



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R13:1986

Dimensionering av ytjord- värmekollektor

Beräkningar med simuleringsmodell

**Ingvar Rehn
Jan Sundberg
Björn O Modin**

*R
A12*

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION
Accnr
Plac <i>ser</i>

Byggeforskningsrådet

R13:1986

DIMENSIONERING AV YTJORDVÄRMEKOLLEKTOR

Beräkningar med simuleringsmodell

Ingvar Rehn
Jan Sundberg
Björn O Modin

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 810673-9
från Statens råd för byggnadsforskning till Geologiska
institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

REFERAT

Med hjälp av en datormodell som bygger på finita differensmetoden har ytjordvärmekollektorn studerats för att kunna få fram dimensioneringsregler för den. De datorsimuleringar som gjorts torde täcka många dimensioneringsfall, men ej alla, för ytjordvärmesystem. Exempel på fall som bör belysas mera är extrem belastningskaraktistik på ytjordvärmekollektor och kollektorer under snöröjda ytor.

Tre olika orter har valts med olika klimattyper. Därvid har ett normalår och ett extremår med hänsyn till både lufttemperatur och snötäckning utsetts. Ortarna är Luleå, Uppsala och Kristianstad. Nio olika förenklade, homogena jordtyper har använts för Luleå och för övriga orter fem jordtyper. Förlägningsdjup och avstånd mellan slangar i kollektorn har varierats. 16-125 kWh/m²,år har i simuleringarna tagits från marken. Fördelningen av denna har gjorts med hänsyn till lufttemperatur eller har antagits vara baslast.

Dessa simuleringar finns sammanfattade på drygt 50 diagram. Ur dessa diagram kan lägsta, högsta, viktad medel-, samt extremårets lägsta köldbärartemperatur utläsas beroende på årsenergiuttag per m² markyta, jordart, ort, slangnivå och avstånd mellan slangar. Avlästa köldbärartemperaturer bör i vissa fall korrigeras då värmepumpens driftsätt inte motsvarar det som antagits i simuleringarna.

Resultaten från dessa simuleringar visar att framför allt jordart och klimat är viktiga parametrar för att bestämma möjligt energiuttag. Även avståndet mellan slangar påverkar möjligt energiuttag medan förlägningsdjup spelar mindre roll. Djupet var dock redan begränsat inom relativt snäva gränser inom vad som ansågs vara ett praktiskt förlägningsdjup. Beträffande klimatet bör det noteras att snötäcket har stor betydelse för möjligt energiuttag.

I Byggeforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R13:1986

ISBN 91-540-4524-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Liber Tryck AB Stockholm 1986

FÖRORD

Denna rapport hänför sig till BFR-projekt 810673-9 och behandlar dimensionering av yttjordvärmekollektorn. Dimensioneringsreglernas innehåll samt förutsättningarna (klimat, effektbelastning, slangavstånd etc) för datorsimuleringarna har tagits fram under några samarbetsmöten där flera personer med anknytning till yttjordvärmeforskningen deltagit. Följande personer har deltagit i detta arbete.

Douglas Ahlkrona, Thermia AB
Sven Fredén, VTI
Per-Eric Jansson, SLU, Inst f Markvetenskap, Ultuna
Lars-Christer Lundin, SLU, Inst f Markvetenskap, Ultuna
Helen Lundqvist, SLU, Inst f Markvetenskap, Ultuna
Björn O. Modin, VIAK AB/CTH, Geologiska inst. (ordf)
Palne Mogensen, Palne Mogensen AB
Ingvar Rhen, CTH, Geologiska inst.
Jan Sundberg, CTH, Geologiska inst.

Utarbetandet av förutsättningarna i detalj samt genomförandet av datorsimuleringarna och framtagandet av diagrammen har gjorts vid Geologiska institutionen, CTH, av Ingvar Rhen och Jan Sundberg. Datorsimuleringarna täcker ett flertal av möjliga dimensioneringsfall, dock inte alla. Rapportskrivningen har gjorts av Ingvar Rhen förutom kapitel 8, vilket skrivits av Björn O. Modin. Peter Wilén, Geologiska institutionen, CTH, har bidragit med värdefulla synpunkter under projektets gång. Utskriften har gjorts av Ann-Marie Hellgren och ett flertal av figurerna har ritats av Marianne Johnson.

Ingvar Rhen

Jan Sundberg

Björn O Modin

INNEHÅLL	sid
FÖRORD	i
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	ii
SAMMANFATTNING	iv
BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER	viii
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund till projektet	1
1.2 Dimensionering av en ytjordvärmekollektor	1
2 BERÄKNINGSMODELL	5
2.1 Modelluppbyggnad	5
2.2 Verifiering av datormodell	6
3 INDATA TILL SIMULERINGAR	10
3.1 Klimatdata	10
3.2 Belastningskaraktistik	10
3.3 Jordtyper	14
3.4 Slangförläggning	19
3.5 Slangdimension på ytjordvärmekollektor	20
4 HANDHAVANDE AV DIMENSIONERINGSDIAGRAM	21
4.1 Beskrivning av dimensioneringsdiagrammens uppbyggnad	21
4.2 Val av ingångsdata	22
4.3 Dimensioneringsgång	24
4.4 Justering av köldbärartemperatur	29
4.4.1 Justering av köldbärartemperatur vid effektpulser	29
4.4.2 Justering av köldbärartemperatur med hänsyn till slangdiameter	38
4.5 Vattentransport in mot slang vid frysning	40
4.5.1 Erfarenheter från fältanläggning	40
4.5.2 Påverkan på köldbärartemperatur på grund av förändrad värmekonduktivitet intill slang	42
5 EXEMPEL PÅ ICKE HOMOGENA LAGERFÖLJDER SAMT SNÖRÖJDA YTOR	45
5.1 Torv med torr överyta	45
5.2 Grovkornig sand med grundvattenyta något under slangnivå	46
5.3 Snöröjd yta	48
6 TJÄLE	51
6.1 Tjälens utbredning	51
6.2 Permafrost	59
6.3 Tjälskador	59
7 EKOLOGISKA EFFEKTER AV YTJORDVÄRMEUTTAG	63

8	PROJEKTERING AV YTJORDVÄRMEANLÄGGNING	65
8.1	Förundersökning	65
8.2	Projektering av ytjordvärmekollektor	66
8.3	Utförande	67
9	NOMENKLATUR FÖR YTJORDVÄRMEKOLLEKTORNS FÖRLÄGGNING	69
10	DIMENSIONERINGSDIAGRAM	71
10.1	Lathund till dimensioneringsdiagram	71
10.2	Dimensioneringsdiagram	75
	REFERENSER	105

SAMMANFATTNING

Projektet har haft som syfte att upprätta dimensioneringsregler för ytjordvärmesystem i olika jordarter och klimat för Sverige. En datormodell som bygger på finita differensmetoden har använts vid beräkningarna. Denna modell har ursprungligen utvecklats på Lunds tekniska högskola av Eftring, Johansson och Westman. Modellen har sedan kompletterats vid Geologiska institutionen och beräkningarnas omfattning är enligt följande. De datorsimuleringar som gjorts torde täcka många dimensioneringsfall, men ej alla, för ytjordvärmesystem. Exempelvis bör extrembelastningskaraktistik på ytjordvärmekollektorn och kollektorer under snöröjda ytor belysas mera. Datormodellen har verifierats med fältresultat från projekt i Orsa (sand) och Surte (lera).

Tre olika orter har valts med olika klimattyper. Därvid har ett normalår och ett extremår med hänsyn till både lufttemperatur och snötäckning utsetts. Orterna är Luleå, Uppsala och Kristianstad. Nio olika förenklade, homogena jordtyper har använts för Luleå och för övriga orter 5 jordtyper. Simuleringarna har omfattat:

- Två olika djup på slangförläggningen och fyra olika avstånd mellan slangarna i horisontalled.
- Energiuttaget har varierats från 16 kWh/år m^2 till 125 kWh/år m^2 . Detta energiuttag har sedan fördelats över året med hänsyn till framför allt lufttemperatur eller jämnt över året som ett basuttag.

Dessa simuleringar finns sammanfattade på drygt 50 diagram. Ur dessa diagram kan lägsta, högsta, viktad medel- samt extremårets lägsta köldbärartemperatur utläsas beroende på årsenergiuttag per m^2 markyta, jordart, ort, slangnivå och avstånd mellan slangar. Avlästa köldbärartemperaturer bör i vissa fall korrigeras om värmepumpens driftssätt inte motsvarar det som antagits i simuleringarna.

Resultaten från dessa simuleringar visar att framför allt jordart och klimat är viktiga parametrar för att bestämma möjligt energiuttag. Även avståndet mellan slangar påverkar möjligt energiuttag medan förläggningsdjup spelar mindre roll. Djupet var dock redan

begränsat inom relativt snäva gränser inom vad som ansågs vara ett praktiskt förläggingsdjup. Beträffande klimatet bör det noteras att snötäcket har stor betydelse för möjligt energiuttag. Snötäcket verkar isolerande för marken och dämpar vinterkylans nedträngning i denna. Snöröjd markyta kan således försämra möjligt energiuttag. Effekten av snöröjning har inte studerats för alla kombinationer av jordar, nivåer etc. De fåtal simuleringar som gjorts antyder att energiuttaget skall väljas lägre än för snötäckt mark. Jordar med låg vattenhalt påverkas därvid mest. Det bör vidare vara fördelaktigt att förlägga kollektorn djupare under snöröjd markyta än vad som är normalt för icke snöröjd markyta.

I det följande redogörs kortfattat för resultaten från simuleringarna. Nedan ges en bild av hur energiuttaget varierar med klimat, jord, slangförläggning och samspillet mellan dessa variabler. I ett verkligt fall måste det också tas hänsyn till vald värmepump, tjälhävningrisker och eventuell ekologisk påverkan.

Energiuttag/m²,år för olika jordar

Om lägsta tillåtna medelköldbärartemperatur är -5°C och toppresp. baslast har de varaktigheter som beskrivs i rapporten varierar möjligt energiuttag enligt nedanstående tabell. Det lägsta värdet motsvaras av klimat Luleå med 1.5 m mellan slangar och det högsta av Kristianstad med 0.7 m mellan slangar för toppeffektuttaget. Förläggingsdjup är 0.6 eller 1.4 m. För baseffektuttag är avstånd mellan slangar (c/c) 1 m och förläggingsdjup 0.9 m.

Jord	Ung. motsv. Jordart	Min. köldbärartemp. -5°C	
		Toppeffektuttag kWh/m ² ,år	Baseffektuttag kWh/m ² ,år
1	Torv	25-85	60-100
2	Lera	40-80	80-100
5	Torr sand	0-30	15-45
9	Fuktig sand/silt/morän	20-60	50-90
6	Vattenmättad sand	50-100	100->125

Klimat effekterna slår mest igenom på jordar med låg vattenhalt, dvs jord 5 och 9. Detta beror på att det vatten som ligger ovan slangarna också fungerar som en form av isolering då marken fry-

ser på grund av nedkylning från markytan. Nedkylningen av marken från markytan fördröjs om det finns stor mängd vatten som kan frysas. I torra jordarter är denna buffert låg, varför effekterna blir större för dessa vid ett kallt klimat. För jord 5 resp. 9 innebär detta att 50-100% mer energi/m² kan tas ut i Kristianstad i jämförelse med Luleå. För lera och torv är skillnaderna relativt små medan för den vattenmättade sanden kan energiuttaget vara 10-40% större i Kristianstad i jämförelse med Luleå.

När någon del av marken befinner sig i ständigt fruset tillstånd råder det permafrost. Normalt i Sverige har vi ingen permafrost förutom på vissa ställen i norra Lappland. Genom att kyla marken med ytjordvärmekollektorn kan det dock åstadkommas permafrost om energiuttaget är tillräckligt stort. I BFR-rapporten "Fysikaliska effekter av ytjordvärmeuttag" av P-E Jansson och L-C Lundin anges några ungefärliga gränser för permafrost. (Torven och sanden som redovisas har grundvattenytan ca 1.5 m under markytan.)

Årligt energiuttag då permafrost uppstår

	Luleå	Uppsala	Kristianstad
Torv	35	55	70
Sand	90	110	130

(kWh/m²,år)

Ytjordvärmslangen ligger i dessa fall 0.8 m under markytan. Läggs slang djupare än detta inträder permafrost vid lägre energiuttag än här redovisade. De simuleringar som ligger till grund för dimensioneringsdiagrammen pekar mot liknande värden för det årliga energiuttaget då permafrost inträder.

Förläggningsdjup

Lämpligt förläggningsdjup bör väljas så att så hög köldbärartemperatur som möjligt erhålls. En generell tendens är dock att volymen tjälad mark ökar med förläggningsdjup, varvid risken för permafrost ökar och marktemperaturen blir lägre. Skillnaderna mellan olika förläggningsdjup är vanligen inte så stora, vilket medför att förläggningsdjupet vanligen kan väljas ur praktiska synpunkter. Några skillnader kan dock iakttas. För torv förefal-

ler en mer yttlig förläggning (0.6-1.0 m) av slang vara bättre än en djupare. För övriga jordarter är förläggningsdjupet mer beroende av klimatet. I Kristianstad kan slangar läggas grundare än i Luleå, 0.6-1.0 m i Kristianstad mot 1.0-1.4 m i Luleå.

Avstånd mellan slangar (c/c)

Väljs en tätare slangförläggning kan en större energimängd tas ur marken. Detta innebär med en vald lägsta köldbärartemperatur att marken tjälas mer med tät slangförläggning i jämförelse med gles slangförläggning. Skillnaden i möjligt energiuttag mellan slangar med olika c/c beror av samspelet mellan energiuttaget/m² och nedkylningen från markytan. Så länge tjälen som tränger ned från markytan och tjälen runt slangen är skilda från varandra är värmemotståndet mellan 0°C isotermin och köldbärarvätskan måttligt medan när marken är tjälad från markytan ned under slangarna är detta värmemotstånd relativt stort. Hur mycket mer energi/m² som kan tas ut med en tät slangförläggning i jämförelse med en gles beror därför av vald lägsta köldbärartemperatur, klimat, jordart och förläggningsdjup. Lägg slangarna med ett c/c av 0.7 m i stället för c/c 1.5 m och lägsta köldbärartemperatur väljs till -5°C kan ökningen av möjligt energiuttag bli 20% till 100% beroende av klimat och jordart. Ökningen är större i Kristianstad än i Luleå och större för jordar med hög vattenhalt än jordar med låg vattenhalt.

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

A	Erforderlig markyta för ytjordvärmekollektorn	(m ²)
b	Horisontellt avstånd mellan slangar i ytjordvärmekollektorn (eller stråkbredd)	(m)
C	Konstant för att beräkna ΔT_{ϕ}	
c	värmeledningsförmåga	(W/m °C)
d	Förläggningsdjup av ytjordvärmekollektorn	(m)
E	Energi/år som värmepumpen totalt skall producera	(kWh)
e	Årsenergiuttaget per m ² horisontell markyta (ensam slang medför att årsenergiuttaget anges per m slang)	(kWh/m ² år)
K	Konstant för att beräkna max. effektuttag ur dimensioneringsdiagram	
L	Latent värme	(J/m ³)
l	Erforderlig slanglängd för ytjordvärmekollektorn	(m)
$m_0 = 0.06$	totalt värmemotstånd över slang som antagits i dimensioneringsdiagram	(m °C/W)
m_R	Totalt värmemotstånd för slang med radie R	(m °C/W)
$R_0 = 0.02$	Rörradie som antagits i dimensioneringsdiagram	(m)
R	Rörradie	(m)

r	radie utifrån centrum slang	(m)
T_0	Lägsta köldbärartemperaturen beräknad som medelvärde av inkommande och utgående köldbärartemperatur	($^{\circ}\text{C}$)
T_{Q1}	Värmebärartemperatur då Q_1 avges	($^{\circ}\text{C}$)
T_{Q2}	Lägsta inkommande köldbärartemperatur	($^{\circ}\text{C}$)
T_{ϕ}	Årmedelköldbärartemperatur	($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_F	Temperaturdifferens mellan inkommande och utgående köldbärartemperatur	($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_R	Korrigerig av lägsta köldbärartemperatur med hänsyn till förändrad rördiameter	($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_T	Korrigerig av lägsta köldbärartemperatur med hänsyn till korta effektpulser	($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_{ϕ}	Korrigerig av årmedelköldbärartemperaturen med hänsyn till förändrad slangdiameter	($^{\circ}\text{C}$)
Q_0	Max. effekt enligt dimensioneringsdiagram som tas ur jordvärmekollektorn	(W)
q_0	Max. effekt per meter slang enligt dimensioneringsdiagram som tas ur jordvärmekollektorn	(W/m)
Q_1	Max. effekt som värmepumpen skall producera (effekt på kondensorsidan)	(W)
Q_2	Max. effekt från jordvärmekollektorn (effekt på förångarsidan) då Q_1 produceras	(W)
q_2	Max. effekt per meter slang från jordvärmekollektor (effekt på förångarsidan) då Q_1 produceras	(W)

x

Φ	Årsvärmefaktor	
Φ_Q	Värmefaktor då Q_1 produceras	
λ	Värmeledning	(W/m °C)

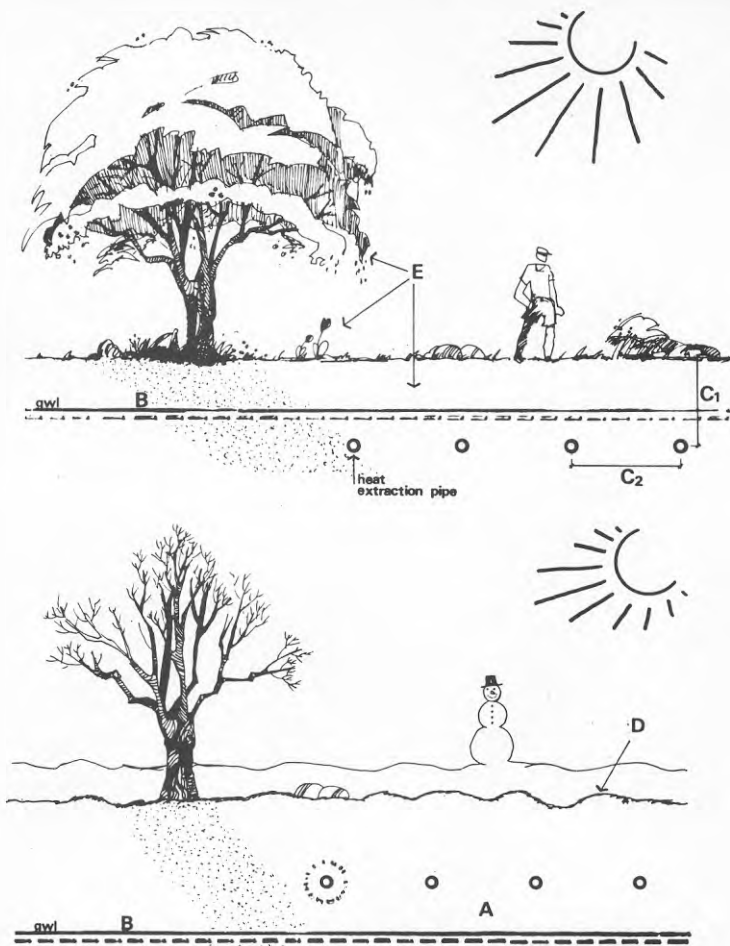
1 INLEDNING

1.1 Bakgrund till projektet

Ytjordvärmekollektorer har under många år använts som värmekälla till värmepumpar. Dimensioneringen av kollektorn har vanligen gjorts med schablonvärden på möjligt energi- och effektuttag ur mark med påföljd att dimensioneringen i många fall blivit osäker. Detta projekt har haft som syfte att ta fram ett bättre dimensioneringsunderlag än dessa schablonvärden. Det dimensioneringsunderlag som presenteras i denna rapport baseras till största delen på ett stort antal datorberäkningar som gjorts med ett finit differensprogram.

1.2 Dimensionering av en ytjordvärmekollektor

Att dimensionera en ytjordvärmekollektor innebär att anpassa energi- och effektuttag till rådande klimat och termiska egenskaper i jorden. De viktigaste klimatologiska variablerna är lufttemperaturen och snötäckningen. Ju kallare klimat desto lägre blir marktemperaturen och desto mer tjälar marken. Detta innebär att möjligt energiuttag sjunker då årsmedeltemperaturen blir lägre. Snötäckningen verkar dock isolerande för marken. Ett snötäcke medför att en större energimängd kan tas ut i jämförelse med en snöröjd yta. Jordens värmeöverförande egenskaper har också en stor betydelse för dimensioneringen. Dessa egenskaper beror av jordens mineralsammansättning, packningsgrad och vattenhalt. Den sistnämnda är den viktigaste på grund av att ytjordvärmesystemen vanligen dimensioneras så att marken fryses runt jordvärmeslangen en kortare eller längre period. Att fastställa en jords termiska egenskaper kan i vissa fall vara svårt. I t ex en grovkornig jordart beror jordprofilens vattenhalt i stor utsträckning på grundvattenytans nivå. Dessutom fluktuerar i allmänhet grundvattennivån under året, vilket försvårar bestämningen av de värmeöverförande egenskaperna. I en finkornig jord är variationen i vattenhalt mindre. Vilken effekt och energimängd som kan tas ut ur en jordvärmekollektor beror förutom av klimat och jordart även av slangförläggning, dvs avstånd mellan markyta och slang och horisontellt avstånd mellan slangar. Köldbärartemperaturen som

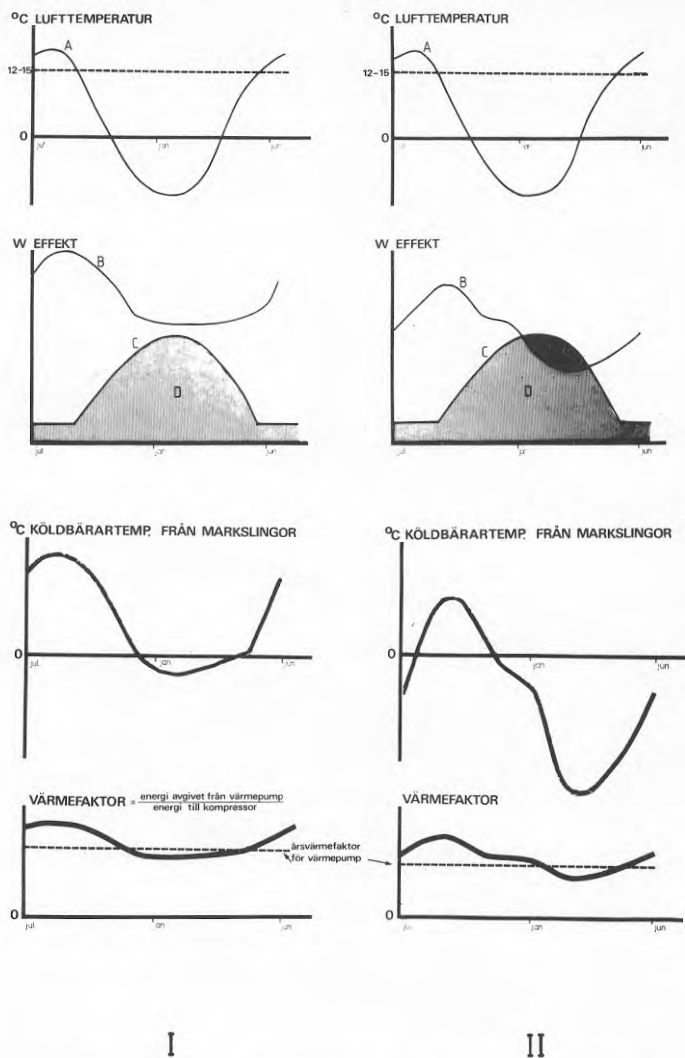


Figur 1.1 Faktorer förutom klimat som påverkar dimensionering av ett ytjordvärmesystem.
 A jordens värmeöverförande egenskaper
 B grundvattenytans läge (påverkar A)
 C kollektorns placering i marken
 D ev. risk för tjälhävning
 E växtlighetens känslighet för nedkylning av marken

erhålls från en ytjordvärmekollektor beror förutom av ovanstående faktorer också av energi- och effektuttaget. Varierar effektbehovet mycket, som skall tillgodoses av ytjordvärmekollektorn, innebär detta i allmänhet ett lägre möjligt energiuttag/m² markyta i jämförelse med en ytjordvärmekollektor med jämn belastning. Ibland bör energiuttaget/m² väljas lägre än vad som skulle vara optimalt med hänsyn till köldbärartemperatur. I tjälfarlig jord

kan markytan röra sig märkbart både vid tjälning av marken och när marken tinar. Blir markytans rörelser stora och/eller ojämna kan en konstruktion skadas som vilar direkt på marken. Exempelvis kan en gångväg som är asfalterad eller belagd med betongplattor spricka upp eller bli ojämna om markrörelserna blir ojämna. En annan faktor att ta hänsyn till är biologiska effekter på grund av att marktemperaturen blir lägre och att perioden då marken är frusen blir längre. Den markbiologiska aktiviteten minskar och i vart fall vissa mindre hårdiga växter kan hämmas av en lägre marktemperatur.

Vid dimensioneringen av en ytjordvärmekollektor eftersträvas att beräkna ytjordvärmekollektorns storlek för en köldbärartemperatur som krävs för att erhålla en viss effekt och energi från värmepumpen. Värmepumpens prestanda ger vilken värmeeffekt som värmepumpen förmår leverera vid olika köldbärartemperaturer. I figur 1.2 illustreras två dimensioneringar där fall II representerar ett större energiuttag/ m^2 än fall I. Kurva C åskådliggör effektbehovet och ytan D energibehovet som behövs under ett år. I fall I förmår värmepumpen leverera en effekt enligt kurva B med hänsyn till köldbärartemperaturen. Värmepumpen kan för fall I täcka hela effektbehovet. I fall II förmår värmepumpen att leverera en effekt enligt kurva B som i detta fallet skär kurva C. Det innebär att den svartfärgade ytan måste tillgodoses av annan energikälla än värmepumpen. I och med att köldbärartemperaturen blir lägre i fall II än i fall I kommer också värmefaktorn för värmepumpen att sjunka. Figur 1.2 är endast ett schematiskt exempel på hur ett ytjordvärmesystem för en villa kan fungera. Dimensioneringen kan också göras så att värmepumpen täcker endast en del av totala effekt- och energibehovet. Värmepumpens effekt, motsvarande B i figur 1.2, hamnar då helt eller delvis under en effektbehovskurva (motsvarande kurva C i figur 1.2).



Figur 1.2 Principskiss av effekt, köldbärartemperatur och värmefaktor under ett år för en värmepump kopplad till ett ytjordvärmesystem.

A: lufttemperatur

B: värmepumpens förmåga att avge effekt

C: effektbehov

D: energibehov

I: Illustrerar en dimensionering som medför att värmepumpen täcker hela energi- och effektbehovet.

II: Illustrerar en dimensionering som ger lägre köldbärartemperatur och därmed ett värmepumpsystem som inte täcker hela energi- och effektbehovet.

2 BERÄKNINGSMODELL

2.1 Modelluppbyggnad

En datormodell, baserad på finita differensmetoden, har använts för att beräkna köldbärartemperaturer. Programmet är ursprungligen konstruerat vid Institutionen för matematisk fysik vid Lunds tekniska högskola av Eftring, Johansson och Westman, 1981. Geologiska institutionen vid Chalmers tekniska högskola har sedan modifierat programmet under arbetet med projektet som denna rapport bygger på. Programmet har körts på Göteborgs Datacentral. Modellen inkluderar följande:

- * Rörformat värmeuttag på valfri plats som kan varieras med tiden. (Rätlinjig interpolation mellan månadsmedelvärden alt. 10-dagars medelvärden.)
- * Fasomvandling (frysning).
- * Temperaturen som varierar med tiden på ränderna.
- * Övergångsmotstånd vid markytan som varierar med tiden (snötäckning).
- * Materialparametrar (ofruset tillstånd) som varierar med tiden i vissa celler.
- * Isoleringar mellan valfria celler.
- * Valfria materialparametrar i olika celler.
- * Värmeflöden på valfria ränder.

Utdatamöjligheter:

- * Utskrift av indata.
- * Temperatur och frysgrad i cellerna vid valfritt tidssteg.
- * Värmeflöden mellan cellerna vid valfritt tidssteg.

- * Temperatur på köldbärare, slang, luft, effekt till hus, effekt från mark, energi från mark, värmefaktor, snöövergångsmotstånd; vid valfritt tidssteg samt viktad medelköldbärartemperatur.
- * Plottning med SAS-Graph.

Modellen inkluderar inte solinstrålning, som framgår ovan, utan endast en varierande randtemperatur kan anges. Indata för detta projekt har varit lufttemperatur (tidsberoende), snötäckning (tidsberoende), energiuttag (tidsberoende), jordart, värmekonduktivitet, värmekapacitet latent värme, slangnivå och avstånd mellan slangar. En indatabank har upprättats för de ovanstående variablerna för att underlätta datorkörningarna.

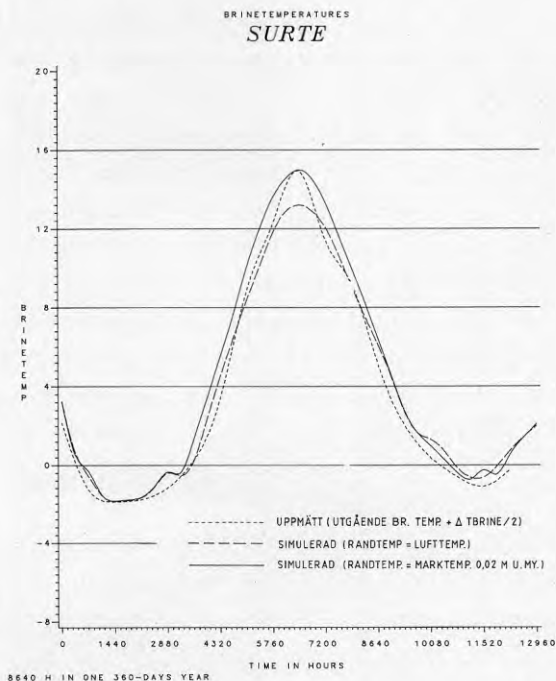
Som starttemperatur i mark användes den temperaturfördelning som opåverkad (inget energiuttag via jordvärmeslang) mark har vid den tidpunkt då första årscykeln för energiuttaget börjar. Djupet till den undre öppna randen har valts till 16 m under markyta med ortens medellufttemperatur som randtemperatur. De vertikala ränderna har varit isolerade. Då en ensam slang har studerats har en bredd av 10 m på nodnätet använts (alltså 20 m mellan slangarna). Det har ansetts tillräckligt för att kunna studera en ensam slang i ett jordfält. 10-dagars medelvärden har använts för lufttemperatur, snötäckning och effektuttag från marken. I programmet sker en rätlinjig interpolation mellan dessa 10-dagars värden. Klimatdata är valda så att de 3 första åren i simuleringen motsvarar ett normalår och det fjärde året ett extremår. Energiuttaget är konstant över samtliga år vid basuttag men varierar vid toppeffektuttag på ett sätt som framgår av kapitel 3.

2.2 Verifiering av datormodell

Verifiering av datormodellen har skett med hjälp av mätdata från två fullskaleprojekt, Surte utanför Göteborg samt Sandhed, Orsa.

Surte

I Surte värms 88 enfamiljshus med värmepump. Till varje hus är anslutet ca 300 m PEL-slang, \varnothing 40 mm, som är förlagd i lera. Avståndet mellan slangarna är ca 1.5 m och förlägningsdjup ca 0.75 m. Årsuttaget av energi från marken är ca 20 kWh/m^2 . Uppmätt lufttemperatur, energiuttag från markslinga, snödjup samt värmeöverförande egenskaper i leran har använts vid simuleringarna. I figur 2.1 visad köldbärartemperatur, dels uppmätt och dels simulerad. De simulerade köldbärartemperaturerna skall sänkas med $1-1.5^\circ\text{C}$ för att kunna jämföras med den uppmätta på grund av att värmepumpen går intermittent. Den mätta kurvan stämmer tämligen väl överens med de simulerade där randvillkoren vid den övre randen varit lufttemperaturen eller marktemperaturen 2 cm under markytan. Det är under sommarmånaderna som det största felet uppstår. Detta beror sannolikt på solinstrålningen som programmet inte tar hänsyn till.



Figur 2.1 Uppmätt och simulerad köldbärartemperatur för en villavärmepump i Surte, Göteborg. Jordart: lera. Uppmätt utgående köldbärartemperatur samt temperaturfall över förångare är tidsmedelvärden under drift.

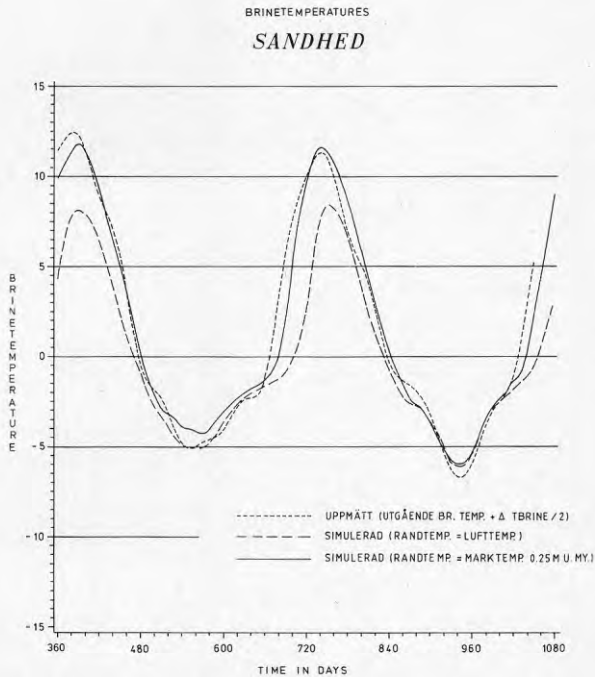
Sandhed

I Sandhed värms 22 hus av 19 värmepumpar. Varje värmepump är ansluten till en ca 400 m PEL-slang, \emptyset 40 mm, som är förlagd i en mellansand. Avståndet mellan slangarna är ca 1.5 m. Slangdjupet varierar mycket inom området men valt jämförelseobjekt har slang- en förlagd på ca 0.85 m under markytan. Grundvattenytan ligger under slangarna i detta fall. De värmeöverförande parametrarna har bestämts med hänsyn till provtagningar och fukthaltsmätningar som gjorts kring slangarna. Flera av de i simuleringen ingående variablerna varierar både i rum och tid på ett sätt som inte kun- nat tas hänsyn till i simuleringarna. Slangnivå och avstånd mel- lan slangarna varierar längs slangen. Vattenhalten varierar kraf- tigt under året och under sista året utsattes snötäcket för upp- repade varmperioder då snön smälte varför uppskattningen av vär- memotståndet över snötäcket har varit osäkert speciellt detta år. Indata är därför mera osäkra än i Surtefallet. Årsuttaget av energi från mark har varit ca 20 kWh/m^2 för båda åren. I figur 2.2 visas dels den uppmätta och dels de simulerade köldbärartem- peraturerna. Med hänsyn till värmepumpens gångtid bör den uppmät- ta köldbärartemperaturen vara ca $1\text{-}1.5^{\circ}\text{C}$ lägre på sommaren och ca $0.5\text{-}1.5^{\circ}\text{C}$ lägre på vintern i jämförelse med simulerad köldbä- rartemperatur. En tämligen god överensstämmelse har uppnåtts, förutom på sommaren, då lufttemperaturen använts som randvillkor. Missanpassningen sommartid då lufttemperaturen använts som rand- villkor beror sannolikt på solinstrålning samt på en förhöjd vär- mekonduktivitet i marken under vårperioden. När mätt marktempera- tur, 25 cm under markytan, används som randvillkor erhålls en bättre anpassning. Som jämförelse kan nämnas att vid simulering utan effektuttag blir aldrig temperaturen på slangnivå lägre än ca $+1^{\circ}\text{C}$.

Modellen förefaller kunna beräkna den lägsta köldbärartempera- ren tämligen bra. Köldbärartemperaturen under sommaren underskat- tas dock av modellen, sannolikt på grund av att solinstrålningen ej finns medtagen i datormodellen. Den minsta köldbärartempera- ren (som redovisas i dimensioneringsdiagrammen) som beräknats av modellen kan vid höga energiuttag eventuellt vara lägre än den som kan påräknas i ett verkligt fall. Detta på grund av att åter- ställningen av marktemperaturen under sommaren är effektivare i

verkligheten än i modellen. Utstrålningen som sker under höst och vinter motverkar dock detta fel.

Observera att uppmätt köldbärartemperatur i verkligheten har fullt märkbara dygnsvariationer. Detta framgår inte av figurerna 2.1 och 2.2 på grund av att kurvan för uppmätt köldbärartemperatur baseras på valda representativa uppmätta temperaturer vid vissa tidpunkter.



Figur 2.2 Uppmätt och simulerad köldbärartemperatur för en villavärmepump i Sandhed, Orsa. Jordart: mellansand. Uppmätt utgående köldbärartemperatur samt temperaturfall över förångare är tidsmedelvärden under drift.

3 INDATA TILL DATORSIMULERINGARNA

3.1 Klimatdata

Beräkningarna har utförts med klimatdata från 3 olika orter:

Luleå
Uppsala
Kristianstad

Ett normalår och ett extremår har valts för varje ort. De 10-dagars medelvärden för lufttemperatur och snödjup som använts visas i figur 3.1 och figur 3.2. Utifrån snödjup har sedan ett värmeövergångsmotstånd beräknats vid markytan, se figur 3.3. (Motsvarande klimatdata har använts av Per-Erik Jansson och Lars-Christer Lundin i den rapport som heter "Fysikaliska effekter av yttjordvärmeuttag", BFR-rapport R50:1984.) I tabell 3.1 framgår vilka år som är valda som simuleringsår för de olika orterna, graddagar beräknade på olika sätt samt årsmedellufttemperaturen.

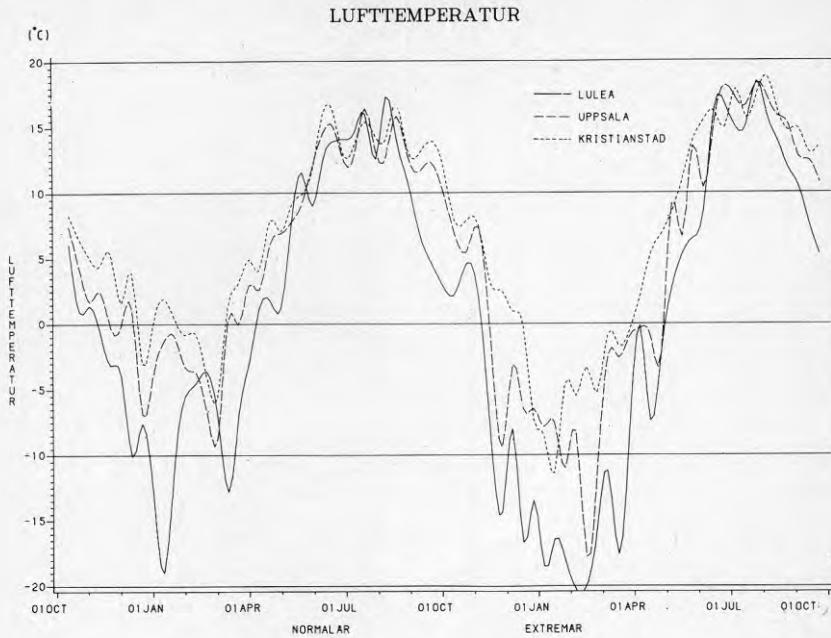
3.2 Belastningskaraktistik

Arsenergiuttaget från marken har fördelats på 2 sätt, som i rapporten kallas:

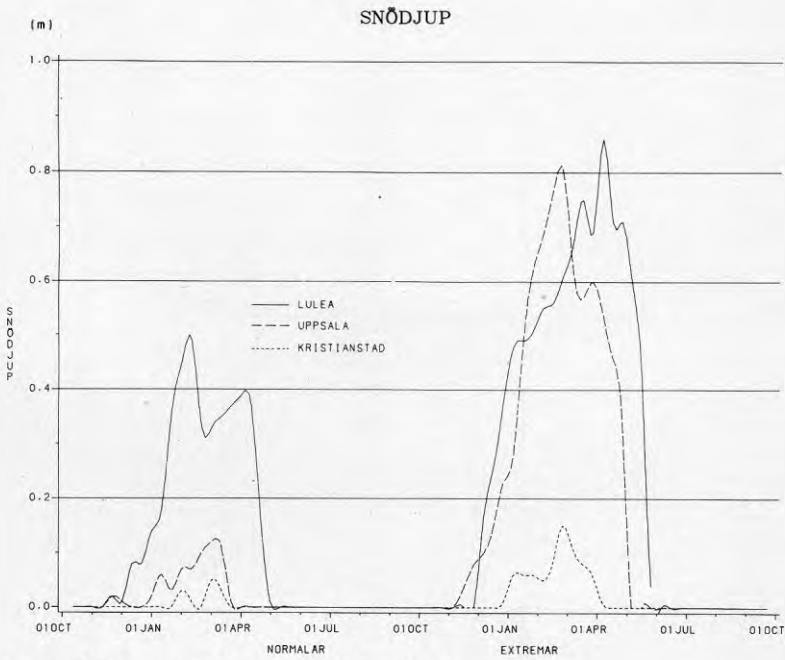
Toppeffektuttag (Topp)
Baseffektuttag (Bas)

Toppeffektuttaget baseras i huvudsak på en beräkning av graddagar för normalåret respektive extremåret. Baseffektuttaget är ett konstant effektuttag över alla år inklusive extremåret. I det följande redogörs för hur toppeffektuttaget är konstruerat och hur det används för att beräkna maximal effekt som under normalår respektive extremår tas ur markslingan. Den beräknade effekten kan sedan behöva korrigeras med hänsyn till värmepumpens driftsätt. Denna korrigering tas upp i kapitel 4.

För att kunna beräkna hur köldbärartemperatur m m som beror av ett visst årligt energiuttag måste en fördelningsfunktion för energiuttaget uppskattas. Den fördelningsfunktion som använts



Figur 3.1 Lufttemperatur för valda år som använts vid datorsimuleringarna.



Figur 3.2 Snödjup för valda simuleringsår.

baseras på följande antaganden. Uppvärmning sker då lufttemperaturen underskrider $+14^{\circ}\text{C}$. Tappvarmvattenbehovet antas vara 10% av årsuppvärmningsenergin i Luleå, 12.5% i Uppsala och 15% i Kristianstad.

I tabell 3.1 visas graddagar för normalår och extremår för orterna. I tabellen visas också som jämförelse Byggnadsstyrelsens beräkning av antalet graddagar för normal- och extremår samt ett medelår.

Tabell 3.1 Graddagar för Luleå, Uppsala och Kristianstad.

Ar	Valt normalår			Ar	Valt extremår		D/A	Medelår för Luft- 61/62-78/79 medel- Graddagar temp.		
	A Grad- dagar (enl.1)	B Tilläggs- energi (enl.2)	C Grad- dagar (enl.3)		D Grad- dagar (enl.1)	E Grad- dagar (enl.3)		(enl.3)	$^{\circ}\text{C}$	
Luleå	75/76	4611	461	5268	65/66	5701	6367	1.24	5450	2.0
Uppsala	64/65	3256	407	3663*	65/66	3963	4102*	1.22	4032	5.7
Kristianstad	64/65	2627	394	3152**	62/63	3036	3624**	1.16	3251	7.7

* Gäller Stockholm

** Gäller Malmö

- (1) Graddagar räknade för dagar kallare än $+14^{\circ}\text{C}$
- (2) Tilläggsenergin proportionerad som 10% av A för Luleå, 12.5% av A för Uppsala och 15% av A för Kristianstad.
- (3) Graddagar räknas för dagar kallare än $+17^{\circ}\text{C}$ dagar förutom följande månader:
oktober $+13^{\circ}\text{C}$, april och september $+12^{\circ}\text{C}$, augusti $+11^{\circ}\text{C}$ samt maj, juni och juli $+10^{\circ}\text{C}$ (beräkning enligt Byggnadsstyrelsen).

Tappvarmvattenförbrukningen antas vidare vara konstant över året. Summan av energin till uppvärmning och tappvarmvatten för 10-dagars medelvärden bildar en fördelningskurva över energiuttaget över året. Dessa kurvor för de olika orterna kan normeras så att energiuttaget över året - ytan under kurvan - blir densamma för alla orterna. Dessa kurvor visas i figur 3.4. Ytan under fördelningskurvan för normalåret blir 1 kWh för alla orterna. Under extremåret ger det kallare klimatet flera graddagar. Fördelningen av energiuttaget under extremåret är normerad med normalåret som bas och ytan under fördelningskurvan för extremåret blir därför ca 1.2 kWh (jämför D/A i tabell 3.1).

Som framgår av figur 3.4 är toppeffekten i förhållande till energiuttaget relativt lika för orterna. Det innebär att det maximala effektuttaget i topplasten kan beräknas genom enkel multiplikation av det årliga energiuttaget per m^2 med ca 0.3 vid toppeffektuttag och med ca 0.12 vid baseffektuttag. Maximala toppeffektuttaget är således $0.3/0.12 \approx 2.5$ ggr större än baseffektuttaget (nämnare och täljare kan utläsas ur figur 3.4). Det maximala effektuttaget under året erhålls då som W/m^2 . Detta värde måste sedan räknas om med hänsyn till aktuellt avstånd mellan slangar för att erhålla W/m slang.

Simuleringsåret har valts från 1 oktober till 30 september för att kunna se hur marksystemet återhämtar sig över sommarperioden.

3.3 Jordtyper

Vid simuleringarna har 9 olika jordprofiler använts. Varje jordprofil är homogen med avseende på de värmeöverförande egenskaperna. Dessa är valda så att de extremfall som kan tänkas förekomma täcks in. För Luleå är simuleringar gjorda för alla jordarter. Eftersom den mest avgörande faktorn för köldbärartemperaturen är vattenhalten har antalet jordarter reducerats till 5 för Uppsala och Kristianstad. Med hjälp av diagrammen över Luleå kan en uppskattning göras av hur mycket köldbärartemperaturen förskjuts för de övriga 4 jordarterna med klimat som Uppsala resp Kristianstad. Tabell 3.2 visar jordarterna som använts i simuleringarna.

En och samma fryspunktsnedsättning har ansatts för alla jordarter. Vattnet antas börja frysa vid 0°C och vara helt fruset vid -1°C . I grövre jordarter fryser det mesta av vattnet innan -1°C och i finkorniga jordarter såsom lera kan 10-20% (volymprocent) av vattnet vara ofruset vid -1°C . Detta medför att köldbärartemperaturerna i beräkningarna blir något för låga för grovkorniga jordarter och något för höga för finkorniga jordarter. Skillnaden är tämligen liten och har ringa betydelse för att bedöma vilket energiuttag/ m^2 som är lämpligt.

Tabell 3.2 Värmeöverförande egenskaper för de 9 olika jordarna som använts vid datorsimuleringarna. Index + och - står för egenskaper i ofruset resp fruset tillstånd.

Jord- typ	λ^+ $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$	λ^- $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$	C^+ $\text{J/m}^3^{\circ}\text{C}$ $\times 10^6$	C^- $\text{J/m}^3^{\circ}\text{C}$ $\times 10^6$	L J/m^3 $\times 10^8$	ρ_d kg/m^3	Sr %	Kommentar
1	0.5	2.0	4.0	2.0	3.2	-	-	
2	0.9	2.4	3.5	2.0	2.2	800	100	Kvartsfattig
3	0.55	0.7	1.4	1.1	0.3	1300	20	Kvartsfattig
4	1.25	2.6	3.1	2.0	1.7	1300	100	Kvartsfattig
5	0.7	0.9	1.4	1.1	0.3	1300	20	Kvartsrik
9	1.25	2.0	2.0	1.4	0.85	1300	50	Kvartsrik
6	1.7	3.6	3.1	2.0	1.7	1300	100	Kvartsrik
7	1.2	1.2	1.6	1.4	0.2	1800	20	Kvartsrik
8	2.7	4.3	2.6	2.0	1.1	1800	100	Kvartsrik

Vanligtvis är inte en markprofil homogen utan fysikaliska egenskaper varierar både i vertikalled och i horisontalplanet. Sedi- ment såsom lera, silt- och sandavlagringar har vanligen en horisontell skiktning och de fysikaliska egenskaperna varierar främst i vertikalled. Lerans värmeöverförande egenskaper kan förväntas variera mindre än för övriga jordarter på grund av att leran vanligen har en ringa kvartshalt och en hög vattenhalt. För sand och silt varierar kvartshalten mera och framför allt kan vattenhalten variera mycket. Därför har fler jordarter (jord 3-9) valts som kan tänkas representera olika förhållanden i sand och silt. En teoretisk modell utvecklad av Ø Johansen jämte egna er-

farenheter har använts för att erhålla värmekonduktiviteten (λ) och värmekapaciteten (c) i tabell 3.2. Torrdensitet, mineralsammansättning och vattenmättnadsgrad har därvid varit utgångsvärden.

Nedan kommenteras vilken verklig jordart som jord 1-9 kan tänkas representera. Dessa kommentarer skall ses som en orientering. Vid dimensionering bör den aktuella jordartens värmeöverförande egenskaper bestämmas för att man sedan skall kunna bedöma vilken eller vilka av jordarna 1-9 som skall användas som underlag till dimensioneringen. I en kommande JVG-rapport "Värmeöverförande egenskaper i jord" av J. Sundberg kan dessa egenskaper bestämmas ur diagram för olika jordar.

Torv

Jord 1 kan representera helt mättade organiska jordarter som i det närmaste bara innehåller vatten.

Lera

Jord 2 representerar en lera med relativt låg densitet och därmed hög vattenhalt. Jord 4 liknar mera en torrskorpelera. (Lera, vanligen vid markyta och någon eller några meter ned, kan ha en högre densitet, sprickighet och högre hållfasthet på grund av påverkan av klimat och vegetation. Denna lera brukar benämnas torrskorpelera.) En moränlera har vanligen en högre densitet och innehåller grövre fraktioner än en glaciälera. Jord 4 och ett mellanling mellan jord 4 och jord 8 kan därför representera en moränlera. Skillnaden i lägsta köldbärartemperatur mellan jord 4 och jord 2 är liten, varför jord 2 i de flesta fall torde kunna representera en lerjord.

Silt

Siltiga jordarters vattenhållningsförmåga är tämligen god och de har vanligtvis en högre densitet samt innehåller mer kvarts än lerorna.

Jord 4 repr. löst lagrad, kvartsfattig, vattenmättad silt.

Jord 9 repr. löst lagrad, kvartsrik, fuktig silt.

Jord 6 repr. löst lagrad, kvartsrik, vattenmättad silt.

Jord 8 repr. fast lagrad, kvartsrik, vattenmättad silt.

Sand

Sandiga jordarter har en mycket varierad vattenhållningsförmåga. Detta kommenteras mera nedan. Kvantshalt och densitet kan också variera tämligen mycket.

Jord 3 repr. löst lagrad, kvartsfattig, torr sand.

Jord 4 repr. löst lagrad, kvartsfattig, vattenmättad sand.

Jord 5 repr. löst lagrad, kvartsrik, torr sand.

Jord 9 repr. löst lagrad, kvartsrik, fuktig sand.

Jord 6 repr. löst lagrad, kvartsrik, vattenmättad sand.

Jord 7 repr. fast lagrad, kvartsrik, torr sand.

Jord 8 repr. fast lagrad, kvartsrik, vattenmättad sand.

Morän

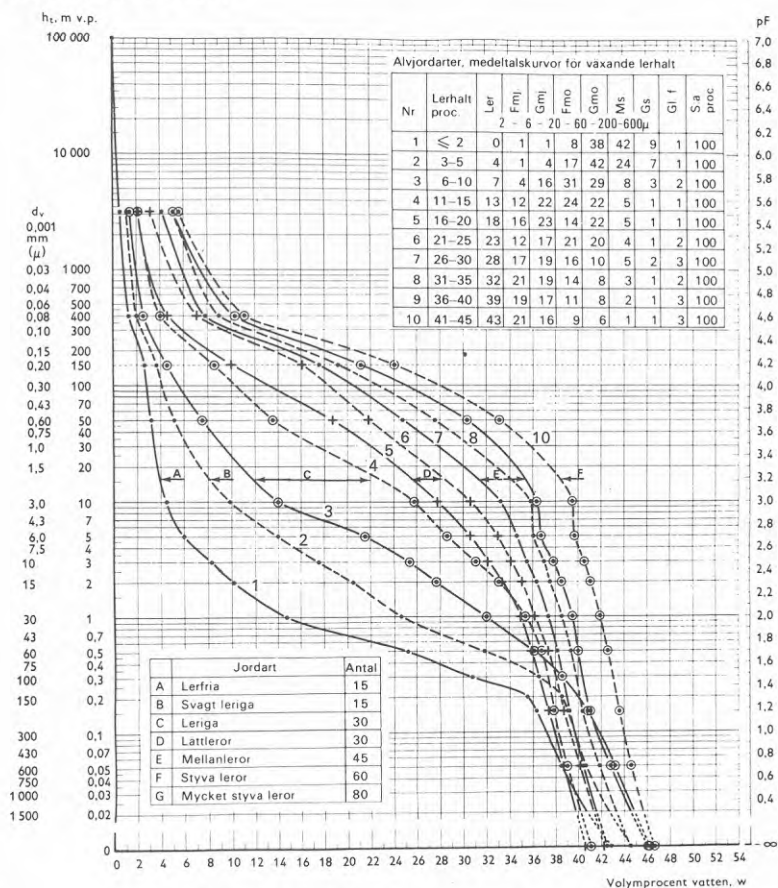
Morän kan variera mycket med avseende på kornfördelning och mineralsammansättning. Detta påverkar både vattenhållande egenskaper och värmekonduktiviteten för mineralpartiklarna. Vanligtvis håller dock moränen vatten bättre än sand. Detta betyder att om extremfallen av morän beaktas kan jord 2-9 vara tillämpliga. Om inte moränen är alltför grovkornig torde dock jord 4, 9, 6 och 8 kunna användas. Det bör poängteras att kvartsrika moräner knappast förekommer, varför köldbärartemperaturen normalt torde bli någon eller några grader under vad diagrammen för jord 9, 6 och 8 visar (se Luleå, jord 4 och 6).

Vattenhaltsvariation

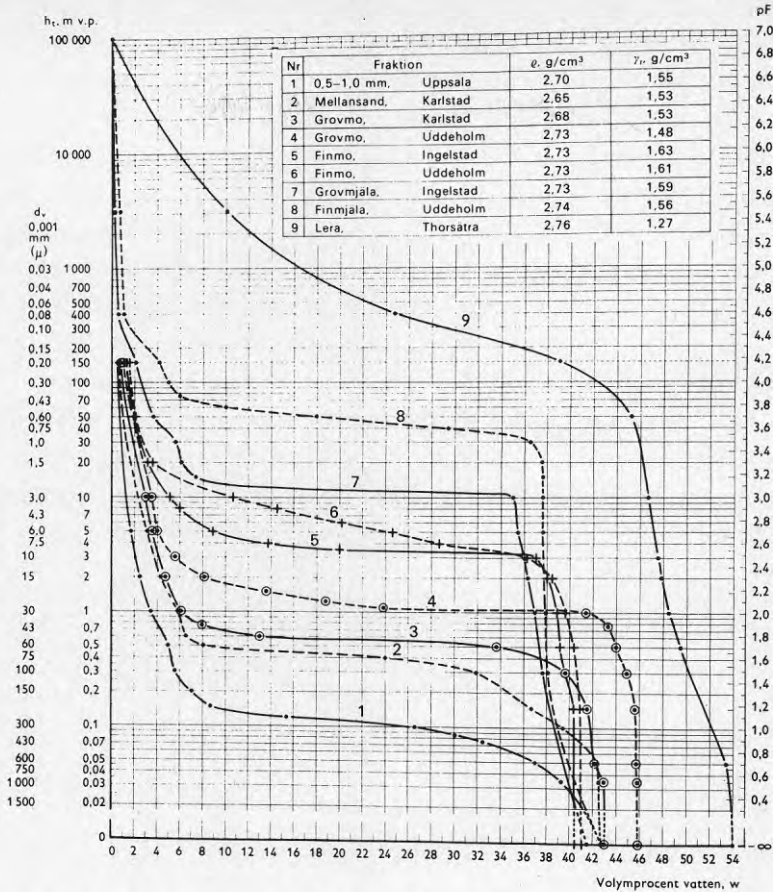
Som framgår av texten nedan kan vattenhalten variera betydligt i vertikal led i en markprofil. Detta gäller framför allt sand och grövre jordarter men även silt, morän och torv. I kapitel 5 kommenteras några jordprofiler för att belysa vilken influens en icke homogen lagerföljd får. Exempelen som behandlas är markprofil med en grundvattenyta under slangnivå i en för övrigt relativt torr sand samt en torv med en torr överyta.

Vilken vattenhalt som råder i en markprofil beror framför allt av var grundvattenytan finns i profilen samt av kornstorleksfördelningen på olika nivåer i markprofilen. Under stationära förhållanden då ingen vattentransport äger rum i en jordprofil inställer sig en jämviktstvattenhalt på varje nivå över en grundvattenyta. Den vattenhalt som erhålls på en viss nivå beror av avstånd

till grundvattenyta och kornstorleksfördelning på denna nivå. Vattenhalterna i en homogen jordprofil under stationära förhållanden kan åskådliggöras enligt figur 3.5. Denna figur baseras på ett stort antal mätningar, som redovisas av Andersson och Wiklert (1972). h_t i figur 3.5 motsvaras av avståndet till grundvattenyta. I denna figur framgår dock inte hur en mer ensgraderad sand beter sig. Detta framgår bättre ur figur 3.6. Ur figurerna kan utläsas att grovkorniga jordarter tappar mycket av sitt vatteninnehåll inom ett relativt litet avstånd från grundvattenytan, vilket kan göra det svårt att uppskatta en jordarts vattenhalt. Under naturliga förhållanden kan de jämviktsvattenhalter som uppvisas i figur 3.5 och 3.6 både över- och underskridas. En högre vattenhalt kan erhållas på grund av att regn infiltrerar och perkolerar ner i markprofilen, en lägre på grund av växtlighetens evapotranspiration.



Figur 3.5 Vattenhållningskurvor för alvjordarter. Medeltalskurvor för växande lerhalt (från Andersson och Wiklert, 1972).



Figur 3.6 Vattenhållningskurvor för ensgraderade jordarter (från Andersson och Wiklert, 1972).

3.4 Slangförläggning

Nivå under markytan och avstånd mellan jordvärmeslangarna har varierats enligt följande (se också figur 3.7):

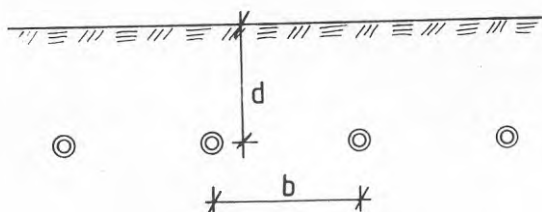
Slangförläggning vid topp-effektuttag:

- Djup under markyta (d) 0.6 m 1.4 m
- Avstånd mellan slangar (b) 0.7 m, 1.0 m, 1.5 m och ensam slang (solitär)

Slangförläggning vid baseffektuttag:

- Djup under markyta (d) 0.9 m
- Avstånd mellan slangar (b) 1.0 m

I beräkningarna har solitär slang (ensam slang) ett avstånd på 10 m till närmaste vertikala rand. Beroende av avstånd mellan slangar och effektuttag kommer slangarnas inbördes influens att variera. Detta medför att vad som kan betraktas som en solitär slang också varierar. Detta har inte analyserats i detalj men grova riktvärden är att i jordar med låg värmekonduktivitet och värmekapacitet (såsom jord 3, 5 och 7) bör slangarna ligga på ett avstånd av ca 3 m vid lågt energiuttag (enligt dimensioneringsdiagram) och ca 5 m vid högt energiuttag för att kunna betraktas som solitära slangar. I jordar med hög värmekonduktivitet och värmekapacitet bör slangarna ligga på ett avstånd av ca 5 m vid högt effektuttag för att kunna betraktas som solitärslang. Vid lågt energiuttag (25-50 kWh/m²,år) sammanfaller ofta köldbärartemperaturer för solitär slang och fallet med $b = 1.0$ m, vilket tyder på att influensen mellan slangarna är mycket begränsad vid låga energiuttag.



Figur 3.7 Slangförläggning - beteckningar.

3.5 Slangdimension på ytjordvärmekollektor

En vanligt förekommande slangdimension har valts vid datorberäkningar. Slangens ytterdiameter är 40 mm och ansatt totalt värmemotstånd för slang (övergångsmotstånd (köldbärare - slangvägg, slangvägg - jord) + värmemotstånd i slangvägg) är 0.06 m⁰C/W (0.0075 m²⁰C/W). Skall annan slangdiameter användas och/eller annat värmemotstånd anses gälla, kan köldbärartemperatur avläst i dimensioneringsdiagram relativt enkelt korrigeras. Hur detta kan göras beskrivs i kapitel 4.

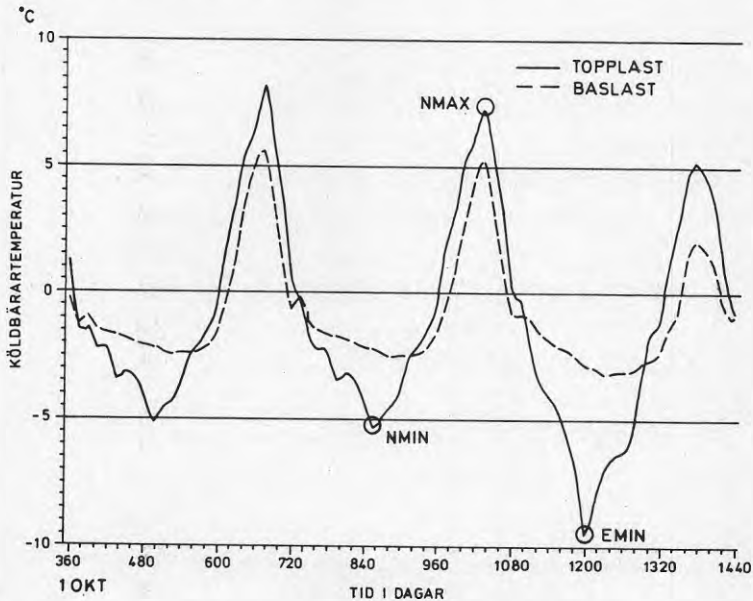
4 HANDHAVANDE AV DIMENSIONERINGSDIAGRAM

4.1 Beskrivning av dimensioneringsdiagrammens uppbyggnad

Sammanlagt finns det 53 diagram i denna rapport. De representerar

- * 3 olika klimat i Sverige
- * 9 olika typjordarter
- * 2 olika slangförläggingsdjup (1 vid baseffektuttag)
- * 4 olika avstånd mellan slangar (1 vid baseffektuttag)
- * över året varierat effektuttag ("toppeffektuttag") eller över året konstant effektuttag ("baseffektuttag")

Simuleringarna har utförts med tre på varandra följande normalår och därefter ett extremår.



Figur 4.1 Köldbärartemperaturens variation från oktober tredje normalåret till oktober för extremåret för ett exempel på topp- respektive baslast. Energiuttag/m² och år är samma för båda fallen.
 NMAX: MAX KÖLDBÄRARTEMPERATUR för tredje normalåret
 NMIN: MIN KÖLDBÄRARTEMPERATUR för tredje normalåret
 EMIN: MIN KÖLDBÄRARTEMPERATUR för extremåret

Dimensioneringsdiagrammen visar vilken lägsta (NMIN), högsta (NMAX) samt medelköldbärartemperatur (VMED) för tredje normalåret

samt lägsta köldbärartemperatur (EMIN) för extremåret, som kan påräknas vid olika energiuttag per m^2 markyta vid given slangdimension. I figur 4.1 visas hur köldbärartemperaturen varierar för ett specifikt energiuttag. I denna figur finns markerat minsta köldbärartemperatur under tredje normalåret respektive extremåret samt den högsta köldbärartemperaturen under normalår. Medelköldbärartemperaturen baseras på köldbärartemperaturen under de tre normalåren och extremåret är viktad med hänsyn till energiuttaget, vilket ger en möjlighet att uppskatta årsvärmefaktorn för värmepumpen. Nedan beskrivs hur indata väljs för att kunna göra en dimensionering samt hur dimensioneringsdiagrammen används.

4.2 Val av ingångsdata

Följande indata är nödvändiga för att kunna använda dimensioneringsdiagrammen:

Årligt energibehov

Maximalt effektbehov

Värmepump: värmeeffekt och värmefaktor i förhållande till köldbärartemperatur och värmebärartemperatur (framledningstemperatur)
driftsätt av värmepump
slangdimension på jordvärmekollektor

Klimat: luftens årsmedeltemperatur
snötäckning på markytan där jordvärmeslang skall förläggas

Jordart: värmekonduktivitet (λ) W/m^0C
värmekapacitet (C) J/m^3^0C
latent värme (L) J/m^3

Nedan kommenteras ovanstående punkter.

Energi- och effektbehov

För att kunna bedöma vilken energi och effekt som skall tas ur ytjordvärmekollektorn måste dels fastighetens årsenergibehov, effektbehov, framlednings- och returtemperatur vara kända, dels värmepumpens prestanda. För att tillgodose en vald maximal effekt

från värmepumpen får inte köldbärartemperaturen underskrida en viss temperatur.

I dimensioneringsdiagrammen finns 2 fördelningar av årsenergin. Den ena är ett konstant effektuttag över året ("baseeffektuttag") och den andra fördelar effektuttaget främst med hänsyn till utelufttemperaturen ("toppeffektuttag"). Hur värmepumpen appliceras i ett energisystem avgör vilken belastningskaraktäristik som kan förväntas på ytjordvärmekollektorn. Detta avgör om diagram för baseeffektuttag, toppeffektuttag eller en kombination av båda skall användas för att få en korrekt dimensionering.

Den köldbärartemperatur som erhålls från dimensioneringsdiagrammet kan behöva justeras på grund av att värmepumpens effektuttag inte är lika som vid datorsimuleringarna. Datorsimuleringarna motsvaras av en kapacitetsreglerad värmepump som går kontinuerligt. Effektuttaget i modellen styrs av en normerad varaktighetskurva som baseras på 10-dagarsmedelvärden. Den maximala effekt som enligt dimensioneringsdiagrammet kan tas från ytjordvärmekollektorn (som enkelt kan beräknas med hänsyn till årligt energiuttag/m² slanglängd och avstånd mellan slangar) måste jämföras med den maximala effekt som värmepumpen skall tillgodose. Avviker den senare från den beräknade kan en korrigering uppåt eller nedåt av köldbärartemperaturen beräknas. I allmänhet torde korrigeringarna bli små om det är fråga om uppvärmning av hus och värmepumpen bara skall täcka effektbehovet helt eller nästan helt.

Slangdimension

Ytjordvärmekollektorns slangdimension är 40 mm i ytterdiameter samt övergångsmotstånd + värmemotstånd i slang är satta till 0.06 m⁰C/W. Korrigering för annan slangdimension och/eller annat övergångsmotstånd kan relativt enkelt göras, se kapitel 4.4.2.

Klimat

I beräkningarna har använts tre olika orter som i stort kan anses täcka klimatvariationerna i Sverige med avseende på lufttemperatur och snötäckning. Orterna är Luleå, Uppsala och Kristianstad. Genom att använda uteluftens årsmedeltemperatur för andra orter

kan bedömning göras vilket diagram som skall användas. Ligger uteluftens årsmedeltemperatur för någon ort mellan årsmedeltemperaturen för orterna Luleå och Uppsala eller Uppsala och Kristianstad bör diagrammen för respektive ort kombineras. De avlästa köldbärartemperaturerna från respektive diagram (Luleå-Uppsala eller Uppsala-Kristianstad) bör viktas med hänsyn till hur mycket som den aktuella ortens luftmedeltemperatur avviker från luftmedeltemperaturen i Luleå och Uppsala, alternativt Uppsala och Kristianstad.

Snötäckning har stor betydelse för hur ett ytjordvärmesystem fungerar. Ett snötäcke fungerar för marken som en isolation mot vinterkylan. Ju bättre isolation under vinterhalvåret desto mer energi kan tas från marken. Uppsala och Kristianstad har under normalåret ett ringa snötäcke och därmed är isolationen liten. I Luleå är däremot snödjupet så ansevärt att en påtalig isolering av markytan erhållits. Om ytjordvärmekollektorn skall läggas under en snöröjd yta med klimat som Luleå bör energiuttaget/m² och år sänkas. I kapitel 5 exemplifieras hur mycket köldbärartemperaturen sjunker vid snöröjd markyta.

Jordart

Nio olika jordarter finns representerade i diagrammen. Vilket eller vilka diagram som skall användas beror av vilka värmeöverförande egenskaper den jord har, där ytjordvärmekollektorn skall förläggas. Den mest betydelsefulla parametern för värmeöverföringen är vattenhalten i marken, vilket syns tydligt i dimensioneringsdiagrammen. Hur värmekonduktivitet, värmekapacitet och latent värme kan tas fram redogörs för i en kommande JVG-rapport "Värmeöverförande egenskaper i jord" av J Sundberg.

4.3 Dimensioneringsgång

Syftet med dimensioneringen är att bestämma slanglängd och slangförläggning för ytjordvärmekollektorn med hänsyn till energi- och effektbehov, klimat och jordens värmeöverförande egenskap. Med valt klimat, värmeöverförande egenskaper i jorden samt kännedom om det rör sig om toppeffektuttag eller baseffektuttag kan ett

eller flera diagram väljas ut för dimensioneringen. Som exempel väljs klimat Luleå, jord 9 samt topeffektuttag (figur 4.2) för att visa hur diagrammen används. Följande data är kända:

- E (kWh): Energi/år som skall produceras av värmepump
 Q_1 (W): Max. effekt som skall produceras av värmepump
 (effekt på kondensorsidan)

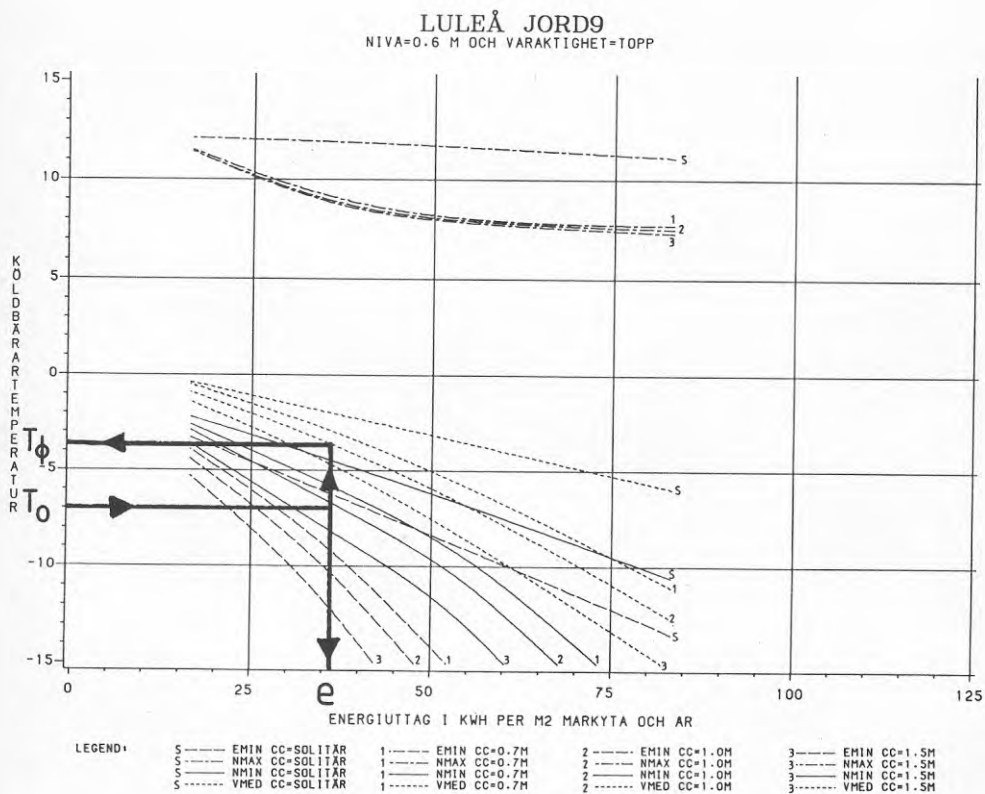
I diagram som visar värmepumpens prestanda med avseende på köldbärar- respektive värmebärartemperatur kan värmefaktor och effekt vid olika köldbärar- och värmebärartemperaturer studeras. Nedanstående variabler används fortsättningsvis i texten.

- Q_0 (W): Max. effekt enligt dimensioneringsdiagram som tas ur kollektorn
 Q_2 (W): Max. effekt från jordvärmekollektorn (effekt på förångarsidan) då Q_1 produceras
 T_{Q1} ($^{\circ}\text{C}$): Värmebärartemperatur då Q_1 avges
 T_{Q2} ($^{\circ}\text{C}$): Lägsta inkommande köldbärartemperatur då värmepumpen kan avge Q_1
 ΔT_F ($^{\circ}\text{C}$): Temperaturdifferens mellan inkommande och utgående köldbärartemperatur
 T_0 ($^{\circ}\text{C}$): Lägsta köldbärartemperatur beräknat som medelvärde av inkommande och utgående köldbärartemperaturer. $T_0 = T_{Q2} - \Delta T_F / 2$.
 T_{ϕ} : Årsmedelköldbärartemperatur
 ϕ_Q : Värmefaktor då Q_1 produceras
 ϕ : Årsvärmefaktor vid T_{ϕ}

Temperaturdifferensen mellan inkommande och utgående köldbärare är vanligen för mindre värmepumpar 2-4 $^{\circ}\text{C}$. Den temperatur som fås från dimensioneringsdiagrammen motsvarar köldbärarens medeltemperatur. Är köldbärartemperaturen för värmepumpens prestanda angiven som inkommande köldbärartemperatur bör därför köldbärarens medeltemperatur beräknas. Den lägsta tillåtna medelköldbärartemperaturen blir då $T_0 = T_{Q2} - 1$ (eller -2).

Med hjälp av T_0 kan nu erforderlig markyta och slanglängd beräknas. I figur 4.2 har kurvan för minimala köldbärartemperaturen för normalåret använts för att bestämma erforderlig markyta. Kur-

van för extremåret kan användas som kontroll för att se vad som kan hända under ett kallt år eller som dimensioneringskurva då värmepumpen skall klara hela energi- och effektbehovet. Antalet graddagar är (enligt kapitel 3) under extremåret ca 20% fler i jämförelse med normalåret. Av detta följer att E är att betrakta som energiförbrukningen under ett normalår.



Figur 4.2 Dimensioneringsdiagram för Luleå, jord 9, slangnivå (d)=0.6 m och toppeffektbelastning.

T_0 ger ett årligt energiuttag/ $m^2 = e$ (kWh/ m^2 år) beroende av valt avstånd (b) mellan slangar. Ligger slangen ensam (b=solitär) erhålls energiuttaget per m slang: e (kWh/m år). (I kapitel 3.4 redogörs kort för vad som kan betraktas som solitär slang.) Me-

delköldbärartemperaturen T_ϕ , som kan utläsas ur dimensioneringsdiagram, och värmepumpsprestanda ger då förväntad årsvärmefaktor ϕ . Erforderlig markyta för kollektorn = A och slanglängd = l blir då

$b=0.7, 1.0$ eller 1.5 blir:

$$A = (E/e) (1 - 1/\phi) \quad (\text{m}^2) \quad (4.3.1)$$

$$l = A/b \quad (\text{m}) \quad (4.3.2)$$

$b=\text{solitär}$:

$$l = (E/e)(1-1/\phi) \quad (\text{m}) \quad (4.3.3)$$

Maximal 10-dygnsmedeleffekt som kan tas ur markkollektorn vid den belastningsvaraktighet som förutsätts i dimensioneringsdiagrammet blir med

$b=0.7, 1.0$ eller 1.5 :

$$Q_0 = l \cdot b \cdot e \cdot K \quad (\text{W}) \quad (4.3.4)$$

$$q_0 = b \cdot e \cdot K \quad (\text{W/m}) \quad (4.3.5)$$

$b=\text{solitär}$:

$$Q_0 = l \cdot e \cdot K \quad (\text{W}) \quad (4.3.6)$$

$$q_0 = e \cdot K \quad (\text{W/m}) \quad (4.3.7)$$

Konstanten K i formeln ovan kan utläsas ur den normerade varaktighetskurvan, figur 3.4. Av figuren framgår att $K \approx 0.3$ för topp-effektuttag och $K \approx 0.12$ för baseeffektuttag. Från ytjordvärmekollektorn skall en effekt av maximalt Q_2 tas ut. Värmepumpsprestanda ger ϕ_Q med hänsyn till T_0 (eller T_{Q2} - se aktuellt diagram).

$$Q_2 = Q_1 (1 - 1/\phi_Q) \quad (\text{W}) \quad (4.3.8)$$

$$q_2 = Q_2/l \quad (\text{W/m}) \quad (4.3.9)$$

Q_0 skall jämföras med Q_2 . Om Q_2 är större än Q_0 skall köldbärartemperaturen korrigeras enligt kapitel 4.4. Är rördiametern större eller mindre än 0.04 m skall korrigering göras enligt kapitel 4.4. Temperaturkorrigeringen blir:

$$T_{0\text{ korr}} = T_0 + \Delta T_T + \Delta T_R \quad (4.3.10)$$

ΔT_R är korrigering på grund av att annan rördiameter än vad som anges för dimensioneringsdiagram och ΔT_T är korrigering för effektpulser.

Om $T_{0\text{ korr}}$ hamnar så lågt under T_0 att inte Q_2 kan tillgodoses, måste årsenergiuttaget/ m^2 minskas och/eller avståndet mellan slangar ändras. Beräkningen upprepas tills Q_2 kan tillgodoses med hänsyn till $T_{0\text{ korr}}$. Om $T_{0\text{ korr}}$ används direkt hamnar beräkningen på säkra sidan. Q_0 blir då större än Q_2 .

Är Q_2 mindre än Q_0 kan energiuttaget ökas på motsvarande sätt. Om $T_{0\text{ korr}}$ används direkt i detta fall blir ökningen för stor och en kontroll av Q_0 krävs.

Används flera diagram för olika orter och/eller jordarter uppskattas e och ϕ för valt b genom lämplig viktning mellan diagrammen.

Om slangdiametern 0.04 m väljs, torde diagrammen för topeffekt för det mesta ge ett tämligen korrekt värde på e . En korrigering för ΔT_T blir vanligen liten. Vid baslastanläggningar kan varaktighetskurvan variera tämligen mycket. Varaktighetskurvan för den baslast som använts i dimensioneringsdiagrammen är extrem så till vida att en sk normal baslastanläggning vanligen har en viss ojämn fördelning av energin under året. Detta innebär att det kan vara lämpligt att utgå från topp- eller baslastdiagrammen beroende av verkligt fall. Kurvorna har vanligen flacka förlopp, vilket underlättar den approximativa uppskattning som ibland är nödvändig att göra mellan diagrammen.

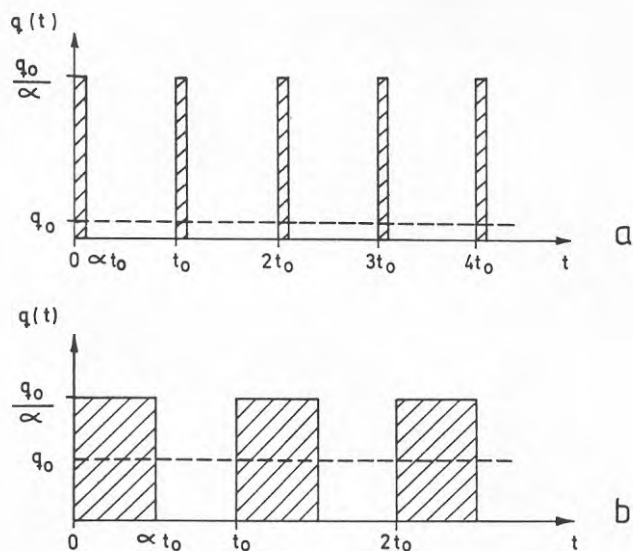
4.4 Justering av köldbärartemperatur

Den i dimensioneringsdiagrammen avlästa köldbärartemperaturen kan behöva justeras om ett kortvarigt effektuttag från jordvärmekollektorn inte motsvaras av det maximala uttaget beräknat ur dimensioneringsdiagrammen. Om rördiametern på ytjordvärmekollektorn skall vara större eller mindre än 0.04 m måste också en korrektion göras av köldbärartemperaturen. Nedan beskrivs hur dessa korrigeringar kan göras.

4.4.1 Justering av köldbärartemperatur vid effektpulser

I de fall där den ur dimensioneringsdiagrammen beräknade maximala effekten inte motsvaras av värmepumpens driftseffekt kan korrigering av köldbärartemperaturen göras analytiskt om effektpulserna är av relativt kort varaktighet. Effektpulsens varaktighet kan t ex bero på att ett maximalt effektuttag skall kunna tillgodoses under en eller ett par dagar.

Värmepumpens driftsätt påverkar också köldbärartemperaturen. Mindre värmepumpar har vanligen ingen effektregering utan värmepumpen går antingen med maximal effekt eller står stilla. Effekten tas därvid ut som ett pulståg. Se figur 4.3a och 4.3b. Under sommarhalvåret kan situationen se ut som figur 4.3a och under vinterhalvåret som fig 4.3b. Medeleffekten är uttryckt som maximala effekten q_0/α och tiden mellan 2 pulser t_0 . Pulsens varaktighet blir då $\alpha \cdot t_0$. Köldbärartemperaturen blir lägre vid intermitt drift i jämförelse med kontinuerlig drift. Köldbärarvätskan i ytjordvärmekollektorn verkar dock utjämnande då köldbäraren tar upp värme så länge den är kallare än sin omgivning. Detta oberoende av om köldbärarvätskan cirkulerar eller ej. Dessa förhållanden torde spela en underordnad roll då den kritiska punkten för dimensionering i allmänhet är då värmepumpen går kontinuerligt eller nära nog kontinuerligt under en viss tid då energi-behovet är som störst och då marken är frusen som mest.



Figur 4.3 Intermittent effektuttag. Medeleffekten q_0 tas ut som ett pulståg med max. effekten q_0/α under tiden αt_0 .

Den analytiska lösningen som är användbar för att beräkna temperatursänkningen på grund av en stegpuls bygger på följande förutsättningar.

- * Marken tänkes oändligt utsträckt åt alla håll vinkelrätt rörets utsträckning
- * Värmeledningens, λ (W/m^0C), värmekapaciteten, c (J/m^3^0C), är konstant i marken. Ingen fasomvandling vatten/is äger rum i marken.
- * Effektuttaget q (W/m) börjar vid tiden $t=0$ och är konstant.

Temperaturen på avståndet r (m) från rörets centrum och vid tiden t (s) ges av

$$T(r,t) = -\frac{q}{4\pi\lambda} \cdot E\left(\frac{r^2}{4at}\right) = \frac{q}{\lambda} \cdot E_t\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad (4.4.1)$$

där $a = \lambda/c$ (m^2/s) är värmediffusivitet. Funktionen $E(x)$ ges av

$$E(x) = \int_x^\infty \frac{1}{s} e^{-s} ds \quad (4.4.2)$$

En approximativ lösning av $E(x)$ ger:

$$E_t(\tau) \approx -\frac{1}{4\pi} (\ln(4\tau) - 0.5772) - \frac{1}{16\pi} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{16\tau^2}\right) \quad (4.4.3)$$

där

$$\tau = \frac{at}{r^2}$$

För $\tau \geq 0.5$ är maximala felet på E_t 1%. E_t kan förenklas ytterligare och då erhålls

$$E_t(\tau) \approx -\frac{1}{4\pi} (\ln(4\tau) - 0.5772) \quad (4.4.4)$$

För $\tau \geq 5$ är maximala felet 2%. Värmediffusiviteten för en torr och frusen jordart med låg värmekonduktivitet är ca $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ och för en vattenmättad jordart med hög värmekonduktivitet är $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ett rimligt värde. (För en ofrusen jord kan värmediffusiviteten variera mellan ca $0.15 \cdot 10^{-6}$ till $1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.) Med hänsyn till $\tau \geq 0.5$ eller $\tau \geq 5$ kan en minsta tid beräknas för vilken lösning på E_t har ett maximalt fel på 1% resp. 2%.

Lösningen ovan gäller dock för en linjekälla och röret där effektuttaget sker har därmed ingen radiell usträckning. Skall $E_t(\tau)$ användas för att beräkna lägsta temperaturen på en verklig röryta bör emellertid τ vara större än vad som angivits ovan. Ekvationen för en linjekälla förutsätter att det finns en värmediffusivitet mellan centrum rör och röryttervägg som är lika med värmediffusiviteten utanför röret. Jämförs lösningen av $E_t(\tau)$ med linjekälla med en lösning där den konstanta effekten q verkar på en viss radie från centrum, dvs då q inte är en linjekälla utan q strömmar in i ett rör, finner man att för $\tau > 20$ blir felet med $E_t(\tau)$ mindre än 2%. Med $\tau = 0.5$ och $r = \text{rörradie}$ blir värdet på $E_t(\tau)$

enligt ekvation 4.4.3 mycket lägre i jämförelse med då effektuttaget appliceras på rörranden r . $\tau=2$ medför att $E_t(\tau)$ blir ca 20% lägre. Som antytts i inledningen av detta avsnitt är det termodynamiska förloppet runt ett rör komplicerat i början då cirkulationen av köldbärarvätskan startar. Det termodynamiska problemet blir i hög grad tredimensionellt för korta varaktigheter på effektuttaget. När temperaturutvecklingen på en röryta skall studeras bör därför inte för korta tider väljas då ekvationerna ovan inte förmår att beskriva förloppet rätt. En god uppskattning torde dock erhållas för $\tau > 20$. Tabellen nedan visar minsta längd på effektpulser som kan studeras vid de angivna rörradierna och $\tau=20$.

		rörradie (m)		
		0.01	0.02	0.04
t_{\min}	för $a = 0.6 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$	55 min	3.7 h	15 h
t_{\min}	för $a = 2.0 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$	17 min	1.1 h	4.4 h

Temperaturpåverkan är mycket liten då $r/\sqrt{at} > 3$. Influensradien, där temperaturpåverkan är liten på grund av effektuttaget q , kan lätt beräknas med ovanstående uttryck.

		tid för effektpuls (h)		
		1	24	120
r	influensradie för $a = 0.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	0.14 m	0.7 m	1.5 m
	" " $a = 2.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	0.25 m	1.2 m	2.8 m

Värmeflödet vid ovanstående influensradier kan uppskattas på följande sätt: Då influensradien beräknats som $r = 3\sqrt{at}$ blir $\tau=1/9$ för alla beräknade influensradier. Temperaturen vid influensradien är efter tiden t

$$T_{r1} = \frac{q}{\lambda} E_t(\tau_{r1}) \quad (4.4.5)$$

och vid den något större radien r_2

$$T_{r2} = \frac{q}{\lambda} E_t(\tau_{r2}) \quad (4.4.6)$$

För värmeflödet (q_r) genom rörsegmentet r_1 till r_2 blir då

$$\begin{aligned} q_r &= -\frac{\lambda}{\Delta r} \cdot A \cdot \Delta T_r = -\frac{\lambda}{r_1 - r_2} \cdot \frac{r_1 + r_2}{2} \cdot 2\pi(T_{r1} - T_{r2}) \quad (4.4.7) \\ &= \pi \cdot q \cdot \frac{(r_1 + r_2)}{(r_1 - r_2)} (E_t(\tau_{r1}) - E_t(\tau_{r2})) \end{aligned}$$

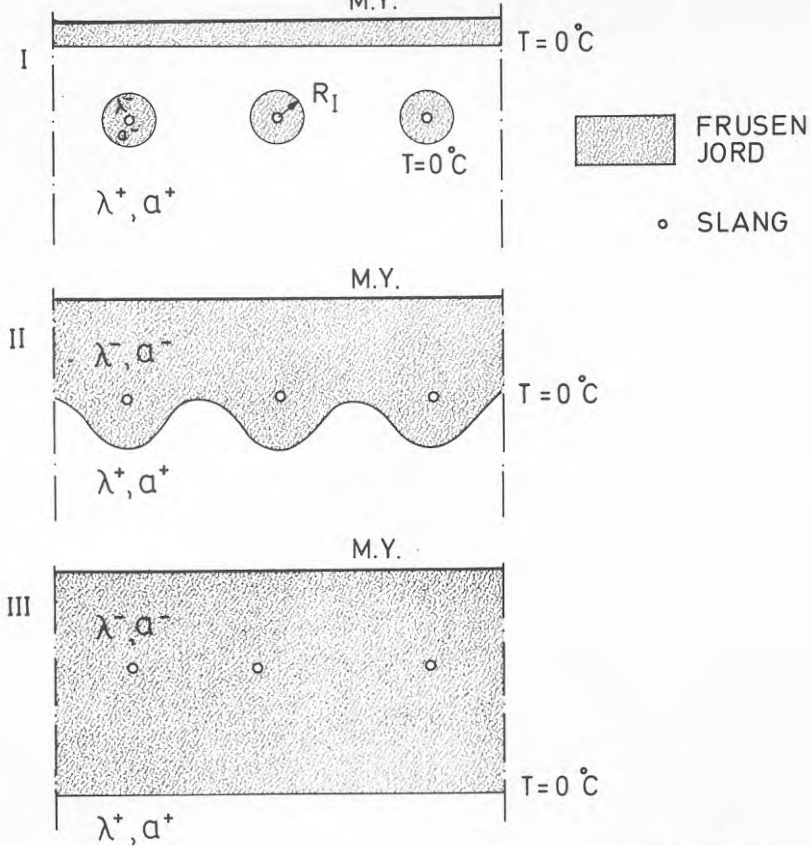
sätt $r_2 = r_1 \cdot 1.1$

$$q_r \approx \pi \cdot q \cdot \left(\frac{2.1}{-0.1}\right) \left(\frac{1}{4\pi} \cdot (3.7 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2})\right) \quad (4.4.8)$$

$$\frac{q_r}{q} \approx 0.09$$

Vid influensradien är alltså värmeflödet ca 10% av totala värmeflödet (effektuttaget). Är villkoren för den analytiska lösningen uppfyllda innanför influensradien men ej utanför torde den analytiska lösningen dock ge en tämligen god uppskattning av lägsta köldbärartemperatur då värmeflödet är begränsat vid influensradien (som den är definierad ovan). (Observera att E_t i ekvation 4.4.7 måste lösas med en noggrannare ekvation än 4.4.3 då $\tau < 0.5$.)

Effektuttaget är i allmänhet störst under vinterhalvåret och då är också marken i allmänhet frusen. I figur 4.4 visas 3 olika schematiska bilder av ett vertikalsnitt genom en ytjordvärmekollektor. Bild I-III kan dels representera markens tillstånd under höst, vinter resp. vår-vinter, dels den maximala frysningen vid lågt, mellan resp. högt energiuttag. Vid normal dimensionering torde markens frusna zon under januari-mars ha en utbredning som liknar II eller III i figur 4.4. Speciellt för fall III torde den analytiska lösningen ge en tillräckligt god uppskattning av temperatursänkningen på grund av en effektpuls.



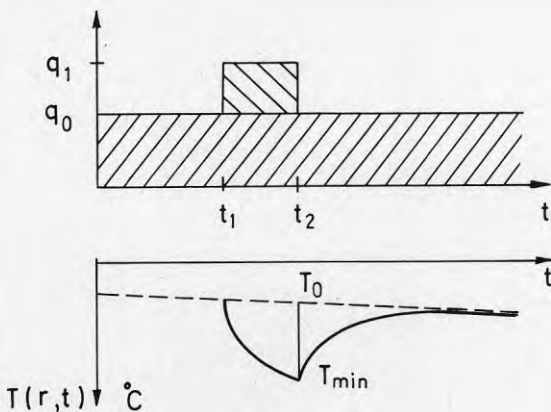
Figur 4.4 Nollisotermens läge i ett vertikalsnitt vinkelrät yttjordvärmslangens utsträckning. Hur mycket av ett marksnitt som är fruset beror av jordart, energiuttag och klimat samt när under året vertikalsnittet studeras. Bild I-III kan dels representera markens tillstånd under höst, vinter resp. vår-vinter, dels den maximala frysningen vid lågt, mellan resp. högt energiuttag.

För fall I blir temperatursänkning mindre eller t o m avsevärt mindre om R_I (radien på den frusna zonen runt slangen) är mindre än influensradien. Detta beror av att vid radien R_I ($=0^\circ\text{C}$ isotherm) kan relativt stora energimängder frigöras genom fasomvandling (frysning av vatten i marken). När temperaturutbredning på grund av en effektpuls når R_I bromsas denna temperaturutbredning upp på grund av fasomvandlingen. Därmed bromsas också sänkningen av köldbärartemperaturen upp. Detta innebär att om temperatursänkningen på grund av en effektpuls beräknas med antagande att

fall III, figur 4.4, råder så ligger beräkningen på den säkra sidan.

Under kapitel 6 visas några exempel på marktemperaturens förändring under tredje normalåret och extremåret längs en vertikal linje genom slang. Ur dessa figurer kan utläsas nollisotermens ungefärliga läge under slang. Av dessa figurer framgår att vid låga effektuttag och vid vattenmättade jordarter är det längsta avståndet mellan slang och nollisoterm relativt kort. Situationen liknar fall II i figur 4.4. Även för ett relativt stort energiuttag är situationen liknande den i fall II, figur 4.4, då ett mildare klimat råder såsom för Uppsala och Kristianstad. Det medför att temperatursänkningen på grund av en effektpuls (beräknad med ekv 4.4.9) överskattas om influensradien (beräknad enligt ovan) överskrider avståndet mellan slang och nollisoterm.

Genom att utnyttja superposition kan temperaturutveckling på ett visst avstånd r adderas för olika effektuttag som skall adderas. Betrakta figur 4.5. Effekten antas öka momentant med $(q_2 - q_0)$ under en tid $(t_2 - t_1) = t_0$. Den lägsta temperaturen på avståndet r som effekttökningen $(q_2 - q_0)$ orsakar blir ΔT_T . Denna temperatursänkning skall adderas till den aktuella köldbärartemperatur som orsakats av q_0 . Lägsta köldbärartemperatur blir således $T_{\min} = T_0 + \Delta T_T$.



Figur 4.5 Superposition av effektpulser.

Enligt ovan kan temperatursänkningen vid en effektpuls beräknas med följande formel.

$$\Delta T_T = q_2 - q_0 \left(\frac{1}{\lambda} E_t \left(\frac{r^2}{4at_0} \right) - m_0 \right) \quad (4.4.9)$$

där m_0 är värmemotståndet från yttersida slang till köldbäraren. I detta fall är r =radie på jordvärmeslang.

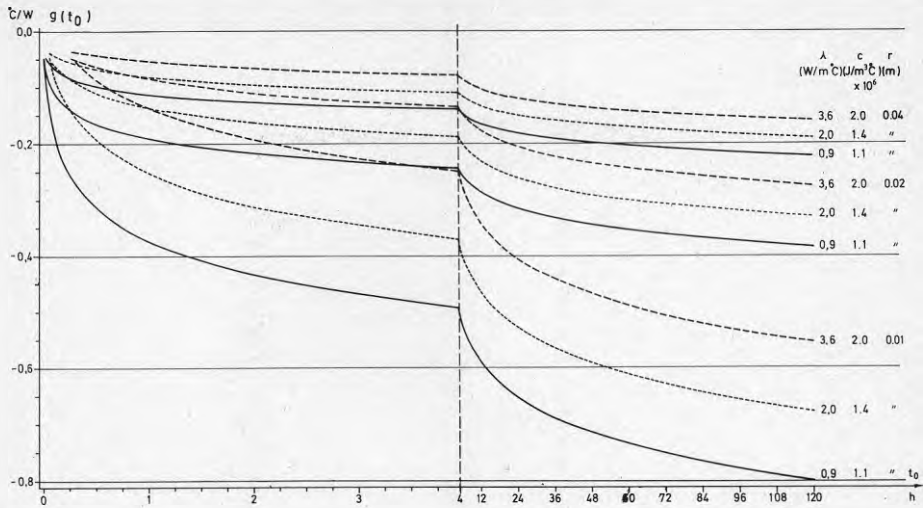
E_t kan beräknas med ekvation 4.4.3 eller 4.4.4. Är $\tau = at/r^2 > 20$ ger ekvation 4.4.4 en god approximation av $E_t(\tau)$

$$\Delta T_T = q_2 - q_0 \left(- \frac{1}{4\pi\lambda} (\ln(4\tau) - 0.5772) - m_0 \right) \quad (4.4.10)$$

I figur 4.6 är termen $(1/\lambda)(E_t(\tau) - g(t_0))$ åskådliggjord för några jordarter. I denna figur har ekvation 4.4.3 använts. Med denna figur kan temperatursänkningen på grund av en effektpuls uppskattas. Jorden antas frusen för $g(t_0)$. Som framgår ur figuren antar τ värden mindre än 20 och värdena på $g(t_0)$ blir då mindre än vad en korrekt lösning på $E_t(\tau)$ skulle ge. Figurerna ger dock en någorlunda riktig bild av temperaturförloppet även för kortare tider än vad som ges av $\tau=20$. Temperatursänkningen beräknat med hjälp av figur 4.6 blir då med $m_0=0.06$:

$$\Delta T_T = (q_2 - q_0) (g(t_0) - 0.06) \quad (4.4.11)$$

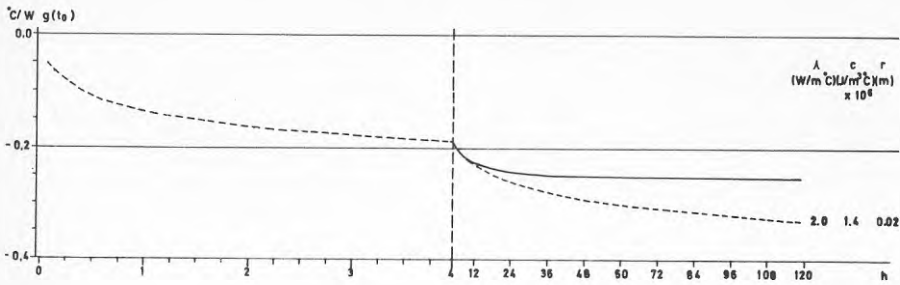
I de fall då maximala effekten q_2 ligger mitt emellan q_0 för topplast resp baslast eller nära baslast gäller inte de teoretiska beräkningar som redovisas under 4.4.1 därför att influensradien blir mycket stor de långa tider som blir aktuella. Temperatursänkningen på grund av långa effektpulser avstannar emellertid i allmänhet efter några dagar när temperatursänkningen i marken på grund av effektpulser kommer fram till ofrusna zonen. Detta innebär att en grov uppskattning av ΔT_T bör kunna göras om pulsens varaktighet sätts till ett par dagar. Resultat av T_0^{kor} skall under alla omständigheter hamna mellan T_0 avläst ur topp- resp baseffektdiagrammen.



Figur 4.6 Transient temperaturförlopp för en effektpuls av 1 W med varaktigheten t_0 för några värden på värmekonduktivitet (λ) och värmekapacitet (c) och rörytterradien (r). Funktionsvärdet av $g(t_0)$ multipliceras med effektpulsens värde i W för att erhålla temperatursänkningen.

Som beskrivits ovan bromsas sänkningen av köldbärartemperaturen när temperaturutbredningen på grund av en effektpuls når en rand där fasomvandling sker. I figur 4.7 visar en principbild hur avvikelser från $g(t_0)$ kan se ut om pulsen når en rand med fasomvandling efter ca 1 dygn.

För fallet med flera pulser efter varandra, såsom exemplifieras i figur 4.3, måste flera effekttuttar superponeras. Lösningen för detta visas ej här. Den finns emellertid i en kommande BFR-rapport ("Markvärme. En handbok om termiska analyser" av Johan Claesson et al.). I de flesta fall torde dock det räcka med att studera vilken temperatursänkning som orsakas av den första effektpulsen ($q_2 - q_0$) då värmepumpen går intermittent och som superponeras på 10-dagars medeleffektuttaget q_0 .



Figur 4.7 Transient temperaturförlopp för en effektpuls av 1 W med varaktigheten t_0 . Den heldragna linjen visar vad som händer om temperaturutbredningen på grund av en effektpuls efter ca 1 dygn når randen där fasomvandling sker.

4.4.2 Justering av köldbärartemperatur med hänsyn till slangdiameter

Köldbärartemperaturen som kan utläsas i dimensioneringsdiagrammen bygger på att en slang med ytterdiameter av 0.04 m och ett totalt värmemotstånd över slang (övergångsmotstånd (köldbärare-slangvägg) + värmemotstånd i slangvägg) på $0.06 \text{ m}^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Om en annan slangdiameter och/eller ett annat värmemotstånd gäller kan köldbärartemperaturen korrigeras enkelt med nedanstående formel. Den bygger på antagandet att stationära förhållanden snabbt ställer in sig lokalt runt slangen dvs att värmekapaciteten är försumbar. Effektpuls bör analyseras enligt kapitel 4.4.1.

$$T_R(t) = T_O(t) + q(t) \left(m_0 - m_R + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right) \quad (4.4.12)$$

- $q(t)$ (W/m): effektuttag per meter slang
- $T_O(t)$ ($^{\circ}\text{C}$): köldbärartemperatur på grund av $q(t)$ med slangdiameter $2R_0$
- $R_0 = 0.02$ (m): slangradie som antagits i dimensioneringsdiagram
- $m_0 = 0.06$ ($\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{W}$): totalt värmemotstånd över slang som har antagits i dimensioneringsdiagram
- λ (W/ m°C): värmekonduktivitet i jorden närmast slangen
- $T_R(t)$ ($^{\circ}\text{C}$): köldbärartemperatur på grund av $q(t)$ med slangdiameter $2R$

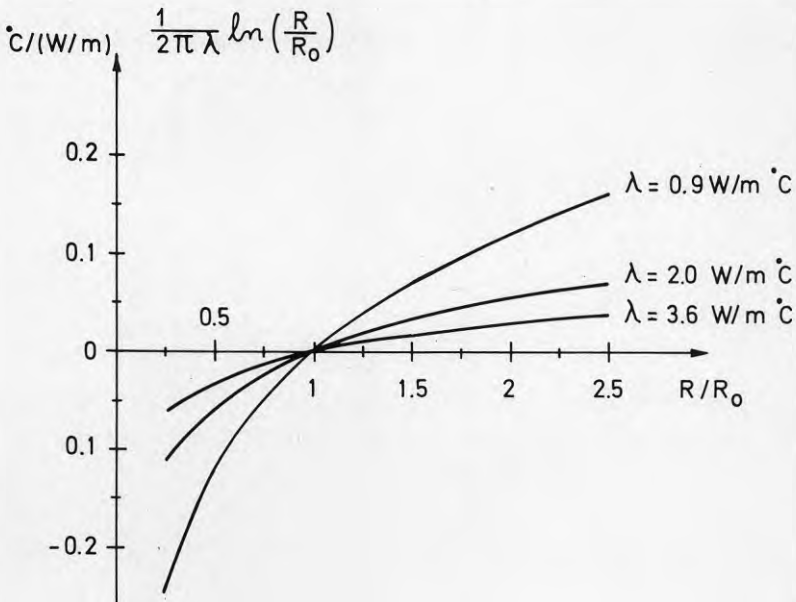
R (m): ny slangradie
 m_R ($m^{\circ}C/W$): nytt totalt värmemotstånd över slang med radien R

Ekvationen ovan kan skrivas om på följande sätt.

$$(T_R(t) - T_0(t))/q(t) = m_0 - m_R + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (4.4.13)$$

Sista termen i ekvation 4.4.13 åskådliggörs i figur 4.8. Multiplieras avläst värde för en vald radie med $q(t)$ erhålls den temperaturförändring som beror av förändrad slangdimension. Till detta adderas förändringen som beror av förändrat övergångsmotstånd. Den största temperaturskillnaden $\Delta T_R(t) = T_R(t) - T_0(t)$ som på ovanstående sätt beräknas uppstår då $q(t)$ är som störst dvs då $q(t) = q_0$.

$$\Delta T_R = q_0 \left(m_0 - m_R + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \right) \quad (4.4.14)$$



Figur 4.8 Värmemotståndets förändring runt slang som funktion av förhållandet mellan slangradie R och en referensradie R_0 .

När rördiametern ändras kommer även medelköldbärartemperaturen T_ϕ att ändras. Därmed påverkas också årsvärmefaktorn. Förändringen av T_ϕ kan beräknas på följande sätt. Enligt ovan är

$$\Delta T_R(t) = q(t) \left(m_0 - m_R + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{R_0} \right) = q(t) \cdot m \quad (4.4.15)$$

Vidare är

$$q(t) = e \cdot b \cdot f(t) \quad (4.4.16)$$

där $f(t)$ är fördelningsfunktionen som redovisas i figur 3.4. e är energiuttaget/ m^2 och år och b är avstånd mellan slangar i meter. För solitär förläggning är energiguttag/m slang och b kan sättas till till 1. Köldbärartemperaturens förändring med tiden blir då

$$\Delta T_r(t) = e \cdot b \cdot f(t) \cdot m \quad (4.4.17)$$

Medelköldbärartemperatur beräknas enligt nedan

$$T_\phi = \frac{\int T(t) q(t) dt}{\int q(t) dt} \quad (4.4.18)$$

Förändringen av köldbärartemperaturen ΔT_ϕ blir då

$$\begin{aligned} \Delta T_\phi &= \frac{\int \Delta T(t) q(t) dt}{\int q(t) dt} = \frac{\int (e \cdot b) f(t) m (e \cdot b) f(t) dt}{\int (e \cdot b) f(t) dt} \\ &= \frac{(e \cdot b)^2 m}{(e \cdot b)} \frac{\int f(t)^2 dt}{\int f(t) dt} = (e \cdot b) m C \quad (4.4.19) \end{aligned}$$

Konstanten C kan beräknas med hänsyn till $f(t)$ och blir enligt nedan.

$$\text{Toppeffektuttag: } C = 0.17$$

$$\text{Baseffektuttag: } C = 0.12$$

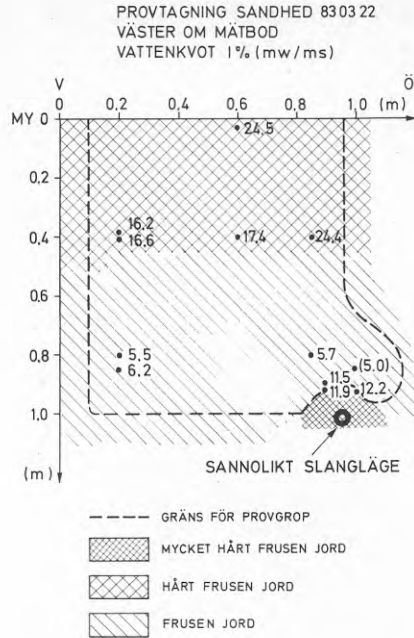
4.5 Vattentransport in mot slang vid frysning

4.5.1 Erfarenheter från fältanläggningar

Vid frysning av vatten i en jord ovan grundvattenytan bildas ett porvattenundertryck vid isfronten, vilket medför att vatten kom-

mer att strömma till isfronten för att där frysas. Mängden vatten som strömmar till isfronten beror av bl a jordens hydrauliska konduktivitet (som varierar med vattenmättnadsgrad), isfrontens avstånd till grundvattenytan och frysprocessens varaktighet. Detta är en process som kan förväntas vara mer eller mindre aktiv då jorden fryser runt en jordvärmslang. Detta har också bekräftats vid några fältundersökningar då vattenhalten mätts i den frusta zonen runt slangen. Processen då vatten transporteras mot jordvärmslangen innebär dels att en större mängd latent värme blir tillgängligt nära slangen och dels att värmekonduktiviteten ökar i den frusna zonen runt slangen. Båda faktorerna påverkar köldbärartemperaturen på ett gynnsamt sätt, dvs den ökar. Detta blir betydelsefullt speciellt i torra jordar med en låg värmekonduktivitet. En vattenhaltsanrikning kring slang kan då minska temperaturfallet in mot slang betydligt.

I figur 4.9 visas resultatet från en undersökning där kollektorn är förlagd i en mellansand. Av den framgår att vattenkvoten för detta specifika fall är ungefär 2 ggr större i den frusna zonen intill slang, vilket i detta fall innebär en mättnadsgrad på ca 50% (mättnadsgrad = S_r = volymvatten/porvolym). Undersökningar i såväl andra som liknande jordarter visar också på en vattenhaltsökning i fruset tillstånd närmast slang. Graden av vattenhaltsökning varierar mellan undersökningarna och några generella slutsatser om fukttransporten som äger rum runt en slang kan inte göras med hänsyn till dessa undersökningar. För att kunna göra detta krävs ett mera ingående studium av frysprocessens mekanism under icke vattenmättade förhållanden.



Figur 4.9 Uppmätt vattenhalt i ett vertikalsnitt genom mark med jordvärmeslang. Jorden är en mellansand och provtagningen gjordes i Orsa, Sandhed.

Att negligera att en vattenhaltskoncentration kan äga rum runt slangen innebär att dimensioneringen blir försiktigare än om den skulle medräknas. Nedan visas hur en zon närmast slang med förhöjd värmekonduktivitet kan behandlas för att kunna justera köldbärartemperaturen erhållen ur dimensioneringsdiagrammen.

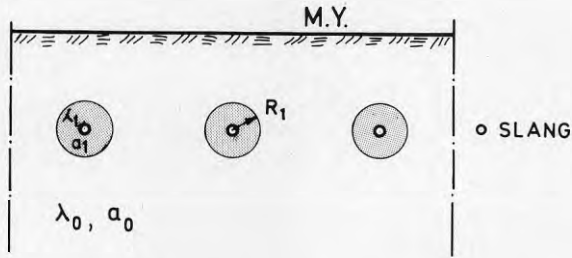
4.5.2 Påverkan på köldbärartemperatur på grund av förändrad värmekonduktivitet intill slang

Om värmekonduktiviteten är bättre eller sämre lokalt närmast slang i jämförelse med omgivande jord kan detta påverka köldbärartemperaturen relativt mycket. Vid en vattenhaltsökning förändras alla värmeöverförande egenskaper. Om endast förändringen i värmekonduktivitet beaktas kan förändringen i köldbärartemperatur enkelt beräknas. Därvid bortses från den inverkan en förändrad värmekapacitet har på dynamiska förlopp och den energi som kan utvinnas genom att en större mängd vatten kan frysas nära slangen.

Antag att zonen med förändrad värmekonduktivitet (λ_1) är cirkulär med radien R_1 . Omgivningen utanför R_1 har värmekonduktiviteten λ_0 , slangradien är R_0 (se figur 4.10). $T_0(t)$ är köldbärartemperaturen enligt dimensionering med $\lambda = \lambda_0$ i hela markprofilen. Den justerade köldbärartemperaturen T_1 blir med ovanstående antaganden enligt följande.

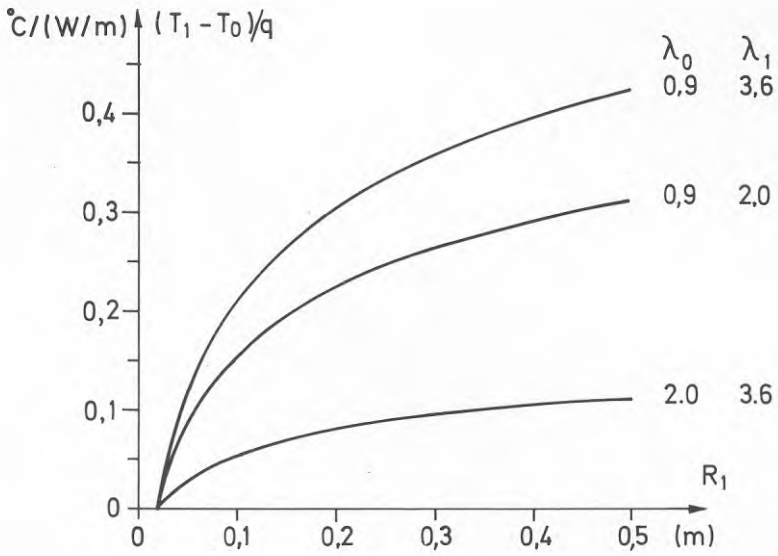
$$T_1(t) = T_0(t) + \frac{q(t)}{2\pi\lambda_0} \ln \frac{R_1}{R_0} - \frac{q(t)}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{R_1}{R_0} \quad (4.5.1)$$

$$(T_1(t) - T_0(t))/q(t) = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{R_1}{R_0} \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \quad (4.5.2)$$



Figur 4.10 Illustration för ekvation 4.5.1.

Den sista ekvationen finns plottad i figur 4.11 med $\lambda_0 = 0.9$ resp $2.0 \text{ W/m}^0\text{C}$ (som jord 5 och 9 i fruset tillstånd) och med $\lambda_1 = 2.0$ resp $3.6 \text{ W/m}^0\text{C}$ (som jord 9 resp jord 6 i fruset tillstånd). Enligt tabell 3.2 motsvaras dessa exempel av en mätnadsgrad av 20% resp 50% för λ_0 och 50% resp 100% för λ_1 . Figuren 4.11 visar storleken på temperaturhöjningen som kan erhållas på grund av förhöjd vattenhalt runt slang då $R_0 = 0.02 \text{ m}$. Om $q(t) = 20 \text{ W/m}$, $\lambda_0 = 0.9 \text{ W/m}^0\text{C}$, $\lambda_1 = 3.6 \text{ W/m}^0\text{C}$, och radien på den frusna zonen är 0.25 m så blir temperaturhöjningen $(T_1 - T_0) = 20 \cdot 0.33 \approx 7^0\text{C}$. Av exemplet ovan och av figur 4.11 framgår att i torra jordarter med ett relativt högt effektuttag kan en fuktkoncentration runt slangens inverka mycket gynnsamt på köldbärartemperaturen.



Figur 4.11 Värmotståndets minskning på grund av en förhöjd värmekonduktivitet inom en radie R_1 runt slang.

5 EXEMPEL PÅ ICKE HOMOGENA LAGERFÖLJDER SAMT SNÖRÖJDA YTOR

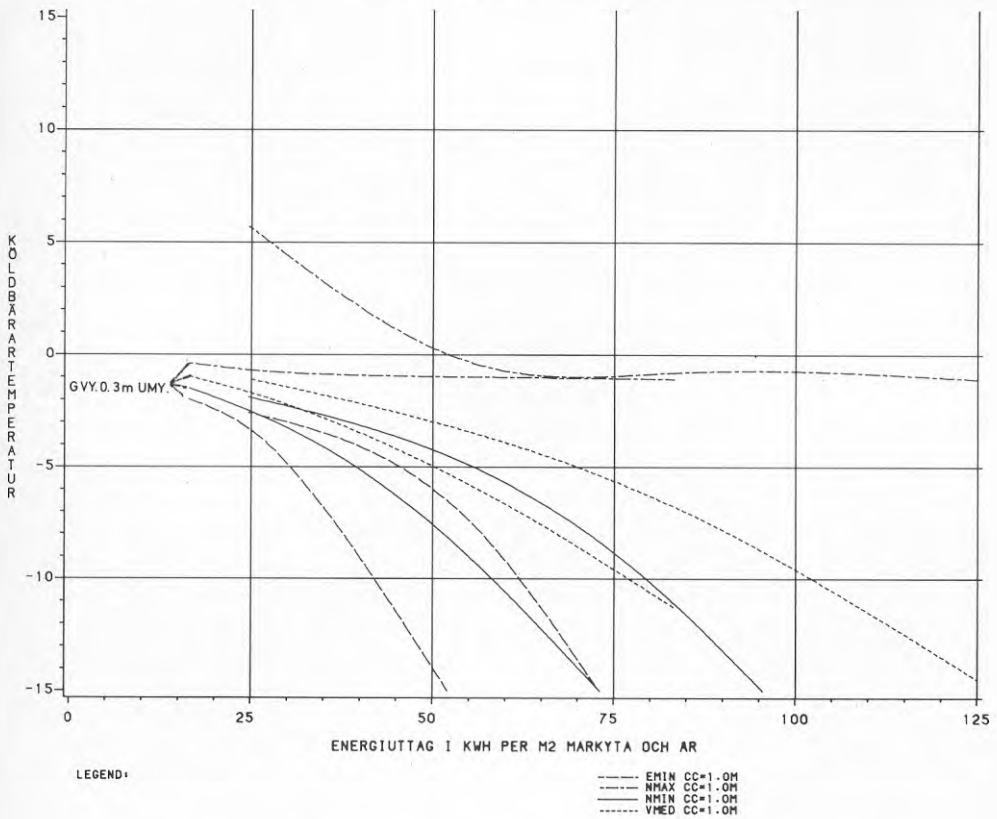
5.1 Torv med torr överyta

I dimensioneringsdiagrammen har antagits att torven är vattenmättad ända upp till markytan. I många fall ligger emellertid grundvattenytan något under markens överyta. Beräkningar har därför också gjorts för en torv där överytan har antagits ha en mycket låg vattenhalt, som därmed fungerar isolerande och radikalt försämrar återställning av marktemperaturen sommartid. Jordprofilen har getts följande termiska egenskaper:

djup under my (m)	λ^+ W/m ⁰ C	λ^- W/m ⁰ C	C^+ J/m ³ °C x10 ⁶	C^- J/m ³ °C x10 ⁶	L J/m ³ x10 ⁸
0 -0.35	0.15	0.5	1.0	0.5	0.8
0.35-	0.5	2.0	4.0	2.0	3.2

I exemplet är avståndet mellan slangar 1.0 m och förläggingsdjup är 0.6 m. I figur 5.1 redovisas resultat för den helt mättade torven och torven med en torr överyta. Som framgår av figur 5.1 sjunker möjligt energiuttag med 20-30%. Detta beror av att marken inte hinner återställas sommartid utan marken är ständigt tjälad. I de flesta fall då grundvattenytan ligger under torvens överyta torde vattenhalten vara högre i den omättade zonen än vad som antagits i beräkningarna. Detta medför att möjligt effektuttag för en torv med omättad zon sannolikt inte reduceras så mycket som redovisas i detta exempel. I fall där grundvattenytan ligger betydligt lägre än 35 cm under markytan torde det dock vara lämpligt att dimensionera försiktigt.

LULEÅ JORDI VATTENMÄTTAD OCH MED GVV 0.3M UMY
 NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



Figur 5.1 Jämförelse mellan torv med grundvattennivån i markyta resp med grundvattennivån 0.3 m under markyta. Slangnivå är 0.6 m, varaktighet, toppeffektuttag och klimat som Luleå.

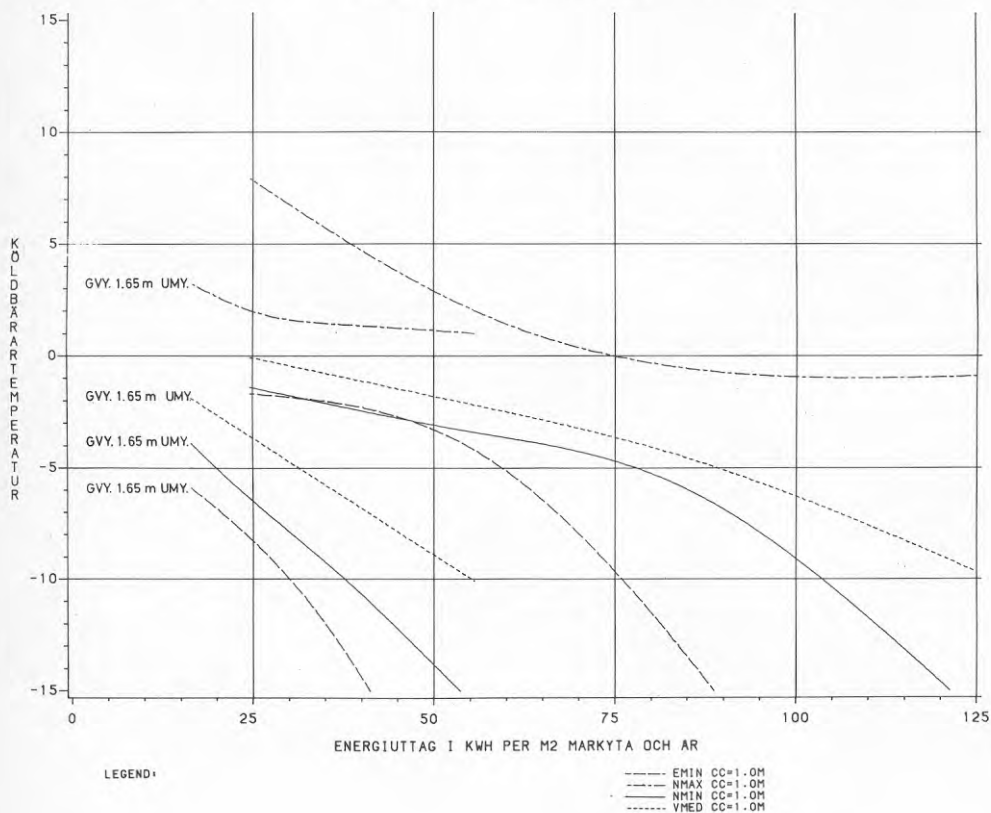
5.2 Grovkornig sand med grundvattenyta något under slangnivå

Som framgår av figur 3.5 och 3.6 minskar vattenhalten tämligen snabbt ovan grundvattenytan för grovkorniga jordarter. Ett tänkbart alternativ är därför en jordprofil med ett skikt med låg vattenhalt som underlagras av vattenmättad jord. Jordprofilen i exemplet som valts har följande termiska egenskaper:

djup under my (m)	λ^+ W/m ⁰ C	λ^- W/m ⁰ C	C^+ J/m ³ ₀ C x10 ⁶	C^- J/m ³ ₀ C x10 ⁶	L J/m ³ x10 ⁸	Kommentar
0 -1.65	0.7	0.9	1.4	1.1	0.3	som jord 5
1.65-	1.7	3.6	3.1	2.0	1.7	som jord 6

Avstånd mellan slangar är 1.0 m och förläggingsdjup är 1.4 m. Detta fall har jämförts med en helt vattenmättad jordprofil (jord 6). I figur 5.2 redovisas resultatet för dessa två fall. Som framgår av figur 5.2 sjunker möjligt energiuttag med 60-70% för fallet med grundvattenytan 1.65 m under markytan. En jämförelse med en homogen jordprofil av typ jord 5 ger att möjligt energiuttag är 30-60% större för fallet med grundvattenytan 1.65 m under markytan. Om exemplet förändras så att skiktet med den lägre vattenhalten blir tunnare och/eller slangen ligger i vattenmättad jord kommer köldbärartemperaturen att öka, dvs bli gynnsammare. I grovkorniga jordarter kan det förekomma förhållanden som liknar jord 5, jord 6 och även något mellanting som i exemplet (figur 5.2). Det innebär att grundvattenytans läge är mycket viktigt för dimensioneringen i grovkorniga jordarter.

LULEÅ JORD6 VATTENMÄTTAD OCH MED GVV 1.65M UMY
 NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



Figur 5.2 Jämförelse mellan en helt vattenmättad sand och en sand där grundvattennivån ligger 0.15 m under slangnivå. Slangnivå är 1.4 m, varaktighet, toppeffektuttag och klimat som Luleå.

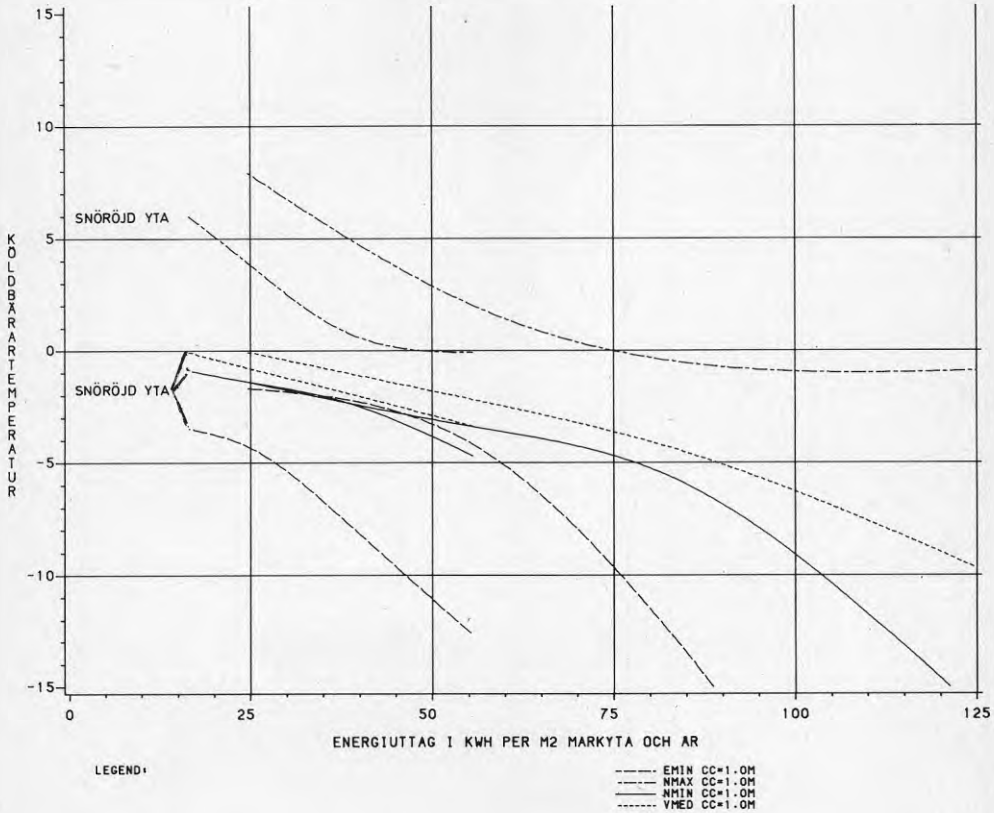
5.3 Snöröjd yta

Jämförelsen görs för 2 jordar, jord 9 och jord 6. Endast klimat för Luleå har använts då Uppsala och Kristianstad har mycket ringa snötäckning normalåret och därför fungerar som snöröjda ytor. Avstånd mellan slangar är 1.0 m och förläggningsdjup 1.4 m. I figur 5.3 och 5.4 visas resultatet från simuleringarna. I figur 5.3 visas fallet med en vattenmättad jord, jord 6. Som framgår ur figuren påverkas inte minsta köldbärartemperaturen för normalåret

om energiuttaget/m² är mindre än ca 40 kWh/år. För extremåret påverkar dock kallare klimatet köldbärartemperaturen markant. Att förhållandena kan vara så gynnsamma för energiuttag <40 kWh/m² år beror av att markens latent värme ovan slangarna fungerar som en dämpare av kylans nedträngning i marken. Flyttas emellertid slangen närmare markytan bör köldbärartemperaturen bli lägre vid energiuttag <40 kWh/år. Är marken ovan slangarna inte helt vattenmättad bör likaså köldbärartemperaturen bli lägre än vad som visas i figur 5.3.

LULEÅ JORD6 MED OCH UTAN SNÖRÖJD MARKYTA

NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



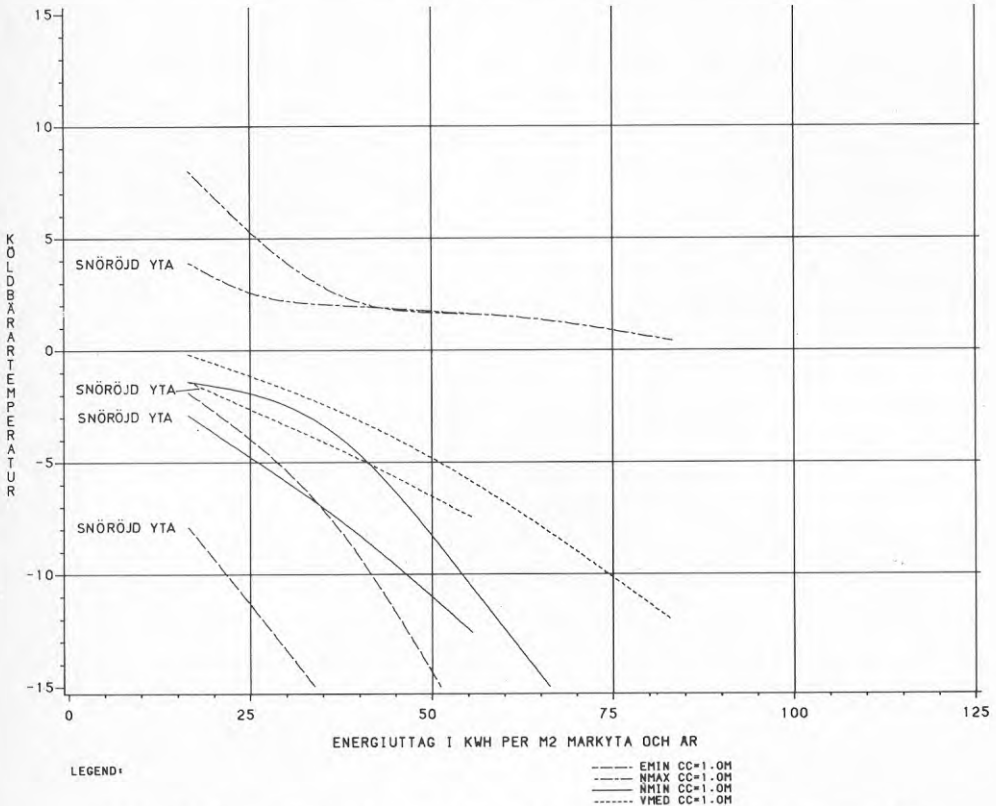
Figur 5.3 Jämförelse mellan snötäckt och snöröjd markyta för en vattenmättad sand. Slangnivå är 1.4 m, varaktighet, toppeffekutttag och klimat som Luleå.

I figur 5.4 visas fallet med jord 9 som har en vattenmättnadsgrad av 50%. Jord 9 har endast hälften av den latent energi som finns i jord 6 men en värmediffusivitet som bara är något mindre än för jord 6. Detta medför att kylan tränger snabbare ned i jord 9 i jämförelse med jord 6. Detta syns också tydligt på köldbärartemperaturen i figur 5.4.

Ytjordvärmekollektorn bör förläggas under snötäckt mark då detta ger de bästa förutsättningarna för energiuttag på vintern. Om marken där kollektorn förläggs måste hållas snöröjd bör energiuttaget reduceras om klimatet är kallare än Uppsala-klimat. En grov uppskattning av reduktionen bör kunna göras med figur 5.3 och 5.4. Lägg slangens grundare än vad som anges i dessa figurer kommer köldbärartemperaturen att sjunka.

LULEÅ JORD9 MED OCH UTAN SNÖRÖJD MARKYTA

NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



Figur 5.4 Jämförelse mellan snötäckt och snöröjd markyta för en icke vattenmättad sand/silt. Slangnivå är 1.4 m, varaktighet, toppeffektuttag och klimat som Luleå.

6 TJÄLE

6.1 Tjäles utbredning

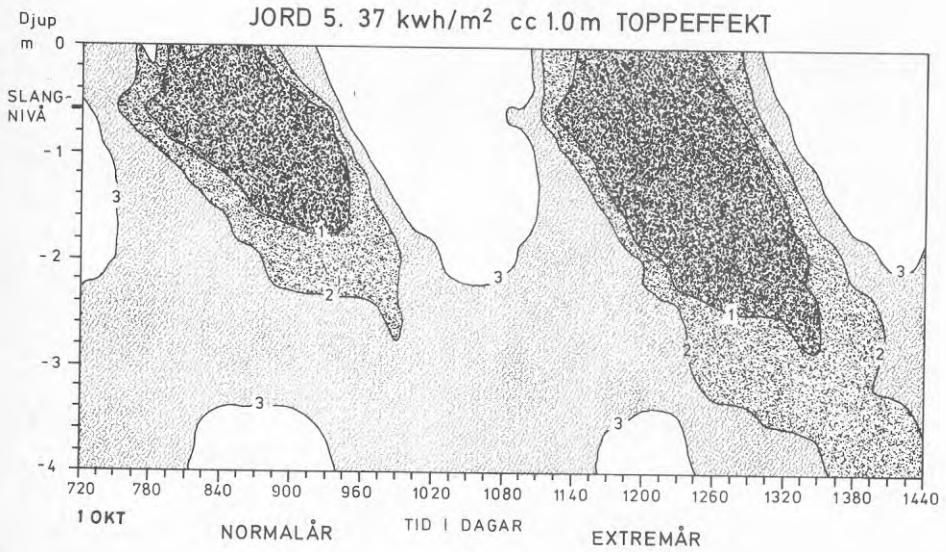
Tjäles utbredning i tid och rum beror av framför allt klimat, värmeöverförande egenskaper i marken och energiuttag från ytjordvärmekollektor. Tjäleningen kan börja antingen runt slang eller vid markytan beroende av såväl klimat som energiuttagets storlek.

I figur 6.1 visas exempel på nollisotermens förflyttning med tiden längs en vertikal linje genom slang. I figuren visas tredje normalåret respektive extremåret. Som framgår av figurerna har klimatet en stor inverkan på tjäles utbredning. Ytterligare egenskaper som påverkar tjäles utbredning är jordens hydrauliska konduktivitet, vattenhållande förmåga samt grundvattenytans läge. Tjälen skapar ett porvattenundertryck, vilket under vissa förhållanden kan ge upphov till vattenströmning från grundvattenytan till tjälefronten. Detta kommenteras ytterligare under avsnitt 6.3.

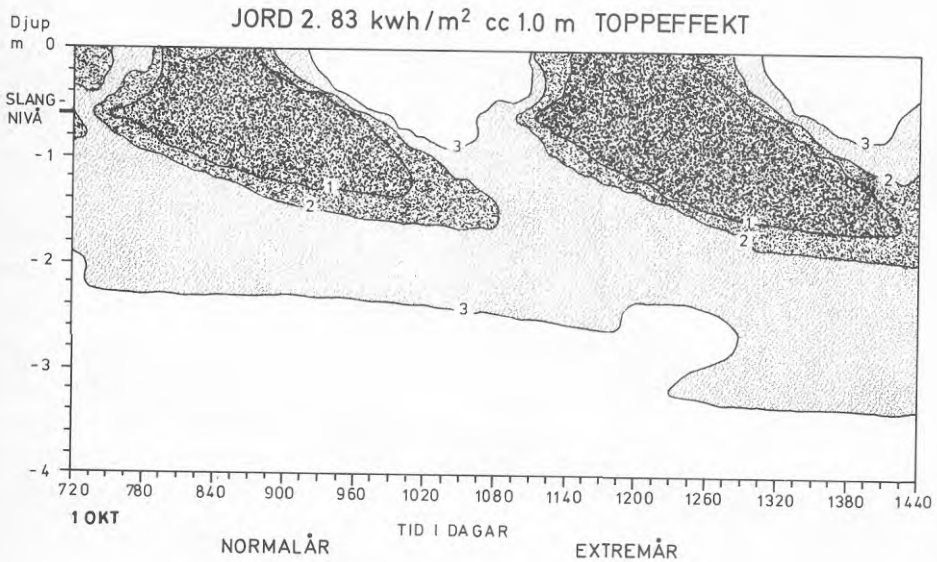
Även ytjordvärmekollektorernas förläggning påverkar tjäles utbredning. Ju djupare kollektorn förläggs desto mer tjälead mark erhålls och risken för permafrost ökar. Lägg slangarna tätt i horisontal led kan det hända att jorden mellan slangarna fryser till ett sammanhängande skikt innan tjälen från markytan når slangarna. Detta anses kunna medföra att maskar stängs inne i ett ofruset markskikt mellan tjäleat skikt vid markyta resp slangnivå. När så detta ofrusna skikt så småningom också fryser dör de maskar som eventuellt finns i detta skikt som ej tål infrysning.

Figurerna 6.2-7 är exempel på hur temperaturfältet i ett vertikalsnitt genom slang ser ut för tredje normalåret och extremåret för olika klimat, några olika jordar och energiuttag. Ur dessa figurer med isotermer i ett tid-djupdiagram kan tjäles och temperaturfältets utbredning jämföras mellan olika jordarter, klimat och energiuttag för att få en bättre känsla för de termiska förloppen i marken. Temperaturen på slangnivå motsvaras av jordtemperaturen ca 5 cm från slangens. Som framgår av dessa figurer har klimatet en stor inverkan på tjäledjupet. Det bör observeras att var nollisotermen hamnar vid datorsimulering också beror av hur fryspunktsnedsättning antas se ut. Vid dessa simuleringar har vattnet antagits frysa mellan 0°C och -1°C .

0-ISOTERMER
KRISTIANSTAD, UPPSALA, LULEÅ
(1) (2) (3)

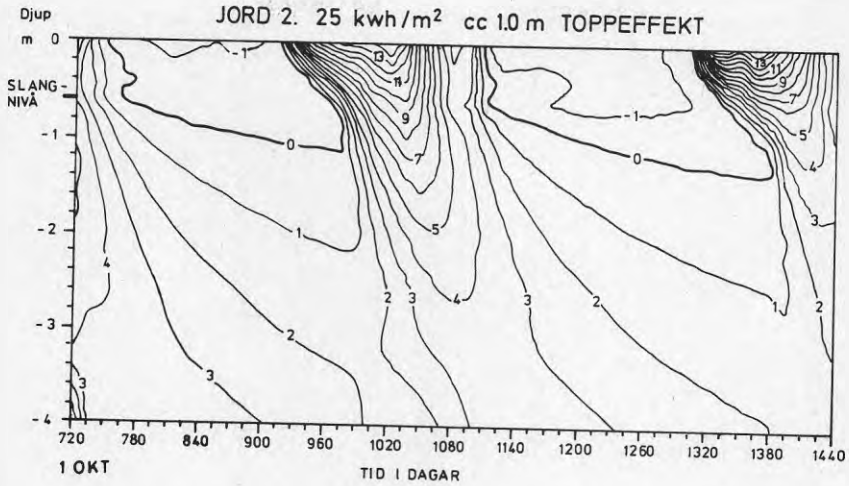


0-ISOTERMER
KRISTIANSTAD, UPPSALA, LULEÅ
(1) (2) (3)

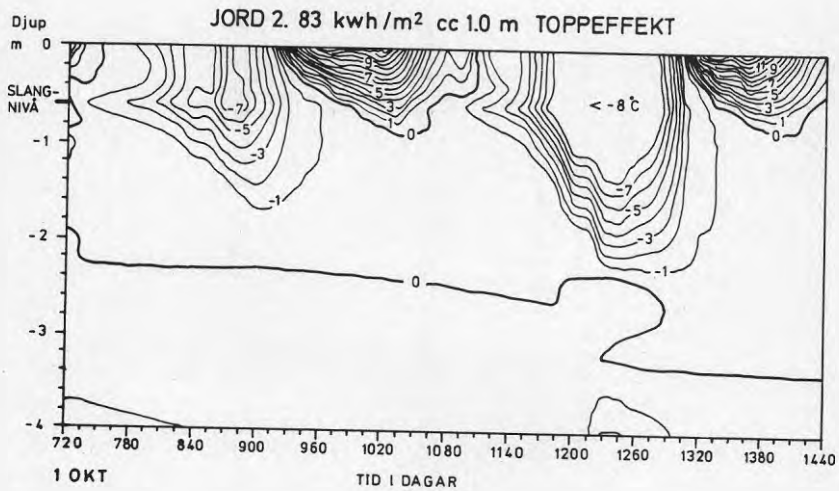


Figur 6.1 0°C isotermens förflyttning med tiden längs en vertikal linje från markytan genom slang. Jord 5 är en torr sand och jord 2 är en lera.

ISOTERMER LULEÅ

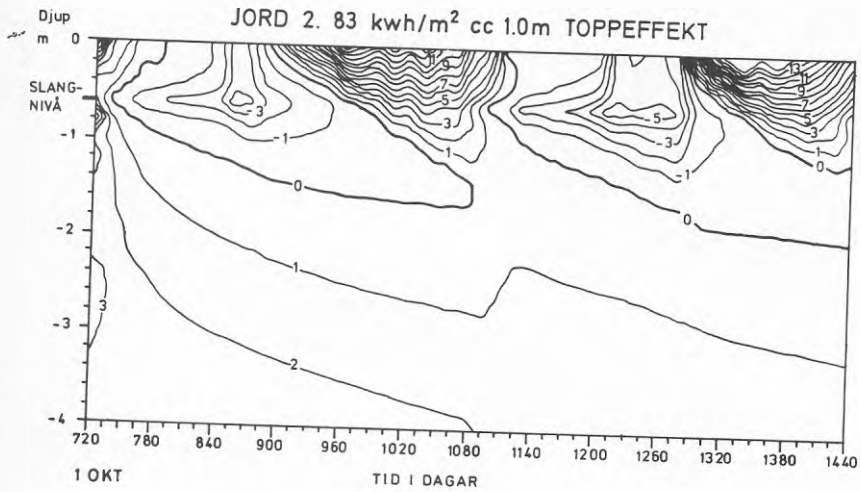


ISOTERMER LULEÅ

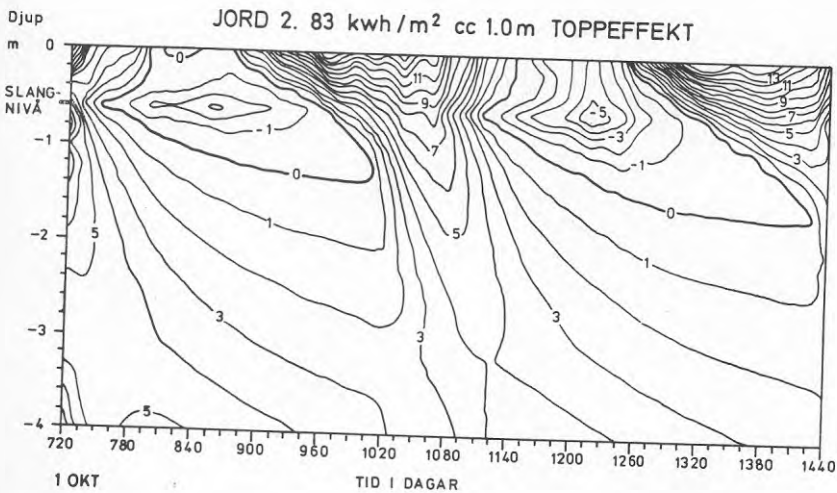


Figur 6.2 Temperaturförändringen längs en vertikal linje från markyta genom slang. Jord 1era och klimat Luleå.

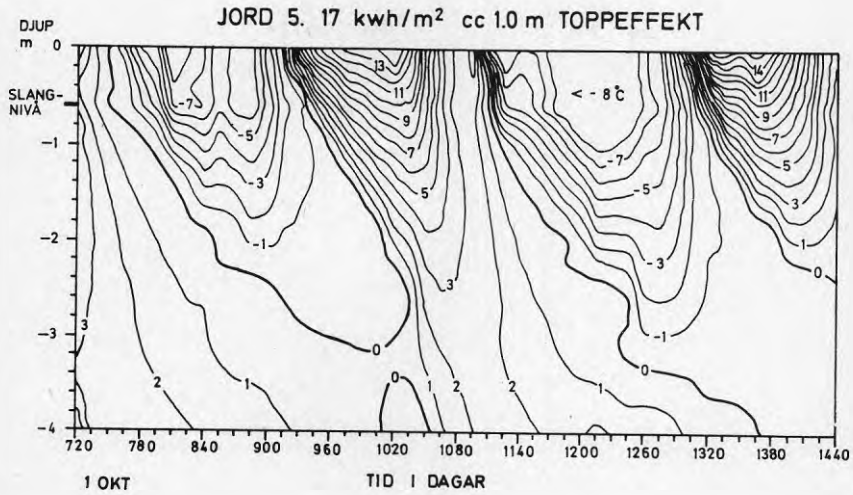
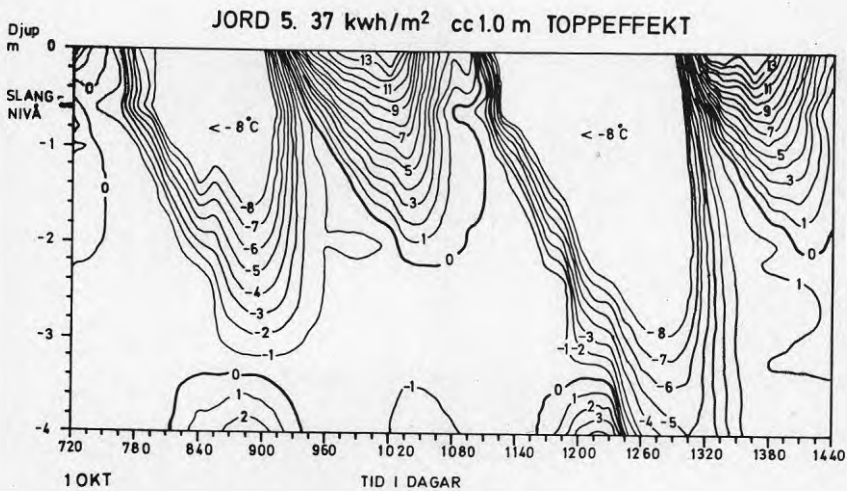
ISOTERMER UPPSALA



ISOTERMER KRISTIANSTAD

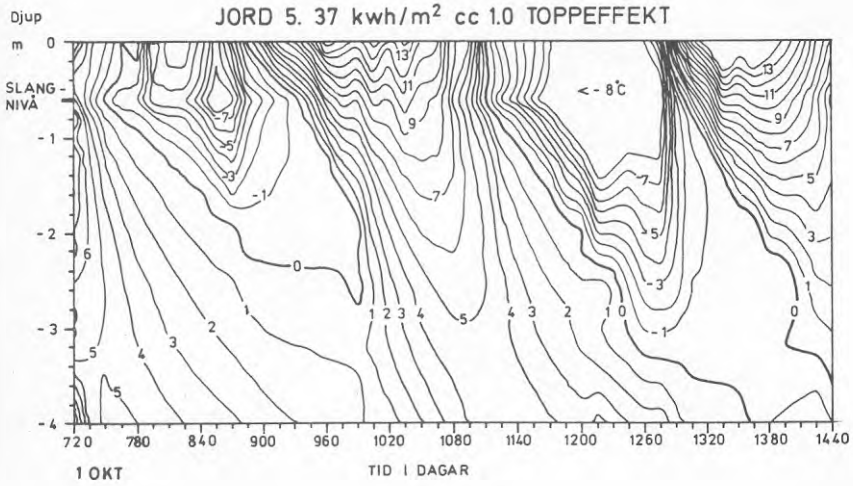


Figur 6.3 Temperaturförändringen längs en vertikal linje från markyta genom slang. Jord lera och klimat Uppsala resp Kristianstad.

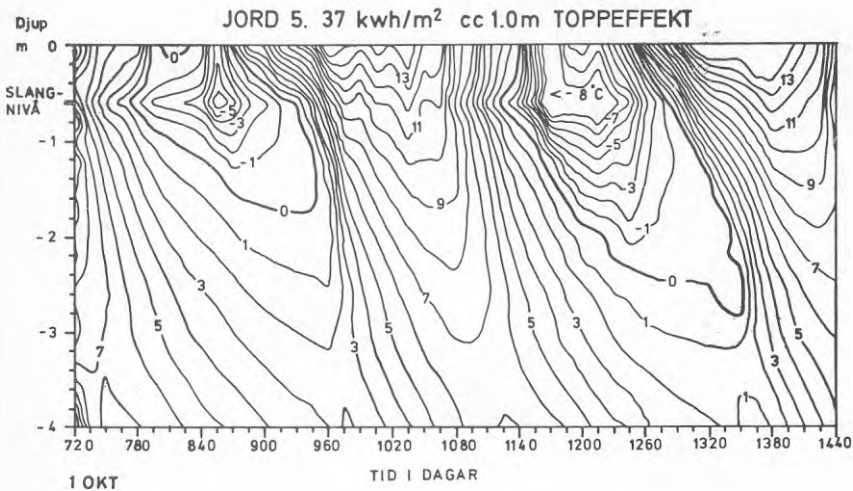
ISOTERMER
LULEÅISOTERMER
LULEÅ

Figur 6.4 Temperaturförändringen längs en vertikal linje från markyta genom slang. Jord torrsand och klimat Luleå.

ISOTERMER
UPPSALA

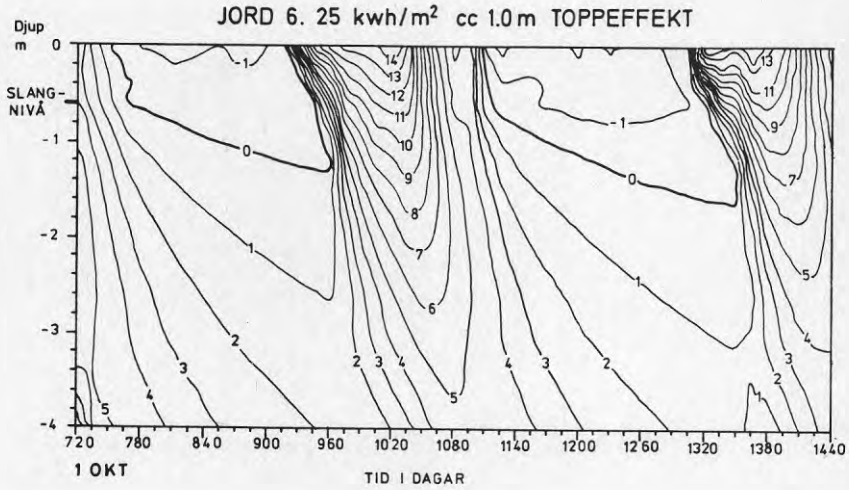


ISOTERMER
KRISTIANSTAD

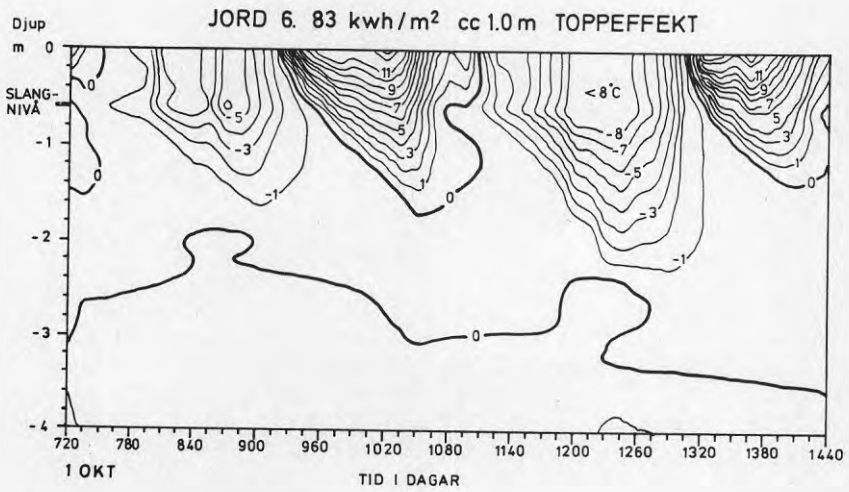


Figur 6.5 Temperaturförändringen längs en vertikal linje från markyta genom slang. Jord torrsand och klimat Uppsala resp Kristianstad.

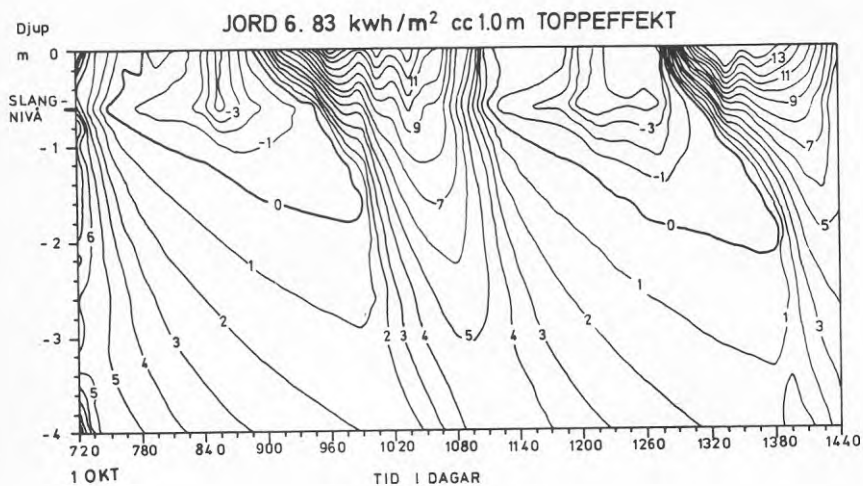
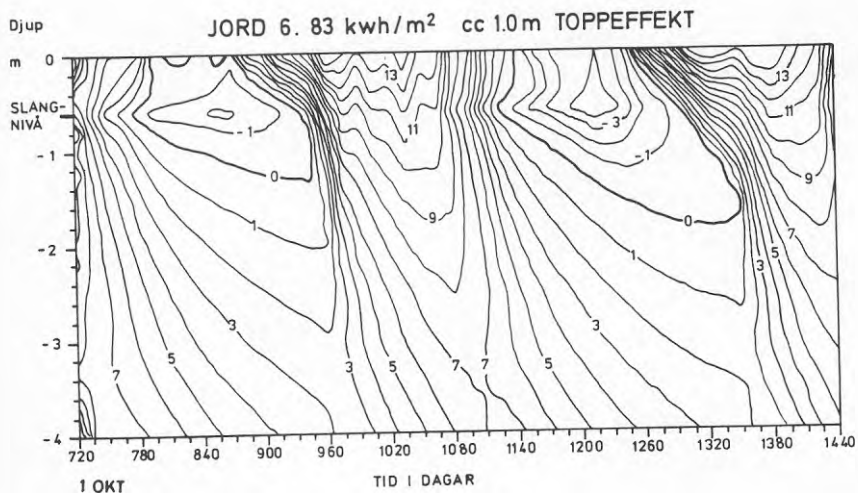
ISOTERMER LULEÅ



ISOTERMER LULEÅ



Figur 6.6 Temperaturförändringen längs en vertikal linje från markyta genom slang. Jord mättad sand och klimat Luleå.

ISOTERMER
UPPSALAISOTERMER
KRISTIANSTAD

Figur 6.7 Temperaturförändringen längs en vertikal linje från markyta genom slang. Jord mättad sand och klimat Uppsala resp Kristianstad.

6.2 Permafrost

När någon del av marken befinner sig i ständigt fruset tillstånd råder det permafrost. Normalt i Sverige har vi ingen permafrost förutom på vissa ställen i norra Lappland. Genom att kyla marken med ytjordvärmekollektorn kan det dock åstadkommas permafrost om energiuttaget är tillräckligt stort. I BFR-rapporten "Fysikaliska effekter av ytjordvärmeuttag" av P-E Jansson och L-C Lundin anges några ungefärliga gänser för permafrost. (Torven och sanden som redovisas har grundvattenytan ca 1.5 m under markytan.)

	Årligt energiuttag då permafrost uppstår (kWh/m ² ,år)		
	Luleå	Uppsala	Kristianstad
Torv	35	55	70
Sand	90	110	130

Ytjordvärme­slangen ligger i dessa fall 0.8 m under markytan. Läggs slang djupare än detta inträder permafrost vid lägre energiuttag än här redovisade. De simuleringar som ligger till grund för dimensioneringsdiagrammen pekar mot liknande värden för det årliga energiuttaget då permafrost inträder. Ur dimensioneringsdiagrammen kan inte avläsas när permafrost inträder beroende av att permafrosten alltid börjar under slangnivå. I de fall då den maximala köldbärartemperaturen blir negativ har permafrosten nått upp till slangnivå. Förutom en sämre miljö för växter och markbiologisk aktivitet torde en permafrost få mest negativa konsekvenser i siltiga jordarter. Detta tas upp under avsnitt 6.3.

6.3 Tjälskador

I några fall har det uppstått sprickor eller ojämnheter i markytan där ytjordvärmekollektorer varit förlagda. Ojämnheterna har varierat i storlek och problem har angetts vara t ex svårighet med gräsklippning eller vattenansamling i ojämnheterna. Detta beror sannolikt helt eller delvis på att kollektorn varit förlagd i en tjälfarlig jord. Tjälhävningen kan också orsaka skador av mer allvarlig art. Förläggning av slang under husgrund är helt olämpligt då eventuell tjälhävning kan ge ojämn lyftning av grun-

den, vilket kan resultera i sprickbildning i huset. Nedan beskrivs kort tjälprocessen, vad som betraktas som tjälfarlig jord samt vad som kan göras för att minska riskerna för skador.

Allt vatten i marken fryses inte vid 0°C beroende av att vattenmolekylerna binds olika hårt till mineralpartiklarna. Detta medför att det finns en vattenfilm mellan iskristallerna och mineralpartiklarna. Från denna tunna vattenfilm tas vatten till iskristallisationen. Det undertryck som därvid uppstår i vattenfilmen inducerar en vattentransport i den ofrusna jorden mot det område där kristallisation sker. Storleken på vattentransporten beror av framför allt jordens hydrauliska konduktivitet (i omätat tillstånd), vattenhållande förmåga samt grundvattenytans läge. Om de första faktorerna är (relativt sett) stora och avståndet till grundvattenytan litet är förutsättningarna goda för en vattenanrikning i zonen där marken fryser och resultatet kan bli att marken häver sig. Även trycket mellan mineralpartiklarna, tjälperiodens varaktighet och porsystemets utseende påverkar tjälbildning. Är porerna grova, som i en sand, växer iskristallerna ned i porerna och omsluter mineralkornen. Jorden häver sig ej. I ett finporigt system bildar vanligen isen skikt i jorden. Iskristallerna omsluter inte mineralkornen som vid en grovkornig jord. Hävningen beror av att vatten expanderar när det fryser till is samt av den mängd vatten som transporteras till den frysta zonen.

De jordarter som är mest tjälfarliga, dvs där risk för tjällyftning är störst och där ibland vattenöverskottet då marken tinar kan göra jorden flytande ("jäslera"), är siltiga jordarter. En indelning av jordars tjälfarlighet har gjorts av Beskow (1935). Denna är uppställd nedan.

- I. Icke tjälfarliga. Ej tjällyftande; därför ej heller vattenanrikning i tjälen = inget vattenöverskott i tjällossning.

Torvjordar, dyjordar, grus, sand (grovsand, mellansand och finsand) (högst $50\% < 0.125\text{ mm}$ och kapillaritet $< 1\text{ m}$).

II. Måttligt tjälfarliga. Tjällyftning och vattenanrikning i tjälen inträffar normalt, men når större belopp endast i sankt läge, med ringa avstånd till grundvattenytan; fara för tjälskott bara i sådant läge.

Leror, gyttjor, normal morän (moig-sandig typ), lerig sand.

III. Mycket tjälfarliga. Tjällyftning och vattenanrikning i tjälen normalt betydande, vid högt grundvatten mycket stor. Jordartens speciella konsistensegenskaper vid vattenöverskott ("jäslereflytande") innebär stor fara för skador i tjällossningen (tjälskott, släntflytning).

Silt, grovlera, siltig morän och alla övergångar till normal morän, klass II.

De typer av skador som nämndes i inledningen till detta avsnitt har alla uppstått i jordar som kan hänföras till tjälfarlighetsklass III. Sprickor som kan uppstå i markytan hamnar ofta ovan slangarna och vågigheten/sprickor märks mest på våren då markytan tinat men det forfarande finns is lokalt runt slang. Tjälproblem vid ytjordvärmekollektorer behandlas mera utförligt i en kommande BFR-rapport av Sven Fredén, VTI (Statens väg- och trafikinstitut). Att förutsäga ett tjälförlopp är ett svårt teoretiskt problem med många parametrar. Nedan ges några förslag på hur riskerna kan minskas i tjälfarliga jordar.

- Lägg aldrig slang under eller nära en konstruktion (t ex husgrund) som kan ta skada av en tjällyftning.
- Energiuttaget/ $m^2, \text{år}$ bör vara lägre än vad som är möjligt enligt dimensioneringsdiagram. Energiuttaget/ $m^2, \text{år}$ varierade mellan 25-40 kWh/ $m^2, \text{år}$ för de anläggningar där skador uppstod.
- Risken för att markytan skall häva sig ojämnt kan troligen minskas om tryckfördelning nära markytan på grund av tjälningen runt slangen utjämnas. Om avståndet mellan slangar minskas och förläggingsdjupet ökas i jämförelse med "normal dimensionering" erhålls sannolikt en bättre tryckfördelning.

Avståndet mellan slangar bör därvid vara mindre än förläggningensdjupet om en tryckfördelning 2:1 antas. Dvs läggs slangen på 1 m djup bör avståndet mellan slangar inte överskrida 1 m.

7 EKOLOGISKA EFFEKTER AV YTJORDVÄRMEUTTAG

Som inledningsvis påpekades är inte bara förväntad lägsta köldbärrartemperatur dimensionerande utan det bör även tas hänsyn till tjäle och ekologi. Tjäle beskrevs i föregående kapitel och i detta kapitel tas den ekologiska aspekten upp mycket kortfattat. Nedan omnämns två rapporter som ger en bild av konsekvenserna av ytjordvärmeuttag. Några detaljerade anvisningar om olika kombinationer av växtlighet, klimat, energiuttag har ej ännu kunnat göras men rapporterna torde kunna utgöra ett underlag då olika växters lämplighet i samband med ytjordvärmekollektorer diskuteras.

I Hacksta utanför Uppsala har under en treårsperiod studerats framför allt markkemi, markbiologi och växtodling på markytor med olika energiuttag i jämförelse med en referensyta. Energiuttag har varit ca $100 \text{ MJ/m}^2, \text{år}$ ($28 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$) och ca $200 \text{ MJ/m}^2, \text{år}$ ($56 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$). Några markkemiska förändringar kunde inte konstateras. Däremot visade de markbiologiska undersökningarna entydigt att aktiviteten minskade vid uttag med jordvärmekollektor. Växtodlingsförsöken omfattade gräs, rosor, prydnadsbuskar och barrväxter. Effekten på gräset visade sig vara mycket liten och mest negativt påverkades rosorna. Det var emellertid det större energiuttaget som gav de märkbara skillnaderna på odlingsresultatet och då främst på de mindre hårdiga växtsorterna. Effekterna visade sig vara störst tidigt på växtsäsongen och växternas försenade utveckling beror sannolikt av marktemperaturen. I BFR-rapporten R51:1982 av Troedsson et al (1982) redovisas denna studie mera utförligt.

BFR-rapporten "Fysikaliska effekter av ytjordvärmeuttag", Jansson & Lundin (1984) redovisar hur markens temperatur och tjäle påverkas av olika värmeuttag i olika marktyper och klimat i Sverige. Det är en teoretisk studie som gjorts med en datormodell, utvecklad på SLU (Sveriges Lantbruksuniversitet), Uppsala. Summan av temperatursänkningen både på olika djup i marken och över olika tidsperioder har studerats. Även vegetationsperiodens början och slut, tjäldjup och första tjälfria dag redovisas. Det visar sig att vilken påverkan ett ytjordvärmeuttag får beror av vilken storhet som betraktas som viktigast. Temperatursänkningen på djupet (0.44-1.40 m) fram till den 1 juni påverkades mest, medan

vegetationsperiodens längd påverkades minst. Temperatursumman i markskiktet under 0.44-1.40 m fram till 1 juni (för en sand med djupt liggande grundvattenyta) blev för Uppsala resp. Kristianstad motsvarande den för Luleå utan energiuttag (naturliga förhållanden) om energiuttagen var 100 resp 150 MJ/m²,år (28 resp 42 kWh/m²,år) för Uppsala resp Kristianstad. Motsvarande energiuttag vid samma längd av vegetationssäsong var tre gånger högre. Variationen är således stor.

8 PROJEKTERING AV YTJORDVÄRMEANLÄGGNING

Beroende på ytjordvärmeanläggningens storlek och därmed de ekonomiska förutsättningarna kan varierande grad av förundersökningar och detaljprojektering behöva göras. Nedan beskrivs kortfattat några faktorer som bör beaktas vid förundersökning, projektering och utförande på platsen.

8.1 Förundersökning

I samband med projektering av en ytjordvärmekollektor bör följande undersökas och fastställas:

- Fastställande av jordarter inom planerat ytjordvärmekollektorområde. Jordarternas tekniska och termiska egenskaper. (främst vattenhållande egenskaper, tjälfarlighet, bärighet och grävbarhet. Bärighet avgör vilka skador, i form av t ex traktorspår i gräsmattan, som kan uppstå, samt framför allt vilken maskintyp som kan utföra nedläggning av ytjordvärmekollektor.)
- Bestämning av grundvattenytans läge under markytan i friktions- och torvjordarter.
- Markytornas känslighet för ojämn tjällyftning. Kraven från beställaren kan variera beroende av vad markytan skall användas till.
- Slangförläggning: markytans lutning med tanke på lämpliga lägen på samlingsbrunnar med tanke på avluftning. Eventuell samlingslednings förläggning. Hinder såsom träd, buskar, stenar, berg i dagen eller nära markytan etc.
- Andra ledningar, dikningar, elkablar m m inom området som påverkar ytjordvärmekollektorns nedgrävning eller nedplöjning.
- Andra ledningar eller konstruktioner som kan skadas av tjäle.

- Hur pass känslig för ett ytjordvärmeuttag är den växtlighet som planeras vara på det tänkta ytjordvärmeområdet? Vad har beställaren för krav?
- Klimatförhållanden, ortens luftmedeltemperatur samt snötäckning. Kommer ytjordvärmekollektorn att ligga under snöröjd yta? Ligger markytan där kollektorn skall förläggas på en solig sluttning? Detta bör påverka bedömningen om dimensioneringen skall göras försiktigt eller ej.
- Belastningskaraktär för effektbehov. Topplast eller baslast?
- Markägarförhållande. Är beställaren och projektören helt på det klara över dessa?
- Framtida exploateringar, låser man utvecklingen?
- Eventuella krav ur miljöskyddssynpunkt (exempelvis skyddsområde för kommunal vattentäkt).

8.2 Projektering av ytjordvärmekollektor

Vid projekteringen av ytjordvärmekollektorn bör man tänka på följande:

- Val av område för kollektorn med tanke på:
 - grävbarhet
 - markytans lutning, placering av samlingsbrunnar för luftning
 - markytans bärighet
 - vegetation såsom buskar, träd etc
 - block och andra hinder såsom t ex jordhögar, träd etc

Markytans lutning avgör var avluftning är möjligt, placering av avluftare kan ske i fördelningsbrunn eller i vp-rum. Markytan måste luta från fördelningsbrunnen så att varje slinga kan luftas. Kopplingen av slingorna bör helst utföras så att jämn flödesfördelning erhålles utan instrykning.

- Dimensionering av slangdimensioner med tanke på:
 - minsta köldbärartemperatur
 - läggningsteknik
 - tryckfall
 - avstånd mellan slangar
 - förläggingsdjup av slang
 - totalekonomi

- Val av samlingsledning med tanke på:
 - läggningsteknik; olika rörmaterial har olika hållfasthets-egenskaper
 - isolering. Det är ofta nödvändigt i praktiken att delvis isolera samlingsledning. Det kan göras med färdigisolerade rör eller med lös isolering som läggs runt eller ovan rör.
 - avlufning

- Isolera samlingsledningen eller slang när den passerar:
 - vägar
 - känslig markyta
 - avlopps- och vattenledningar
 - andra konstruktioner som kan ta skada av tjäle

Försök att lägga kollektorn så att isolering ej krävs.

- Dela upp kollektorn i minst tre delar vid större kollektorer så att varje del går att köra även om övriga är avstängda.

8.3 Utförande

Vid anläggande av yttjordvärmekollektorer bör man tänka på:

- noggrant dokumentera slangläge och lägen för kopplingar

- att undvika ojämn förläggning i vertikal led, främst med tanke på avluftning men även tillse att verklig förläggning inte skiljer sig mycket från projekterad så att dimensioneringen ej stämmer. I ett nybyggnadsområde bör därför markytan grovplaneras så att ungefärligt rätt markytanivå finns då kollektorn nedlägges

- att det inte blir veck på slang på grund av för snäva böjar och att stenar klämmer på slangen
- att kopplingarna blir ordentligt utförda så att läckage ej uppstår
- att skada markytan så lite som möjligt för att minimera återställningsarbetet med markytan.

9 NOMENKLATUR FÖR YTJORDVÄRMEKOLLEKTORNS FÖRLÄGGNING

Nedanstående förslag tar endast upp termer som är lämpliga vid beskrivning av hur en ytjordvärmekollektor skall utföras. Termer som rör geologi och värmepumpsteknik har utelämnats i denna sammanställning. Detta förslag har utarbetats vid de möten som beskrivs i förordet.

Ytjordvärmekollektor

Värmeväxlare i form av slangar förlagda horisontellt i jord. Slangarna kan ligga i en eller flera nivåer och i en eller flera grupper. Förläggningsdjup inom 0.5-2 m.

Termer gällande förläggning av ytjordvärmekollektorn:

Förläggningsdjup (vid ytjordvärme d m)

Djupet under markytan för slang eller slanggrupp.

Gallerförläggning

De värmeupptagande rören förläggs med jämn delning inom ett sammanhållet område. Delningen är sådan att inverkan mellan rören måste beaktas (<3-5 m).

Gruppvidd (g)

Avstånd mellan slangar i slanggrupp.

Samlad u-rörsförläggning

Stråken förläggs i liggande U-form. Värmeuttaget från skänk-larna påverkar varandra liksom samlade värmeuttaget i varje stråk.

Slanggrupp

En slanggrupp består av ett antal slangar som ligger så nära varandra - 0.2 å 0.3 m - att de beräkningsmässigt kan behandlas som en slang. Exempel: vertikal tvåslanggrupp, horisontell tvåslanggrupp, treslanggrupp etc.

Solitär förläggning

Slang/slanggrupp frilagda med så stora avstånd till andra slangar/slanggrupper att inbördes påverkan är betydelselös.

Solitär U-rörsförläggning

Slangarna förläggs i U-form. Värmeuttag från skänklarna antas påverka varandra. Avstånden till andra u-rör antas vara sådana att inverkan är praktiskt försumbar.

Stråk

Kollektorn förutsätts vara uppbyggd av en eller flera över varandra liggande slanggrupper. Genom den jord som ligger närmast slanggruppen leds värme till dessa. En remsa inneslutande slanggrupperna med jord benämnes värmeupptagande stråk.

Stråkdelening (b)

Horisontellt avstånd mellan slang eller slanggrupper vid gallerförläggning.

10 DIMENSIONERINGSDIAGRAM

10.1 Lathund till dimensioneringsdiagram

Nedan finns de formler och diagram från kapitel 4 som är nödvändiga för att använda dimensioneringsdiagrammen.

Kända uppgifter

- Energi och effektbehov

E (kWh): Energi/år som skall produceras av värmepump

Q_1 (W): Max. effekt som skall produceras av värmepump
(effekt på kondensorsidan)

- Värmepumpens prestanda

Q_0 (W): Max. effekt enligt dimensioneringsdiagram som tas ur kollektorn

Q_2 (W): Max. effekt från jordvärmekollektorn (effekt på förångarsidan) då Q_1 produceras

T_{Q1} ($^{\circ}\text{C}$): Värmebärartemperatur då Q_1 avges

T_{Q2} ($^{\circ}\text{C}$): Lägsta inkommande köldbärartemperatur då värmepumpen kan avge Q_1

ΔT_F ($^{\circ}\text{C}$): Temperaturdifferens mellan inkommande och utgående köldbärartemperatur

T_0 ($^{\circ}\text{C}$): Lägsta köldbärartemperatur beräknat som medelvärde av inkommande och utgående köldbärartemperaturer. $T_0 = T_{Q2} - \Delta T_F / 2$.

T_{ϕ} Årsmedelköldbärartemperatur

ϕ_Q : Värmefaktor då Q_1 produceras

ϕ : Årsvärmefaktor vid T_{ϕ}

- Luftens årsmedeltemperatur för orten ifråga.

- Snötäckning

- Jordens värmeöverförande egenskaper

λ ($\text{W}/\text{m}, ^{\circ}\text{C}$) värmekonduktivitet

C ($\text{J}/\text{m}^3, ^{\circ}\text{C}$) värmekapacitet

L (J/m^3) latent värme

Beräkning av erforderlig markyta och slanglängd

Välj med hänsyn till klimat och värmeöverförande egenskaper lämpligt eller lämpliga diagram. Med hänsyn till klimat kan viktning mellan diagram göras med hjälp av ortens årsmedeltemperatur för luft.

	Årsmedeltemperatur för uteluften (°C)
Luleå	2.0
Uppsala	5.7
Kristianstad	7.7

Jordtyperna i diagrammen har följande värmeöverförande egenskaper i ofruset resp fruset tillstånd.

Jord- typ	λ^+ W/m°C	λ^- W/m°C	C^+ J/m ³ °C x10 ⁶	C^- J/m ³ °C x10 ⁶	L J/m ³ x10 ⁸	ρ_d kg/m ³	Sr %	Kommentar
1	0.5	2.0	4.0	2.0	3.2	-	-	
2	0.9	2.4	3.5	2.0	2.2	800	100	Kvartsfattig
3	0.55	0.7	1.4	1.1	0.3	1300	20	Kvartsfattig
4	1.25	2.6	3.1	2.0	1.7	1300	100	Kvartsfattig
5	0.7	0.9	1.4	1.1	0.3	1300	20	Kvartsrik
9	1.25	2.0	2.0	1.4	0.85	1300	50	Kvartsrik
6	1.7	3.6	3.1	2.0	1.7	1300	100	Kvartsrik
7	1.2	1.2	1.6	1.4	0.2	1800	20	Kvartsrik
8	2.7	4.3	2.6	2.0	1.1	1800	100	Kvartsrik

Lägsta lämpliga köldbärartemperatur enligt specifikation för värmepump blir:

$$T_0 = T_{Q2} - \Delta T_F / 2$$

ΔT_F är temperaturdifferensen mellan inkommande och utgående köldbärare. Den är vanligen 2-4°C.

Välj slangavstånd (b) och gå in diagram med T_0 och avläs energiuttag/m²,år (e) och viktad köldmedeltemperatur (T_ϕ). (Interpolera om flera diagram används.) T_ϕ ger årsmedelvärmefaktorn (ϕ) ur specifikationen för värmepumpen.

Erforderlig markarea (A) och slanglängd (l):

$$b = 0.7, 1.0 \text{ eller } 1.5 \text{ (m)} \quad b = \text{solitär}$$

$$A = (E/e)(1 - 1/\phi) \quad (\text{m}^2)$$

$$l = A/b \quad (\text{m}) \quad l = (E/e)(1-1/\phi) \text{ (m)}$$

Maximal effekt enligt dimensioneringsdiagram:

$$\text{Topplast: } K = 0.3$$

$$\text{Baslast: } K = 0.12$$

$$b = 0.7, 1.0 \text{ eller } 1.5 \text{ (m)} \quad b = \text{solitär}$$

$$Q_0 = l \cdot b \cdot e \cdot K \quad (\text{W}) \quad Q_0 = l \cdot e \cdot K \text{ (W)}$$

$$q_0 = b \cdot e \cdot K \quad (\text{W/m}) \quad q_0 = e \cdot K \text{ (W/m)}$$

Maximal effekt på värmepumpens köldbärarsida:

$$Q_2 = Q(1 - 1/\phi_Q) \quad (\text{W})$$

$$q_2 = Q_2/l \quad (\text{W/m})$$

Om $Q_2 > Q_0$ eller $Q_2 < Q_0$ så att värmepumpen kräver en kyleffekt som är större än den dimensionerade kollektorn medger eller att kollektorn har en överkapacitet bör en korrigering göras av Q_0 . Används en rördiameter i ytjordvärmekollektorn som är större eller mindre än 0.04 m bör Q_0 korrigeras även för detta. Ny köldbärartemperatur blir efter korrigering:

$$T_0^{\text{kor}} = T_0 + \Delta T_T + \Delta T_R$$

Genom att använda T_0^{kor} eller ett värde mellan T_0 och T_0^{kor} kan en ny uppskattning göras av Q_0 .

Korrigering på grund av effektpuls

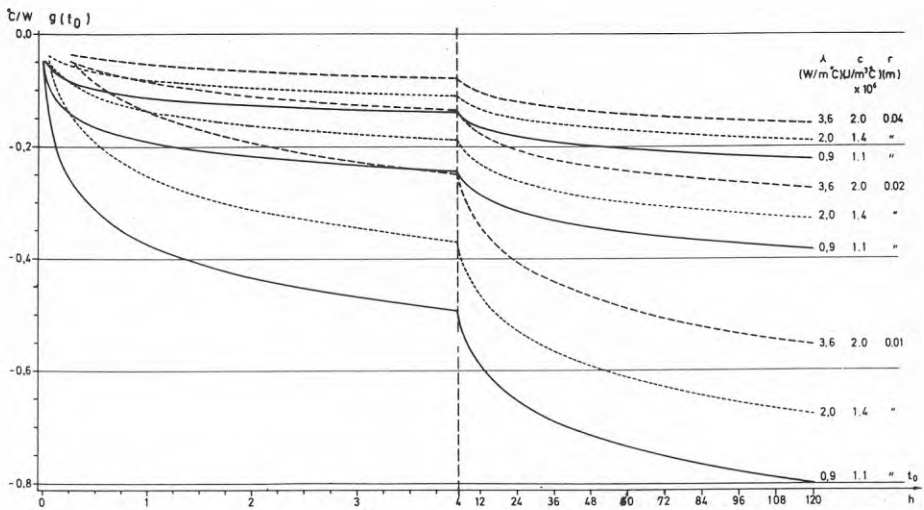
$$\Delta T_T = q_2 - q_0 \left(\frac{1}{\lambda} E_t \left(\frac{r^2}{4at_0} \right) - m_0 \right)$$

$$\begin{aligned}\Delta T_T &= q_2 - q_0 \left(-\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4at_0}{r^2} \right) - 0.5772 \right) - m_0 \right) = \\ &= (q_2 - q_0) \cdot (g(t_0) - m_0)\end{aligned}$$

$$at_0/r^2 > 20$$

$$m_0 = 0.06 \text{ m}^0\text{C/W}$$

$g(t_0)$ kan uppskattas med figur 10.1 då t_0 är känt.



Figur 10.1 Effektpuls. Funktionen $g(t_0)$ illustrerad med exempel på jordarter.

Korrigerig på grund av förändrad rördiameter

$R_0 = 0.02 \text{ m}$ rörradie använd i dimensioneringsdiagram
 $m_0 = 0.06 \text{ m}^0\text{C/W}$ värmemotstånd mellan köldbärare och ytter-sida rör i dimensioneringsdiagram

$R = \text{ny rörradie}$

$m_R = \text{nytt värmemotstånd}$

$$\Delta T_R = q_0 \left(m_0 - m_R + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{R_0} \right)$$

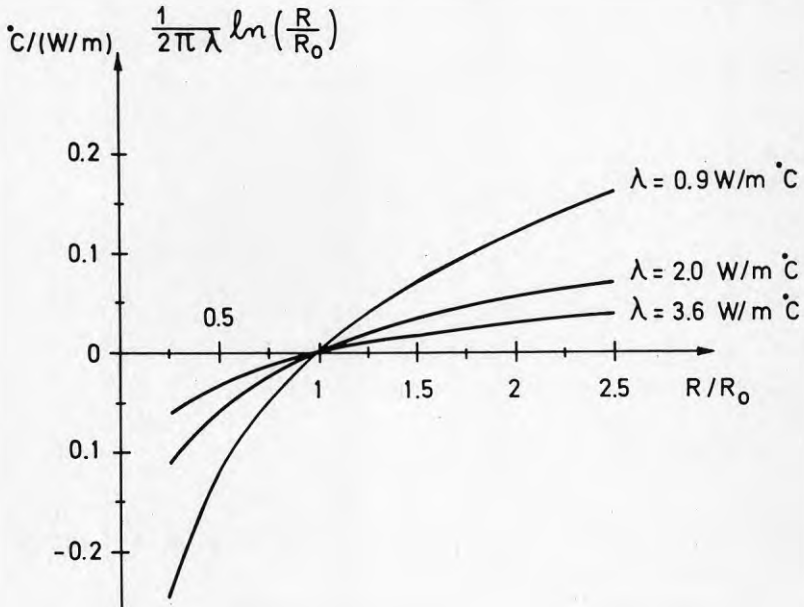
Sista termen kan uppskattas i figur 10.2. Den viktade medelköld-temperaturen förändras enligt nedanstående formel.

$$\Delta T_{\phi} = (e \cdot b) \cdot C \cdot (m_0 - m_R + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{R_0})$$

För solitär förläggning sätts $b = 1$

Toppeffektuttag $C = 0.17$

Baseeffektuttag $C = 0.12$



Figur 10.2 Förändrad rördiameter.

10.2 Dimensioneringsdiagram

Dimensioneringsdiagrammen är placerade enligt följande ordning.

Luleå	topplast
Luleå	baslast
Uppsala	topplast
Uppsala	baslast
Kristianstad	topplast
Kristianstad	baslast

Nedanstående beteckningar används i diagrammen.

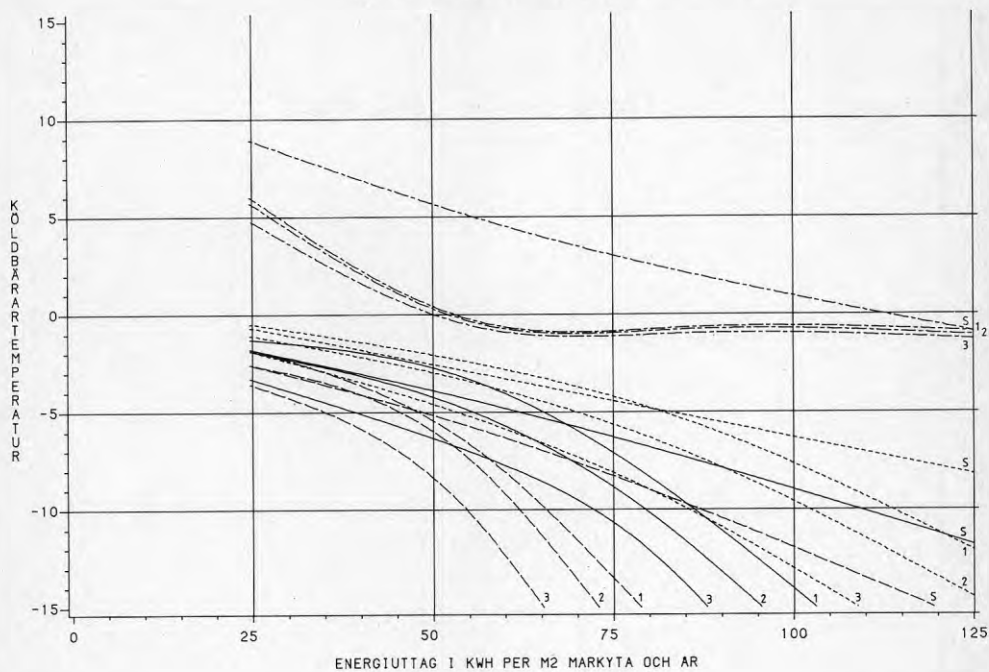
Varaktighet:	"Topp" betyder toppeffektbelastning och "bas" betyder baseffektbelastning.
NIVÅ:	Anger förläggingsdjup för slang
cc:	anger avstånd mellan slangar och är =b i formlerna ovan.
EMIN:	MINSTA köldbärartemperatur under extremåret.
NMAX:	HÖGSTA köldbärartemperatur under ett normalår.
NMIN:	MINSTA köldbärartemperatur under ett normalår.
VMED:	Den viktade årsmedelköldbärartemperaturen.

Köldbärartemperaturen som avläses ur diagrammen är i °C.

I vissa fall ger EMIN en högre köldbärartemperatur än VMIN. (Ex. Luleå, jord 2, nivå 1.4 m.) Detta beror endast på att kurvorna är bildade med hjälp av relativt få punkter (energiuttag, köldbärartemperatur). Kurvanpassning, som gjorts med dator, kan medföra något för hög köldbärartemperatur strax innan en kurva kröker kraftigt nedåt. I några diagram har detta uppstått och felet beror således inte på datorberäkningarna utan för få punkter för att kurvanpassningen skall bli helt korrekt. Felen är försumbara.

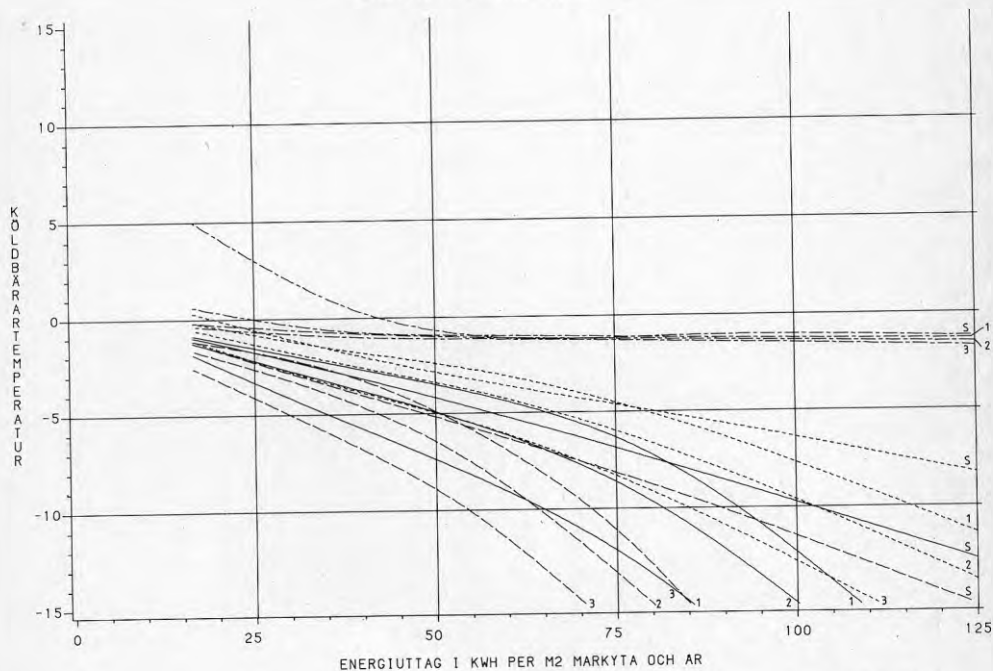
LULEÅ JORD1

NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



LULEÅ JORD1

NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



LEGEND:

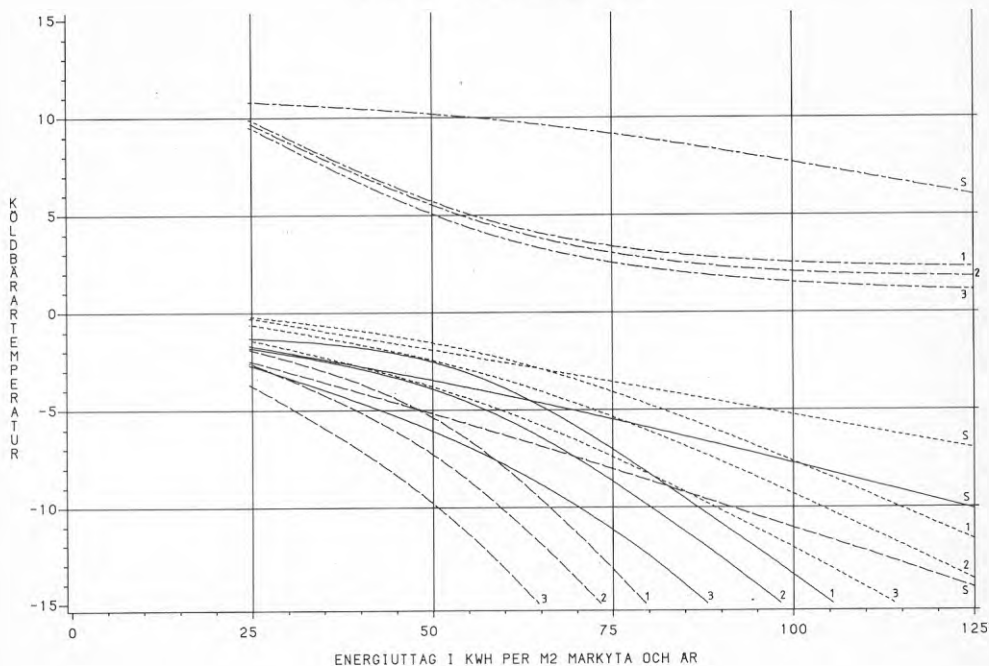
S --- EMIN CC=SOLITÄR
 S --- NMAX CC=SOLITÄR
 S --- NMIN CC=SOLITÄR
 S --- VMED CC=SOLITÄR

1 --- EMIN CC=0.7M
 1 --- NMAX CC=0.7M
 1 --- NMIN CC=0.7M
 1 --- VMED CC=0.7M

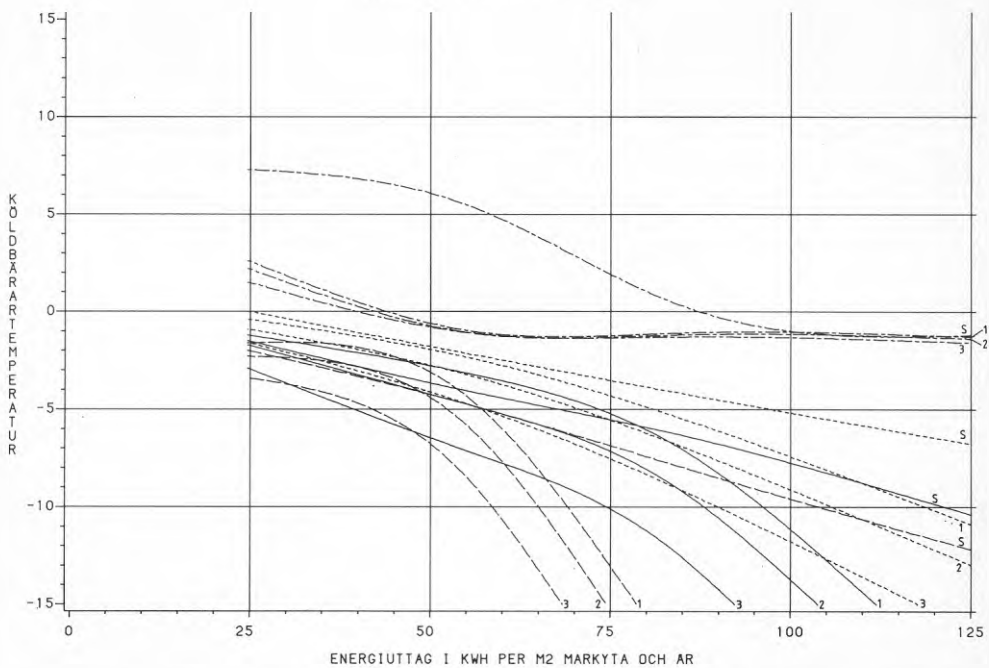
2 --- EMIN CC=1.0M
 2 --- NMAX CC=1.0M
 2 --- NMIN CC=1.0M
 2 --- VMED CC=1.0M

3 --- EMIN CC=1.5M
 3 --- NMAX CC=1.5M
 3 --- NMIN CC=1.5M
 3 --- VMED CC=1.5M

LULEÅ JORD2
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



LULEÅ JORD2
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP

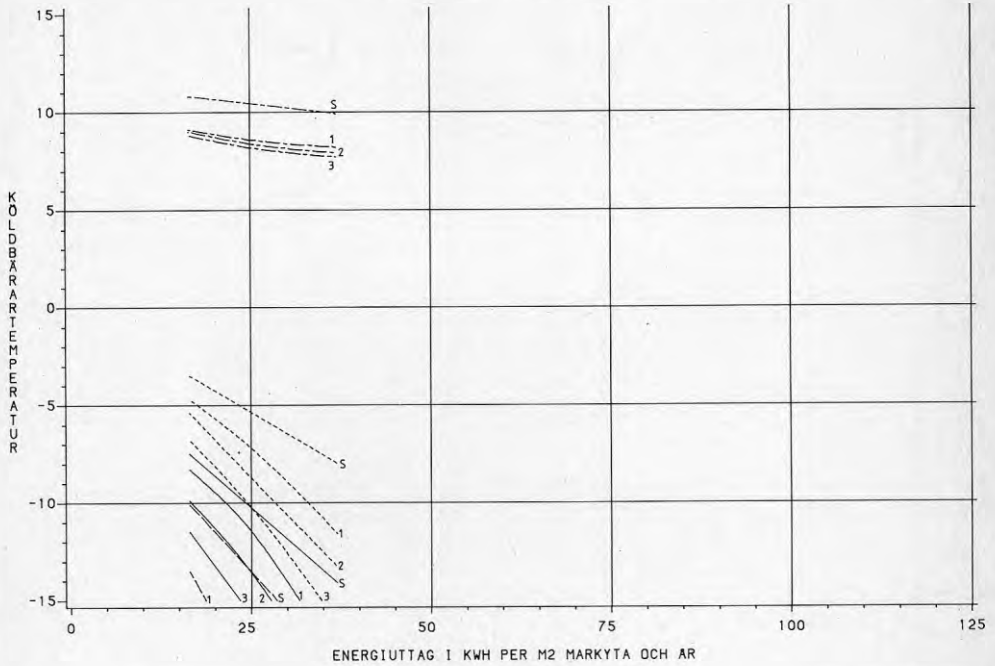


LEGEND

S - - - - EMIN CC=SOLITÄR	1 - - - - EMIN CC=0.7M	2 - - - - EMIN CC=1.0M	3 - - - - EMIN CC=1.5M
S - - - - NMAX CC=SOLITÄR	1 - - - - NMAX CC=0.7M	2 - - - - NMAX CC=1.0M	3 - - - - NMAX CC=1.5M
S - - - - NMIN CC=SOLITÄR	1 - - - - NMIN CC=0.7M	2 - - - - NMIN CC=1.0M	3 - - - - NMIN CC=1.5M
S - - - - VMED CC=SOLITÄR	1 - - - - VMED CC=0.7M	2 - - - - VMED CC=1.0M	3 - - - - VMED CC=1.5M

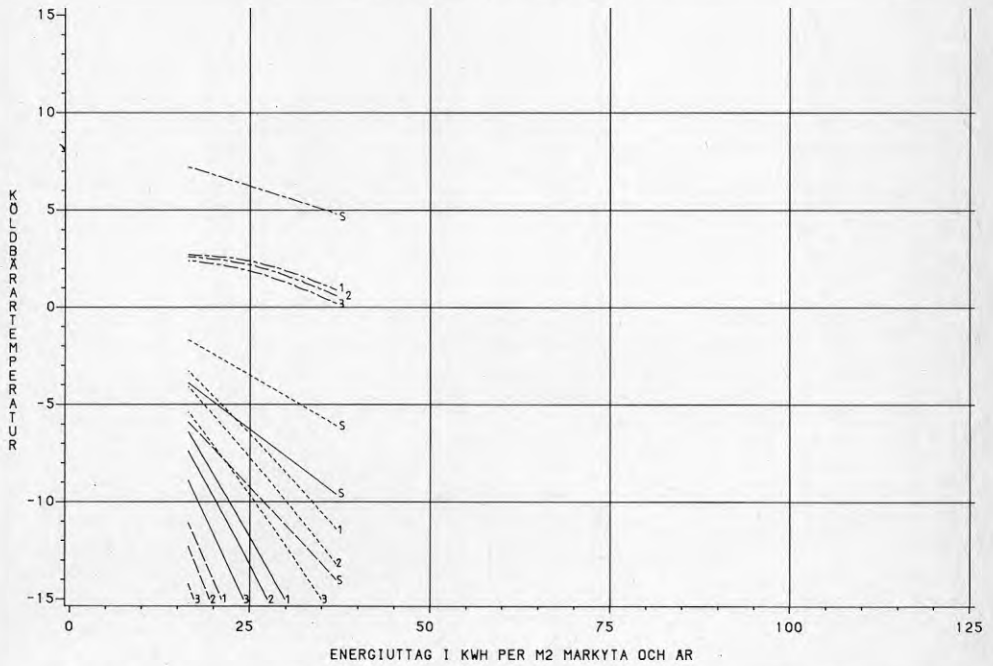
LULEÅ JORD3

NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



LULEÅ JORD3

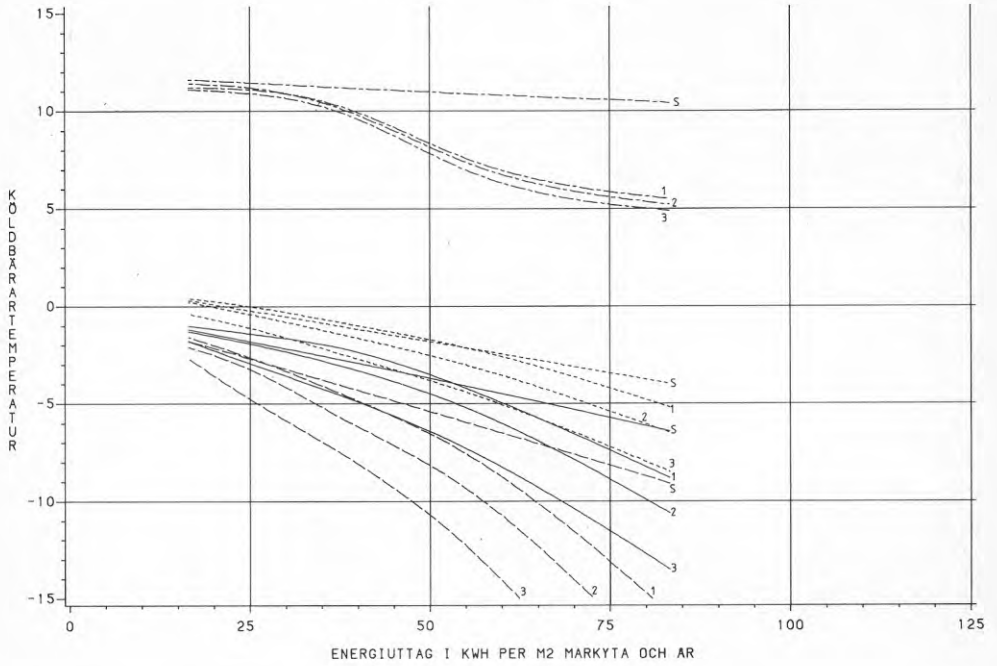
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



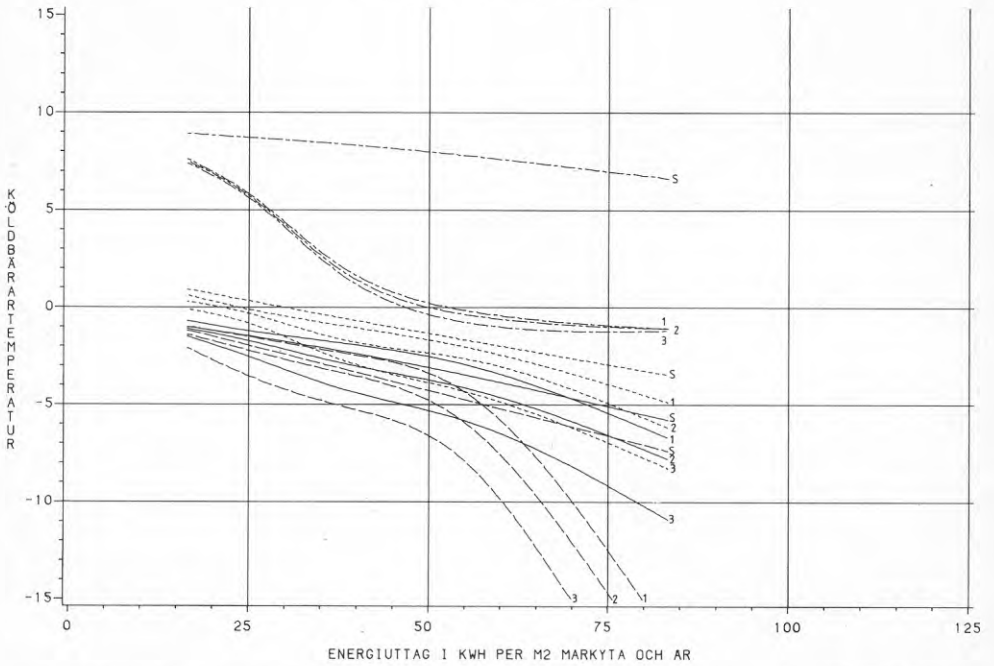
LEGEND:

S	EMIN CC=SOLITÄR	1	EMIN CC=0.7M	2	EMIN CC=1.0M	3	EMIN CC=1.5M
S	NMAX CC=SOLITÄR	1	NMAX CC=0.7M	2	NMAX CC=1.0M	3	NMAX CC=1.5M
S	NMIN CC=SOLITÄR	1	NMIN CC=0.7M	2	NMIN CC=1.0M	3	NMIN CC=1.5M
S	VMED CC=SOLITÄR	1	VMED CC=0.7M	2	VMED CC=1.0M	3	VMED CC=1.5M

LULEÅ JORD4
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



LULEÅ JORD4
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP

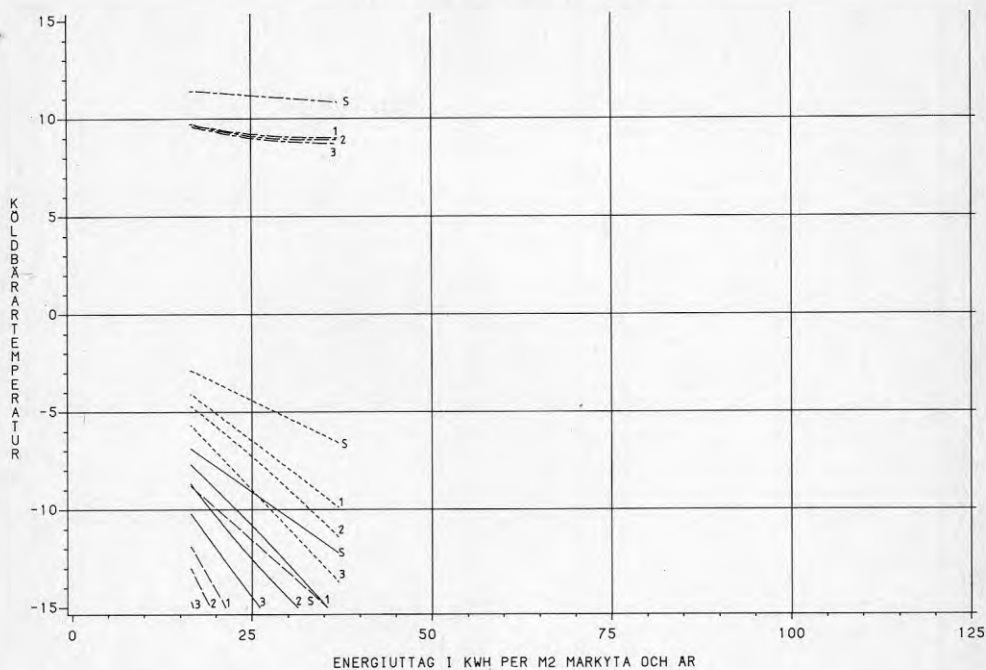


LEGEND:

S----- EMIN CC=SOLITÄR	1----- EMIN CC=0.7M	2----- EMIN CC=1.0M	3----- EMIN CC=1.5M
S----- NMAX CC=SOLITÄR	1----- NMAX CC=0.7M	2----- NMAX CC=1.0M	3----- NMAX CC=1.5M
S----- NMIN CC=SOLITÄR	1----- NMIN CC=0.7M	2----- NMIN CC=1.0M	3----- NMIN CC=1.5M
S----- VMED CC=SOLITÄR	1----- VMED CC=0.7M	2----- VMED CC=1.0M	3----- VMED CC=1.5M

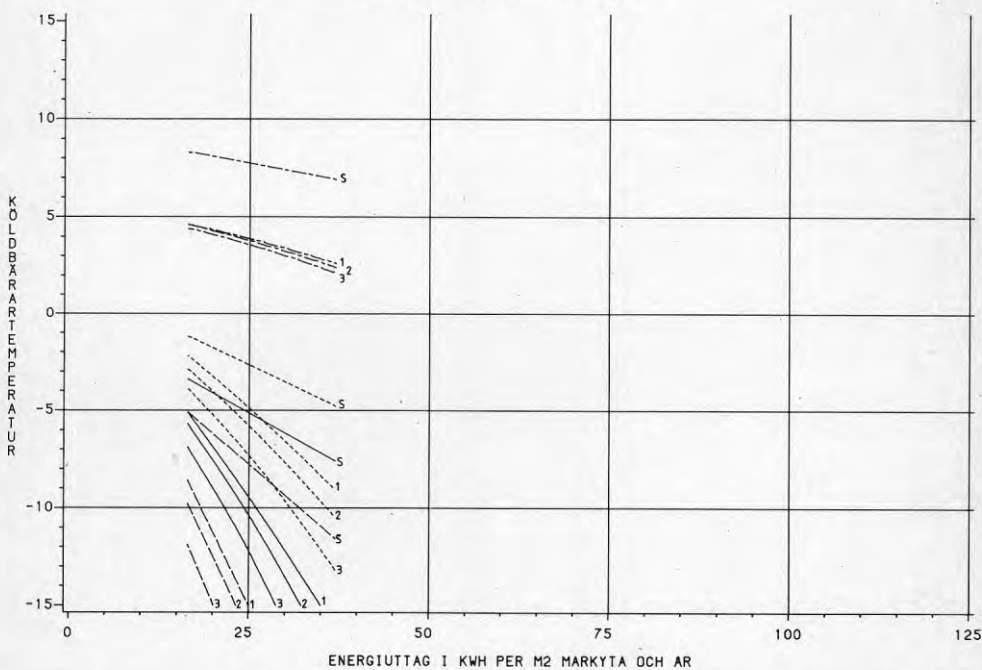
LULEÅ JORD5

NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



LULEÅ JORD5

NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP

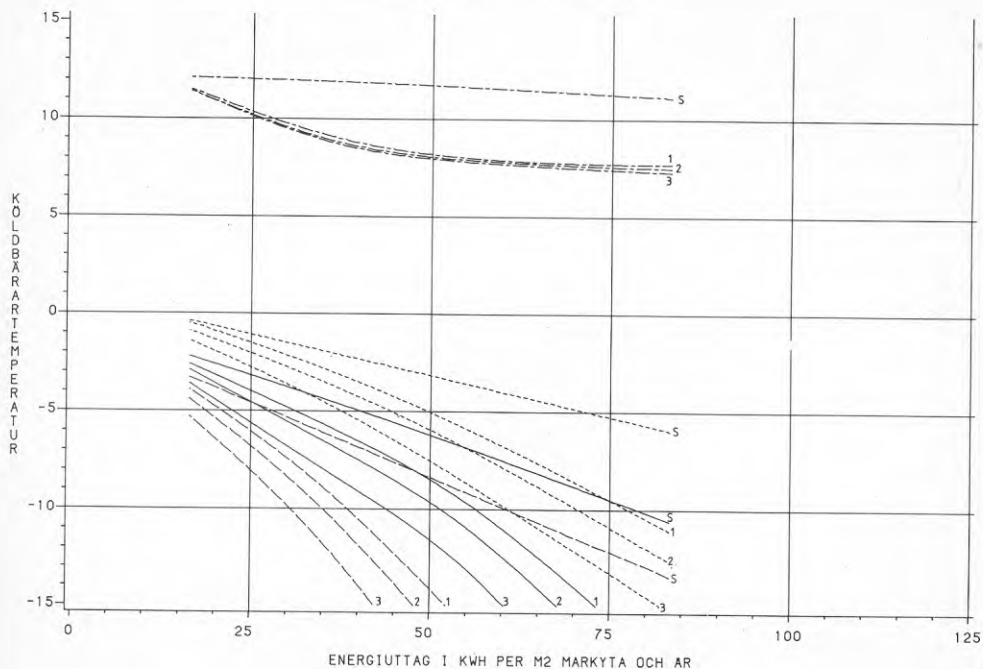


LEGEND:

S----- EMIN CC=SOLITÄR	1----- EMIN CC=0.7M	2----- EMIN CC=1.0M	3----- EMIN CC=1.5M
S----- NMAX CC=SOLITÄR	1----- NMAX CC=0.7M	2----- NMAX CC=1.0M	3----- NMAX CC=1.5M
S----- NMIN CC=SOLITÄR	1----- NMIN CC=0.7M	2----- NMIN CC=1.0M	3----- NMIN CC=1.5M
S----- VMED CC=SOLITÄR	1----- VMED CC=0.7M	2----- VMED CC=1.0M	3----- VMED CC=1.5M

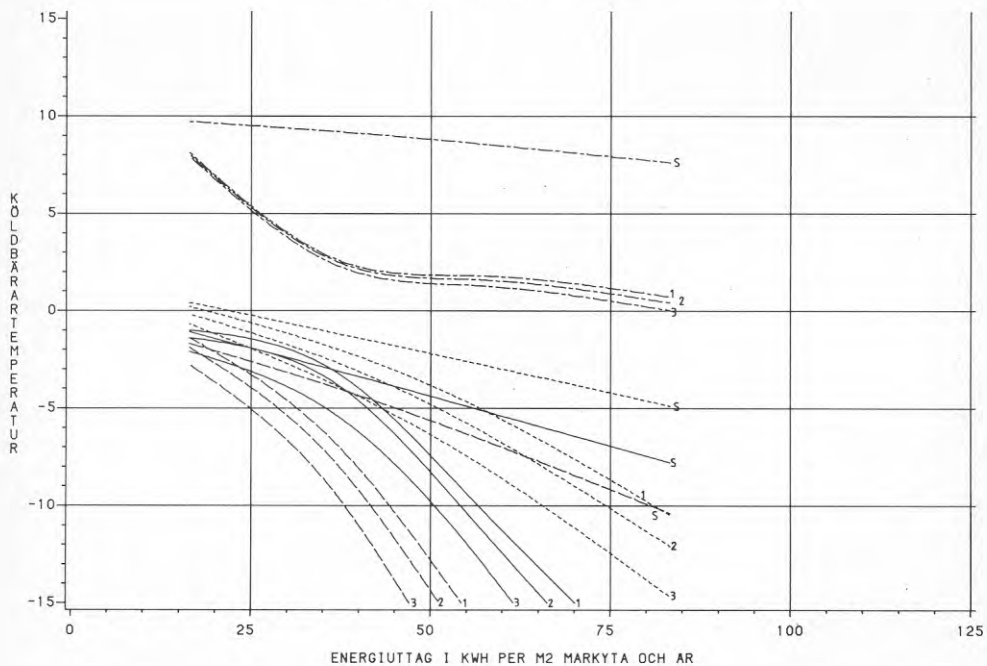
LULEÅ JORD9

NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



LULEÅ JORD9

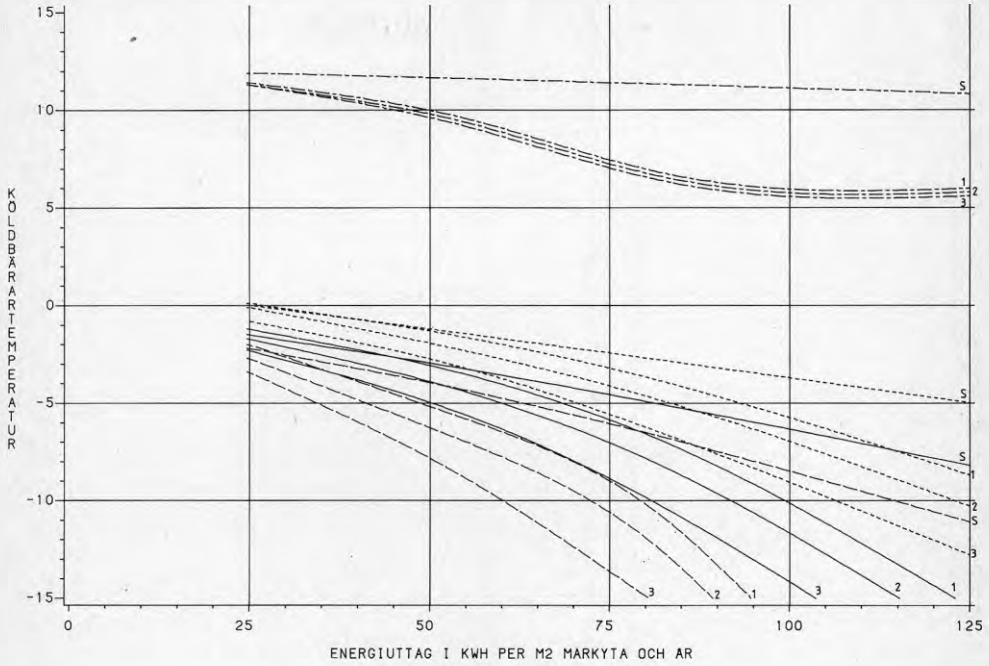
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



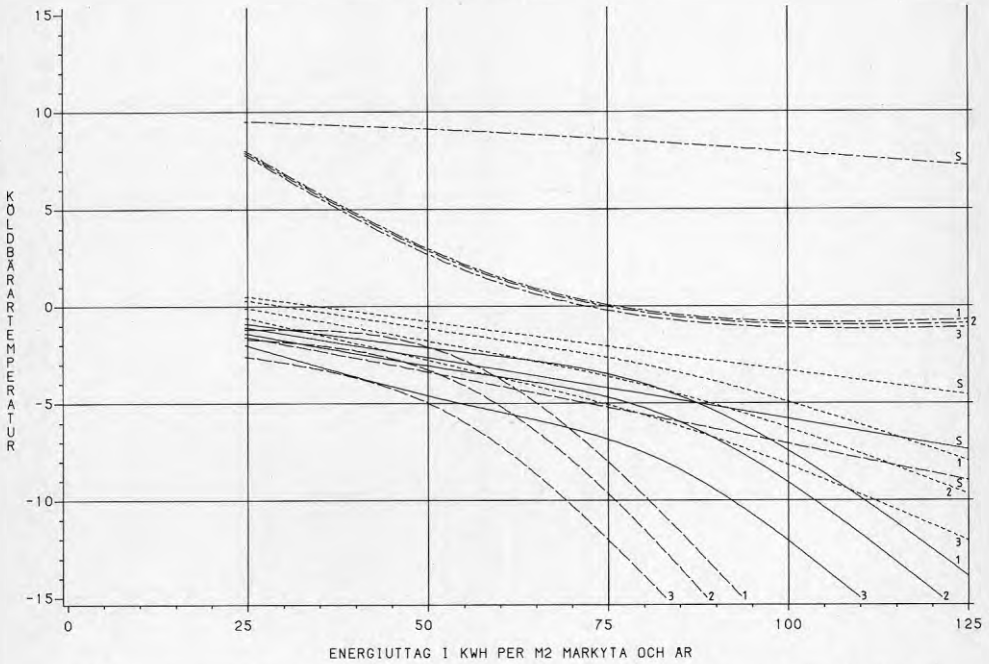
LEGEND:

S-----	EMIN CC=SOLITÄR	1-----	EMIN CC=0.7M	2-----	EMIN CC=1.0M	3-----	EMIN CC=1.5M
S-----	NMAX CC=SOLITÄR	1-----	NMAX CC=0.7M	2-----	NMAX CC=1.0M	3-----	NMAX CC=1.5M
S-----	NMIN CC=SOLITÄR	1-----	NMIN CC=0.7M	2-----	NMIN CC=1.0M	3-----	NMIN CC=1.5M
S-----	VMED CC=SOLITÄR	1-----	VMED CC=0.7M	2-----	VMED CC=1.0M	3-----	VMED CC=1.5M

LULEÅ JORD6
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



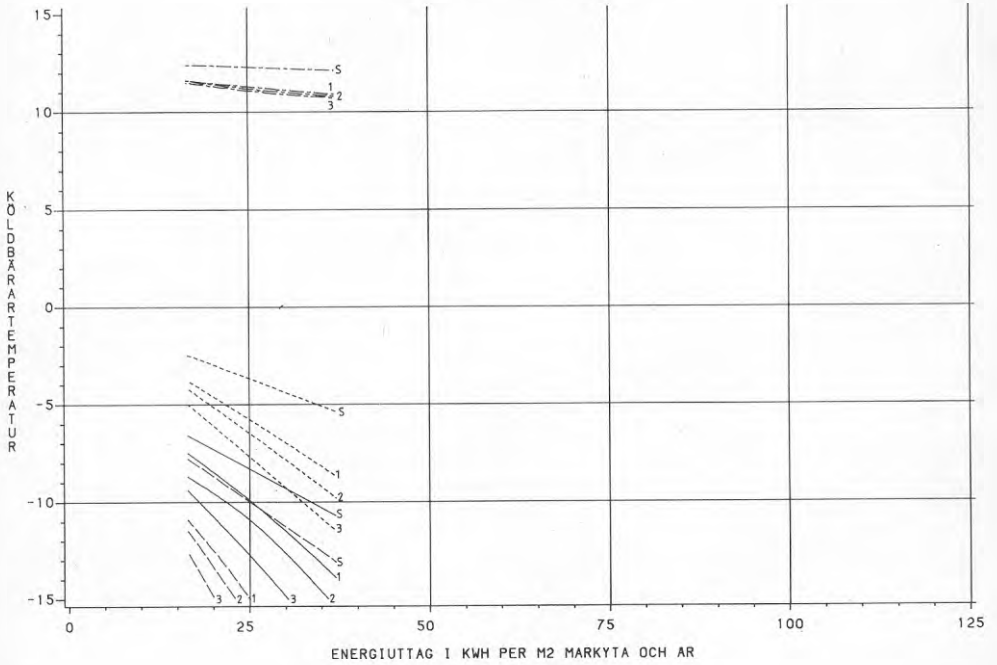
LULEÅ JORD6
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



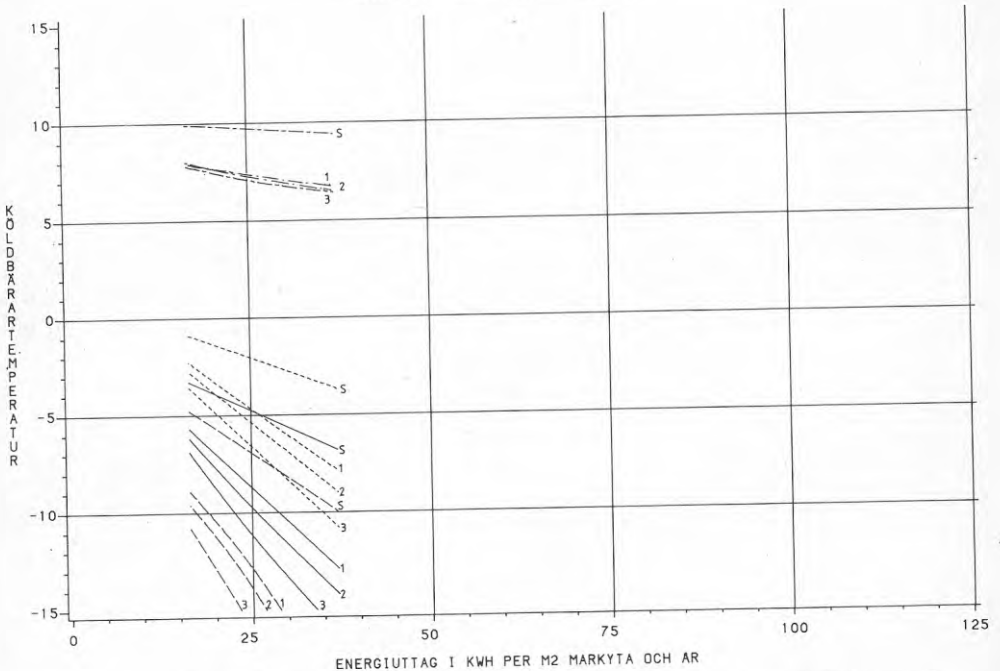
LEGEND:

S	EMIN CC=SOLLITÄR	1	EMIN CC=0.7M	2	EMIN CC=1.0M	3	EMIN CC=1.5M
S	NMAX CC=SOLLITÄR	1	NMAX CC=0.7M	2	NMAX CC=1.0M	3	NMAX CC=1.5M
S	NMIN CC=SOLLITÄR	1	NMIN CC=0.7M	2	NMIN CC=1.0M	3	NMIN CC=1.5M
S	VMED CC=SOLLITÄR	1	VMED CC=0.7M	2	VMED CC=1.0M	3	VMED CC=1.5M

LULEÅ JORD7
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



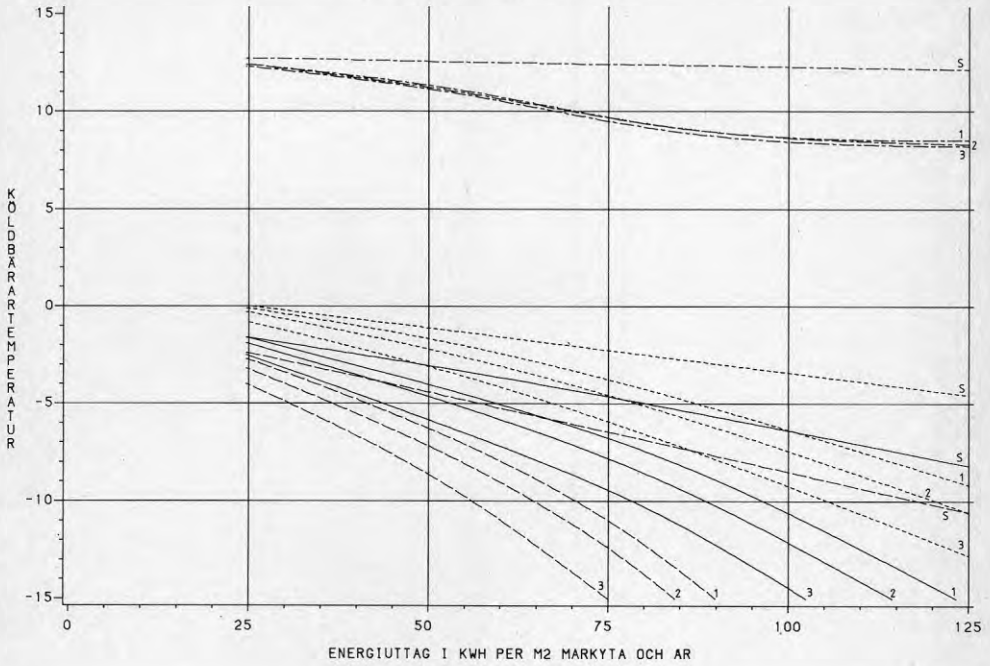
LULEÅ JORD7
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



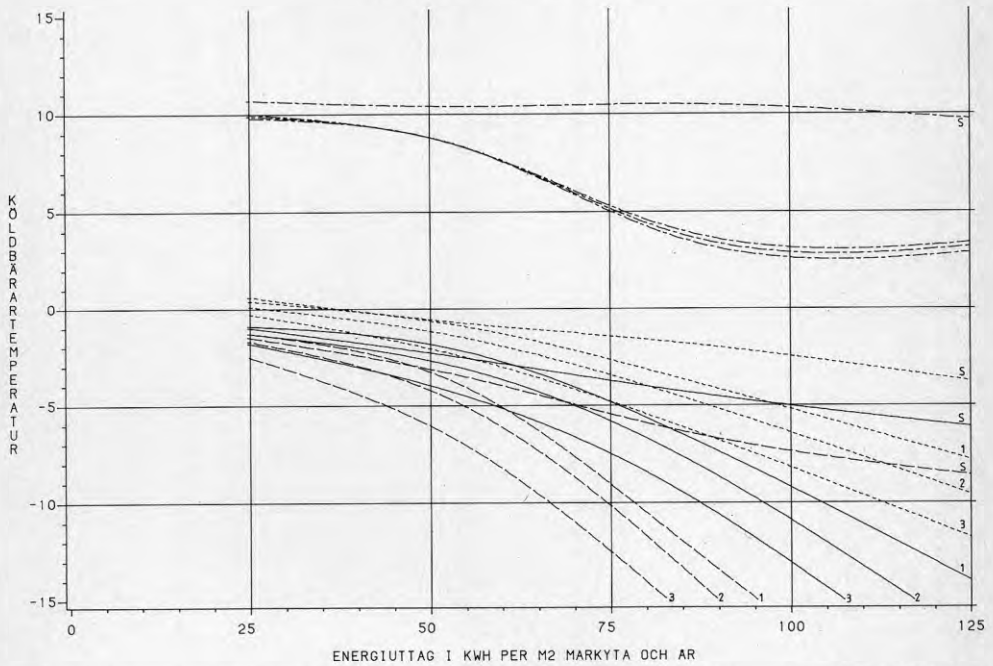
LEGEND:

S----- EMIN CC=SOLITÄR	1----- EMIN CC=0.7M	2----- EMIN CC=1.0M	3----- EMIN CC=1.5M
S----- NMAX CC=SOLITÄR	1----- NMAX CC=0.7M	2----- NMAX CC=1.0M	3----- NMAX CC=1.5M
S----- NMIN CC=SOLITÄR	1----- NMIN CC=0.7M	2----- NMIN CC=1.0M	3----- NMIN CC=1.5M
S----- VHED CC=SOLITÄR	1----- VHED CC=0.7M	2----- VHED CC=1.0M	3----- VHED CC=1.5M

LULEÅ JORDS
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



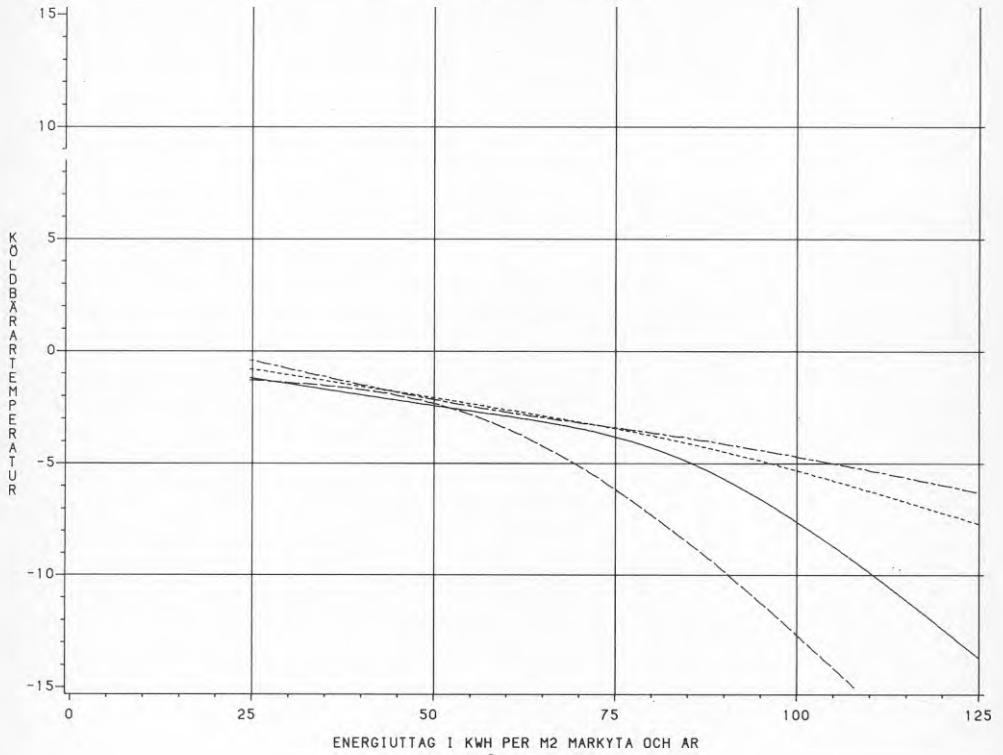
LULEÅ JORDS
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



- LEGEND:
- | | | | |
|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| S----- EMIN CC=SOLITÄR | 1----- EMIN CC=0.7M | 2----- EMIN CC=1.0M | 3----- EMIN CC=1.5M |
| S----- NMAX CC=SOLITÄR | 1----- NMAX CC=0.7M | 2----- NMAX CC=1.0M | 3----- NMAX CC=1.5M |
| S----- NMIN CC=SOLITÄR | 1----- NMIN CC=0.7M | 2----- NMIN CC=1.0M | 3----- NMIN CC=1.5M |
| S----- VMED CC=SOLITÄR | 1----- VMED CC=0.7M | 2----- VMED CC=1.0M | 3----- VMED CC=1.5M |

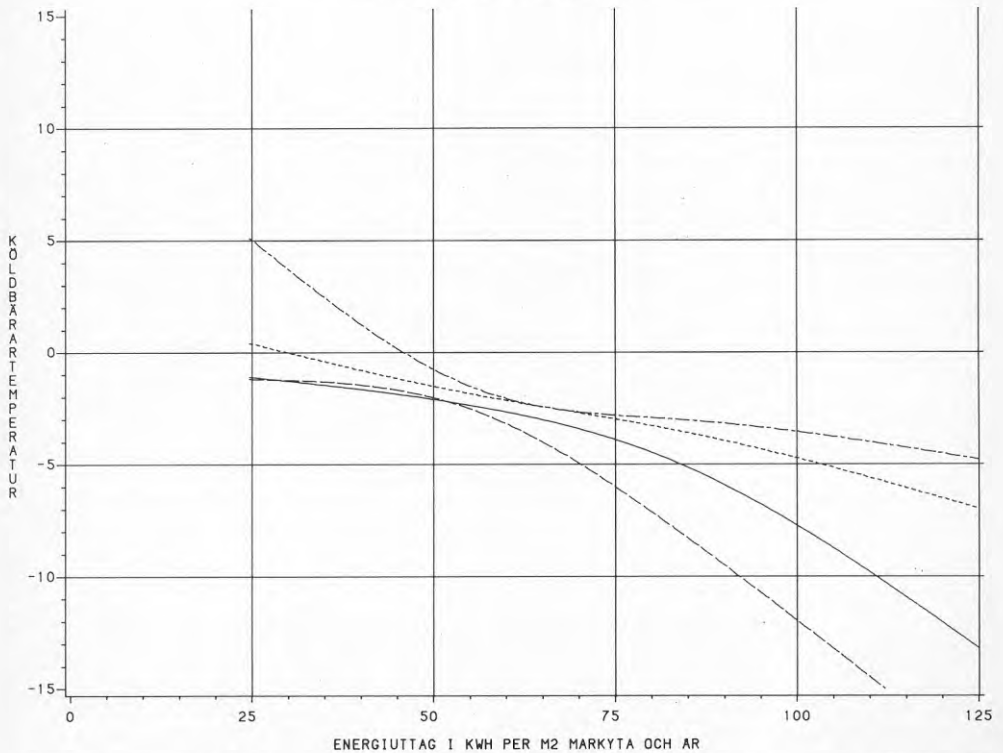
LULEÅ JORD1

NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS



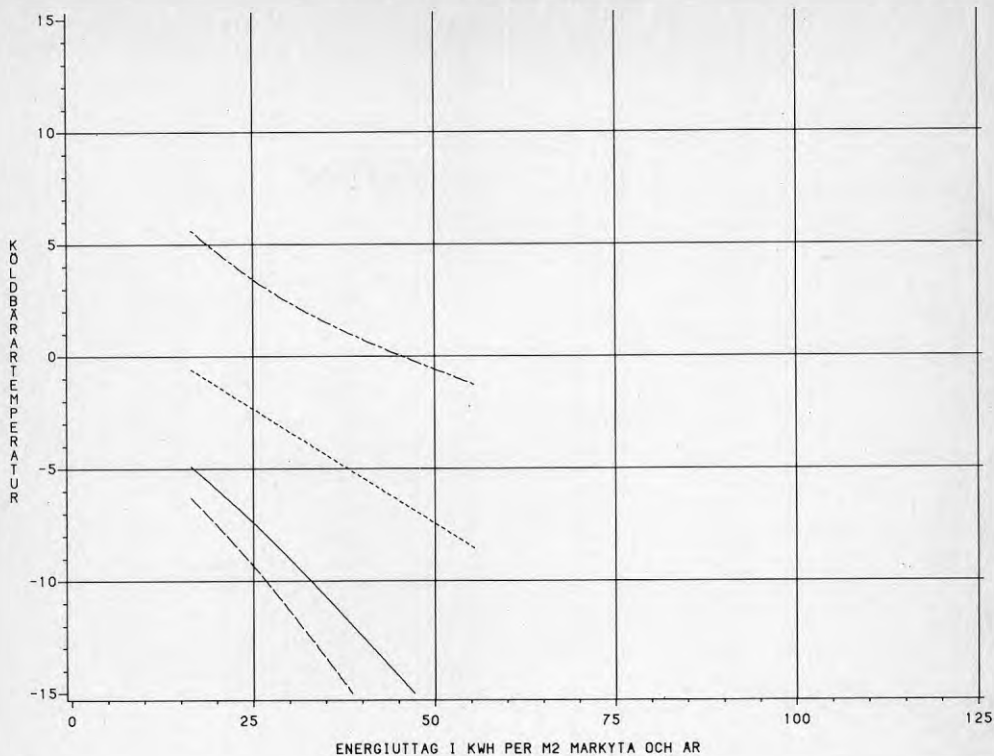
LULEÅ JORD2

NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS

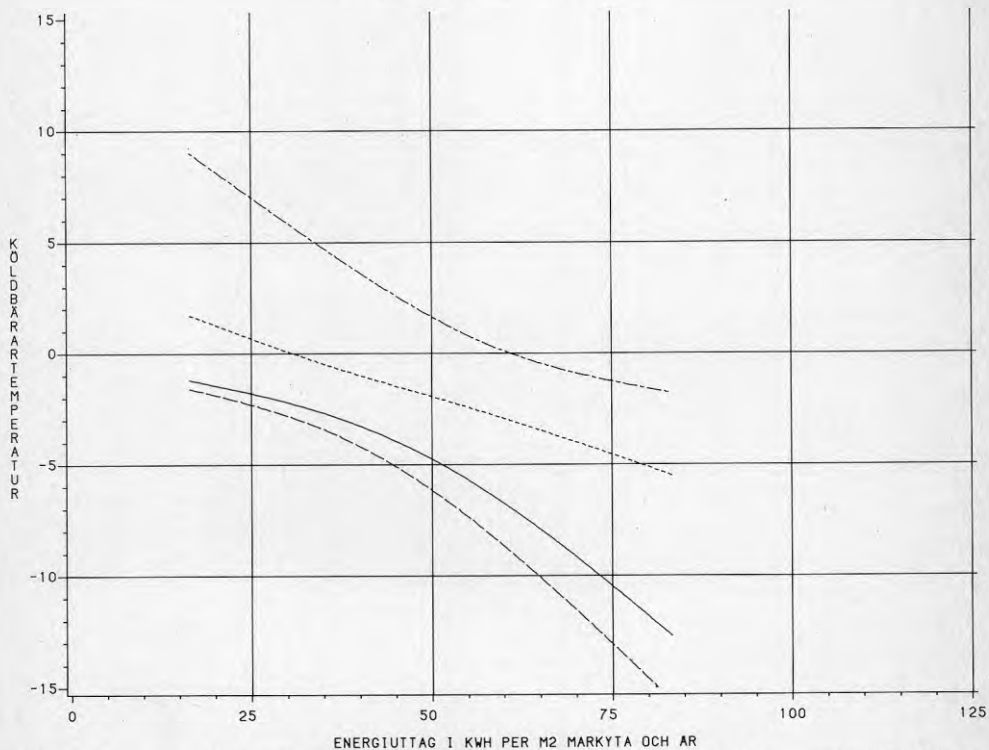


LEGEND: V ——— EMIN CC=1.0M - - - - NMAX CC=1.0M ——— NMIN CC=1.0M ····· VMED CC=1.0M

LULEÅ JORD5
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS

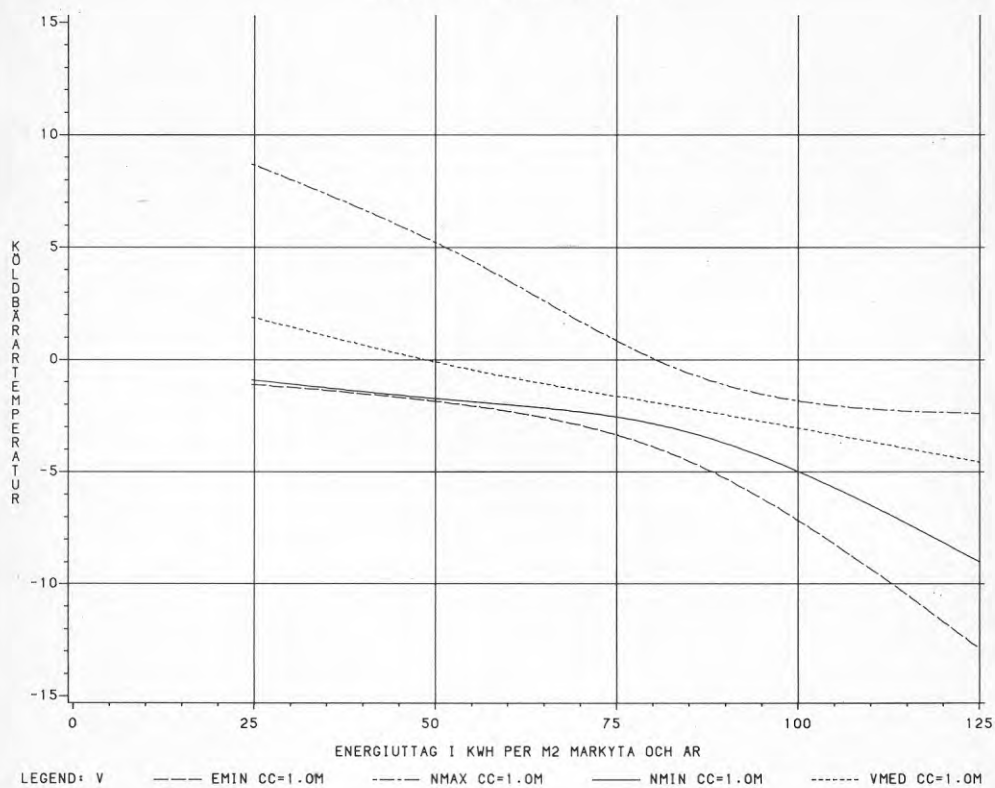


LULEÅ JORD9
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS

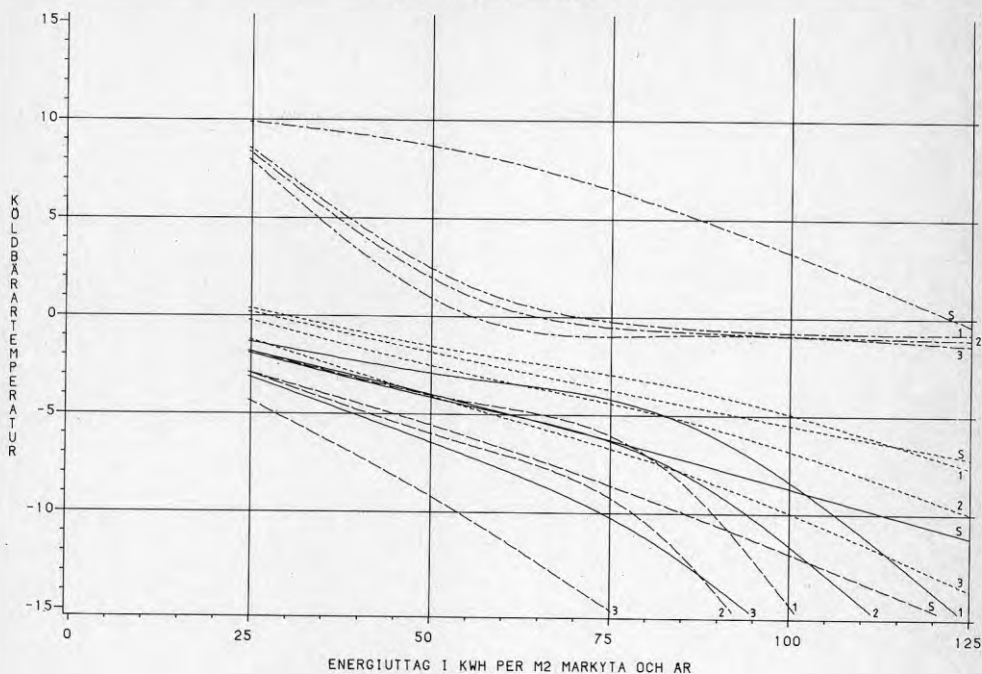


LEGEND: V ——— EMIN CC=1.0M - - - - NMAX CC=1.0M ——— NMIN CC=1.0M ····· VMED CC=1.0M

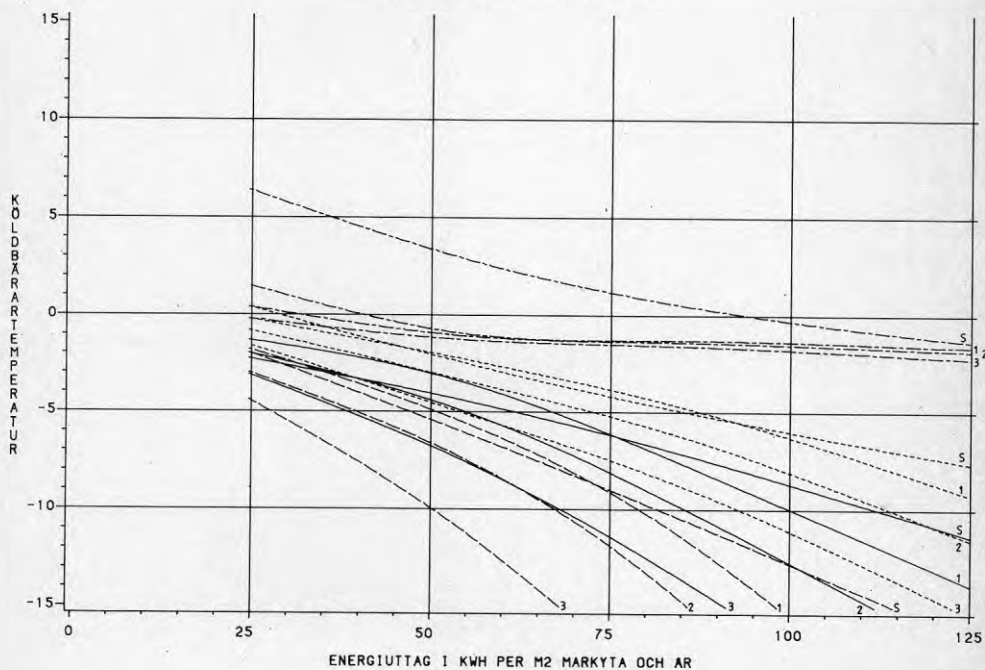
LULEÅ JORD6
NIVA=0.9 M DCH VARAKTIGHET=BAS



UPPSALA JORD1
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



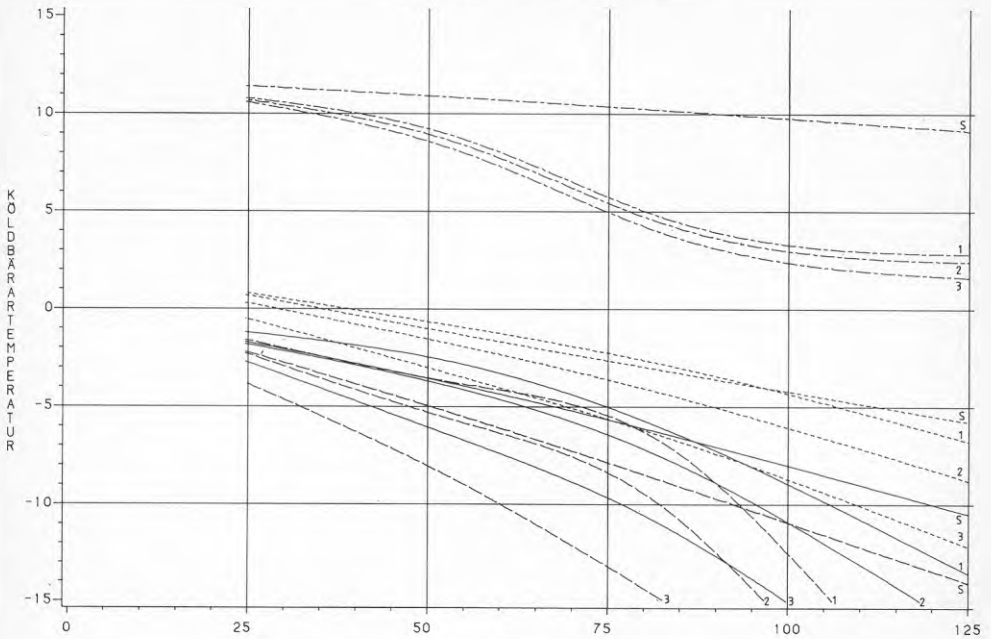
UPPSALA JORD1
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



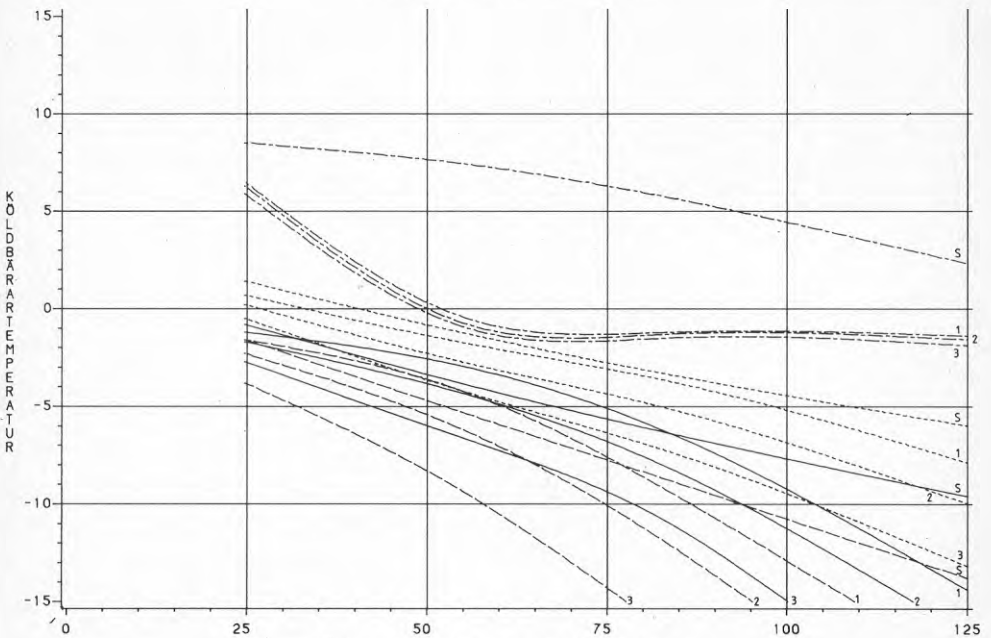
LEGEND:

S - - - - EMIN CC=SOLITÄR	1 - - - - EMIN CC=0.7H	2 - - - - EMIN CC=1.0M	3 - - - - EMIN CC=1.5M
S - - - - NMAX CC=SOLITÄR	1 - - - - NMAX CC=0.7H	2 - - - - NMAX CC=1.0M	3 - - - - NMAX CC=1.5M
S - - - - NMIN CC=SOLITÄR	1 - - - - NMIN CC=0.7H	2 - - - - NMIN CC=1.0M	3 - - - - NMIN CC=1.5M
S - - - - VMED CC=SOLITÄR	1 - - - - VMED CC=0.7H	2 - - - - VMED CC=1.0M	3 - - - - VMED CC=1.5M

UPPSALA JORD2
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



UPPSALA JORD2
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP

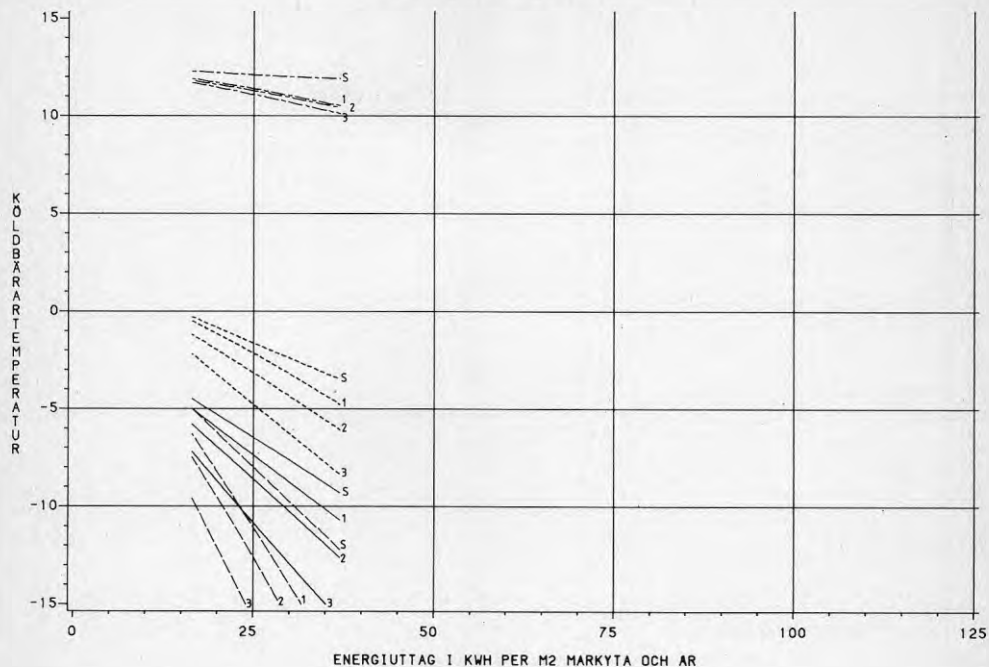


ENERGIUTTAG I KWH PER M2 MARKYTA OCH ÅR

LEGEND:	S----- EMIN CC=SOLITÄR	1----- EMIN CC=0.7M	2----- EMIN CC=1.0M	3----- EMIN CC=1.5M
	S----- NMAX CC=SOLITÄR	1----- NMAX CC=0.7M	2----- NMAX CC=1.0M	3----- NMAX CC=1.5M
	S----- NMIN CC=SOLITÄR	1----- NMIN CC=0.7M	2----- NMIN CC=1.0M	3----- NMIN CC=1.5M
	S----- VMED CC=SOLITÄR	1----- VMED CC=0.7M	2----- VMED CC=1.0M	3----- VMED CC=1.5M

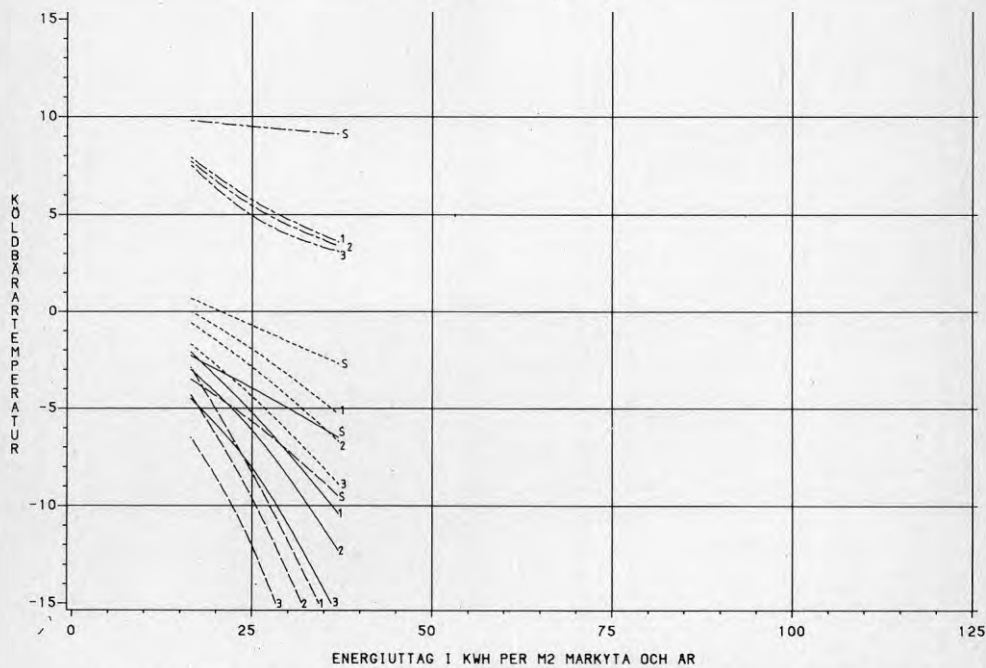
UPPSALA JORD5

NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



UPPSALA JORD5

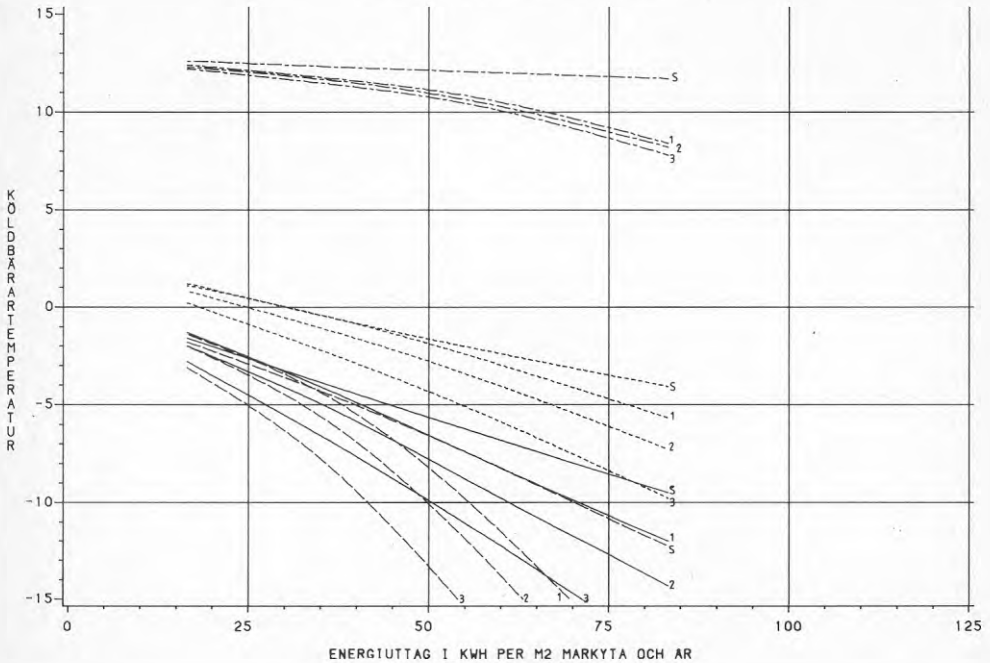
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



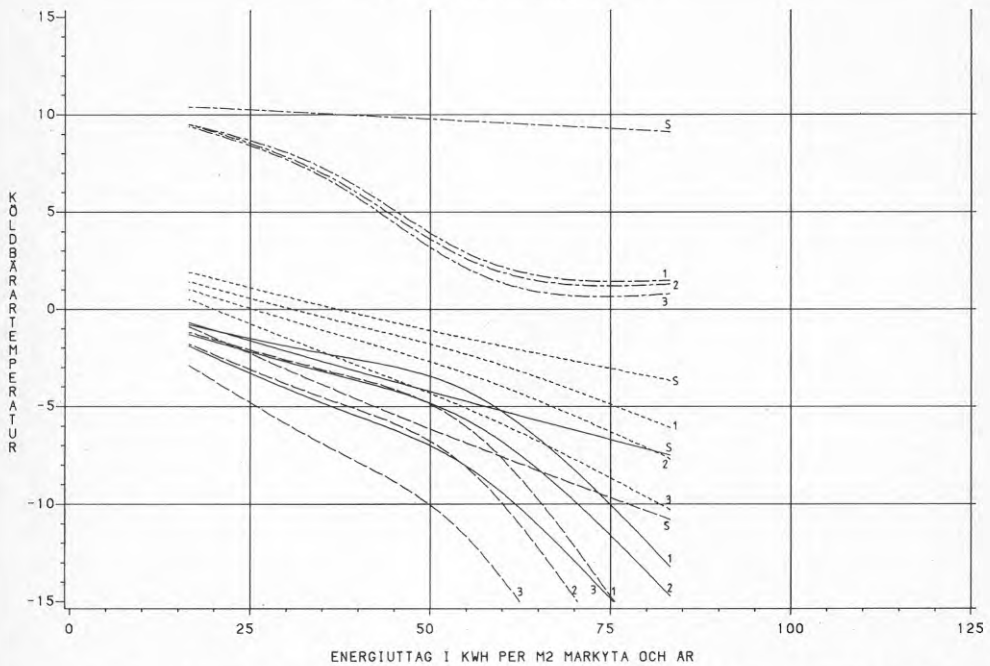
LEGEND:

S	EMIN CC=SOLITAR	1	EMIN CC=0.7M	2	EMIN CC=1.0M	3	EMIN CC=1.5M
S	NMAX CC=SOLITAR	1	NMAX CC=0.7M	2	NMAX CC=1.0M	3	NMAX CC=1.5M
S	NMIN CC=SOLITAR	1	NMIN CC=0.7M	2	NMIN CC=1.0M	3	NMIN CC=1.5M
S	VMED CC=SOLITAR	1	VMED CC=0.7M	2	VMED CC=1.0M	3	VMED CC=1.5M

UPPSALA JORD9
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



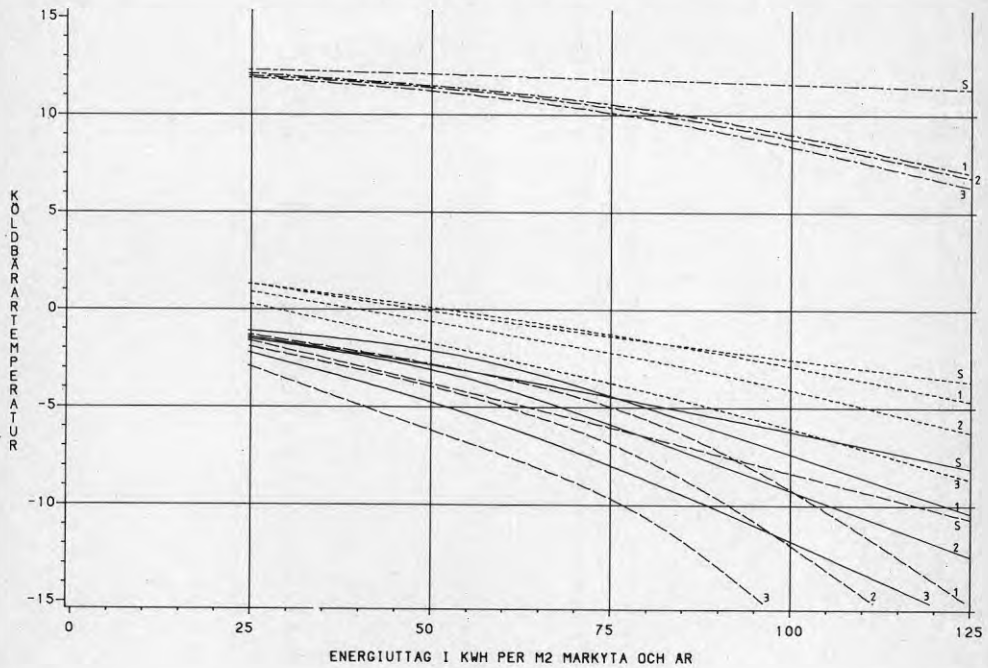
UPPSALA JORD9
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



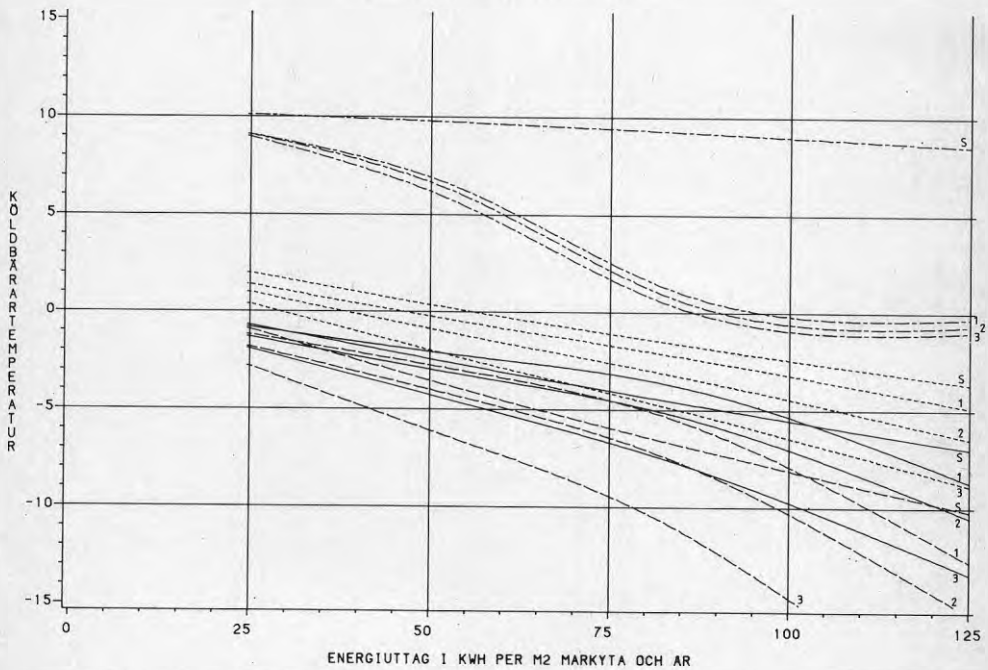
LEGEND:

S----- EMIN CC=SOLITÄR	1----- EMIN CC=0.7M	2----- EMIN CC=1.0M	3----- EMIN CC=1.5M
S----- NMAX CC=SOLITÄR	1----- NMAX CC=0.7M	2----- NMAX CC=1.0M	3----- NMAX CC=1.5M
S----- NMIN CC=SOLITÄR	1----- NMIN CC=0.7M	2----- NMIN CC=1.0M	3----- NMIN CC=1.5M
S----- VHED CC=SOLITÄR	1----- VHED CC=0.7M	2----- VHED CC=1.0M	3----- VHED CC=1.5M

UPPSALA JORD6
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



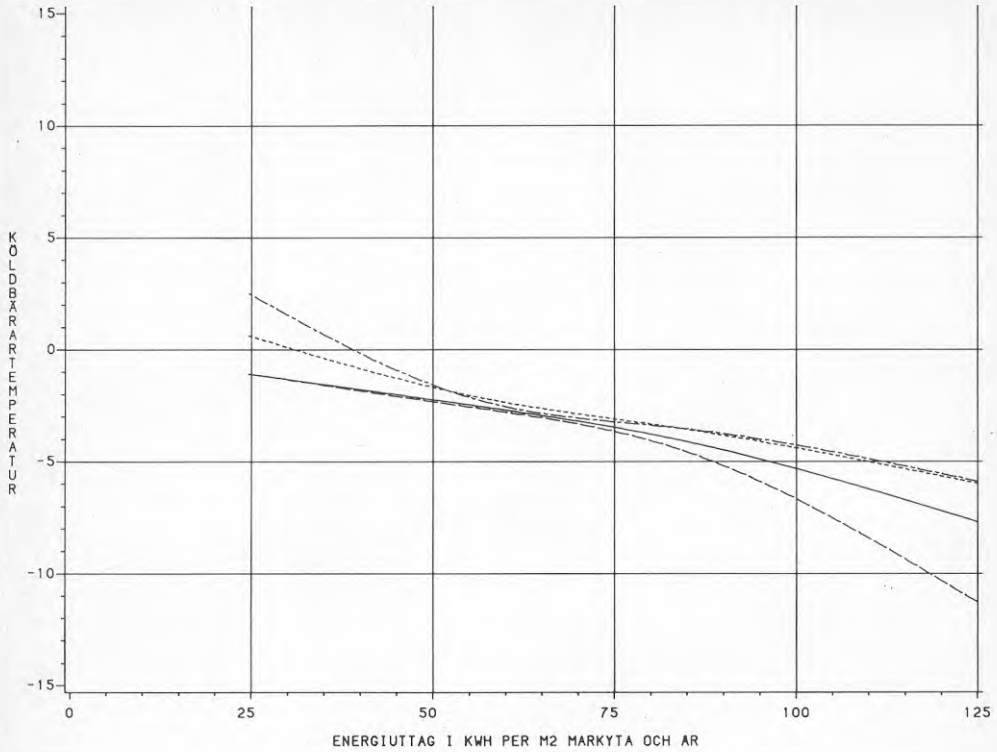
UPPSALA JORD6
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



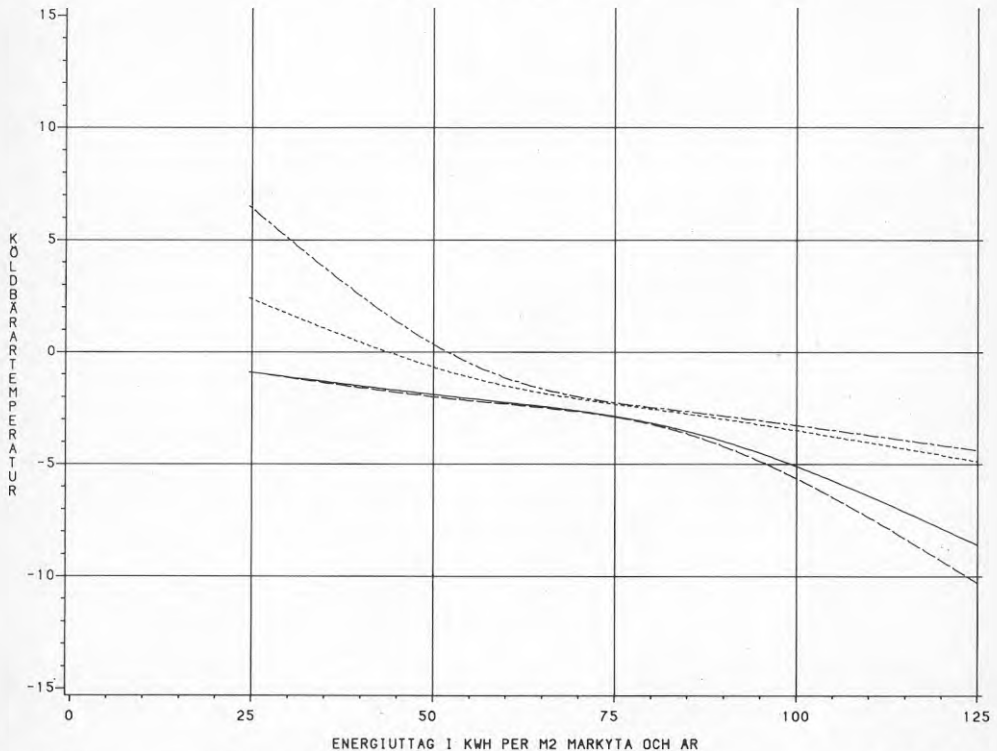
LEGEND:

S----- EMIN CC=SOLITAR	1----- EMIN CC=0.7M	2----- EMIN CC=1.0M	3----- EMIN CC=1.5M
S----- NMAX CC=SOLITAR	1----- NMAX CC=0.7M	2----- NMAX CC=1.0M	3----- NMAX CC=1.5M
S----- NMIN CC=SOLITAR	1----- NMIN CC=0.7M	2----- NMIN CC=1.0M	3----- NMIN CC=1.5M
S----- VMED CC=SOLITAR	1----- VMED CC=0.7M	2----- VMED CC=1.0M	3----- VMED CC=1.5M

UPPSALA JORD1
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS

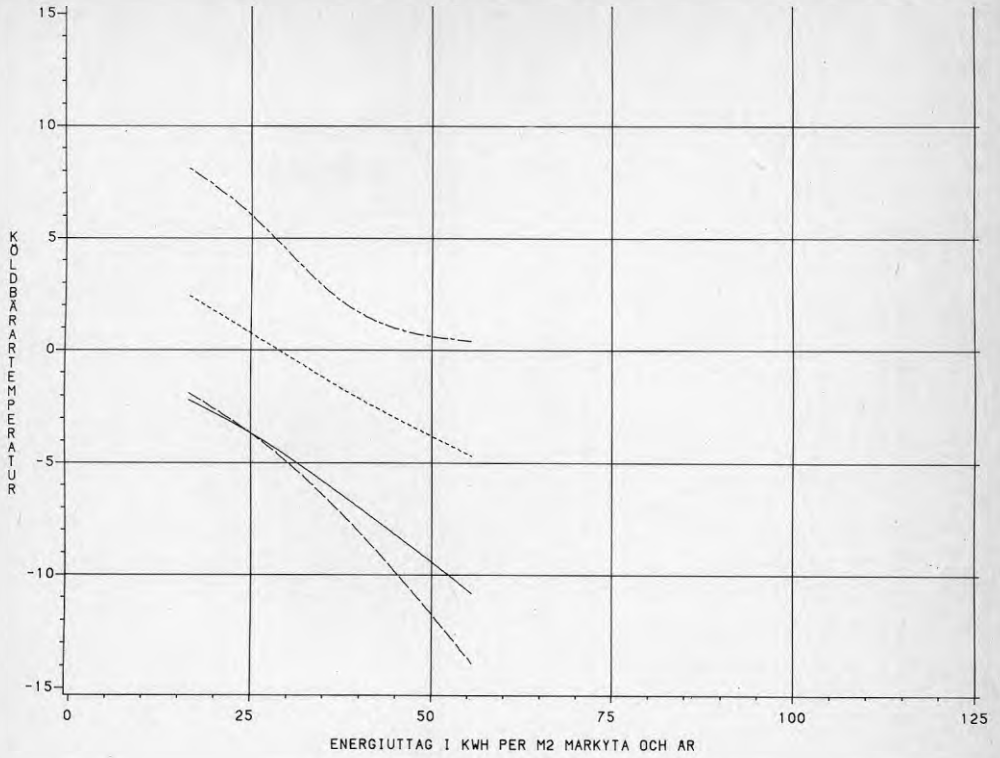


UPPSALA JORD2
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS

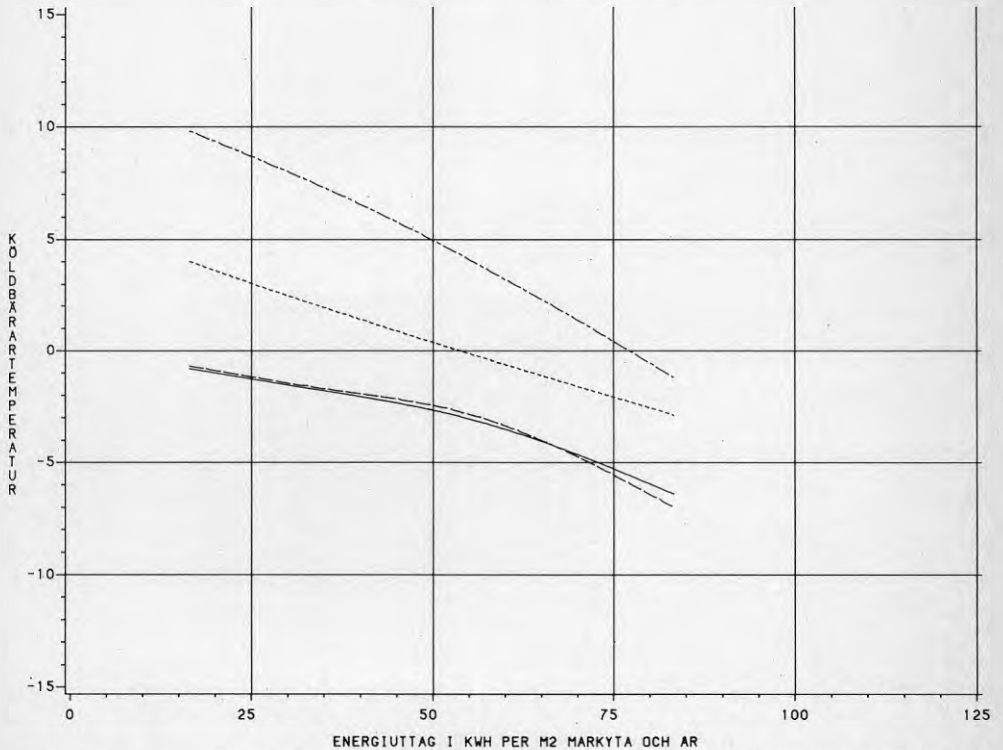


LEGEND: V --- EMIN CC=1.0M -.- NMAX CC=1.0M — NMIN CC=1.0M VMED CC=1.0M

UPPSALA JORD5
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS

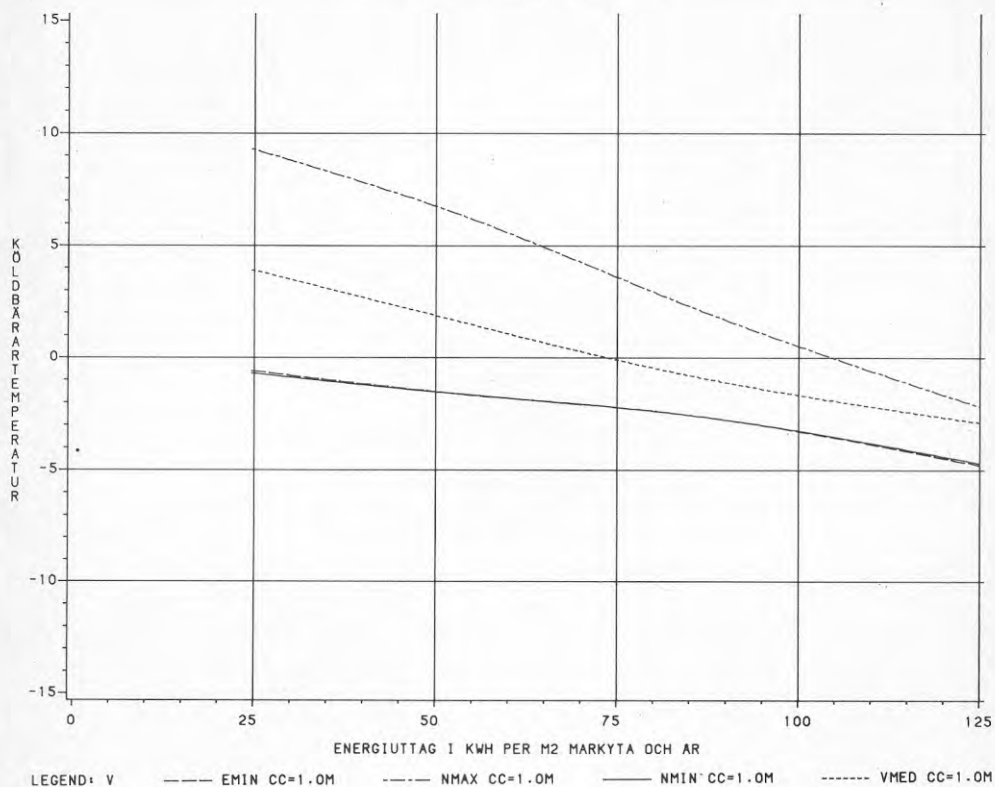


UPPSALA JORD9
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS

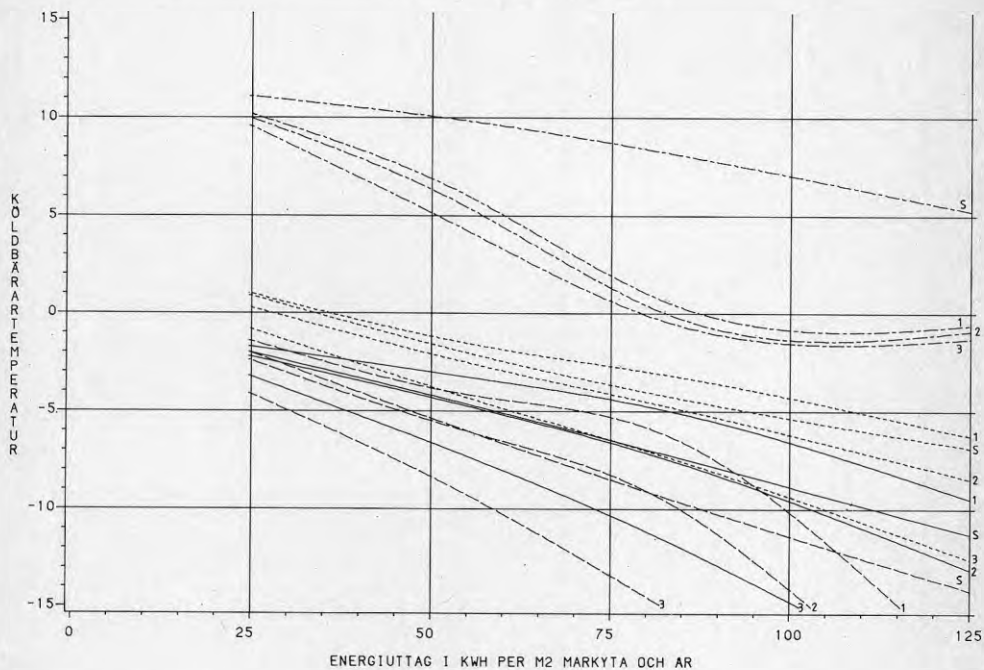


LEGEND: V --- EMIN CC=1.0M -.- NMAX CC=1.0M — NMIN CC=1.0M VMED CC=1.0M

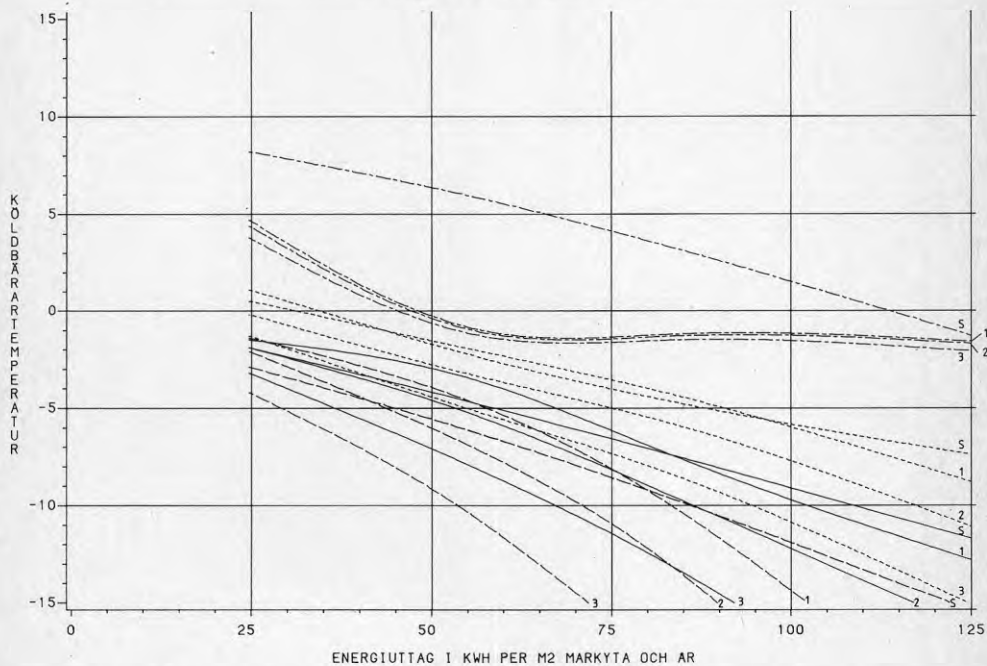
UPPSALA JORD6
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS



KRISTIANSTAD JORD1
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



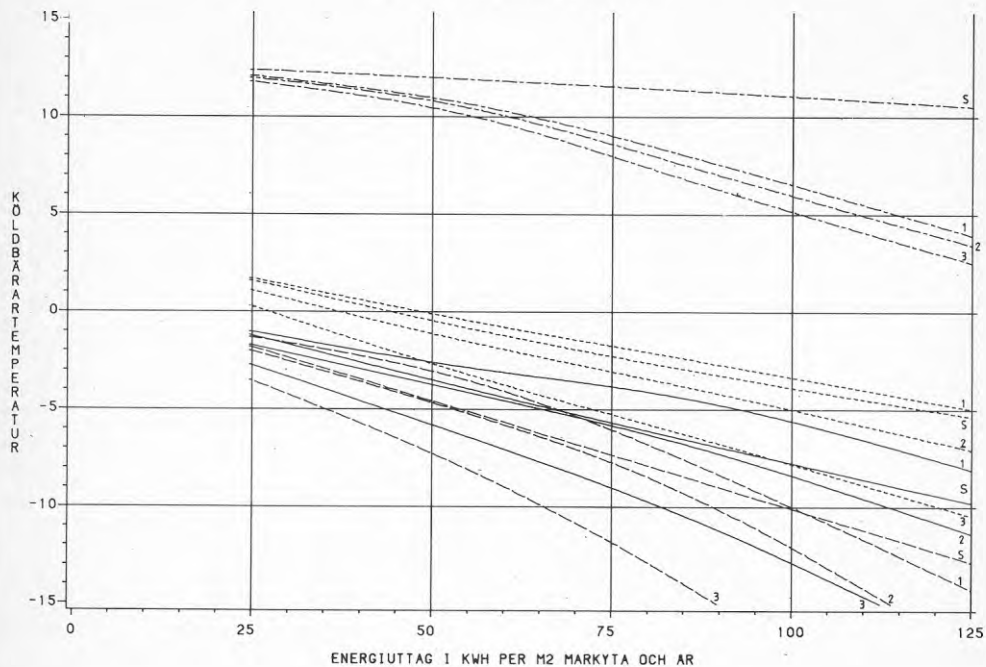
KRISTIANSTAD JORD1
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



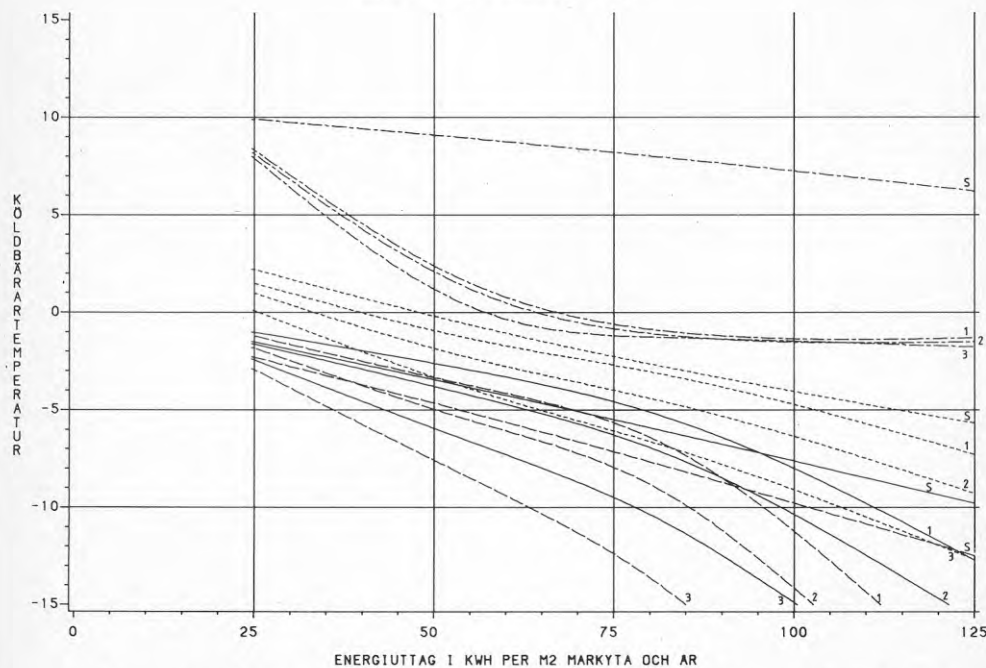
LEGEND:

S - - - - EMIN CC=SOLITÄR	1 - - - - EMIN CC=0.7M	2 - - - - EMIN CC=1.0M	3 - - - - EMIN CC=1.5M
S - - - - NMAX CC=SOLITÄR	1 - - - - NMAX CC=0.7M	2 - - - - NMAX CC=1.0M	3 - - - - NMAX CC=1.5M
S - - - - NMIN CC=SOLITÄR	1 - - - - NMIN CC=0.7M	2 - - - - NMIN CC=1.0M	3 - - - - NMIN CC=1.5M
S - - - - VMED CC=SOLITÄR	1 - - - - VMED CC=0.7M	2 - - - - VMED CC=1.0M	3 - - - - VMED CC=1.5M

KRISTIANSTAD JORD2
IVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



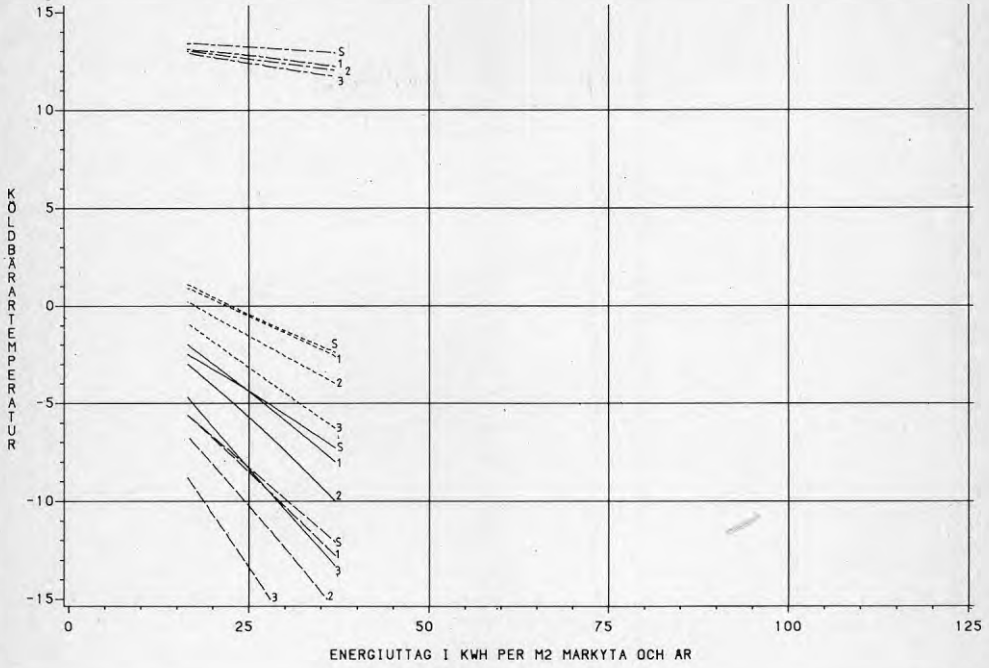
KRISTIANSTAD JORD2
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



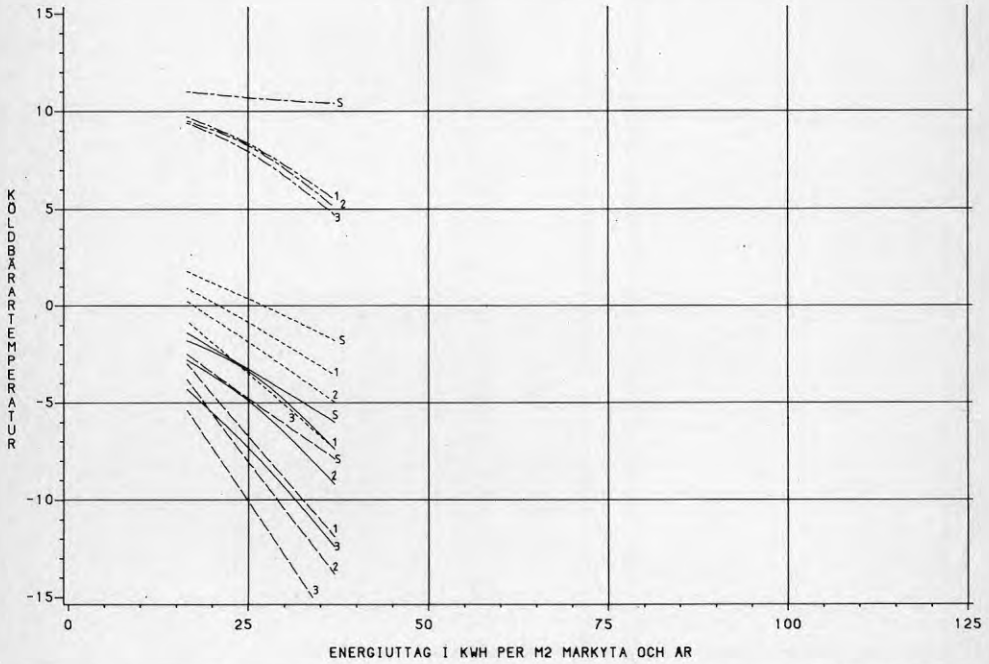
LEGEND:

S	EMIN CC=SOLITÄR	1	EMIN CC=0.7M	2	EMIN CC=1.0M	3	EMIN CC=1.5M
S	NMAX CC=SOLITÄR	1	NMAX CC=0.7M	2	NMAX CC=1.0M	3	NMAX CC=1.5M
S	NMIN CC=SOLITÄR	1	NMIN CC=0.7M	2	NMIN CC=1.0M	3	NMIN CC=1.5M
S	VHED CC=SOLITÄR	1	VHED CC=0.7M	2	VHED CC=1.0M	3	VHED CC=1.5M

KRISTIANSTAD JORD5
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



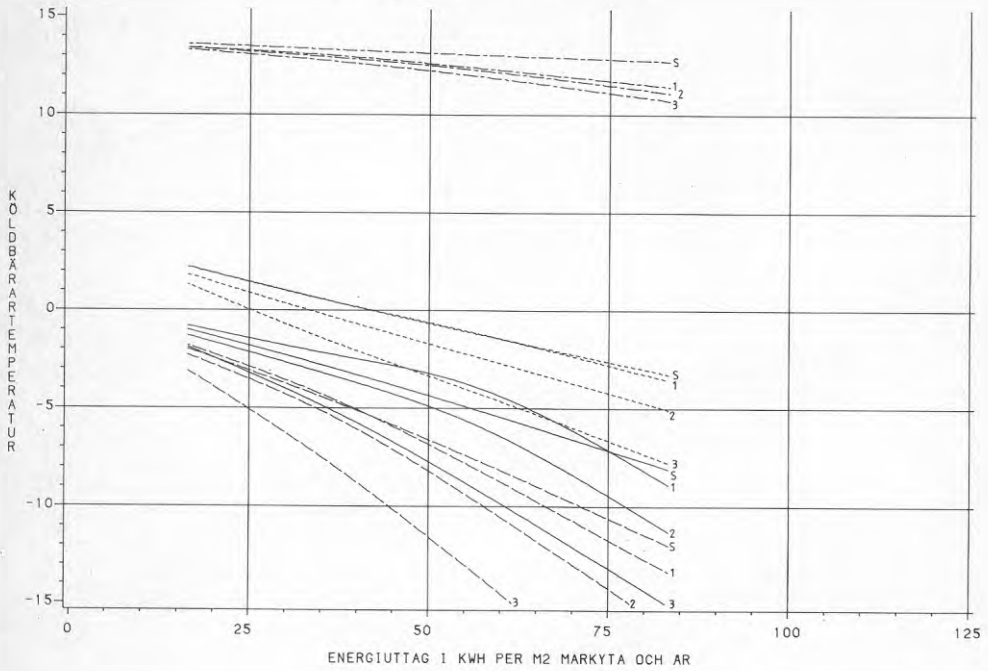
KRISTIANSTAD JORD5
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



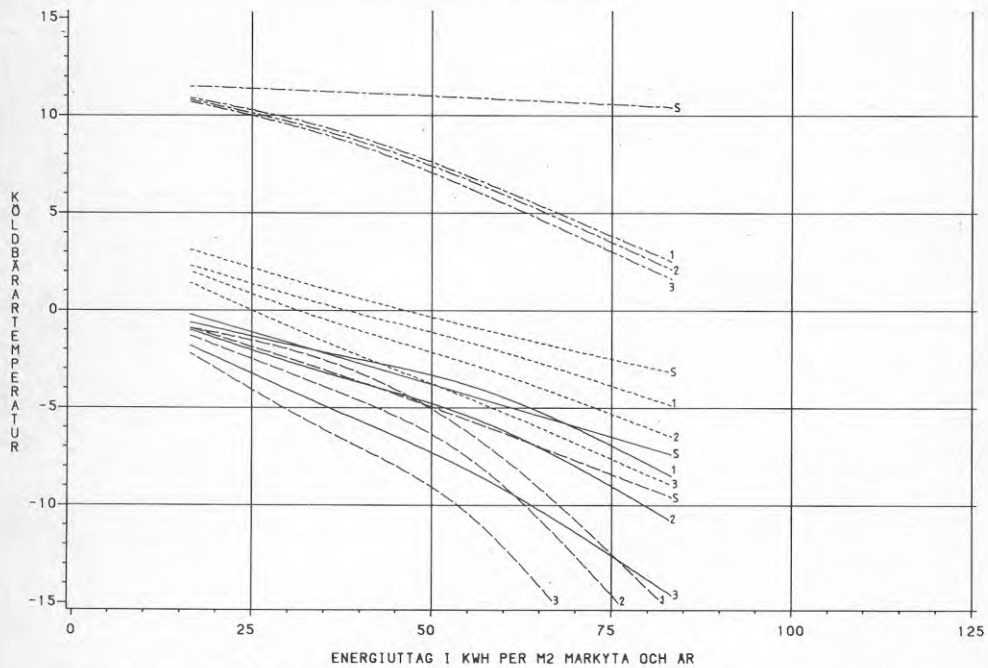
LEGEND:

S	-----	EMIN CC=SOLITAR	1	-----	EMIN CC=0.7M	2	-----	EMIN CC=1.0M	3	-----	EMIN CC=1.5M
S	-----	NMAX CC=SOLITAR	1	-----	NMAX CC=0.7M	2	-----	NMAX CC=1.0M	3	-----	NMAX CC=1.5M
S	-----	NMIN CC=SOLITAR	1	-----	NMIN CC=0.7M	2	-----	NMIN CC=1.0M	3	-----	NMIN CC=1.5M
S	-----	VMED CC=SOLITAR	1	-----	VMED CC=0.7M	2	-----	VMED CC=1.0M	3	-----	VMED CC=1.5M

KRISTIANSTAD JORD9
NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



KRISTIANSTAD JORD9
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP

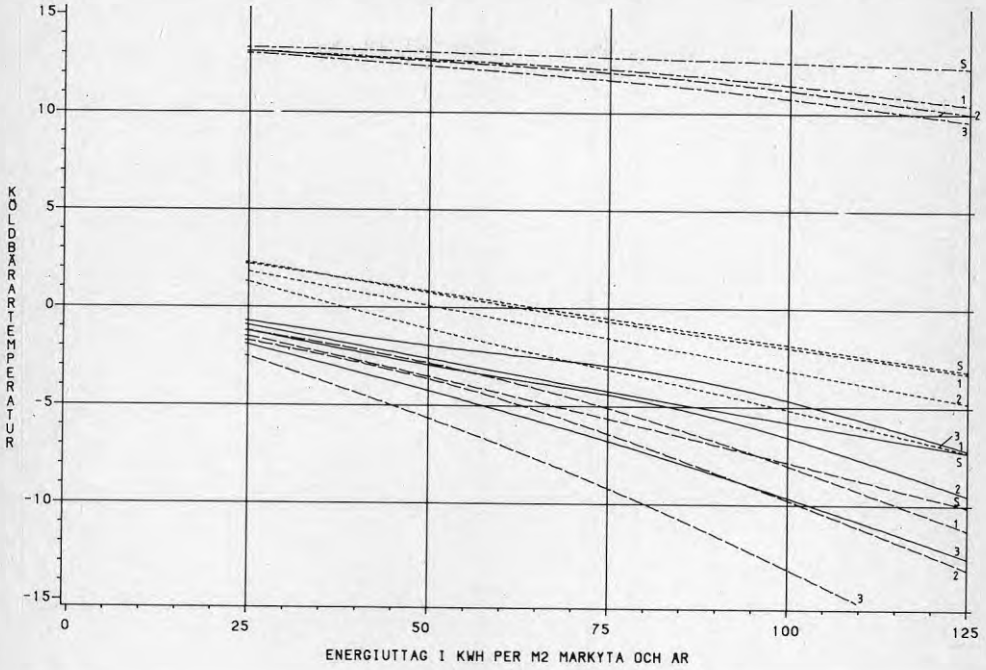


LEGEND:

S	EMIN CC=SOLITÄR	1	EMIN CC=0.7M	2	EMIN CC=1.0M	3	EMIN CC=1.5M
S	NMAX CC=SOLITÄR	1	NMAX CC=0.7M	2	NMAX CC=1.0M	3	NMAX CC=1.5M
S	NMIN CC=SOLITÄR	1	NMIN CC=0.7M	2	NMIN CC=1.0M	3	NMIN CC=1.5M
S	VMED CC=SOLITÄR	1	VMED CC=0.7M	2	VMED CC=1.0M	3	VMED CC=1.5M

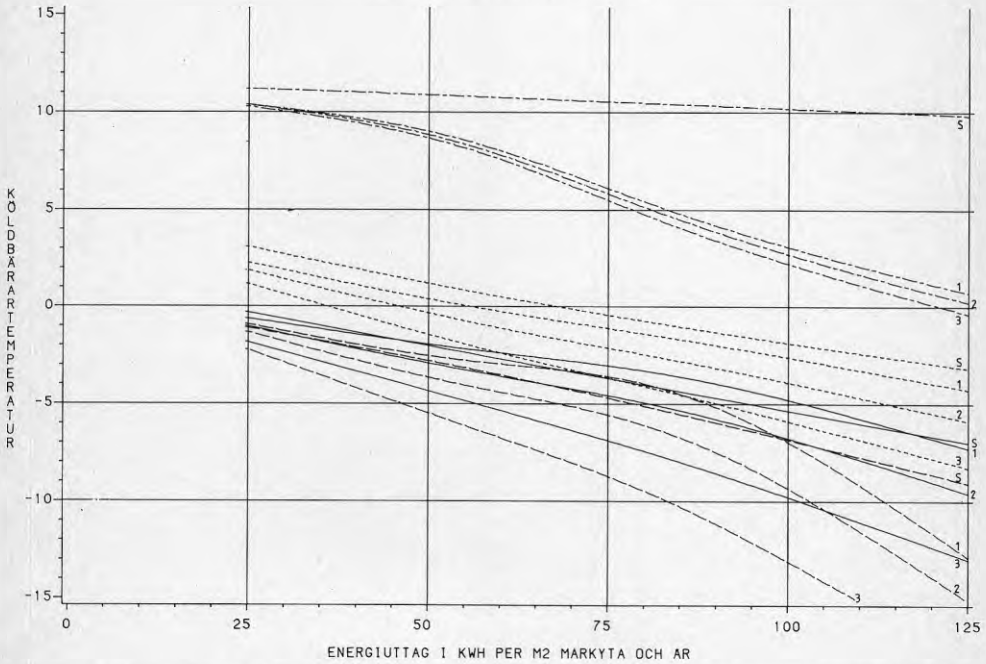
KRISTIANSTAD JORD6

NIVA=0.6 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



KRISTIANSTAD JORD6

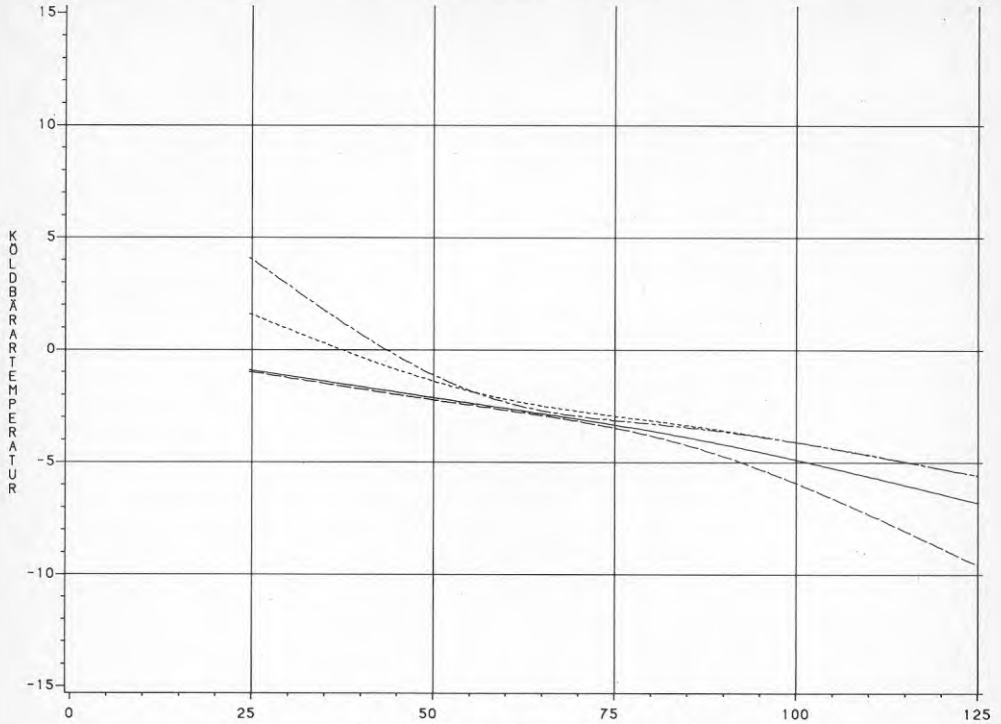
NIVA=1.4 M OCH VARAKTIGHET=TOPP



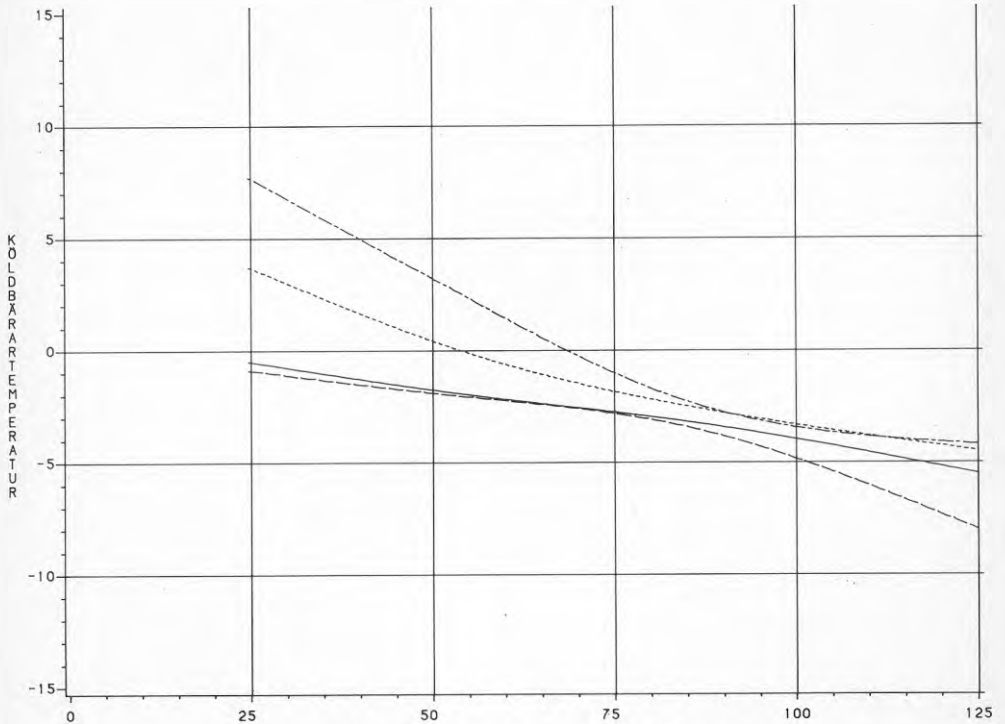
LEGEND:

S - - - - EMIN CC=SOLITÄR	1 - - - - EMIN CC=0.7M	2 - - - - EMIN CC=1.0M	3 - - - - EMIN CC=1.5M
S - - - - NMAX CC=SOLITÄR	1 - - - - NMAX CC=0.7M	2 - - - - NMAX CC=1.0M	3 - - - - NMAX CC=1.5M
S - - - - NMIN CC=SOLITÄR	1 - - - - NMIN CC=0.7M	2 - - - - NMIN CC=1.0M	3 - - - - NMIN CC=1.5M
S - - - - VMED CC=SOLITÄR	1 - - - - VMED CC=0.7M	2 - - - - VMED CC=1.0M	3 - - - - VMED CC=1.5M

KRISTIANSTAD JORD1
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS



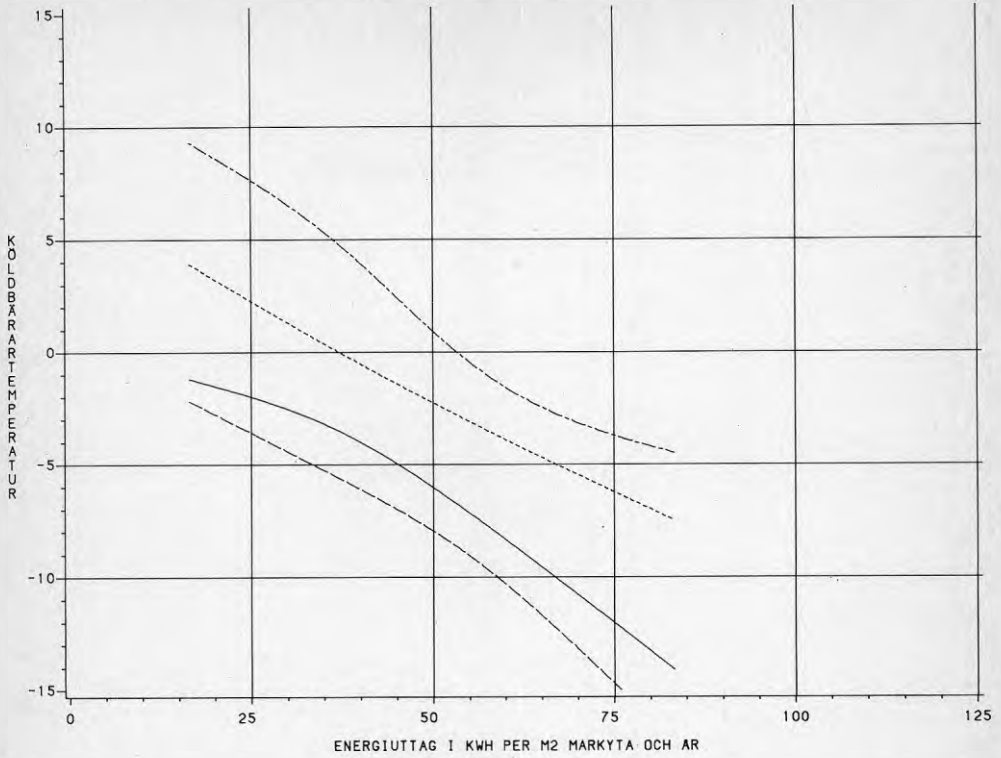
KRISTIANSTAD JORD2
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS



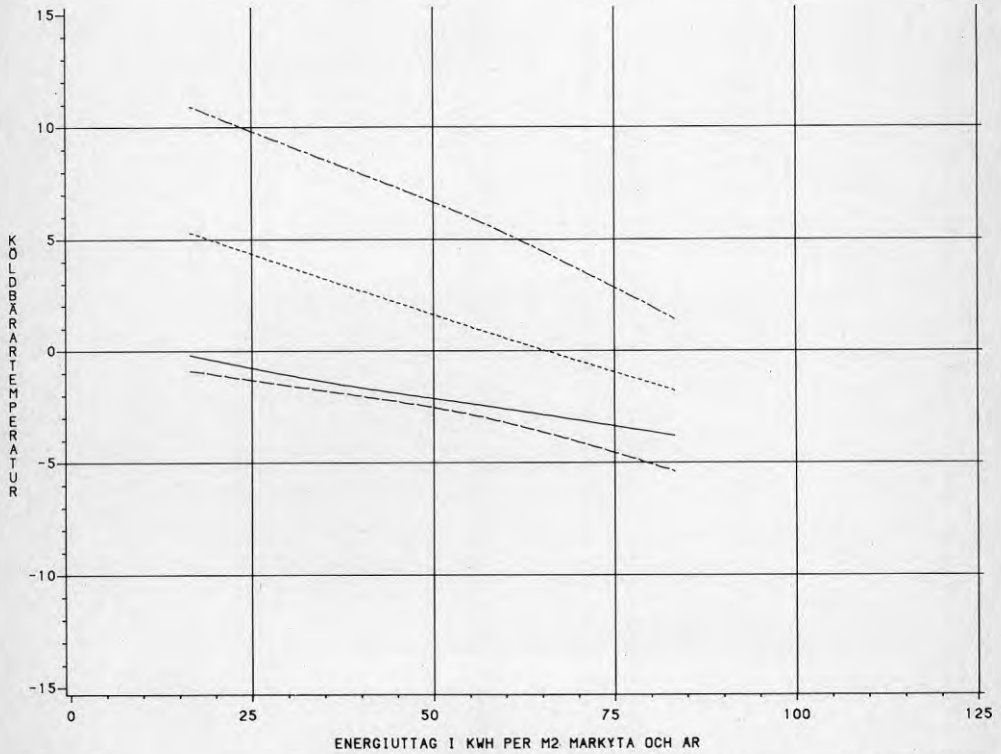
ENERGIUTTAG I KWH PER M2 MARKYTA OCH AR

LEGEND: V - - - - EMIN CC=1.0M NMAX CC=1.0M ——— NMIN CC=1.0M - · - · VMED CC=1.0M

KRISTIANSTAD JORD5
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS

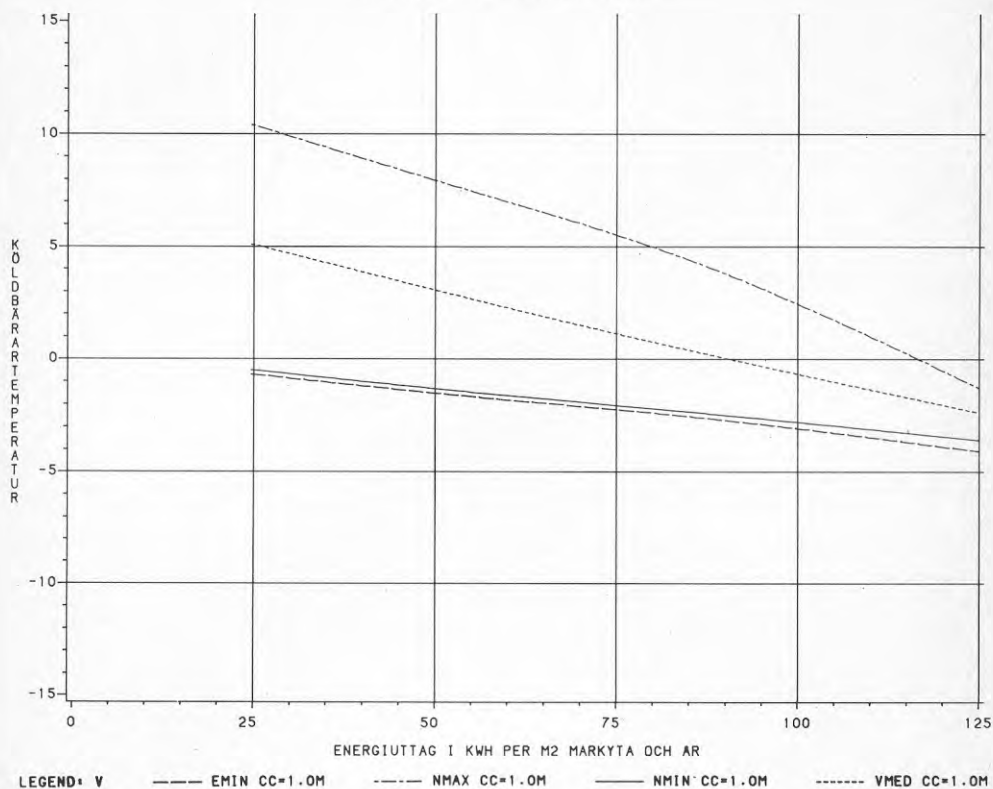


KRISTIANSTAD JORD9
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS



LEGEND: V - - - - EMIN CC=1.0M - · - · NMAX CC=1.0M ——— NMIN CC=1.0M ····· VMED CC=1.0M

KRISTIANSTAD JORD6
NIVA=0.9 M OCH VARAKTIGHET=BAS



REFERENSER

- Andersson, S & Wiklert, P, 1972: Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. Grundförbättring 25 (2-3), p 53-243. Uppsala.
- Beskow, G, 1935: Tjälbildning och tjällyftning med särskild hänsyn till vägar och järnvägar. (Sveriges Geologiska Undersökning) Serie C, No 375, Årsbok 26 (3), p 242. Stockholm.
- Carslaw, H S & Jaeger, J C, 1959: Conduction of heat in solids. Second edition. (Oxford University Press) Oxford.
- Claesson, J & Dunand, A, 1983: Heat Extraction from the Ground by Horizontal Pipes. A Mathematical Analysis. (Byggforskningsrådet) D1:1983. Stockholm.
- Claesson, J, Eftring, B, Eskilson, P & Hellström, G: Markvärme. En handbok om termiska analyser. (Byggforskningsrådet) T16, T18, T19:1985.
- Ingersoll, L R, et al, 1950: Theory of earth heat exchangers for the heat pump (ASHVE Journal section) Heating, Piping and Air Conditioning, vol. 22, p.113-122.
- Jansson, P-E, & Lundin, L-C, 1984: Fysikaliska effekter av ytjordvärmeuttag. Simulerade uttag för olika marker och klimat. (Byggforskningsrådet) R50:1984 p.84. Stockholm.
- Johansen, Ø & Frivik, P-E, 1980: Thermal Properties of Soils and Rock. Groundfreezing, Preprints, p 427-453. Trondheim.
- Modin, B, 1979: Förstudie av byggnadsuppvärmning med jordvärmepump. Geologiska faktorer. (Byggforskningsrådet) R55:1979. Stockholm.
- Rhen, I, 1982: Horisontella jordvärmesystem över och under grundvattenytan. Geologiska förutsättningar i Orsa. (Jordvärmegruppen CTH) JVG-rapport nr 4. Göteborg.
- Sundberg, J, 1985: Värmeöverförande egenskaper i jord. Rapport under utskrift. BFR-projekt 810671-8.

Troedsson, T, Jansson, P-E, Lundkvist, H, Lundin, L & Svensson, 1982: Ekologiska effekter av ytjordvärmeuttag. Markkemi, markfysik, markbiologi, markhydrologi och växtodling. (Byggningsforskningsrådet) R51:1982, p 76. Stockholm.

Värmepumpsteknikens miljökonsekvenser, 1985. (Byggningsforskningsrådet) R28:1985. p 124. Stockholm.

Wallentinus, H-G, 1984: Ytjordvärme- och sjövärmearläggningar. Omgivningspåverkan och driftproblem - en enkätundersökning. (Byggningsforskningsrådet) R119:1984. Stockholm.

Wilén, P, 1983: Ytjordvärmesystem i lera för 88 enbostadshus i Surte. Markpåverkan. (Jordvärmegruppen CTH) JVG-rapport nr 12. Göteborg.

Wilén, P, 1985: 88 ytjordvärmesystem i Surte. Markpåverkan. (Jordvärmegruppen CTH) Göteborg. /Rapport under utgivning/

Ytjordvärme - markkolektorer. BFR-seminarium mars 1982., 1983 (Byggningsforskningsrådet) R37:1983, p 177. Stockholm.

Övrig litteratur:

Modin, B, 1984: Jordvärme (Liber förlag) Geoteknik. Handboken Bygg, p.556-572. Stockholm.

Modin, B, 1978: Geologiska kartor för planering av ytjordvärme. VVS-78. Internationell konferens om förnyelsebara och konventionella energiformer inom VVS-tekniken. Värmepumpar 1978.

PUBLIKATIONER FRÅN JORDVÄRMEGRUPPEN

BFR-RAPPORTER

- Blomqvist N & Jacobson L: Förstudier av byggnadsuppvärmning med jordvärmepump. Förutsättningar i befintlig bebyggelse. BFR-rapport R94:1978.
- Modin B: Förstudier av byggnadsuppvärmning med jordvärmepump. Geologiska faktorer. BFR-rapport R55:1979.
- Jordvärmegruppen CTH: Nordic Symposium on Earth Heat Pump Systems. Preprints + supplement. 1979.
- Berntsson T: Dimensionering av jordvärmesystem. Teknik och ekonomi. BFR-rapport R53:1980.
- Modin B & Wilén P: Byggnadsuppvärmning med jordvärmepump. Geologiska förutsättningar för värmelagring i lera inom större tätorter i Mellansverige. BFR-rapport R88:1980.
- Berntsson T, Franck P-Å, Jacobson L, Modin B & Wilén P: The use of the ground as a heat source for heat pumps in urban areas. BFR-rapport D39:1980.
- Jordvärmegruppen CTH: Användning av mark som värmekälla för värmepumpar i tätort. Översiktliga tekniska-ekonomiska bedömningar. BFR-rapport R149:1980.
- Jacobson L: Vindberoende konvektorer för värmepumpsystem i befintliga hus. BFR-rapport R82:1982.
- Jacobson L: Jordvärmesystem med värmepump i befintlig och ny bebyggelse. Förprojektering av sju objekt i Västsverige. BFR-rapport R112:1982.
- Berntsson T & Bäckström B: Jordvärmegruppen vid CTH, FoU-verksamhet 1981-84. BFR-rapport G10:1985.
- Sundberg J, Thunhom B & Johnson J: Värmeöverförande egenskaper i svensk berggrund. BFR-rapport R97:1985.

JVG-RAPPORTER

(Fr o m mars 1981 har Jordvärmegruppen publiceringsavtal med BFR, vilket innebär att vissa rapporter framgent kommer att utges som s k JVG-rapporter.)

- Wilén P: Grundvatten som värmekälla för husuppvärmning med värmepump. Litteraturstudie, system och ekonomi. JVG-rapport nr 1. 1981.
- Franck P-Å, Modin B & Rosenblad G: Värmepump med vertikalt jordvärmesystem och vindkonvektorer. Utvärdering av ett fullskaleprojekt i Utby. JVG-rapport nr 2. 1981.
- Rhen I: Registrering av vattenhalt i jord genom mätning av den elektriska kapacitansen. JVG-rapport nr 3. 1981

- Rhen I: Horisontella jordvärmesystem över och under grundvattenytan. Geologiska förutsättningar i Orsa. JVG-rapport nr 4. 1982.
- Sundberg J: Metoder för bestämning av värmeöverförande egenskaper i jord och berg. JVG-rapport nr 5. 1982.
- Svensson T & Wilén P: Sedimentvärme för bostadsområdet Finnsnäs, Mora. Förstudie av geologiska och hydrologiska förutsättningar. JVG-rapport nr 6. 1982.
- Berntsson T & Ågren M: Jordvärmepumpar. Kostnader för den apparat tekniska delen. JVG-rapport nr 7. 1982.
- Berntsson T: Measurements on a water-to-water heat pump using mixtures of R22 and R114 as working fluid. JVG-rapport nr 8. 1982.
- Jacobson L: Jordvärme för energi- och oljebesparing i flerbostadshus. JVG-rapport nr 9. 1982.
- Berntsson T, Franck P-Å & Ljungquist J: Vertikal jordvärmeanläggning i befintlig bebyggelse. Kostnadsberäkning för en flerfamiljsfastighet i Torpa, Göteborg. JVG-rapport nr 10. 1982.
- Modin B & Rhen I: Frysning av lera i jordvärmelager i Utby. JVG-rapport nr 11. 1983.
- Wilén P: Ytjordvärmesystem i lera för 88 enbostadshus i Surte. Markpåverkan. JVG-rapport nr 12. 1983.
- Rhen I, Sundberg J & Wilén P: Horizontal pipe systems in soil for heating and cooling of single family houses. JVG-rapport nr 13. 1984.
- Rhen I & Wilén P: Vertikala rörsystem för värmelagring i sand och silt. Förstudie. JVG-rapport nr 14. 1984.
- Wilén P: Jordvärmelager i lera för småhus i Alingsås. Mätning och utvärdering. JVG-rapport nr 15. 1984.
- Larsson B, Franck P-Å & Beijer N: Värmeinfångning med vindkonvektorer för jordvärmeanläggningar. Studier på 1940-60-tals flerbostadshus. JVG-rapport nr 16. 1985.
- Modin B & Wilén P: Värmelagring med vertikala rörsystem i lera. Teknik och ekonomi. JVG-rapport nr 17. 1985.

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 810673-9
från Statens råd för byggnadsforskning till Geologiska
institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

R13: 1986

ISBN 91-540-4524-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6706013

Abonnemangsgrupp:
W. Installationer

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirka pris: 40 kr exkl moms