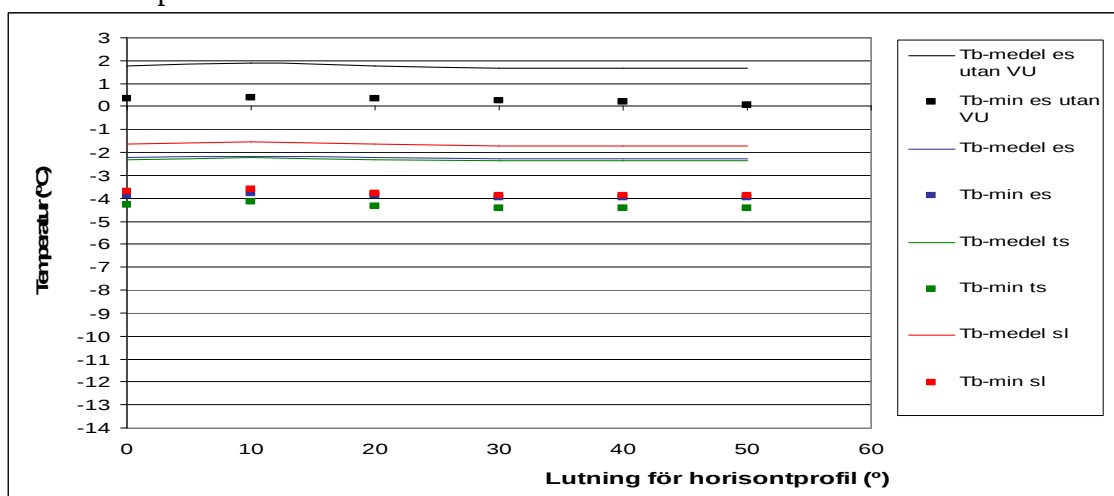


Diagram 30, Förväntad Tb som funktion av horisontprofilens lutning över horisonten.

I Diagram 31 redovisas förväntade Tb-värden som funktion av geografiskt läge i Sverige. Markvärmesystem och värmepump har samma utförande på alla de simulerade orterna, vilket motsvarar att installationen har gjorts oberoende av klimat. Värmebehovet och därmed värmepumpens drift styrs dock av klimatet. Indata till simuleringarna som funktion av ort ges av

Tabell 18. Som framgår av diagrammet varierar de förväntade temperaturnivåerna avsevärt över landet när samma jordvärmesystem används. Det kan förklaras med att randvillkor som T_{luft} , strålningsbalans, värmeuttag och initieell marktemperatur i modellen beror starkt på geografiskt läge. Med ES utan VU blir Tb-medel ca 3,2°C högre i Malmö jämfört med Luleå. Med VU blir Tb-medel för ES, TS och SL 4,1/5,0

och 4,9°C högre i Malmö jämfört med Luleå. Med jordvärmesystem anpassade för aktuell ort vid analysen av synergieffekten blev Tb-medel med VU för ES, TS och SL 1,14/1,64/1,87°C högre i Malmö jämfört med Luleå. Med jordvärmesystemen anpassade efter orten blir alltså temperaturdifferensen mellan norra och södra Sverige avsevärt mindre jämfört med om samma systemutförande används. ES uppvisar mindre temperaturdifferens mellan södra och norra Sverige, varför det verkar mindre känsligt för det geografiska läget.

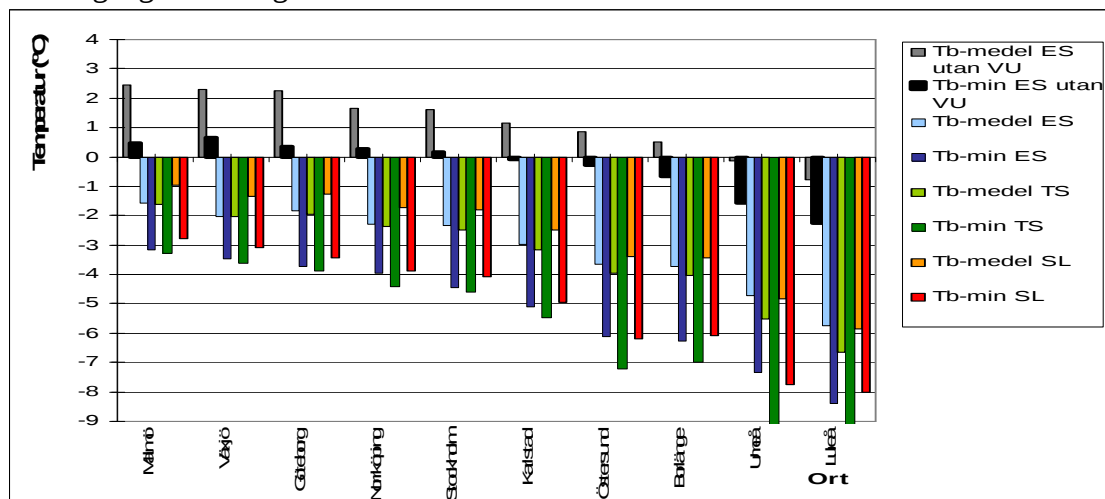


Diagram 31, Förväntad Tb som funktion av geografiskt läge i Sverige. Vid simuleringarna antas jordvärmesystemets utförande (värmepumpeffekt och markvärmeväxlarnas slanglängd) vara detsamma i alla orter enligt referensfallet. Snötäckning, klimatdata och därmed värmeuttag antas till förväntade värden enligt

Tabell 18.

I syfte att finna samverkan mellan VU och c/c-avstånd vid flerårigt VU har en rad simuleringar genomförts. Tb under vintern det femte året med VU redovisas i Diagram 32 till Diagram 34. Simuleringarna är utförda då VU är 50 %, 75 % och 100 % av referensvärde samt då c/c-avståndet ökar från 100 till 280 cm. En matriskombination för dessa fall har simulerats. Indata för simuleringarna är antagna enligt referensfallet. I diagrammen anges Tb-medel för perioden 1/12-1/3 och Tb-min det femte året samt jordtemperaturer nedanför slangarna på nivåerna 1,50 m till 2,82 m under markyta i september det femte året. Jordtemperaturen under slangnivå är en indikator för jordens återladdning. Simuleringar gjordes även för motsvarande fall utan VU med ES-systemet. Beräkningsresultaten var som väntat oberoende av c/c-avstånd för fallet utan VU från mark. Jordtemperaturerna på nivåerna 1,81 m och 2,82 m under markyta var 12 °C respektive 11,2 °C i september det femte året. Tb-medel och Tb-min utan VU i ES-systemet den femte vintern var 1,75 °C respektive 0,30 °C.

Det är vanligt att jordvärmesystem dimensioneras så att Tb-medel hamnar i intervallet -1°C till -3°C. I denna studie har vi valt Tb-medel=-3°C som dimensioneringstemperatur. När tjälkroppar runt slangarna växer samman med varandra och med tjälningen från markytan så kommer ofruset vatten i stor utsträckning att saknas på slangnivå i systemen. Då kan en kraftig reduktion av Tb utvecklas i systemen. Problemet är vilken kombination av c/c-avstånd och nivåer av VU där Tb-medel=-3°C som blir mest fördelaktigt i syfte att få markvärmeväxlare vilka kräver minsta möjliga markyta. I Diagram 32 redovisas beräkningsresultat för ES. Vid VU= 100 % av referensuttaget blir

Tb-medel= -3,17/-2,65/-2,46°C med c/c-avstånd 1,00/1,36/1,72 m. I Diagram 33 visas beräkningsresultat för TS. Tb-medel blir -4,47/-3,30/-2,84°C med c/c-avstånd 1,00/1,36/1,72 m. I Diagram 34 redovisas beräkningsresultat för SL. Tb-medel blir -3,27/-2,75/-2,50°C med c/c-avstånd 2,08/2,44 respektive 2,80 m. Med en idealisk temperaturnivå om -3,0°C för Tb-medel bedöms att ett c/c-avstånd på 1,0 och 1,36 m är rimligt vid fullt värmeuttag i ES och TS. Med SL kan ett antaget c/c-avstånd om 2,44 m vara rimligt. Temperaturen på nivåerna 1,81 och 2,82 m under markytan indikerar då inte permafrosttillstånd det femte simuleringsåret. Om VU per dikesmeter reduceras och/eller dikeslängden ökas kan c/c-avståndet reduceras. Markvärmewäxlaren i sin helhet kräver dock ungefär lika stor markarea. Förlängning av diket ökar dock installationskostnaderna.

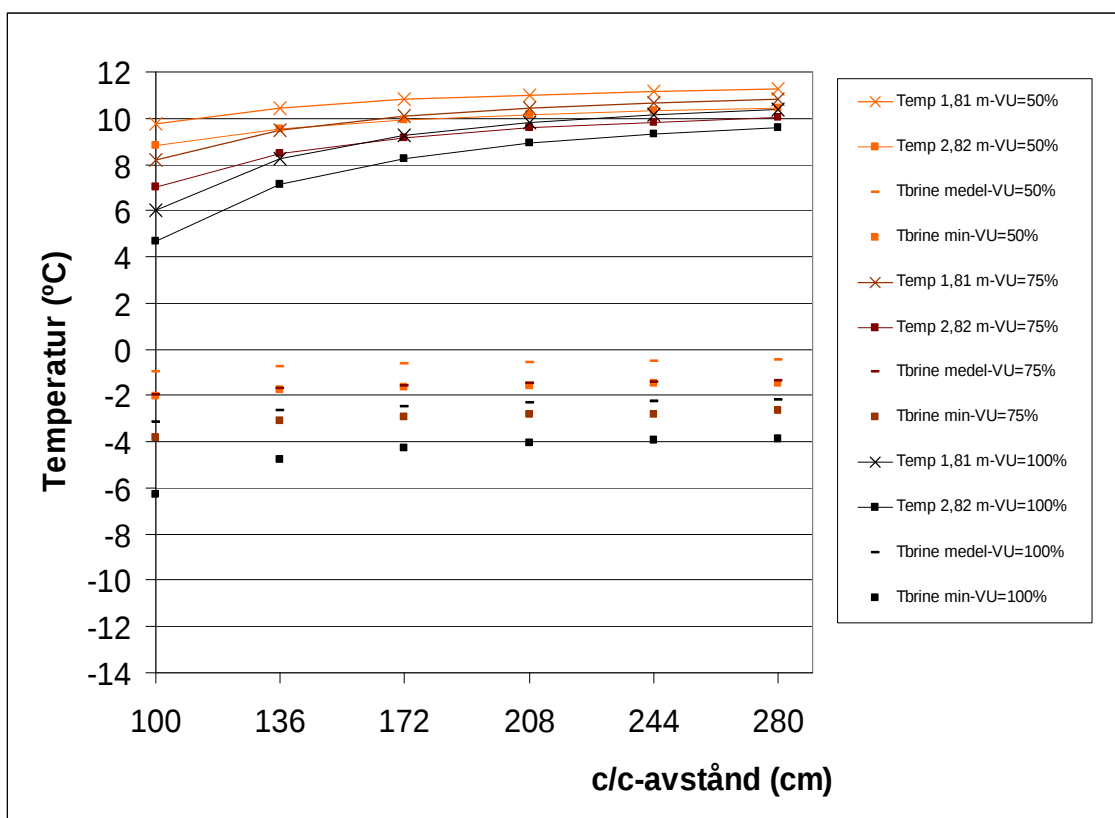


Diagram 32, Förväntad Tb som funktion av c/c-avstånd med ES när VU=50, 75 och 100 % av referensuttag.

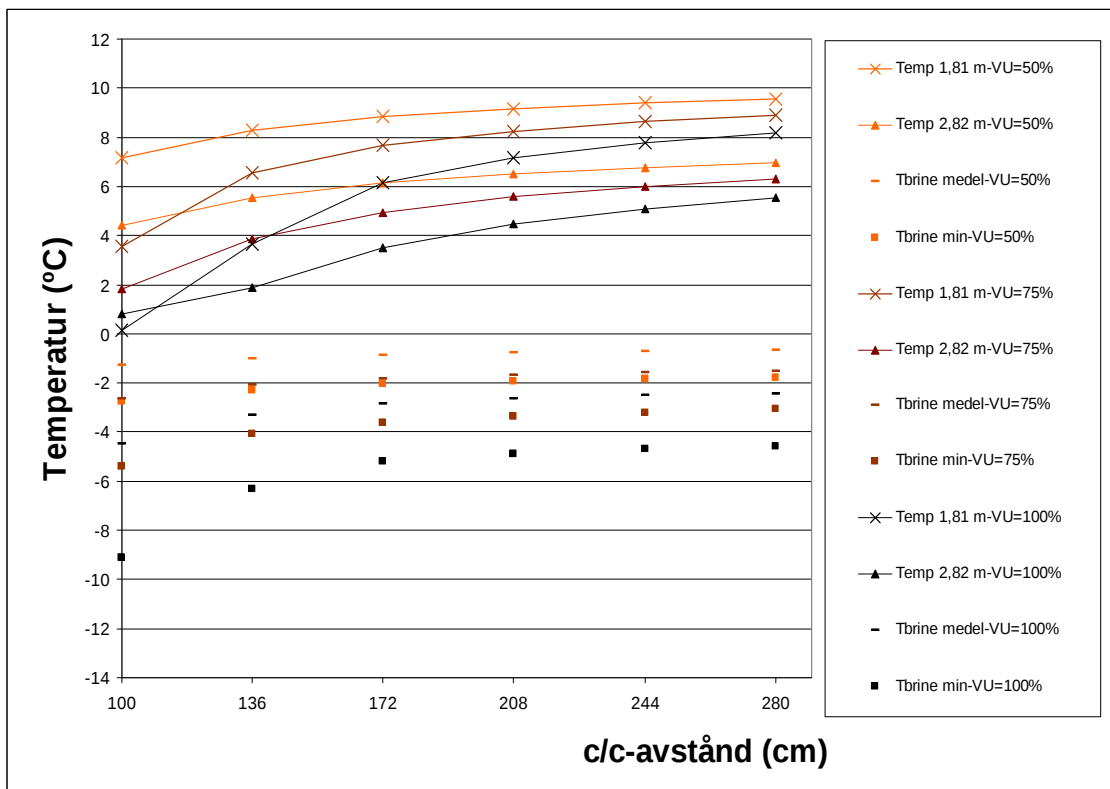


Diagram 33, Förväntad Tb som funktion av c/c-avstånd med TS med VU=50, 75 och 100 % av referensuttag

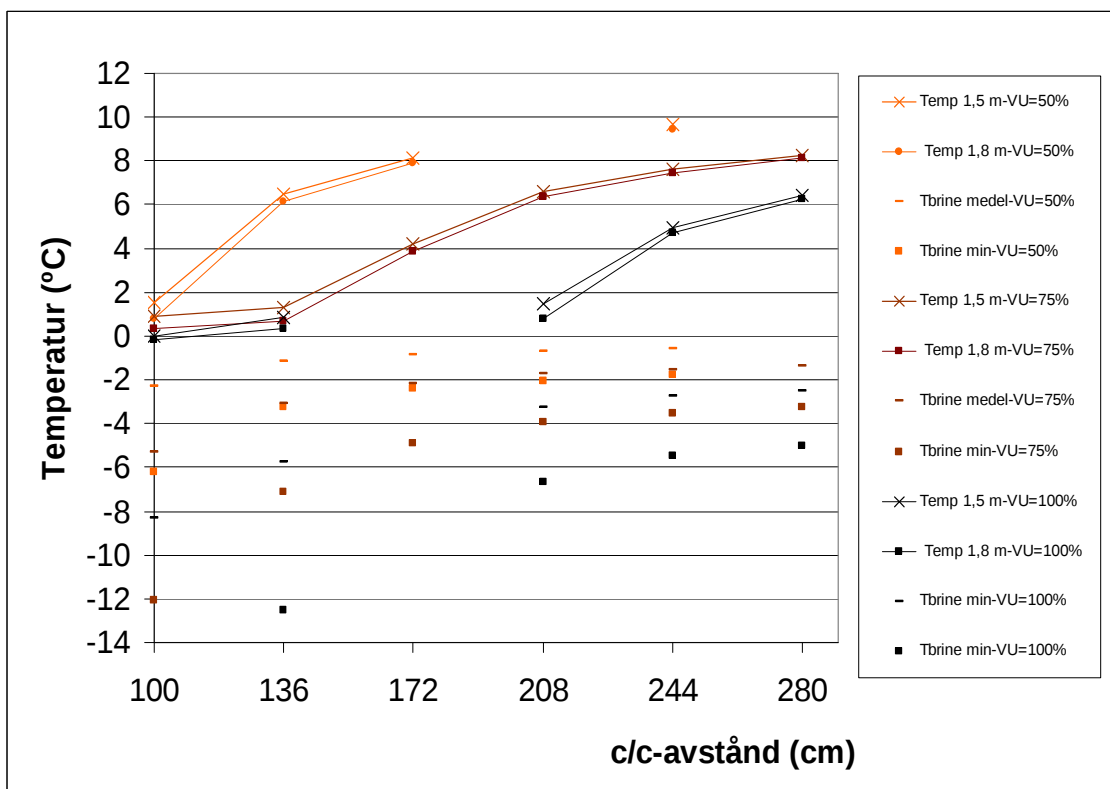


Diagram 34, Förväntad Tb som funktion av c/c-avstånd med SL i diken med VU=50, 75 och 100 % av referensuttag.

I Diagram 35 illustreras grafer med förväntad utveckling av Tb under fem år med ES-, TS- och SL-systemen. I systemen återladdas jorden gott och väl under den varma årstiden det femte året. Högsta Tb sjunker vid VU från 11,3/10,7 och 10,8 den första sommaren till 10,95/9,15/8,75°C den femte sommaren i ES, TS och SL. Under de fem åren minskar alltså Tb med 0,35/1,55 och 2,05°C. I Diagram 36 illustreras förväntad temperaturutveckling under fem år nedanför slangnivå med ES-, TS- och SL-systemen. Under åren sjunker Tb i systemen vid VU succesivt och en termisk jämvikt ställs in mot atmosfären. Under de fem åren minskar jordtemperaturerna på de angivna nivåerna till 8,2/6,2 och 6,8°C.

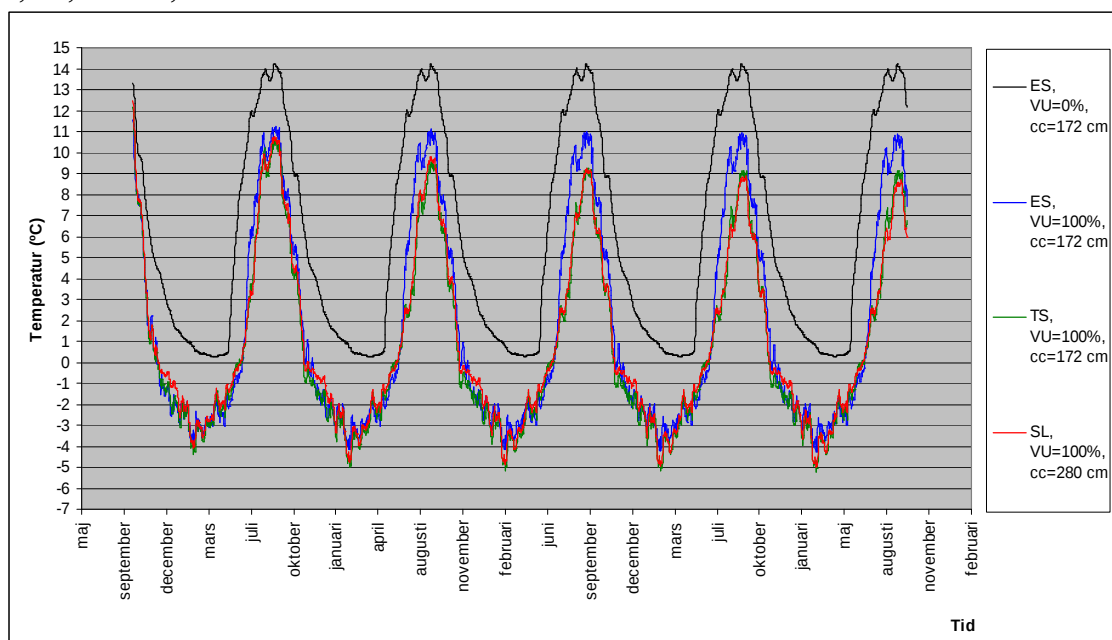


Diagram 35, Förväntad Tb under fem år med tre olika markvärmewäxlare. c/c-avstånd är 172, 172 och 208 cm för ES-, TS- och SL-systemen

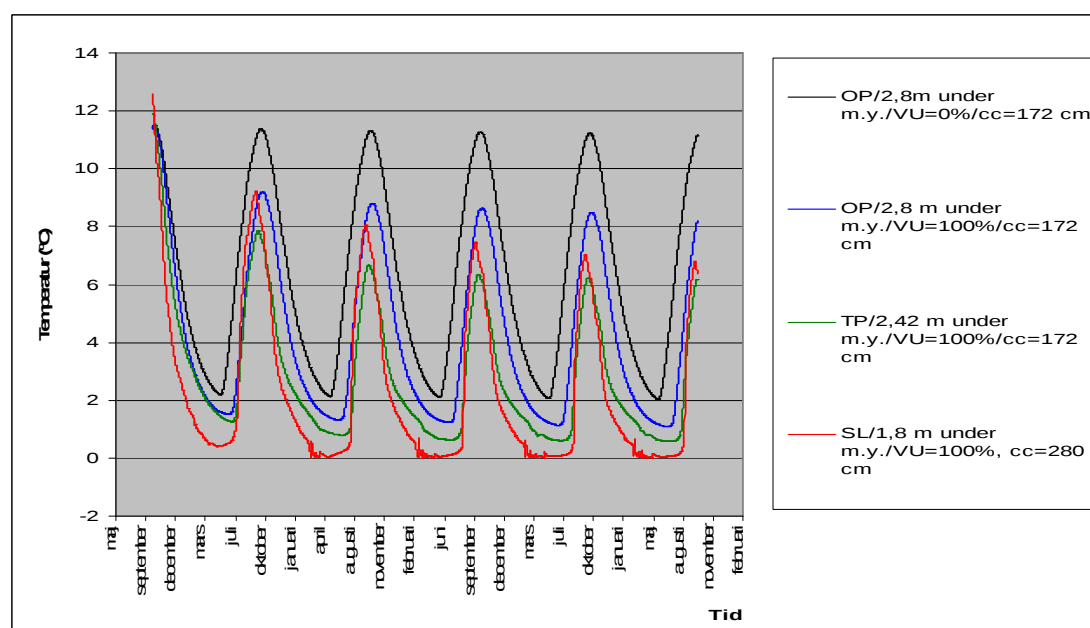


Diagram 36, Förväntad utveckling för marktemperatur nedanför slangnivå under fem år med ES-systemet vid 0 % VU samt ES-, TS- och SL-systemen vid 100 % VU. c/c-avstånd är 172, 172 och 208 cm för ES-, TS- och SL-systemen.

I Tabell 21 nedan ges en sammanfattning av resultaten från sensitivitetsanalysen under ett år. I kolumn 1 i tabellen anges den miljöfaktor som simuleras. Variationsintervall för miljöfaktorn anges inom parentes. I kolumn 2-5 ges förväntad Tb-medel för referensfallen i respektive system. I kolumn 6-9 ges förväntad differens för Tb-medel vid minimi- och maximivärde av faktorn i kolumn 1.

Tabell 21, Sammanfattning av resultat från sensitivitetsanalys av förväntad Tb under ett år. Där det inte anges annat avser kolumnerna fallet med värmeuttag. Där inte anges annat på rad tre avser kolumnerna fallet med VU.

	Tb-medel vid indata enligt referensfallet				Differens för Tb medel vid max och min värde av miljöfaktor			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Miljöfaktor (minvärde-maxvärde enhet)	ES utan VU	ES	TS	SL	ES utan VU	ES	TS	SL
Geografiskt läge, vid konstant jordvärmesystem	1,67	-2,30	-2,37	-1,72	-3,24	-4,16	-5,03	-4,93
Analys av synergieffekt Av ort, GVY, ρ_{torr} (från lera, $\rho_{\text{torr}}=900$ till morän, $\rho_{\text{torr}}=2000$)								
Ma GVY=0,5	2,36	-2,16	-1,93	-1,34	-2,41	0,06	-0,26	-0,47
Ma GVY=1,0	2,45	-2,22	-2,25	-1,55	-2,37	0,01	-0,38	-0,58
Ma GVY=1,5	2,35	-2,96	-2,87	-2,36	-2,29	-0,22	-0,62	-0,77
No GVY=0,5	1,68	-2,17	-1,97	-1,42	-0,85	-0,19	-0,27	-0,34
No GVY=1,0	1,67	-2,30	-2,30	-1,72	-0,87	-0,21	-0,31	-0,39
No GVY=1,5	1,58	-3,14	-3,14	-2,64	-0,85	-0,38	-0,55	-0,61
Lu GVY=0,5	-0,42	-2,99	-3,30	-2,85	-2,81	-2,90	-3,46	-3,46
Lu GVY=1,0	-0,79	-3,36	-3,89	-3,42	-2,78	-2,86	-3,45	-3,45
Lu GVY=1,5	-1,63	-4,99	-5,52	-4,93	-3,38	-3,62	-3,89	-3,89
VU (0-200 %)	1,67	-2,30	-2,38	-1,72	0,00	-7,48	-8,04	-7,54
Slangdnivå (0,8-2,2 m)	1,67	-2,30	-2,38	-1,72	4,32	2,25	2,00	2,14
Snödjup (0-35 cm)	1,67	-2,30	-2,38	-1,72	0,61	0,83	1,04	1,00
c/c-avstånd (100-412 cm)	1,78	-2,30	-2,38	-1,76	0,03	0,62	0,99	2,23
c_p (60-140% av ref. värde)	1,78	-2,24	-2,31	-1,65	-2,00	-0,07	0,19	0,08
λ (60-140% av ref. värde)	1,78	-2,24	-2,31	-1,65	-1,62	1,00	1,13	1,02
FK, GVY=1 m (10-90 %)	1,67	-2,30	-2,38	-1,72	-2,20	-0,28	0,58	-0,05
FK, GVY=2 m (10-90 %)	1,46	-3,25	-3,28	-2,88	-0,69	10,04	10,58	11,8
Uppfuktning vid slang, FK=20 (20-90 %)	1,56	-4,48	-4,87	-5,92	-0,03	4,50	4,70	3,55
Uppfuktning vid slang, FK=40 (40-90 %)	1,39	-3,73	-3,90	-3,93	0,09	1,90	2,07	1,49
Uppfuktning vid slang, FK=60 (60-90 %)	1,46	-3,25	-3,28	-2,88	0,07	0,78	0,83	0,57

Snödjup (0-35 cm)	1,67	-2,30	-2,38	-1,72	0,61	0,83	1,04	1,00
Horisontprofil (0-50°)	1,67	-2,29	-2,36	-1,72	-0,06	-0,06	-0,07	-0,09
Geografiskt läge, vid konstant jordvärmesystem	1,67	-2,30	-2,37	-1,72	-3,24	-4,16	-5,03	-4,93

Tabell 22, Sammanfattning av kommentarer kring styrande faktorer på Tb. Tabellen kan jämföras med sambanden i Tabell 3. I tabellen används följande kvantitativa beteckningar när höjningen eller sänkningen av Tb vid VU i systemen understiger angivet nummer;Konstant: 0,0-0,1°C/Marginellt: 0,1-0,3°C/Något: 0,3-0,7°C/Markant Tb: 0,7-1,5°C/Avsevärt: 1,5-2,5°C.

Miljöfaktor ökar från min- till maxvärde	Inverkan på Tb under kall årstid utan VU	Inverkan på Tb under kall årstid vid VU
VU (0-200 %)	Oberoende	Avsevärt lägre
Slangnivå (0,8-2,2 m)	Avsevärd högre Tb	Markant högre
c/c-avstånd (0-35 cm)	Oberoende	Högre, en brytpunkt uppstår när jorden inte tjälas mellan slangar
C _p (60-140% av ref. värde)	Avsevärt högre	Nära konstant
λ (60-140% av ref. värde)	Avsevärt lägre	Markant högre
Fältkapacitet (S _r =20-90%)	Markant högre Tb vid hög G _{vy} , något lägre Tb vid låg G _{vy}	Konstant vid hög G _{vy} , Avsevärt högre vid låg G _{vy}
Uppfuktning vid slang (från FK till S _r =90%)	Konstant	Avsevärt högre vid låg FK, Avsevärt högre vid medel FK, Något högre vid hög FK
Snötäckning (0-35 cm)	Något högre Tb	Något högre
Horisontprofil (0-50°)	Marginellt lägre Tb	Marginellt lägre
Grundvattenyta (0,5-1,5)	Marginellt lägre, större känslighet i de kompakta systemen	Markant lägre, större känslighet i de kompakta systemen
Grundvattenyta-vid olika orter	Marginellt lägre i Ma och No, markant lägre i Ma.	Markant lägre i Ma och No, Avsevärt lägre i Lu
λ (60-140% av ref. värde)	Avsevärt lägre	Markant högre
C _p (60-140% av ref. värde)	Avsevärt högre	Nära konstant
Jordart med G _{vy} =1,0	Marginell inverkan i No	Marginell inverkan i No
ρ _{tot} (1400-2000) i siltig sand	Markant lägre	Något lägre
Geografiskt läge i Sverige med konstant jordvärme-system (Malmö-Luleå)	Markant lägre, tjäldjup varierar betydligt	Markant lägre i alla system
Geografiskt läge i Sverige med anpassat jordvärme-system (Malmö-Luleå)	Avsevärt lägre, tjäldjup varierar betydligt	Markant lägre i ES-systemet och avsevärt lägre i TS- och SL systemen

Den genomförda sensitivitetsanalysen med datormodellen SEBAM2D innebär en förenkling av verkligheten vilket påverkar beräkningsresultaten. Vid analysen av uppfuktning vid slang betraktas denna inte som en cyklisk process, vilket kan väntas

överskatta känsligheten hos Tb för fukttransport (se avsnitt 2.3). Vid analysen har slanglängden antagits konstant med undantag för analysen av synergieffekter och inte beroende av antagna miljöfaktorer. Slangnivå under markyta var även konstant vid simuleringarna. Vid verklig dimensionering med "Prestige 2.0" ges slanglängd som funktion av en rad faktorer och slangnivå som funktion av geografiskt läge. Slanginstallation sker djupare i norra Sverige jämfört med i södra delarna. Konstant slanglängd kan väntas påverka dess känslighet med avseende på vissa miljöfaktorer. Förenklingen kan antas förstärka känsligheten hos Tb för geografiskt läge.

Vid sensitivitetsanalysen av miljöfaktorer kunde det observeras att geografiskt läge, nivå för mark- och grundvatten, torrdensitet hade stort inflytande på Tb. Nivå för markvatten (fältkapacitet), torrdensitet och jordart är starkt sammanknippade begrepp. Analysen visade att lutningen för horisontprofilen över markytan hade en obetydlig inverkan på Tb under vinterhalvåret. Däremot kan skuggningen ha betydelse för vegetationssäsongens start i närheten av ett jordvärmesystem. Från analysen av synergieffekter verkar det som att jordvärmesystem i norra Sverige är betydligt känsligare för miljöfaktorer som jordart och GVV jämfört med system i södra Sverige (se Tabell 21). Inverkan av samverkande miljöfaktorer som GVV, jordart, torrdensitet och ort har beaktats för några fall. Temperaturdifferensen med flera samverkande miljöfaktorer är inte lika med summan av de enskilda differenserna.

7 KORREKTIONSFAKTORER FÖR KOMPAKTA MARKVÄRMEVÄXLARE

Dimensioneringen av kompakta jordvärmesystem är tänkt att ske genom att dimensionerande slanglängd beräknas för ett ES utifrån aktuellt energibehov och miljöfaktorer. Därefter korrigeras slanglängden i de kompakta systemen med avseende på aktuella miljöfaktorer vid anläggningen. Systemen utformas så att T_b -medel under vintern kan väntas bli -3°C . Preliminärt har det antagits att slanglängden i TS och SL behöver vara 1,3 respektive 3 gånger längre jämfört med ES (Rosén, 2001), vilket ursprungligen baserar sig på rekommendationer för nordamerikanska förhållanden. Det betyder att dikeslängd i TS (2 m slang per m dike) och SL (8 m slang per m dike) blir 65 % respektive 38 % av dikeslängden med ES. Kompakta jordvärmesystem har en större värmeväxlande yta per markareaenhet relativt ES. Uttagen effekt och energimängd i förhållande till omgivande jordvolym är då annorlunda. Därför kan termisk känslighet med avseende på antagna miljöfaktorer i de kompakta systemen antas vara annan jämfört med i ES. Datorsimuleringarna visade att positiva miljöfaktorer kan tillgodogöras mer i de kompakta systemen relativt ES. I detta kapitel redovisas i vilken grad positiva miljöfaktorer kan tillgodogöras i de kompakta kompakta systemen. De preliminära korrektionsfaktorerna multipliceras med de simulerade korrektionsfaktorerna relativt ES och ger det som nedan endast benämns som "Korrektionsfaktor". Korrektionsfaktor för slanglängd med TS och SL relativt ES kan enligt analysen väntas variera i intervallet 1,2-1,5 respektive 1,9-3,1. Dimensionerande dikeslängd i de kompakta systemen relativt ES kan således under alla omständigheter reduceras. I Tabell 23 visas preliminära korrektionsfaktorer, simulerade korrektionsfaktorer relativt ES och korrektionsfaktorer.

Tabell 23, Korrektionsfaktorer (K_{es} , K_{ts} , K_{sl}) av slanglängden för referensfallet med ES, TS och SL.

Faktor	K_{es}	K_{ts}	K_{sl}
Preliminär korrektionsfaktor i Rosén (2001)	1,00	1,30	3,00
Simulerade korrektionsfaktor relativt ES	0,85/0,85=1,00	0,86/0,85=1,01	0,67/0,85=0,80
Korrektionsfaktorer	1,00	1,30·1,01= 1,31	3,00·0,80 = 2,39
Korrektionsfaktor för dikeslängd	1,00	0,66	0,30

I Diagram 37 till Diagram 48 redovisas förväntade korrektionsfaktorer (K_{ts} och K_{sl}) relativt ES för de studerade miljöfaktorerna. I följande tre diagram redovisas förväntade korrektionsfaktorer som funktion av ort, GVV, jordart och ρ_{torr} . I Malmö vid referensfallet blir K_{ts} och K_{sl} 1,29 respektive 2,62. K_{ts} är relativt stabil i Malmö medan K_{sl} varierar något mer. I Norrköping blir korrektionsfaktorerna i allmänhet lägre än i Malmöfallet. Variationsintervallet i Norrköping är litet för K_{ts} medan det större för K_{sl} . I Luleå kan K_{ts} och K_{sl} vid referensfallet väntas vara 1,47 respektive 2,4. Variationsintervallet i Luleå för K_{ts} och K_{sl} är 1,20-1,47 respektive 1,91-3,10. Det är betydligt större jämfört med förväntat i Malmö och Norrköping. I Malmö och

Norrköping är randflöden från mark vintertid sådana att naturlig tjälning inte kan väntas ner till slangnivå. Sedan ofruset vatten finns tillgängligt vid slangen verkar de kompakta systemen relativt okänsliga för befintliga miljöfaktorer. I Luleå blir marken naturligt tjälad ned till slangnivå under stor del av uppvärmningssäsongen, med undantag för två porösa lerjordar, vilket betyder att ofruset vatten saknas vid slang. Därför blev Tb mycket känslig för miljöfaktorer i Luleå, vilket gör att även korrektionsfaktorerna blir mer känsliga eftersom värmemotståndet ser annorlunda ut i de kompakta systemen relativt ES. Spridningen av korrektionsfaktorerna tyder på att termsisk respons är icke-linjär i de kompakta systemen med avseende på antagna miljöfaktorer.



Diagram 37, Förväntade korrektionsfaktorer för Malmö som funktion av jordart, torrdensitet och GY för TS (Kts) och SL (Ksl). För de 9 fallen i gruppen till vänster är GY=0,5 m. För de 9 fallen i gruppen i mitten är GY=1,0 m. För de 9 fallen i gruppen till höger är GY=1,5 m. "L-900" betyder lerjord med torrdensitet 900 kg/m³ och GY=0,5 m. L-900 / L-1100 / L-1500 / S-1400 / S-1600 / S-2000 / M-1600/ M-1800/ M-2000

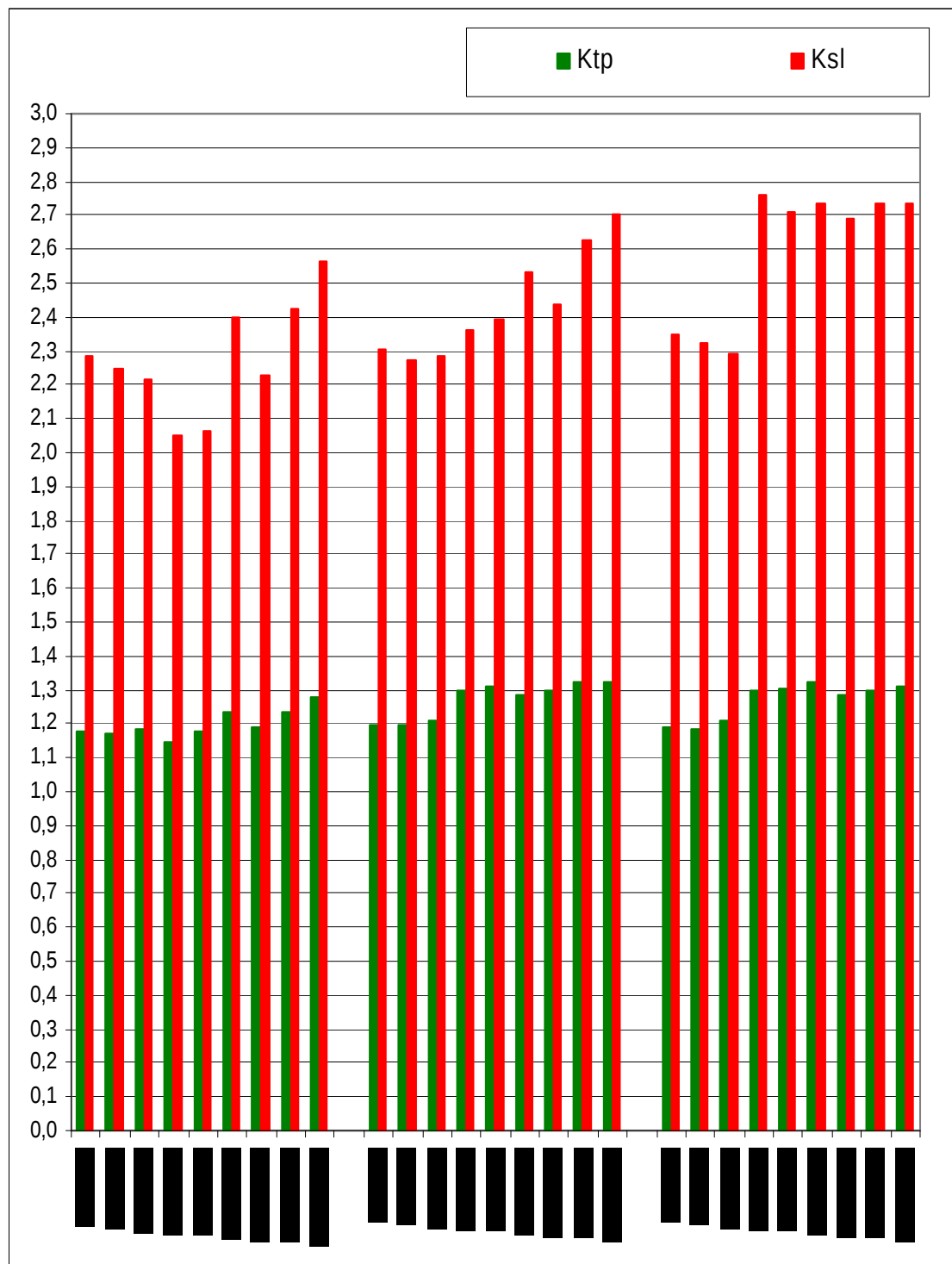


Diagram 38, Förväntade korrektionsfaktorer för Norrköping som funktion av jordart, torrdensitet och GVV för TS (K_{ts}) och SL (K_{sl}). För de 9 fallen i gruppen till vänster är GVV=0,5 m. För de 9 fallen i gruppen i mitten är GVV=1,0 m. För de 9 fallen i gruppen till höger är GVV=1,5 m. "L-900" betyder lerjord med torrdensitet 900 kg/m³ och GVV=0,5 m. L-900 / L-1100 / L-1500 / S-1400 / S-1600 / S-2000 / M-1600/ M-1800/ M-2000

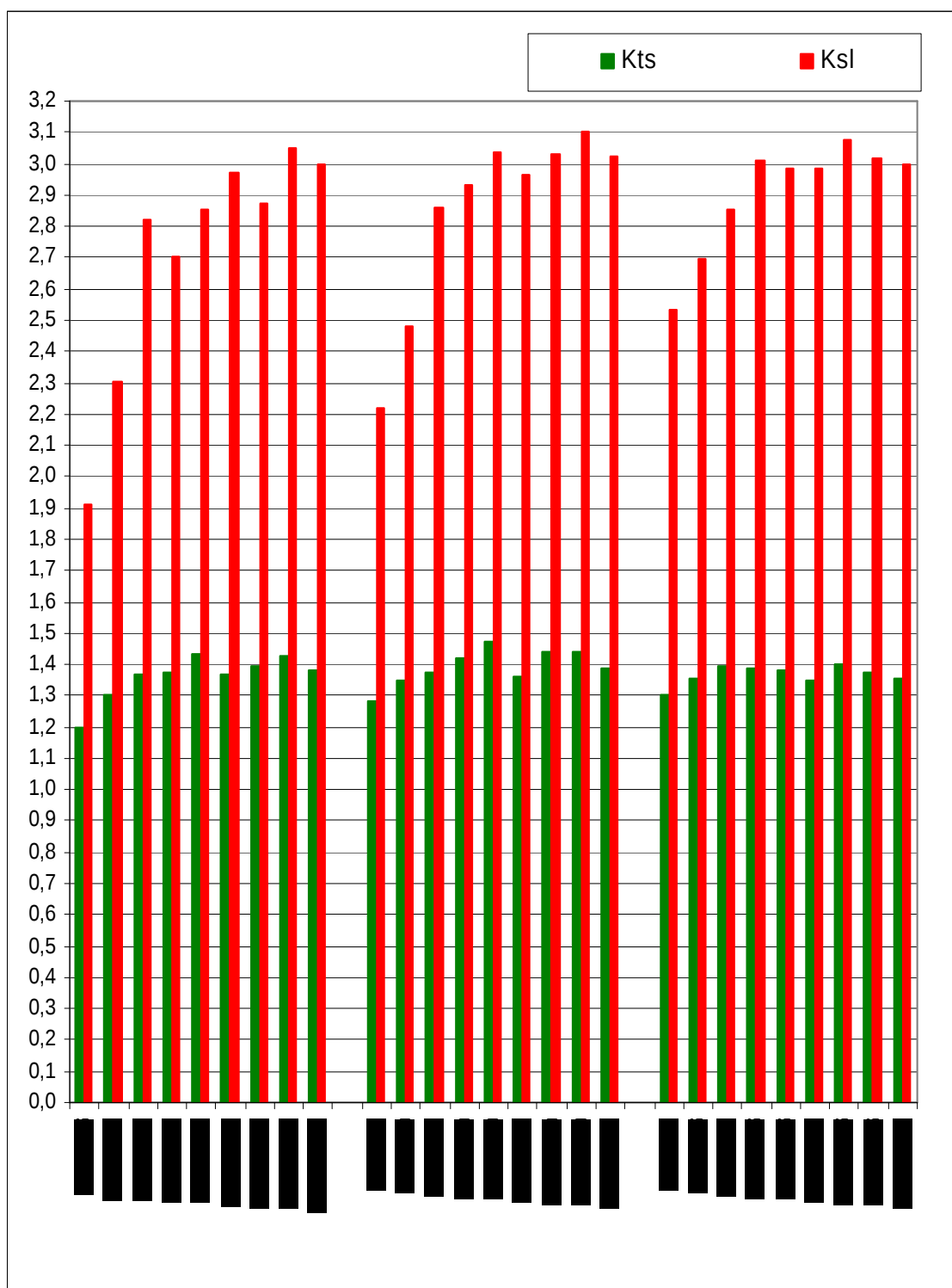


Diagram 39, Förväntade korrektionsfaktorer för Luleå som funktion av jordart, torrdensitet och GVV. För de 9 fallen i gruppen till vänster är GVV=0,5 m. För de 9 fallen i gruppen i mitten är GVV=1,0 m. För de 9 fallen i gruppen till höger är GVV=1,5 m. "L-900" betyder lerjord med torrdensitet 900 kg/m³ och GVV=0,5 m. L-900 / L-1100 / L-1500 / S-1400 / S-1600 / S-2000 / M-1600/ M-1800/ M-2000

I Diagram 40 illustreras förväntade korrektionsfaktorer för de kompakta markvärmewäxlarna som funktion av ansatt värmeuttag (VU) som andel av referensuttag. K_{tp} antar en liten variation medan K_{sl} uppvisar en väsentlig sådan.

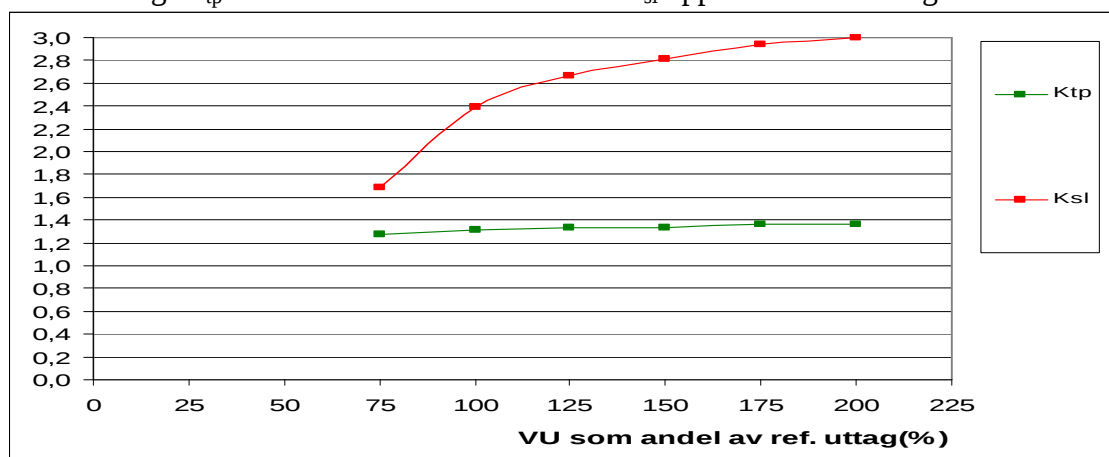


Diagram 40, Förväntade korrektionsfaktorer som funktion av värmeuttags andel (%) av referensuttag (VU).

I Diagram 41 illustreras förväntade korrektionsfaktorer för de kompakta markvärmewäxlarna som funktion av slangnivå under markyta. K_{tp} antar en liten variation medan K_{sl} uppvisar större sådan.

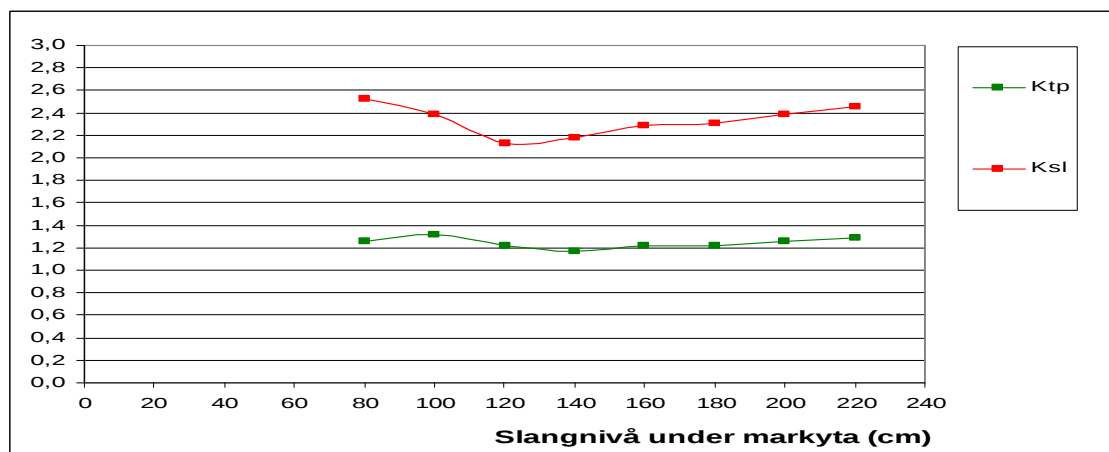


Diagram 41, Förväntade korrektionsfaktorer som funktion slangnivå under markyta.

I Diagram 42 illustreras förväntade korrektionsfaktorer för de kompakta markvärmewäxlarna som funktion av nivå för c_p . K_{tp} sjunker marginellt medan K_{sl} sjunker något mer när c_p ökar.

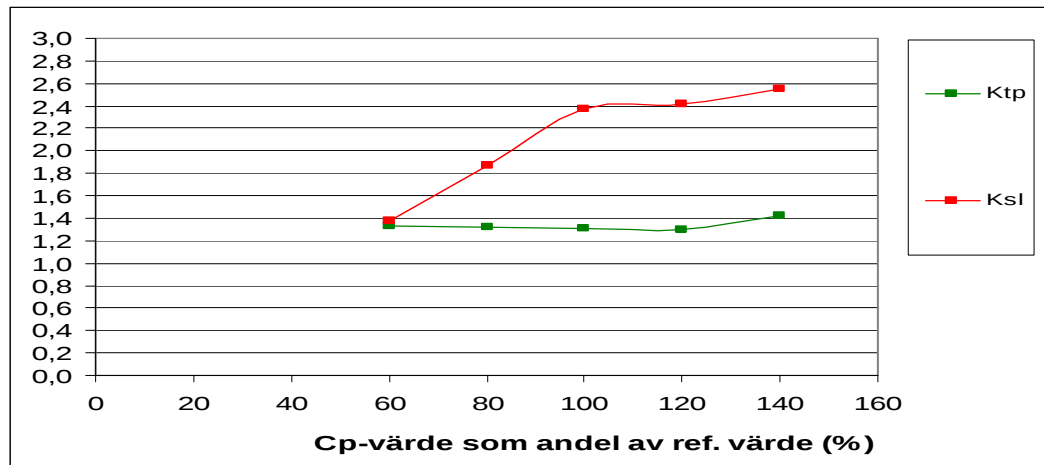


Diagram 42, Förväntade korrektionsfaktorer som funktion av c_p -värdets andel av referensvärdet

I Diagram 43 illustreras förväntade korrektionsfaktorer för de kompakta markvärmewäxlarna som funktion av λ . K_{tp} antar en liten variation medan K_{sl} som väntat visar beroende av λ -värde.

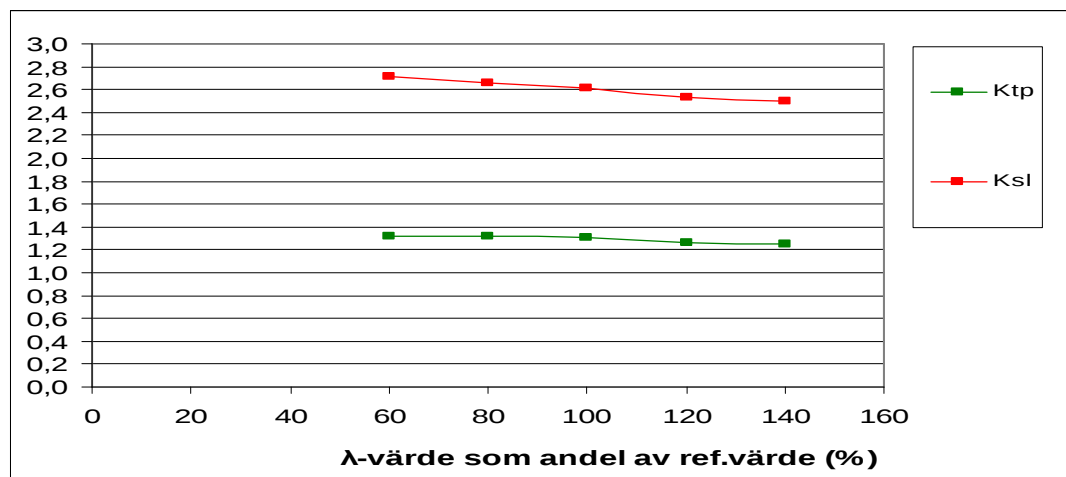


Diagram 43, Förväntade korrektionsfaktorer som funktion λ -värdets andel av referensvärdet

I Diagram 44 illustreras förväntade korrektionsfaktorer för de kompakta markvärmewäxlarna som funktion av FK och GVV. K_{tp} antar liten variation med GVV vid 1,0 och 2,0 m. K_{sl} visar däremot ett tydligt beroende av FK vid GVV=1 m och speciellt vid GVV=2 m.

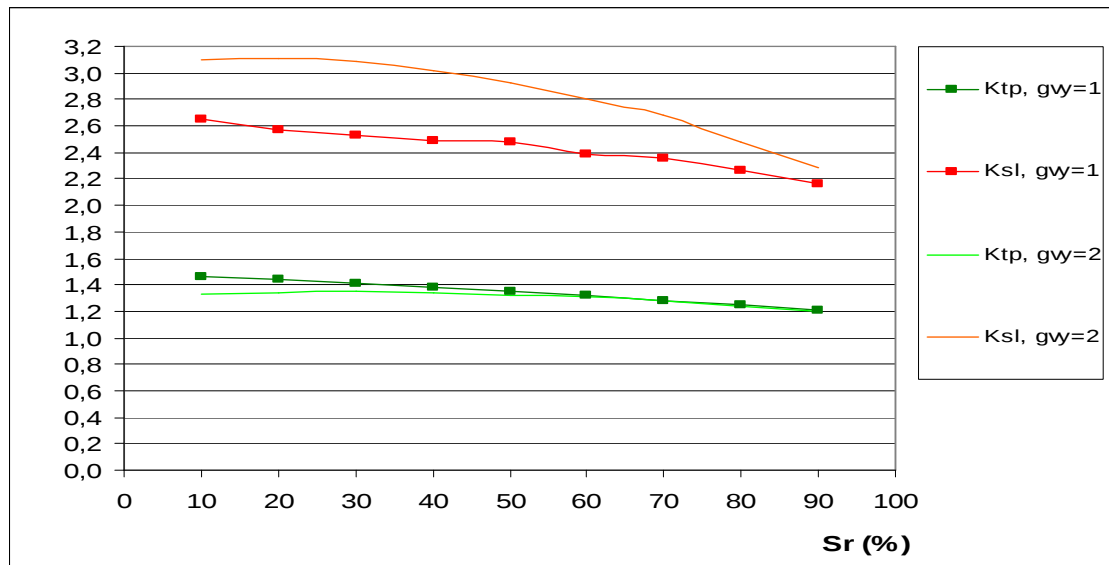


Diagram 44, Förväntade korrektionsfaktorer som funktion fältkapacitet och GvY.

I Diagram 45 illustreras förväntade korrektionsfaktorer för de kompakta markvärmväxlarna som funktion av FK och nivå för uppfuktning vid slang. K_{tp} antar en liten variation vid alla nivåer av FK. K_{sl} som funktion av uppfuktning är relativt konstant vid FK=60%, medan faktorn stiger något vid FK=40 % och väsentligt vid FK=20%. Differentieringen av K_{sl} vid låga FK i SL verkar orsakas av att dess värmemotstånd till stor del finns i jorden. Möjligen kan det bero av det högre värmeuttaget per dikesmeter i de kompakta systemen.

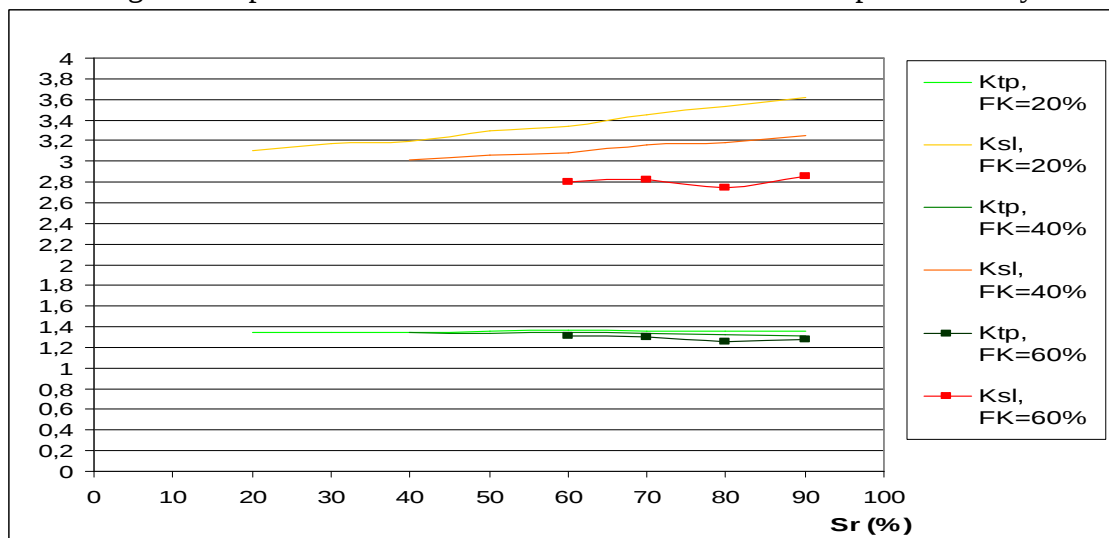


Diagram 45, Förväntade korrektionsfaktorer som funktion fältkapacitet och uppfuktning runt slang. X-axeln anger S_r -nivån i slangens närhet. Fältkapacitet (FK) anges S_r -nivån i markens sjunkvattenzon. Nivå för grundvattenyta är 1,5 m under markyta.

I Diagram 46 illustreras förväntade korrektionsfaktorer för de kompakta markvärmväxlarna som funktion av snödjup. Såväl K_{tp} som K_{sl} antar en liten variation.

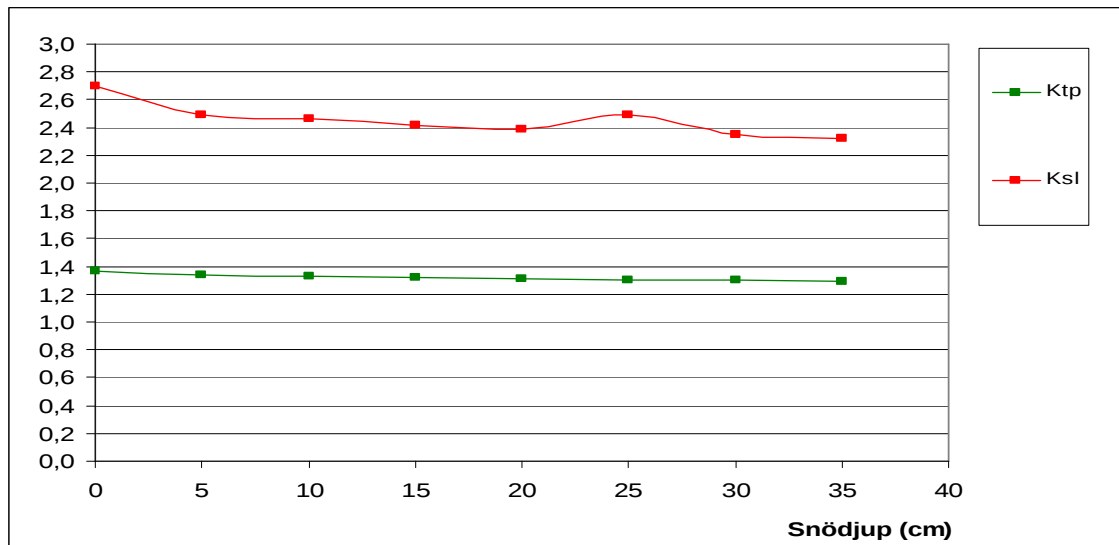


Diagram 46, Förväntade korrektionsfaktorer som funktion av snödjup.

I Diagram 47 illustreras förväntade korrektionsfaktorer för de kompakta markvärmeväxlarna som funktion av lutning för horisontprofilen över markytan. Såväl K_{tp} som K_{sl} antar liten variation medan som funktion av horisontprofil.

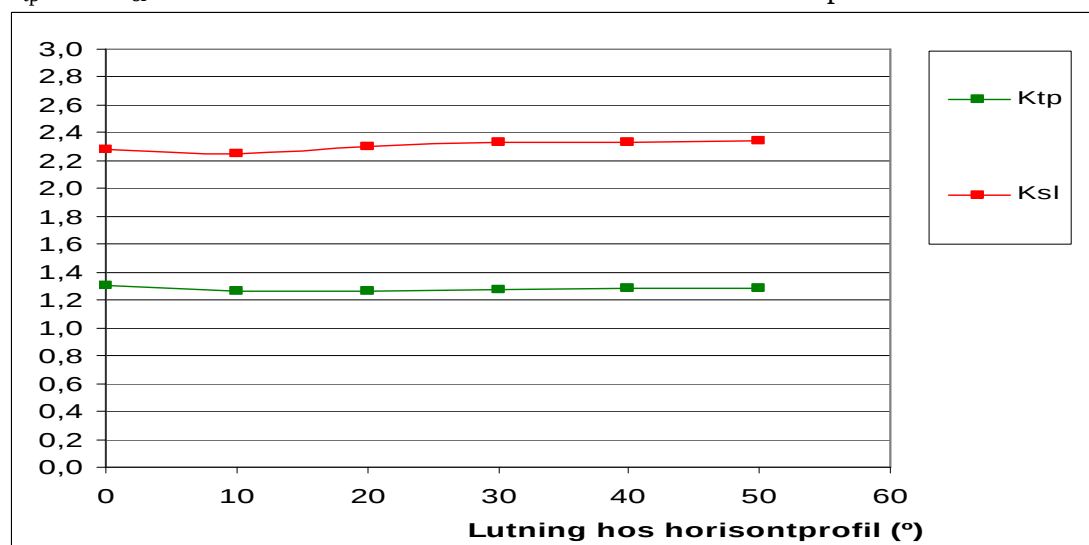


Diagram 47, Förväntade korrektionsfaktorer som funktion lutning för horisontprofil över markyta

I Diagram 48 illustreras förväntade korrektionsfaktorer för kompakta markvärmeväxlare som funktion av geografiskt läge. K_{tp} antar liten variation medan K_{sl} uppvisar en väsentlig sådan.

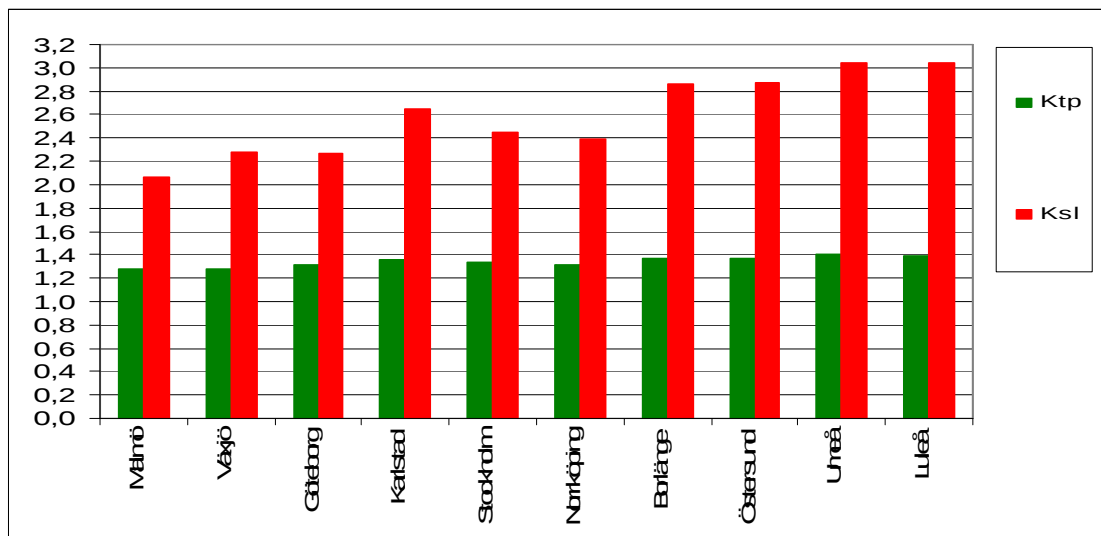


Diagram 48, Förväntade korrektionsfaktorer som funktion av geografiskt läge vid konstant jordvärmesystem. I ett verkligt system varierar värmeuttag/dikesmeter och slangdjup beroende av geografiskt läge.

Dimensionering av de kompakta jordvärmesystemen utgår från beräkning av slanglängd med ES varefter denna korrigeras för respektive system. K_{ts} och K_{sl} ger korrektionsfaktorer för de kompakta systemen relativt ES och inte i absoluta termer. I ES, TS och SL är 1, 2 respektive 8 slangar installerade på dike. SL kan sägas vara en mycket kompakt markvärmesväxlare och funktionen i systemet verkar nära nog kunna extrapoleras från TS och ES. När tätheten för slangarna i diken ökar förskjuts värmemotståndet successivt i systemet från slang till mark. Samtidigt utvinns mer värme per dikesmeter. Vid sensitivitetsanalysen kunde en större känslighet för variationer av miljöfaktorer observeras hos T_b i de kompakta systemen relativt ES-systemet. Därför visar K_{sl} betydligt större känslighet med avseende på antagna miljöfaktorer jämfört med K_{ts} . Känsligheten hos korrektionsfaktorerna för de kompakta systemen verkar alltså stiga med ökad slangtäthet i diken. Ju mer kompakt jordvärmesystemet är desto bättre kan det tillgodogöra positiva miljöfaktorer, men också påverkas mer negativt av negativa miljöfaktorer. Temperaturdifferensen för två simuleringar med flera förändrade miljöfaktorer är skild från summan av differenserna vid simuleringar var för sig. Korrektionsfaktorerna verkar således följa ett icke-lineärt beroende av miljöfaktorerna. När tillgängligt ofruset vatten saknas vid slangarna kan kraftiga reduktioner av T_b väntas. Det ska observeras att K_{ts} och K_{sl} i denna rapport ger individuella anpassningar av slanglängden med avseende på olika miljöfaktorer. Resultaten i rapporten kan därför inte vägas samman till en slutlig anpassad korrektionsfaktor för en dimensionering av slanglängd.

I Tabell 24 visas en sammanfattning av förväntade värden för korrektionfaktorerna K_{ts} och K_{sl} . De redovisas för respektive referensfall (ref) samt vid minimum- och maximumvärden för antagna miljöfaktorerna. Vid referensfallet blir K_{ts} och K_{sl} 1,32 respektive 2,39. Av tabellen nedan framgår att K_{ts} och K_{sl} visar stor känslighet för samma miljöfaktorer som T_b .

Tabell 24, Sammanfattning av korrektionsfaktorer för kompakta jordvärmesystem relativt ES. I kolumn 1 ges respektive miljöfaktor och i kolumn 2 och 5 ges förväntad korrektionsfaktor för respektive referensfall med TS och SL. Kolumn 3-4 och 6-7 ger korrektionsfaktorns förväntade vid minimi och maximi värde på faktorn i kolumn 1 med TS och SL.

Miljöfaktorer (lägsta och högsta värde för faktor)	K_{ts} ref	K_{ts} min	K_{ts} max	K_{sl} ref	K_{sl} min	K_{sl} max
VU (0-200 %)	1,32	1,27	1,37	2,39	1,68	3,00
Slangnivå (0,8-2,2m)	1,32	1,26	1,29	2,39	2,53	2,46
Snödjup (0-35 cm)	1,32	1,37	1,29	2,39	2,70	2,32
c/c-avstånd (100-412 cm)	1,32	1,40	1,26	2,60	3,66	2,60
Uppfuktning (20-90 %), FK=20	1,36	1,34	1,35	3,34	3,11	3,62
Uppfuktning (40-90 %), FK=40	1,34	1,34	1,32	3,08	3,01	3,25
Uppfuktning (60-90 %), FK=60	1,31	1,31	1,28	2,80	2,80	2,86
FK (10-90 %), GVV=1 m	1,32	1,47	1,21	2,39	2,65	2,17
FK (10-90 %), GVV=2 m	1,31	1,34	1,20	2,80	3,10	2,29
Horisontprofil 0-50°ovan markyta)	1,28	1,30	1,28	2,33	2,28	2,34
λ (60-140 % av ref. värde)	1,30	1,32	1,25	2,62	2,72	2,49
C_p (60-140 % av ref. värde)	1,10	1,13	1,09	2,82	3,00	2,75
Orter (Malmö-Luleå), konstant jordvärmesystem	1,31	1,28	1,39	2,39	2,07	3,04
Malmö, GVV=0,5, (lera, 900-morän 2000)	1,23	1,21	1,25	2,52	2,55	2,63
Ma, GVV = 1,0	1,29	1,23	1,29	2,62	2,56	2,69
Ma, GVV = 1,5	1,28	1,21	1,28	2,70	2,57	2,69
No, GVV = 0,5	1,18	1,18	1,28	2,06	2,28	2,57
No, GVV = 1,0	1,31	1,20	1,32	2,39	2,30	2,70
No, GVV = 1,5	1,30	1,19	1,31	2,71	2,35	2,73
Lu, GVV = 0,5	1,43	1,20	1,38	2,85	1,91	3,00
Lu, GVV = 1,0	1,47	1,28	1,54	3,04	2,22	3,02
Lu, GVV = 1,5	1,38	1,30	1,36	2,99	2,53	2,99

Vid sensitivitetsanalysen i avsnitt 0 har det rekommenderats ett c/c-avstånd om 1,36 och 2,44 för TS och SL oberoende av antagna miljöfaktorer. I Tabell 25 visas min och max för K_{ts} och K_{sl} samt dimensionerande c/c-avstånd i de studerade systemen.

Tabell 25, Min och max korrektionsfaktor för slanglängd för de kompakta systemen relativt ES-systemet med avseende på aktuella miljöfaktorer.

System	ES	TS	SL
Generell korrektionsfaktor för slanglängd relativt ES i Rosén (2001)	1,00	1,30	3,00
Anpassad korrektionsfaktor som lägst ($K_{es}/K_{ts}/K_{sl}$)	1,00	1,18	2,00
Anpassad korrektionsfaktor som högst ($K_{es}/K_{ts}/K_{sl}$)	1,00	1,54	3,10
Dim. c/c-avstånd	1,00	1,36	2,44

8 DISKUSSION

8.1 Slutsatser

I denna rapport redovisas både resultat från litteraturstudium och datorberäkningar. Resultaten kan sammanfattas med:

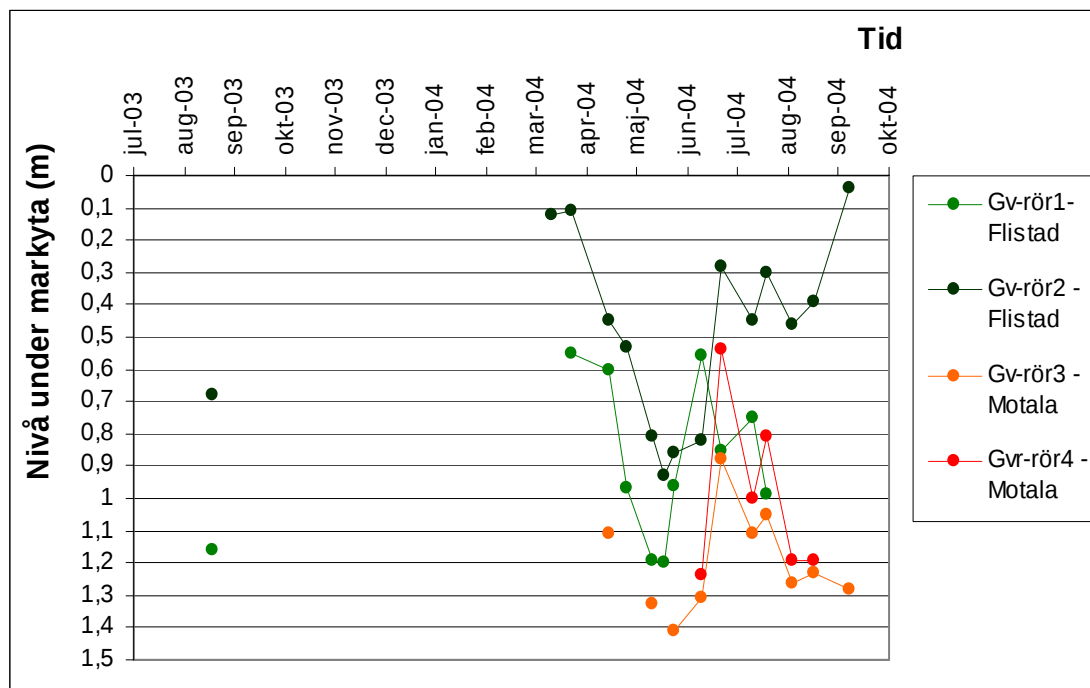
- Termisk fukttransport kan väntas ske i markvärmeväxlare till och från slang. Storlek för horisontell fuktskillnad (S_r , %) har observerats upp till samma storleksordning som drivande temperaturskillnad ($^{\circ}\text{C}$). I markvärmeväxlare kan horisontella S_r -skillnader på upp till 10-20% förväntas. Positiv inverkan av uppfuktning vid slang på brinetemperatur, vid normala hydrogeologiska förhållanden, kan anses vara begränsad men ändå mätbar. Eftersom nivån för uppfuktning vid slang kan vara svår att förutsäga bör processen inte tillgodoräknas vid dimensionering av jordvärmesystem. Uppfuktning runt slang kan däremot betraktas som en säkerhetsmarginal.
- I referensanläggningen i Motala uppmättes fuktgradient (S_r) av ungefär fem procentenheter under en termisk gradient ($^{\circ}\text{C}$) på en procentenhet.
- Datormodellen SEBAM2D har kalibrerats mot mätdata och verifierats mot en analytisk lösning. Modellen kan väntas ge tillförlitliga simuleringsresultat och är tillämpbar i framtida utvecklingsprojekt av jordvärmesystem. Datormodellen kan sägas hålla världsklass vad gäller grad av förenklingar av den fysiska verkligheten.
- Vid sensitivitetsanalysen kunde det observeras att miljöfaktorer som nivå för grundvattenyta (GVY), fältkapacitet, torrdensitet, och geografiskt läge var särskilt viktiga faktorer för brinetemperaturens förväntade nivåer. Det bekräftas även av litteraturstudien i avsnitt 2.4 och 2.5. Miljöfaktorer som horisontprofil och albedovärde verkade vara av liten relevans för brinetemperaturen. Enligt datorsimuleringarna har inga slutsatser dragits som vederlägger tidigare utsagor.
- Med torra jordar krävs mer slang relativt fuktiga jordar. Med en plastduk installerad i dike runt slang kan artificiell uppfuktning skapas runt slang. Vid såväl låg nivå för GVY som låg fältkapacitet (FK) kan låga brinetemperaturer väntas i systemen. Vid $\text{FK}=40\%$ och $\text{GVY}=1,5\text{ m}$ kan T_b -medel under vintern väntas bli omkring -5°C . Med uppfuktad zon runt slang med $S_r=90\%$ kan T_b -medel under vintern väntas stiga med 2°C och bli -3°C . Det motsvarar enligt simuleringen av värmeuttag en reducering av dikeslängd med 25 %.
- Korrektionsfaktorerna med avseende på relevanta miljöfaktorer för slanglängd i de kompakta systemen visar rimliga värden och deras variation kan förklaras utifrån termiska egenskaper och processer. Faktorerna gäller relativt systemet med en slang/dike. Faktorerna varierar i intervallet 1,18-1,54 och 2,00-3,10 för systemen med två slangar/dike respektive med slinkyn. Värmemotståndet i marken relativt i slang är proportionellt mot antalet slangar/dike i systemen. Därför finns värmemotståndet i kompakta jordvärmesystem till större del i marken och mindre i slang relativt ett system med en slang/dike. Därför blir de kompakta systemen känsligare för miljöfaktorer jämfört med ES. De kompakta jordvärmesystemen verkar därför vara som mest attraktiva i jordar med positiva miljöfaktorer. Ett exempel på mark med positiva förutsättningar för att bygga jordvärmesystem är en porös lerjord i Malmö med hög grundvattenyta.
- Temperaturdifferensen med flera förändrade miljöfaktorer är separerad från summan av differenserna var för sig. Korrektionsfaktorerna verkar följa en icke-linjär funktion av antagna indata.

8.2 Förslag på utvecklingsarbete med systemen

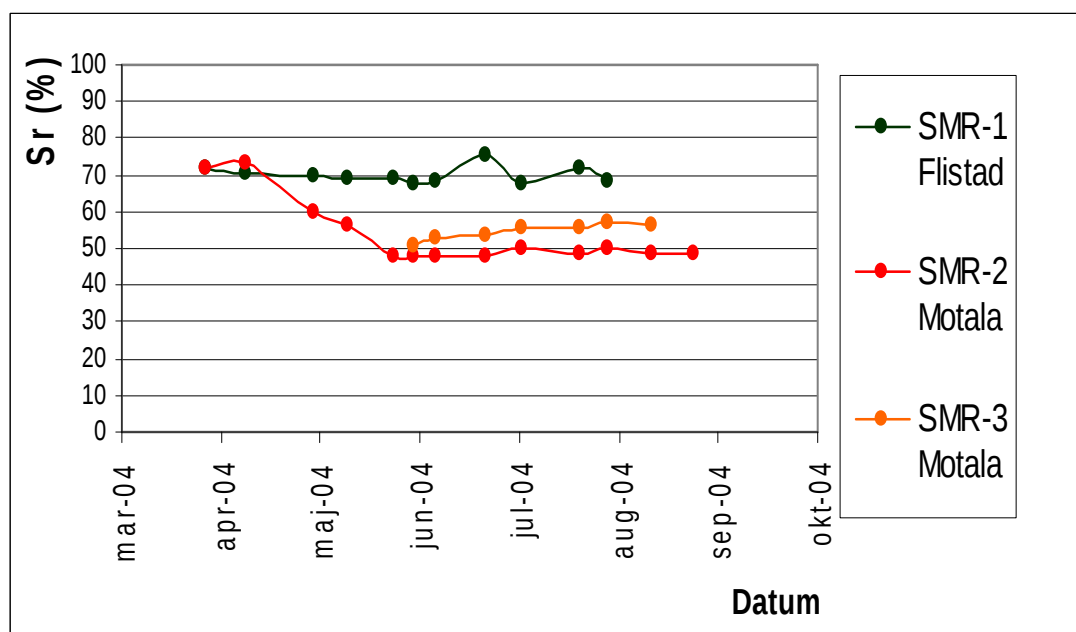
I syfte att förbättra konkurrenskraften för jordvärmesystem generellt kan följande förslag på utvecklingsarbete ges:

- Utvärdering av annan slangtäthet, t.ex. tre eller fyra slangar/dike.
- Utvärdering av förtjänst med att installera plastduk runt slang i diken.
- Utveckling av manual till stöd vid dimensionering för att välja det ekonomiskt mest fördelaktiga systemet.

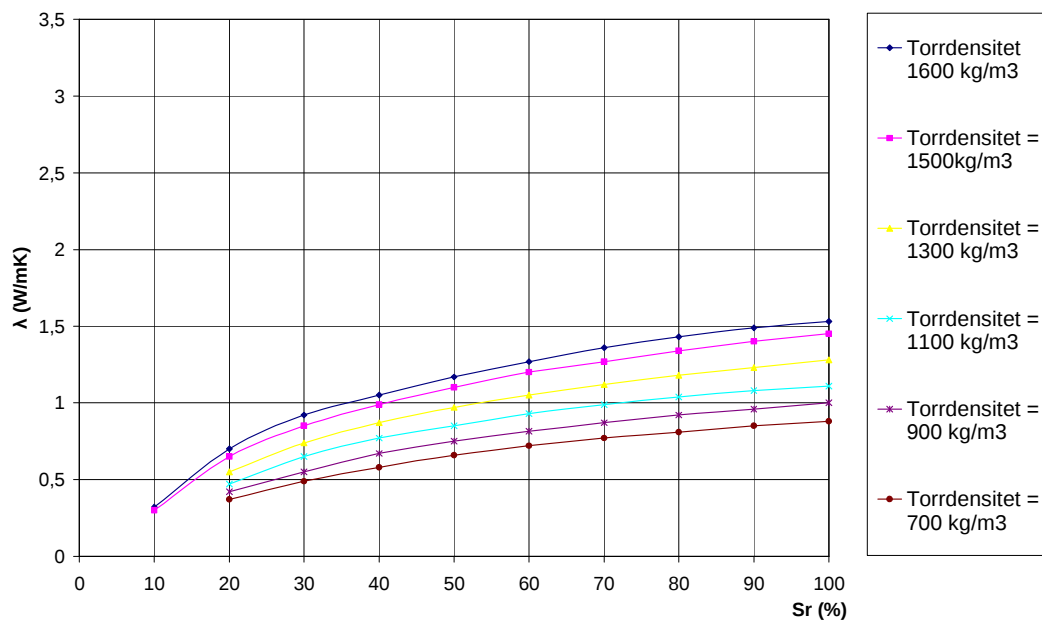
9 BILAGOR



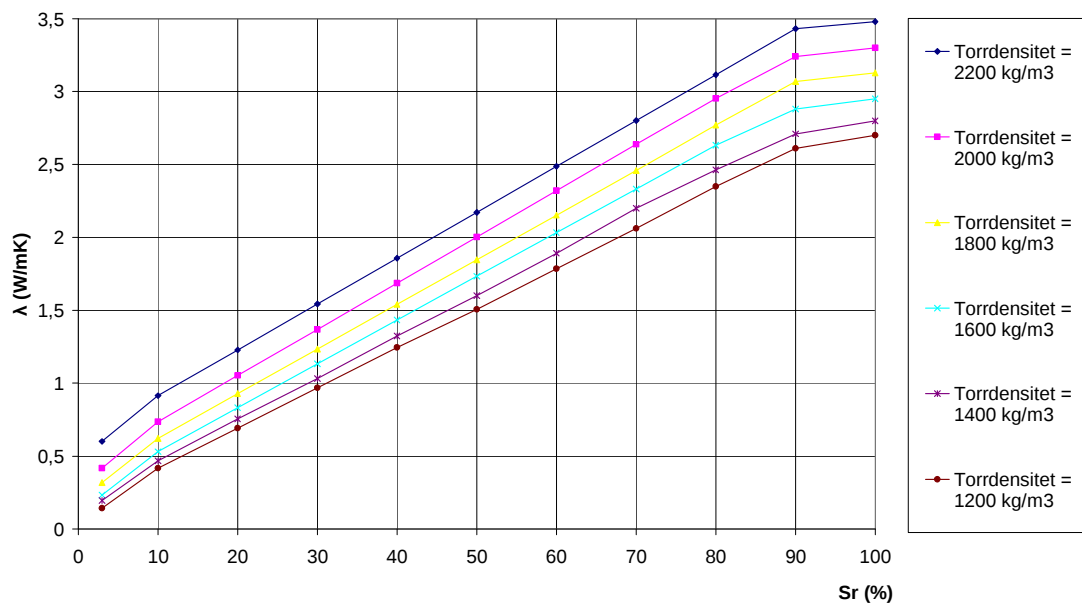
Bilaga 1, Mätresultat av nivåer för GvY i Flistad och Motala. Se Figur 10 och Figur 12 för Gv-rörens placering på fastigheterna.



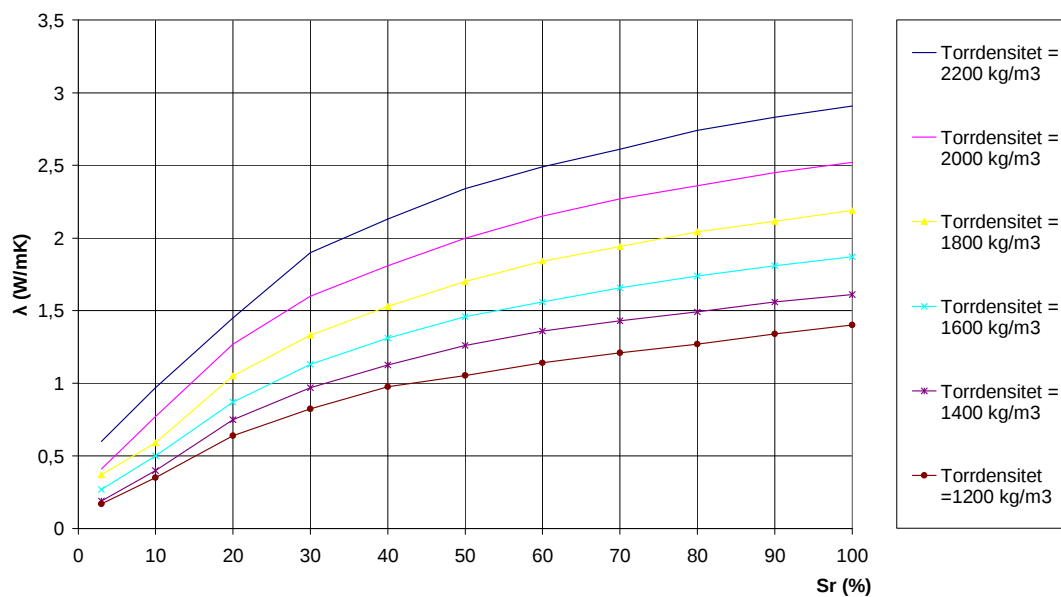
Bilaga 2, Mätresultat av nivåer för S_r med SMR-utrustning i Flistad och Motala.



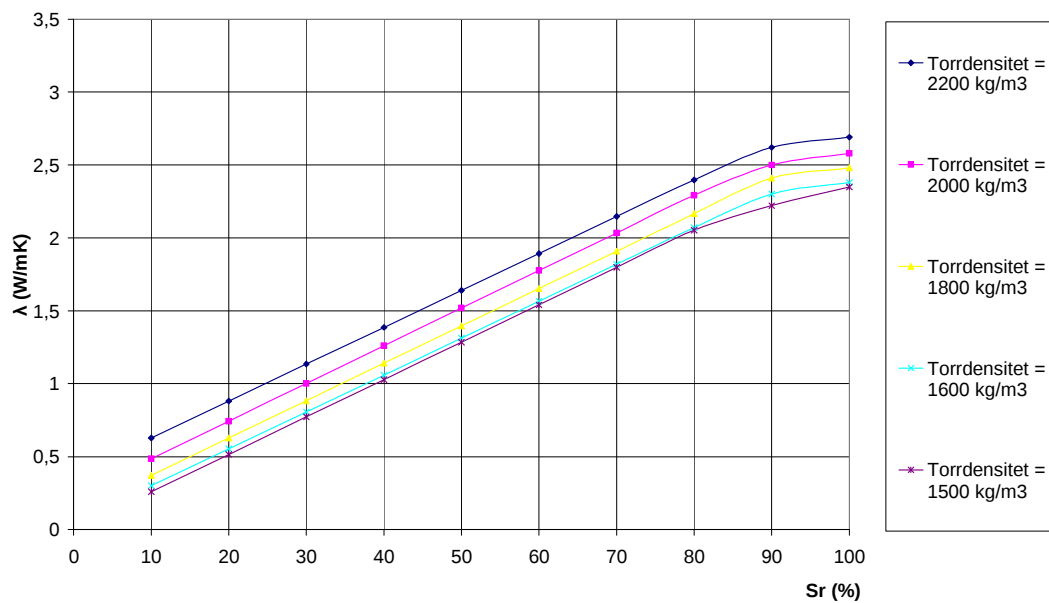
Bilaga 5, Värmekonduktivitet för lera i ofruset tillstånd som funktion av torrdensitet och S_r i Sundberg (1988).



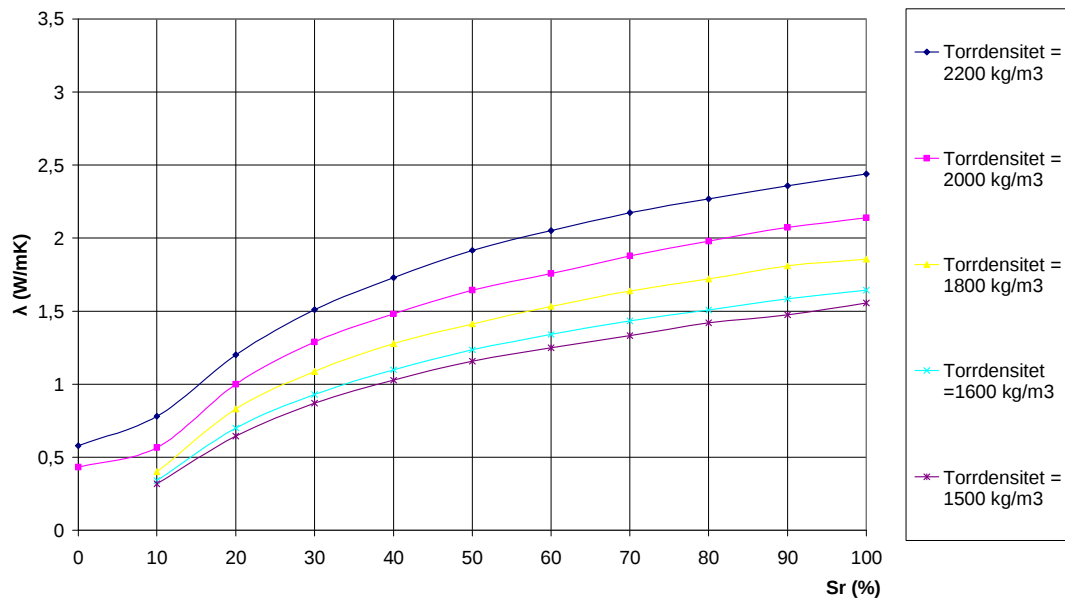
Bilaga 6, Värmekonduktivitet för silt- och sandjord i fruset tillstånd i Sundberg (1988).



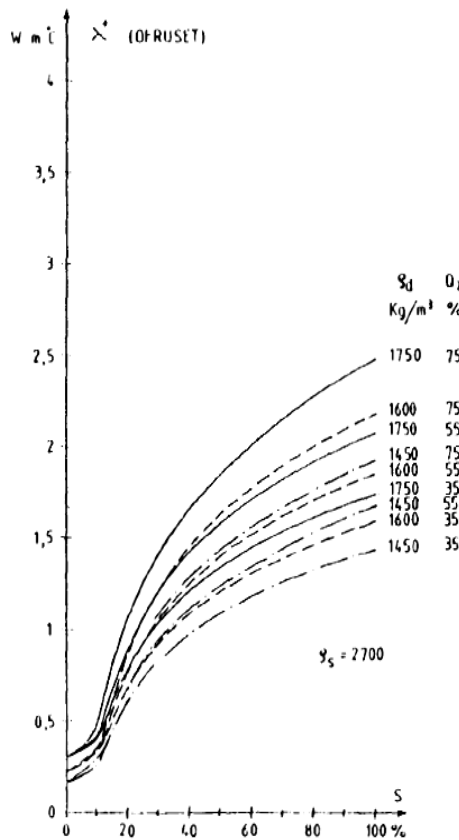
Bilaga 7, Värmeledning för silt- och sandjord i ofruset tillstånd i Sundberg (1988).



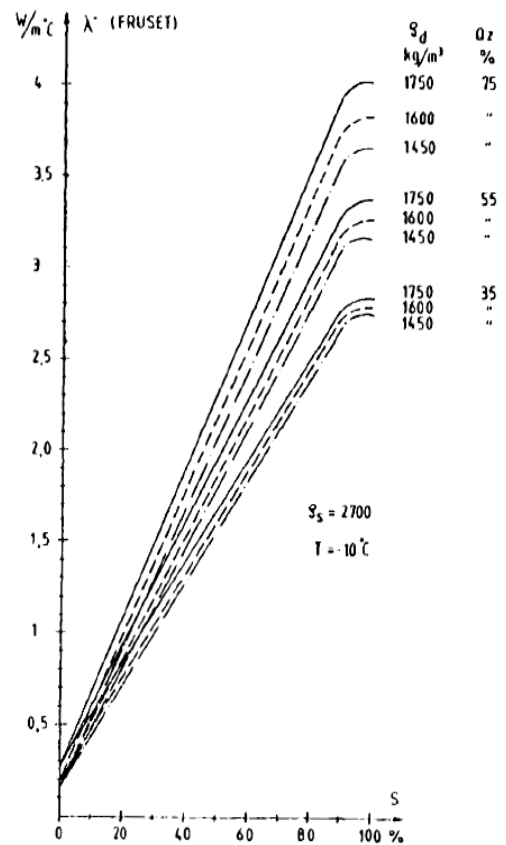
Bilaga 8, Värmeledning för moränjord i fruset tillstånd i Sundberg (1988).



Bilaga 9, Värmeledning för moränjord i ofruset tillstånd i Sundberg (1988).

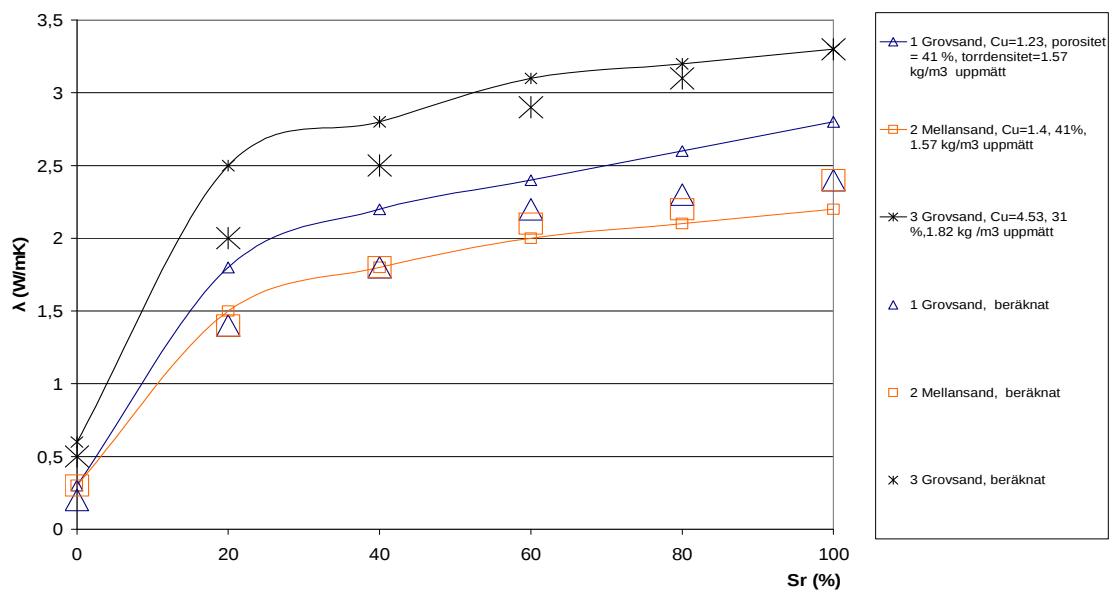


Figur 4.1 Värmeledningsförmågan (λ)
i ofruset tillstånd.

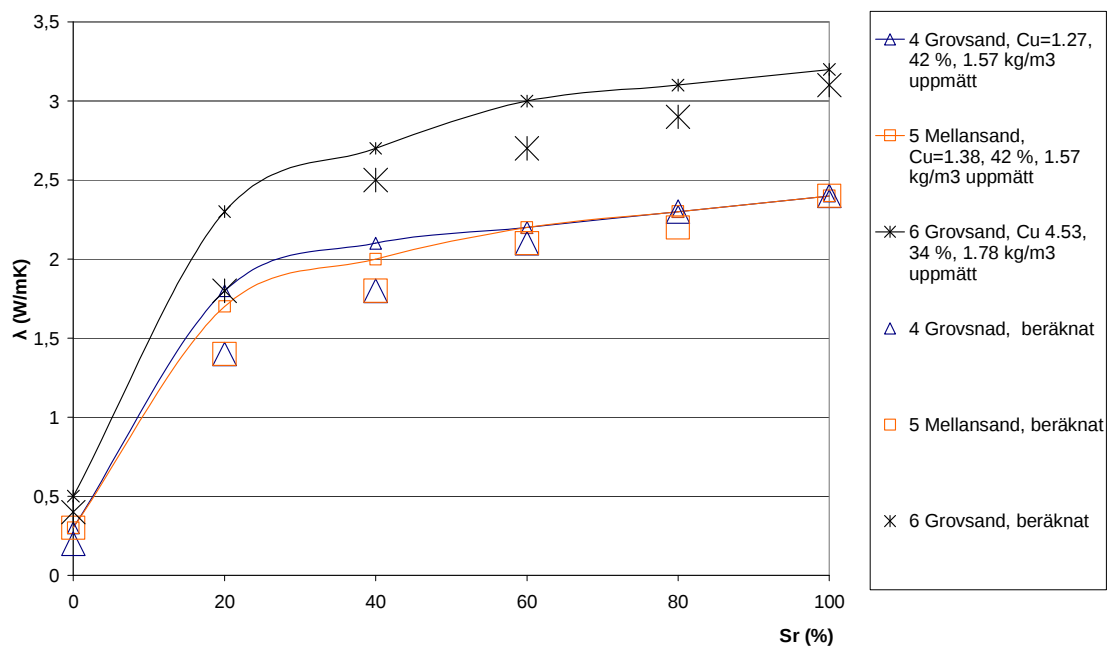


Figur 4.2 Värmeledningsförmågan (λ)
i fruset tillstånd.

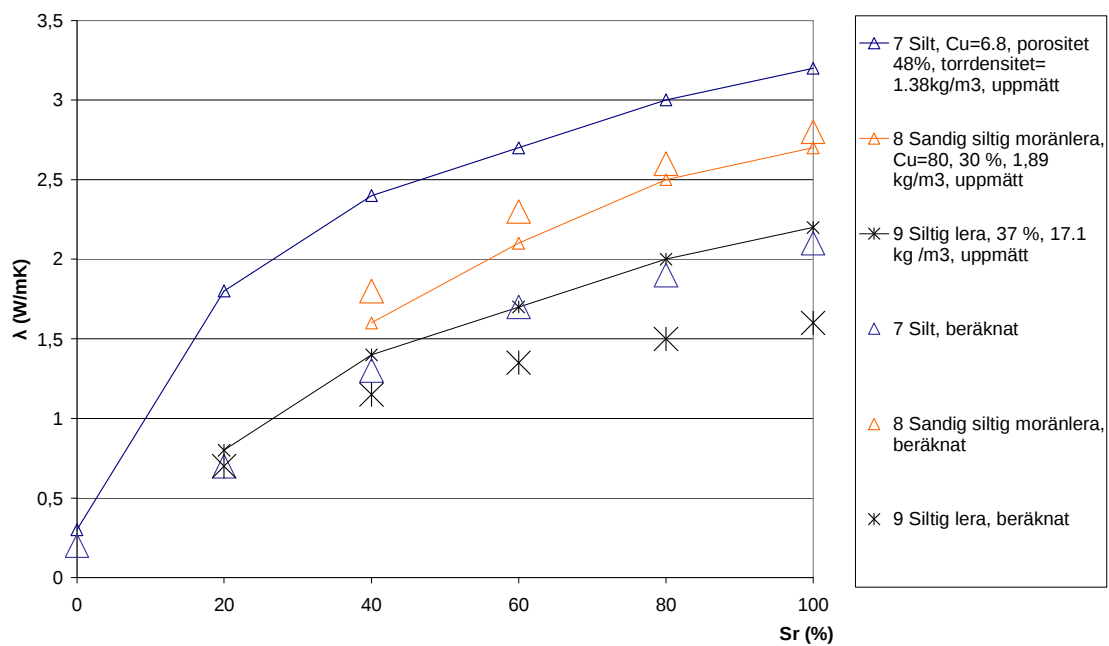
Bilaga 10, Värmeledningsförmåga för silting sandjord i ofruset och fruset tillstånd som funktion av kvartshalt (Q_z), S_r , och torr densitet (ρ_{torr}) i Rhen (1982)



Bilaga 11, Uppmätt och beräknad värmeledningsförmåga i Porsvig, (1986)



Bilaga 12, Uppmätt och beräknad värmekonduktivitet i Porsvig, (1986).



Bilaga 13, Uppmätt och beräknad värmekonduktivitet i Porsvig, (1986).

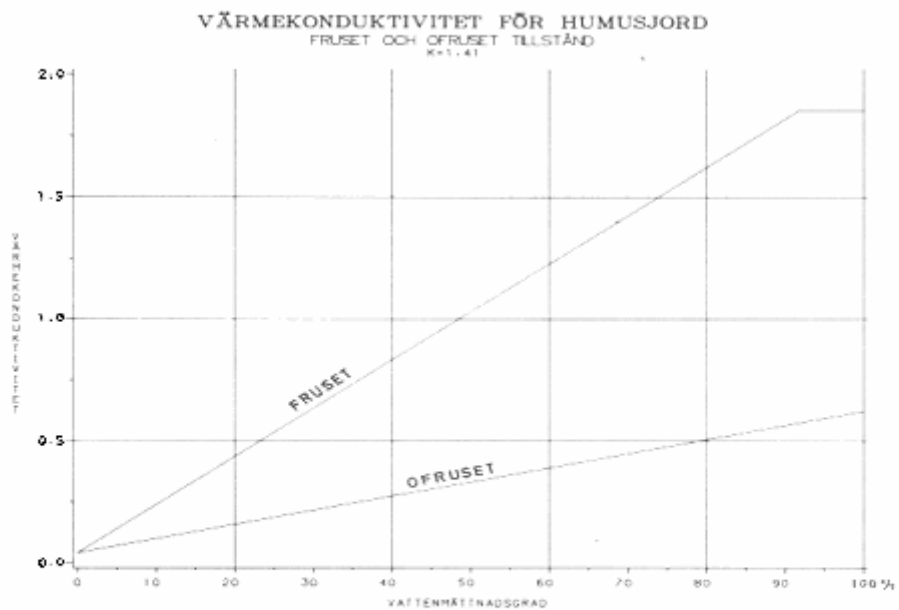
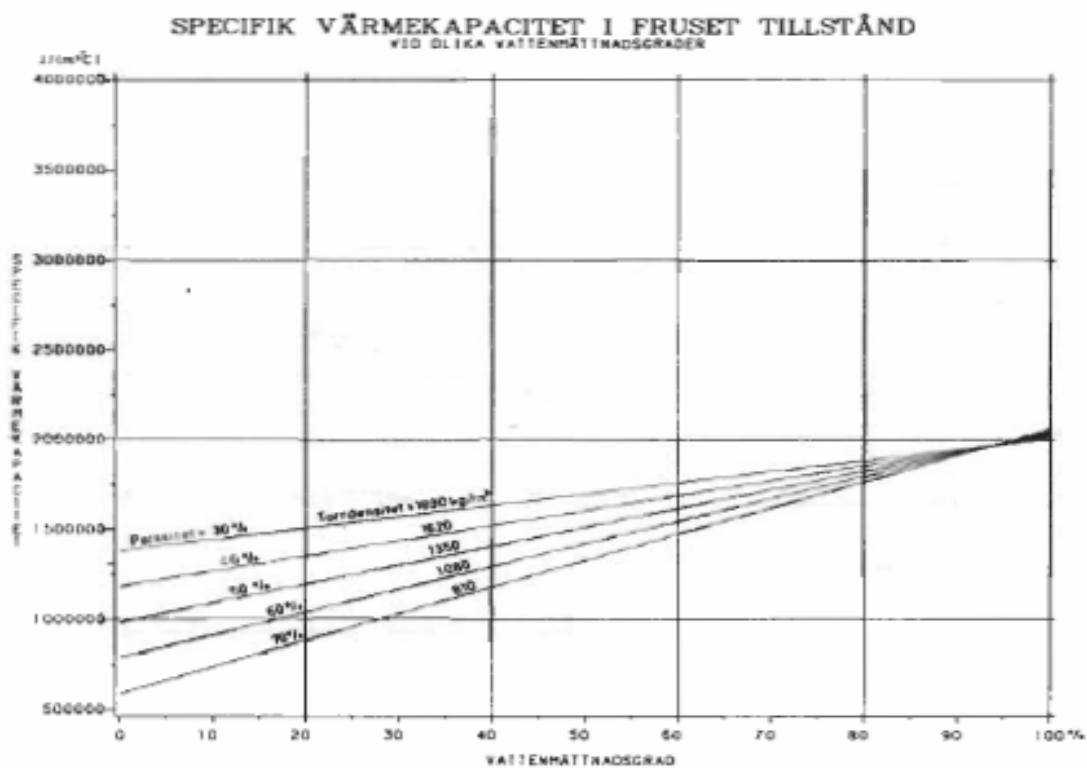
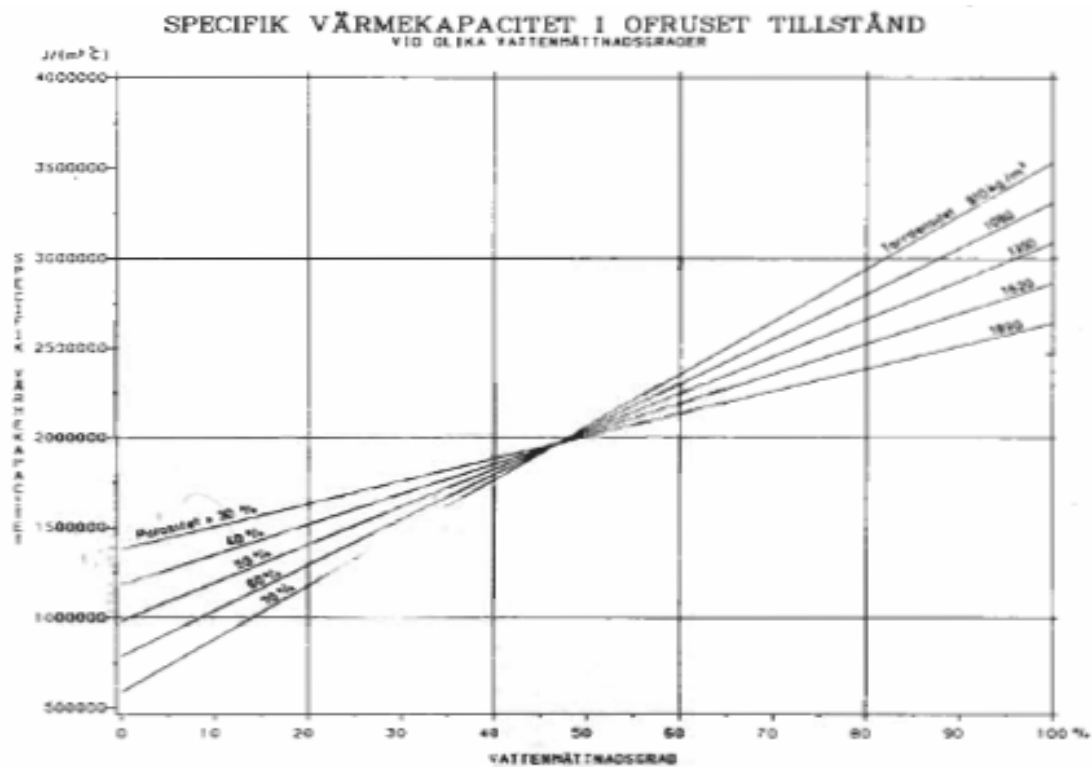


Diagram för bestämning av värmekonduktivitet för organiska jordar i fruset och ofruset tillstånd. Variationen med torrdensiteten är för dessa låga torrdensiteter mycket liten.

Bilaga 14, Värmekonduktivitet, λ (W/mK), i humusjordar i fruset och ofruset tillstånd i Sundberg 1988.



Bilaga 15, Specifik värmekapacitet i ofruset och fruset tillstånd i jord som funktion av S_r (%) och porositet (%) i Sundberg (1988). I diagrammen är nivåer för porositet och torrdensitet något ottydligt angivna. Kurvorna gäller vid porositet 30, 40, 50, 60, 70 % respektive 810, 1080, 1350, 1620, 1890 kg/m^3 .

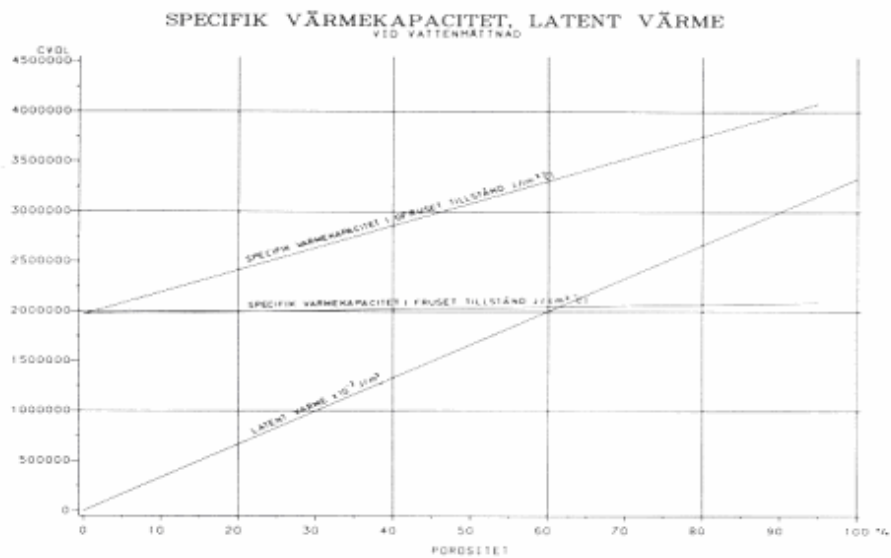


Diagram för bestämning av latent värme och specifik värmekapacitet i fruset och ofruset tillstånd vid vattenmättnad.

Bilaga 16, Specifik värmekapacitet och latentvärme (J) i fruset och ofruset tillstånd i jord enligt Sundberg (1988).

RAPPORT

utfärdad av ackrediterat laboratorium
REPORT is issued by an Accredited Laboratory

SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

Beställare: Samuel Lindskog Statens Geotekniska Institut										
Effektivare elanvändning						Tabell			1(1)	
						Dnr			1-0210-603	
Ankomstdatum		Provtagningsredskap		Laboratorieundersökning			Datum		040913	
040616-040910				Datum 040709-040910			Utförd av S.Z O.A			Teknisk ledare Inga-Maj Kallur
Sektion/ Borrhål/ Djup		Benämning enligt "Jordarternas indelning och be- nämning", Geotekniska laboratorieanvisningar del 2. 1981 års system ¹⁾		2) Den- sitet ρ t/m ³	3) Vat- ten- kvot w %	4) Kon- flyt- gräns w_L %	5) Sen- siti- viteten S_t	5) Skjuv- håll- fasthet τ kPa	Provtagningsdatum (Anmärkning)	
Flistad										
Dike 1, 20 m från åkerkant, Djup 0,3 m					10				040615	
Dike 4, 2 m från åkerkant, Djup 0,25 m					18				040615	
Smr-1, Djup 0,3 m					17				040615	
T2, Djup 0,25 m					20				040910	
Motala										
1 m NNV från SMR-3, Djup 0,3 m					(30)*				*Stor spridning 32–28 % 040615	
1 m NNV från SMR-3, Djup 0,5 m					20				040615	
1 m NNV från SMR-3, 0,5 m horisontellt från slang, Djup 0,57 m					17				040615	
1m NNV från SMR-3, vid slang Djup 0,57m					21				040615	
SMR-3, Djup 0,4 m					17				040608	
SMR-3, Djup 0,55 m					18				040608	
1,5 m NNO från SMR-3, Djup 0,3 m				-	29				040714 Stört prov. Prov i påse	
1,5 m NNO från SMR-3, Djup 0,4 m				1,66	34				040714	
1,5 m NNO från SMR-3, Djup 0,7 m				2,05	16				040714	
1,5 m NNO från SMR-3, Djup 0,75 m				2,08	18				040714	

1) Baserad på okulär jordartsklassificering. Hänsyn har tagits till förekommande mätdata.

R 1 2004-03-09

2) Skrymdensitet SS 027114, Utgåva 2

3) Vattenkvot SS 027116, Utgåva 3

4) Konflytgräns SS 027120, Utgåva 2

5) Skjuvhållfasthet bestämd med konmetoden. SS027125, Utgåva 1. Okorrigerat värde. Korrigering rekommenderas enligt SGI Information 3.

Mätosäkerhet och mätområde för våra metoder redovisas på vår hemsida, www.swedgeo.se

Ackrediterat laboratorium utses av Styrelsen för ackreditering och teknisk kontroll (SWEDAC) enligt lag. Verksamheten vid de svenska ackrediterade laboratorierna uppfyller kraven enligt SS-EN 17025. Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte SWEDAC och utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat. Resultaten gäller enbart för de provade materialen.

Statens geotekniska institut

581 93 Linköping, telefon 013-20 18 00, telefax 013-20 19 14

Bilaga 17, Mätresultat från av värden för vattenkvoter och torrdensiteter i jordprover från markvärmexlarna i Flistad och Motala.

10 REFERENSER

Böcker

Ahlkrona, Douglas, Mogensen, Palne (1987). Sju yttjordvärmeanläggningar – fältmätning och datorsimulering. Statens byggforsknings råd, Stockholm.

Arfvidsson, Jesper (1998). Moisture transport in porous media - Modelling based on Kirchhoff Potentials. Rapport TVBH-1010. Institutionen för byggnadsteknik. Avd för Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola, Lund.

Avén, Sigurd (1984). Handboken Bygg – Geoteknik (avsnitt G02, G03, G04, G21, G24). Liberförlag, Stockholm.

de Vries, D.A., Het warmtegeleidingsvermogen van grond, Med. Landbouwhogescholen Wageningen, 52. Wageningen, Nederland, 1952.

Dunand, Alain (1982). Modélisation des transferts thermiques et hydriques dans le sol. Application à l'extraction d'énergie thermique par pompe à chaleur couplée à un réseau horizontal de tuyaux enterrés. L'université scientifique et médicale et L'institut national polytechnique de Grenoble. Grenoble, Frankrike

Ekroth, Ingvar. Granryd Eric (1994). Tilläpåd termodynamik. Institutionen för energiteknik, KTH. Stockholm

Elmarsson, Bengt, Nevander, Lars Erik (1994). Fukthandboken - teori och praktik. Svensk Byggtjänst AB, Solna.

Fetter, Charles Willard (2001). Applied hydrogeology. Prentice Hall, cop. Upper Saddle River.

Hellström, Göran (1991). Ground Heat Storage, Thermal Analyses of Duct Storage Systems I. Theory. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Lund.

Johansson Jan, Josephsson Börje (1995). Naturvärmesystem för bilsteningsanläggning i Slagnäs. Avd. För Vattenteknik, Luleå Tekniska Universitet. (Examensarbete)

Jönsson, Gilbert (1998). Grundläggande fysik - om gaser och vätskor. Studentlitteratur, Lund.

Knoblich, K, Rammer, R. Martin, G. (1990). Zeitschrift für angewandte Geowissenschaften. Landtechnik Weihestephane. Freising. Germany

Knutsson, Gert, Morfeldt Carl Olof (2002). Grundvatten: teori & tillämpning. Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Lunardini, Virgil (1981). Heat transfer in cold climates. Van Nostrand Reinhold Company. New York.

Philip, J.R. & D.A. de Vrie , Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans, Am. Geophys. Union , 38, 222-223, 1957.

Porsvig, Mogens (1986). Varmeovergangsforhold omkring jordslanger. Energiministeriets varmepumpeforskningsprogram. Geoteknisk institut. Lyngby, Danmark.

Rhen, Ingvar (1982). Horisontella jordvärmesystem över och under grundvattenytan, Geologiska förutsättningar i Orsa, Rapport nr 4. Jordvärmegruppen, ChalmersTekniska Högskola, Göteborg.

Rhen, Ingvar (1989). Ytjordvärmekollektor förlagd i sand, Studie av 19 ytjordvärmesystem förlagda i mellansand i Sandhed, Orsa. Publ. A63. Geologiska Institutionen, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

Rhen, Ingvar. Jonasson, Sven. Johansson, Anders. (1989). Freezing around horizontal pipes in sand due to heat extraction. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborgs universitet, Geologiska institutionen. Göteborg.

Rhen, Ingvar. Sundberg, Jan. Wilén, Peter. (1984). Horizontal pipe systems in soil for heating and cooling of single family houses. Jordvärmegruppen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Rosén, Bengt (red) (2001). System för värme och kyla ur mark- En nulägesbeskrivning. Varia 511. Statens geotekniska institut, SGI Dnr 1-9905-0340, Linköping.

Rosén, Bengt (red) (2006). System för värme och kyla ur mark - Demonstrationsobjekt över jordvärmeanläggningar. SGI Varia 556. Statens geotekniska institut, SGI, Linköping.

Shinn J S, Timian D A, Morey R M, (Applied Research Associates (ARA) inc), Mitchell G (Ohio University), Hull R (Anatech), 1997; Development of a CPT Development Probe for In Situ Measurement of volumetric Soil Moisture Content and Electrical Resistivity. www.cpt.ara.com/resources/publications.html

Sundberg, Jan (1988). Termal properties in Soils and Rocks. Rapport No 35, Statens Geotekniska Institut, Linköping

Tarnawski, V.R. Leong, W.H. Wagner, B. Reuss, M. Schulz, H. Heat and moisture interactions in high temperature ground heat storage. Sid 131-151

Internet

(1) <http://www.swedgeo.se/effektivare-elanvändning/index.html>, 2005-12-13, Göran Karlsson, Linköping.

(2) http://www.sgu.se/sgu/sv/service/kart-tjanst_start.htm#brunn, Uppsala

(3) http://www.ne.se/jsp/notice_board.jsp?i_type=1, 2005, Malmö.