



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**

**R65:1988**

**Dimensionering av  
sjövärmekollektorer**

**Torbjörn Svensson  
Lars-Ove Sörman**

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	<i>R/Pav</i>
Plat	<i>Ser</i>

**Byggforskningsrådet**

R65:1988

## **DIMENSIONERING AV SJÖVÄRMEKOLLEKTORER**

**Torbjörn Svensson**

**Lars-Ove Sörman**

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 870400-4 från Statens råd för byggnadsforskning till Chalmers tekniska högskola, Inst. för vattenbyggnad, Göteborg.

## REFERAT

Teknik och förutsättningar för att använda sjöar och vattendrag som värmekälla för värmepumpar har studerats vid Inst f vattenbyggnad, CTH, i snart tio år. Tidigare har bl a gjorts mätningar i laboratoriet av värmeöverföringen till slangar i olika miljöer, som skall efterlikna dem i sjöar och vattendrag under vintern.

I detta projekt har utvecklats en datormodell, baserad på laboratorieresultaten, för beräkning av värmeupptagning och påfrysning längs sjövärmeslangar vid stationära förhållanden. Modellen lämpar sig att använda vid dimensionering av kollektorer utgående från uppgifter om temperatur och strömning samt slangarnas placering i vattnet. Vidare måste slangens och brineflödets termiska egenskaper anges. Beräkningarna ger också en möjlighet i vissa fall att övervaka hur mycket is det finns på en kollektor i drift.

Projektets huvudresultat är beräkningsprogrammet SJÖKOLL. Programberäkningar eller kopior på programmet kan erhållas från Inst f vattenbyggnad, Chalmers tekniska högskola. För hjälp vid praktisk dimensionering finns ett antal typfall redovisade i diagramform. Dessa gäller för PEL-slang  $\varnothing 40/32.6$  och i övrigt med de förutsättningar och restriktioner som anges i rapporten. Ispåfrysningens hastighet har beräknats analytiskt för några specialfall (konstant brinetemperatur, konstant uttagen effekt), vilka kan användas för kontroll och dimensionering av icke-stationära fall.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R65:1988

ISBN 91-540-4920-2  
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm  
Svenskt Tryck Stockholm 1988



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	<u>Sid</u>	
0	SAMMANFATTNING	4
1	BAKGRUND	5
2	MÅLSÄTTNING	7
3	DATORPROGRAMMET <b>SJÖKOLL</b> FÖR BERÄKNING AV EFFEKT OCH ISPÅFRYSNING	8
3.1	Indata	8
3.2	Utskrifter	11
4	EFFEKT OCH ISPÅFRYSNING FÖR TYPFALL	19
4.1	Stillastående vatten	22
4.2	Rinnande vatten	33
5	DIMENSIONERING	43
5.1	Lågsta brinetemperatur	43
5.2	Maximal lyftkraft	45
5.3	Icke stationär istillväxt	47
6	DRIFTKONTROLL OCH STYRNING MED HÅNSYN TILL MAXIMAL ISPÅVÄXT	51
7	VARIERANDE FÖRHÅLLANDEN LÄNGS SLANGEN	56
8	REFERENSER	61
Appendix A	BERÄKNING AV UPPTAGEN EFFEKT OCH ISPÅFRYSNING PÅ SJÖVÄRMEKOLLEKTOR	
	A1 Bakgrund, restriktioner	
	A2 Värmeupptagning, teori	
	A3 Stillastående vatten	
	A4 Rinnande vatten	
	A5 Istillväxt	
	A5.1 Istillväxt vid konstant effektuttag	
	A5.2 Istillväxt vid konstant brinetemperatur	
	A5.3 Istillväxt i nollgradigt vatten	
Appendix B	PROGRAMBESKRIVNING	
	B1 Flödesschema	
	B2 Parameterlista	
	B3 Programkod	

## 0 SAMMANFATTNING

Teknik och förutsättningar för att använda sjöar och vattendrag som värmekälla för värmepumpar har studerats vid vattenbyggnadsinstitutionen vid CTH i snart tio år. Tidigare har bl a gjorts mätningar i laboratoriet av värmeöverföringen till slangar i olika miljöer, som skall efterlikna dem i sjöar och vattendrag under vintern.

I detta projekt har utvecklats en datormodell, baserad på laboratorieresultaten, för beräkning av värmeupptagning och påfrysning längs sjövärmeslangar vid stationära förhållanden. Modellen lämpar sig att använda vid dimensionering av kollektorer utgående från uppgifter om temperatur och strömning samt slangarnas placering i vattnet. Vidare måste slangens och brineflödets termiska egenskaper anges. Beräkningarna ger också en möjlighet i vissa fall att övervaka hur mycket is det finns på en kollektor i drift, som beskrivs i kap. 6.

Projektets huvudresultat är beräkningsprogrammet SJÖKOLL. Programberäkningar eller kopior på programmet kan erhållas från Inst. för vattenbyggnad, Chalmers tekniska högskola, 41296 Göteborg, tel.031-722166. Indata och utskrifter visas i kap.3. För den som önskar studera programmets uppbyggnad finns en lista över programkoden i Appendix B.

För hjälp vid praktisk dimensionering finns ett antal typfall redovisade i kap.4. Dessa gäller för PEL-slang Ø40/32,6 och i övrigt med de förutsättningar och restriktioner som anges i början av kapitlet. Metoder för praktisk dimensionering diskuteras i kap.5. Där visas också diagram över ispåfrysningens hastighet, vilka kan användas för kontroll och dimensionering av icke-stationära fall.

## 1 BAKGRUND

Värmepumpsystem med en sjö eller ett vattendrag som värmekälla har normalt ett indirekt system för värmeupptagning. Man lägger ut en värmeväxlare i vattnet i form av slangar, en kollektor. I denna cirkulerar en frostskyddad köldbärarvätska, s k brine mellan värmepumpens förångare och värmekällan. För mindre anläggningar, t ex enskilda villor, räcker det med en slang på några få hundra meters längd. Vid större värmebehov parallellkopplas ett erforderligt antal slangar.

En enskild slang läggs, av praktiska skäl, i regel ut i hårnålsform på botten, se fig 1.1a. Man kan då använda en gemensam belastning på fram- och returledningen som förankring mot de islyftkrafter som kan komma att uppträda. Det finns emellertid ett antal tänkbara varianter av slangsystemets utformning och förläggning. Sjöns eller vattendragets storlek, bottenpografi, bottenförhållanden, ägoförhållanden mm måste beaktas. Vid större anläggningar kommer kollektorn att täcka en avsevärd bottenareal och kan t ex utformas som i fig 1.1b. Även mera koncentrerade utföranden finns på marknaden, t ex i form av liggande spiraler, fig 1.1c.

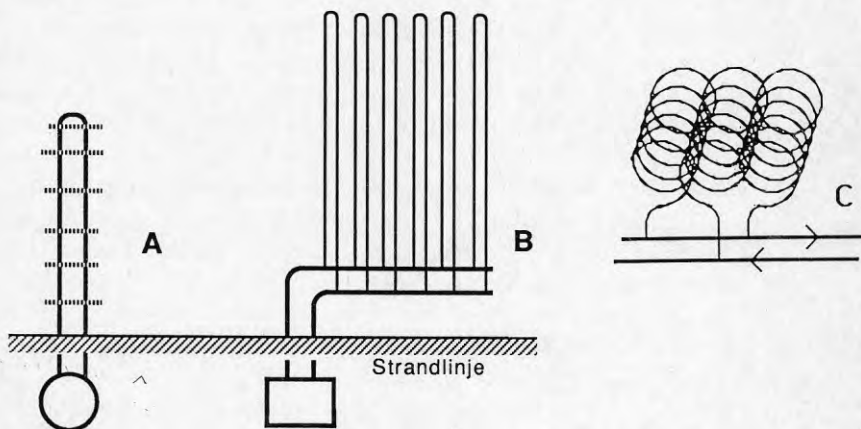


Fig 1.1 Exempel på utförande av sjövärmekollektorer.

Oavsett utförandet på kollektorn är värmeupptagningen längs en enskild slang likartad och analysen av denna utgör grund för dimensionering. Den yttre värmeöverföringen från omgivande vatten eller sediment till ytan på slangen eller den påfrusna iscylindern varierar dock väsentligt beroende på vattentemperatur, strömhastighet, och slangens läge relativt botten (över, på eller nedsjunken). Sambanden mellan dessa omgivningsfaktorer och värmeöverföringen till en slang, vid typiska värden för svenska sjöar och vattendrag vintertid, har tidigare studerats vid vattenbyggnadsinstitutionen, CTH. Resultat från dessa laboratoriemätningar har redovisats av Svensson & Sörman (1983 a,b) och de kan direkt användas för en överslagsmässig dimensionering av kollektorer.

Många gånger önskar man göra en mera detaljerad dimensionering av slanglängd och erforderlig förankring mot islyftkrafter. Speciellt problemet med påfrysning vid låg vattentemperatur och därav betingat förankringsbehov och reducerad effektupptagning är viktig att belysa. I vissa fall, med fast botten och god anliggning mellan slangen och botten, kan man förlita sig på att slangen så att säga fryser fast i botten. I andra fall, och speciellt vid lös botten, måste hela islyftkraften tas upp av förankringen. Flera fall av uppflutna och skadade kollektorer har inträffat, vilket dels kan hänföras till ofullständig dimensionering och dels till avsaknad av kontroll av att vattentemperaturen underskridit den dimensionerande. Alternativt skulle man kunna direkt mäta och kontrollera istjockleken, men det har hittills inte funnits några bra metoder för detta.

Utgående från de ovan nämnda laboratoriemätningarna är det möjligt att beräkna hur brinetemperaturen och ev ispåväxt fördelas längs en sjövärmeslang. Sådana beräkningar är lämpliga som underlag för dimensionering av slanglängd och förankring, förutsatt att en dimensionerande vattentemperatur och strömhastighet är känd.

Brinetemperaturen och ispåväxten anpassar sig normalt relativt snabbt till omgivningen och värmeuttaget påverkar i regel inte heller omgivningens temperatur i någon högre grad. Dimensioneringen kan därför göras för det stationära fallet i de allra flesta fall. Undantag är de fall då vattentemperaturen är nära fryspunkten, så att huvuddelen av värmeförlusten sker genom isbildning. Hänsyn till påverkan på omgivningen kan behöva tas vid mycket stora eller koncentrerade värmeuttag, eller då

slangen sjunkit ned djupt (flera dm) i bottenmaterialet. I det senare fallet kan beräkningsmetoder för ytjordvärme användas.

## 2 MÅLSÄTTNING

Målsättningen med detta projekt är att bygga upp ett beräkningsprogram för analys och dimensionering av en godtyckligt förlagd kollektor i stillastående eller rinnande vatten. Som underlag för beräkningsmodellen används resultaten från ovan nämnda laboratorieförsök.

Beräkningsmetoden skall gälla för stationära förhållanden och kunna analysera sambandet mellan upptagen värmeeffekt, slanglängd och brinetemperatur. I förekommande fall beräknas ispåväxten längs slangen och den därav betingade lyftkraften. De yttre förhållanden, som ges som indata till programmet, skall kunna variera längs slangen.

Beräkningsresultaten skall presenteras så att dimensionering av slanglängd och förankring underlättas. För ett antal typfall redovisas i diagramform den upptagna effekten samt isdiametern som funktion av utgående brinetemperatur från värmepumpen. I samma diagram kan värmepumpens kyleffektkurva läggas in och systemets driftpunkt bestämmas av skärningen mellan kurvorna.

Det beräknade sambandet mellan brinetemperatur, effektuttag och ispåfrysning ger också en möjlighet att, åtminstone approximativt, bestämma istjockleken på kollektorslangarna utgående från uppmätt brinetemperatur och effekt. Härigenom kan man styra driften så att inte den dimensionerade islyftkraften överskrides. Ett mål inom projektet är att presentera en metod att konstruera diagram för sådan kontroll.



### 3 DATORPROGRAMMET "SJÖKOLL" FÖR BERÄKNING AV EFFEKT OCH ISPÅFRYSNING

Beräkningarna i denna rapport är utförda med datorprogrammet **SJÖKOLL**. Programmet beräknar värmeflödet från omgivningen till brinevåtskan i en kollektorslang och förändringen av brinetemperaturen längs slangens. Temperaturskillnaden mellan slangens ändpunkter används för att beräkna den totalt upptagna effekten för slangens. Om påfrysning sker på slangens beräknas den stationära isdiameter som uppnås längs slangens vid en given brinetemperatur ut från värmepumpen.

Teorin bakom beräkningen beskrivs i Appendix A. En generaliserad beräkningsmetod, som kan tillämpas både på stillastående och på rinnande vatten, har utarbetats. Begränsningar för beräkningarnas giltighet beskrivs närmare i kap.4.

Programmet **SJÖKOLL.EXE** är skrivet i GW-basic, vilket gör det möjligt att använda på de flesta persondatorer på marknaden. Ett schema över programmets arbetssätt samt parameterlista och programkod ges i Appendix B

#### 3.1 Indata

Uppgifter om sjöns eller vattendragets temperatur, strömförhållande och bottenförhållanden måste vara kända liksom även den geometriska utformningen av kollektorn och dess placering i förhållande till strömriktning, bottennivå och temperaturskiktning.

Det krävs också kunskaper om kollektorslangens och brinevåtskans fysikaliska och termiska egenskaper. Uppgifter om dessa kan erhållas från tillverkare eller från t ex "Rörbok. Yttre rörledningar" , Melinder (1985) eller Ljung, Olin & Tollin (1986).

Inläsning av indata sker genom att programmet frågar efter uppgifter på det sätt som beskrivs i det följande.

Programmet laddas in med kommandot **LOAD "SJÖKOLL.EXE"** och startas med kommandot **RUN**.

Programmet ställer först ett antal frågor om slangens (rörets)

och brinelösningens fysikaliska och termiska egenskaper enligt följande:

Förklaring	Text	Exempel	Sort
Längden hos en enskild slang	"Slanglängd	" 400	m
Antal slangar i kollektorn	"Antalet slangar	" 1	
Typ av slangmaterial	"Slangmaterial	" PEL	
Slangmaterialets densitet	"Densitet	" 915	kg/m <sup>3</sup>
Slangmaterialets värmeledningstal	"Värmeledningstal	" 0.35	W/mK
Slangens innerdiameter	"Innerdiameter	" 0.0326	m
Slangens ytterdiameter	"Ytterdiameter	" 0.04	m
Typ av brinevätska ETYLENGLYKOL	"Brinevätska	" 27%	
Brinevätskans densitet	"Densitet	" 1041	kg/m <sup>3</sup>
Brinevätskans viskositet	"Viskositet	" 0.0000027	m <sup>2</sup> /s
Brinevätskans värmeledningstal	"Värmeledningstal	" 0.5	W/mK
Brinevätskans värmekapacitet	"Värmekapacitet	" 3760	J/kgK
Brineflöde till kollektorn	"Totalt flöde	" 0.00075	m <sup>3</sup> /s

Om man givit ett felaktigt svar på någon av frågorna finns möjlighet att ge nytt svar genom att svara **nej** på frågan **Vill du ändra något värde?**, som följer omedelbart efter materialfrågorna. Man måste då ge nya svar på alla frågorna. Programmet gör ingen rimlighetskontroll av de svar man lämnat, så det gäller att ge korrekta uppgifter i de SI-enheter som efterfrågas.

Efter inmatning av materialparametrarna beräknas olika grundparametrar såsom Reynolds tal, Prandtls tal, Nusselts tal och inre värmeövergångstalet, varefter dessa skrivs ut tillsammans med de inmatade materialparametrarna.

Programmet frågar därefter: **Är kollektorn utsatt för varierande omgivningsförhållanden och slangmiljö så att den måste delas upp på flera delsträckor?** Med slangmiljö avses då slangens läge relativt bottennivån. Frågan besvaras med **ja** eller **nej** och leder till att programmet följer olika vägar. För att kunna beräkna värmeöverföringen från det omgivande vattnet till slangens yttersida (eller iscylinderns yta) måste omgivningsförhållandena och slangmiljön klarläggas för hela slangens eller för varje delsträcka. Programmet ställer därför följande frågor:

### Hur är kollektorn förlagd?

Som svar på denna fråga finns tre alternativa värden på konstanten **F** som varierar för olika typer av värmeöverföring enligt följande:

Kollektorn i stilla vatten	Sätt $F=0.75$
Kollektorn fritt i rinnande vatten	Sätt $F=0.606$
Kollektorn på botten i rinnande vatten	Sätt $F=0.50$

Därefter följer frågor om hur slangen är förlagd i förhållande till botten. Frågorna är avhängiga svaret på föregående fråga. Om slangen är förlagd i stilla vatten skall man ange ett värde på den  $s_k$  slangmiljöfaktorn **G** enligt följande fyra alternativ; fri slang, slang på botten, slang nedbäddad i botten eller slang nedsjunken i botten. Om slangen är förlagd i rinnande vatten frågar programmet även efter hur slangen ligger i förhållande till vattnets strömriktning. Om slangen ligger nedbäddad i botten i det rinnande vattnet har strömriktningen dock mindre betydelse och slangmiljöfaktorn **G** ansätts ett konstant värde. I övriga fall finns två svarsalternativ, varav det högre väljs om strömmen är riktad tvärs slangen och det lägre om den är längsriktad. Ofta ligger slangen med olika delar längs respektive tvärs strömmen och man får då ansätta ett värde som svarar mot proportionerna av dessa längder.

Som svar på frågan **Ange värde på konstanten G?** finns följande alternativ:

Stilla vatten	fri slang	Sätt $G=23.7$
Stilla vatten	slang på botten	Sätt $G=25$
Stilla vatten	nedbäddad slang	Sätt $G=10$
Stilla vatten	nedsjunken slang	Sätt $G=4$
Rinnande vatten	fri slang	Sätt $0.4 < G < 0.79$
Rinnande vatten	slang på botten	Sätt $0.5 < G < 0.77$
Rinnande vatten	nedbäddad slang	Sätt $G=0.25$

Med fri slang menas att slangen är helt omgiven av vatten, se fig.4.3. Med slang på botten menas att slangen ligger öppet på botten och i kontakt med denna. Om slangen är täckt till hjässan med sediment, vilket lätt inträffar i rinnande vatten med någon sedimenttransport, anges den som nedbäddad. Om slangen sjunker ned någon cm till maximalt ca 10 cm i lösa sediment anses slangen nedsjunken. Huvuddelen av värmetillflödet till slangen sker i dessa fall från vattnet. Om slangen

däremot sjunker djupare kommer värmeledning från omgivande sediment att spela allt större roll. Då gäller inte denna beräkningsmetod utan man får använda beräkningsmetoder av samma typ som för ytjordvärme.

När konstanterna F och G angivits frågar programmet efter **vattentemperaturen** och i förekommande fall **strömhastigheten**, gällande för hela slangens sträckning eller för aktuell delsträcka. Vattentemperaturen måste ligga i intervallet 0-4 °C och strömhastigheten mellan 0 och 2 m/s. Programmet gör rimlighetskontroll av F och G samt av temperatur och strömhastighet. Om något värde faller utanför det tillåtna intervallet frågar programmet ånyo efter ett värde på denna parameter.

Med dessa indata beräknar programmet ett värde på omgivningsparametern C och anpassar isdiametern till en funktion av brinetemperaturen och C med hjälp av konstanterna F1, F2, och F3. Sedan beräknas stegvis brinetemperaturen och isdiametern längs slangens och slutligen den upptagna effekten på grundval av temperaturskillnaden mellan slangens ändar. Denna beräkning görs med utgångspunkt från brinetemperaturen i början av slangens (utgående brinetemperatur), och upprepas för olika värden mellan 0°C och -10°C i steg om 1°C.

### 3.2 Tabellutskrifter

Programmet ger tabellutskrifter av indata, mellanresultat i form av härledda parametrar och islyftkraft vid olika isdiametrar samt slutresultat i form av isdiameter i början och slutet av slangens och den upptagna effekten. Tabellen över slutresultat innehåller följande uppgifter, i förekommande fall uppdelade på delsträckor:

<b>T-ut</b>	Brinetemperatur i början av slang resp delsträcka
<b>D-max</b>	Isdiameter i början av slang resp delsträcka. Vid isfri slang anges slangens ytterdiameter.
<b>D-min</b>	Isdiameter i slutet av slang resp delsträcka.
<b>P-medel</b>	Medelvärde av upptagen effekt per meter slang för hela slanglängden resp. delsträckan.
<b>T-in</b>	Brinetemperatur i slutet av slang resp delsträcka.
<b>P-tot</b>	Sammanlagd upptagen effekt för hela kollektorn från början av slangens (slangarna) till slutet resp slutet av delsträckan.

I det följande presenteras ett antal exempel på tabellutskrifter för olika fall.

**Tabell 3.1** Utskrift av indata rörande slangens och brinevätskans egenskaper samt beräknade grundparametrar.

\*\*\*\*\* Beräkning av ispåfrusen kollektor \*\*\*\*\*

Tulebosjön

Slanglängd	m	400
Antal slangar		1
Slangmaterial		PEL
Densitet	kg/m <sup>3</sup>	915
Värmeledningstal	W/mK	.35
Innerdiameter	m	.0326
Ytterdiameter	m	.04
Brinevätska	ETYLENGL	27%
Densitet	kg/m <sup>3</sup>	1041
Viskositet	m <sup>2</sup> /s	.0000027
Värmeledningstal	W/mK	.5
Värmekapacitet	J/kgK	3760
Totalt flöde	m <sup>3</sup> /s	.00075

Strömhastighet	.8985374	m/s
Reynolds tal	10849.01	
Prandtls tal	21.13647	
Nussels tal	117.1252	
Inre värmeövergångstal	1796.399	
Parametern B	4.604605	



**Tabell 3.2** Utskrift av omgivningsparametern C för olika vattentemperatur.

---

\*\*\*\*\* Kollektor i stillastående vatten i Tulebosjön \*\*\*\*\*  
F = .75      G = 25

Omgivningsparametern C

T	C
0.025	6.278
0.050	2.642
0.100	1.112
0.200	0.469
0.400	0.199
0.600	0.120
0.800	0.085
1.000	0.064
1.500	0.040
2.000	0.028
2.500	0.022
3.000	0.018
3.500	0.015
4.000	0.013

**Tabell 3.3** Utskrift av stationär isdiameter och motsvarande lyftkraft för olika värden på produkten av brinetemperatur och omgivningsparameter C.

\*\*\*\*\* Approximering av stationär isdiameter \*\*\*\*\*  
 F1=-9.825875 F2= 8.317668 F3= .1112405

C*(-Tbrine)	D , m	Lyftkraft ,kg/m
0.200	0.057	0.110
0.400	0.099	0.540
0.600	0.140	1.180
0.800	0.180	2.010
1.000	0.221	3.080
1.200	0.262	4.370
1.400	0.304	5.920
1.600	0.346	7.700
1.800	0.388	9.710
2.000	0.431	12.010
2.200	0.474	14.540
2.400	0.518	17.390
2.600	0.562	20.490
2.800	0.607	23.920

**Tabell 3.4** Utskrift av isdiameter och upptagen effekt för olika utgående brinetemperaturer i stillastående vatten med temperaturen 2,0°C.

Tulebosjön

\*\*\*\*\* Stillastående vatten \*\*\*\*\*

Temperatur = 2 Omgivningsparameter C = .028

T-ut grad-C	T-in grad-C	D-max m	D-min m	P-medel W/m	P-total kW
0.000	1.229	0.040	0.040	9.018	3.607
-1.000	0.843	0.040	0.040	13.527	5.411
-2.000	0.458	0.040	0.040	18.036	7.214
-3.000	0.072	0.040	0.040	22.545	9.018
-4.000	-0.314	0.040	0.040	27.054	10.822
-5.000	-0.700	0.043	0.040	31.555	12.622
-6.000	-1.102	0.050	0.040	35.945	14.378
-7.000	-1.523	0.056	0.040	40.199	16.080
-8.000	-1.961	0.062	0.040	44.317	17.727
-9.000	-2.419	0.068	0.040	48.297	19.319
-10.000	-2.896	0.074	0.040	52.138	20.855

**Tabell 3.5** Utskrift av isdiameter och upptagen effekt för olika utgående brinetemperaturer i stillastående vatten med temperaturen 0,5°C.

Tulebosjön

\*\*\*\*\* Stillastående vatten \*\*\*\*\*

Temperatur = .5 Omgivningsparameter C = .151

T-ut grad-C	T-in grad-C	D-max m	D-min m	P-medel W/m	P-total kW
0.000	0.288	0.040	0.040	2.116	0.847
-1.000	-0.135	0.046	0.040	6.345	2.538
-2.000	-0.607	0.078	0.040	10.224	4.089
-3.000	-1.154	0.110	0.051	13.547	5.419
-4.000	-1.732	0.141	0.070	16.648	6.659
-5.000	-2.329	0.171	0.089	19.606	7.842
-6.000	-2.941	0.202	0.108	22.450	8.980
-7.000	-3.566	0.233	0.127	25.204	10.082
-8.000	-4.201	0.264	0.147	27.884	11.154
-9.000	-4.845	0.295	0.167	30.493	12.197
-10.000	-5.497	0.327	0.187	33.050	13.220

**Tabell 3.6** Utskrift av indata rörande omgivningsförhållanden. Slangen är indelad i tre delsträckor och är utlagd från stranden i hårnålsform i en sjö där vattentemperaturen ökar med djupet.

Delsträcka nr 1  
Längd 100

Vattentemperatur = .5 C  
Vattenhastighet = 0 m/s  
Slang i stillastående vatten  
Slangen på botten  
Omgivningsparametern C= .151

Delsträcka nr 2  
Längd 200

Vattentemperatur = 1 C  
Vattenhastighet = 0 m/s  
Slang i stillastående vatten  
Slangen på botten  
Omgivningsparametern C= .064

Delsträcka nr 3  
Längd 100

Vattentemperatur = .5 C  
Vattenhastighet = 0 m/s  
Slang i stillastående vatten  
Slangen på botten  
Omgivningsparametern C= .151

**Tabell 3.7** Utskrift av isdiameter och upptagen effekt för olika utgående brinetemperaturer för en slang som är utlagd i hårnålsform från stranden och är indelad i tre delsträckor. Temperaturen ökar från 0,5°C närmast stranden till 1,0°C i den yttre delen där vattendjupet är större.

---

Delst nr	T-ut Grad-C	D-max m	D-min m	P-medel W/m	T-in Grad- C	P-tot kW
1.000	0.000	0.040	0.040	2.839	0.097	0.284
2.000	0.097	0.040	0.040	4.857	0.428	1.255
3.000	0.428	0.040	0.040	0.411	0.442	1.296
1.000	-1.000	0.046	0.040	8.486	-0.711	0.849
2.000	-0.711	0.040	0.040	9.199	-0.084	2.688
3.000	-0.084	0.040	0.040	3.317	0.029	3.020
1.000	-2.000	0.078	0.065	12.700	-1.567	1.270
2.000	-1.567	0.040	0.040	13.804	-0.627	4.031
3.000	-0.627	0.040	0.040	6.399	-0.409	4.671
1.000	-3.000	0.110	0.092	16.493	-2.438	1.649
2.000	-2.438	0.047	0.040	18.416	-1.183	5.333
3.000	-1.183	0.052	0.041	9.276	-0.868	6.260
1.000	-4.000	0.141	0.120	20.010	-3.318	2.001
2.000	-3.318	0.059	0.040	22.494	-1.786	6.500
3.000	-1.786	0.072	0.058	11.868	-1.382	7.687
1.000	-5.000	0.171	0.147	23.373	-4.204	2.337
2.000	-4.204	0.071	0.047	25.996	-2.433	7.537
3.000	-2.433	0.092	0.077	14.362	-1.943	8.973
1.000	-6.000	0.202	0.174	26.549	-5.096	2.655
2.000	-5.096	0.083	0.056	29.376	-3.094	8.530
3.000	-3.094	0.113	0.095	16.842	-2.521	10.214
1.000	-7.000	0.233	0.202	29.648	-5.990	2.965
2.000	-5.990	0.095	0.065	32.643	-3.766	9.494
3.000	-3.766	0.133	0.113	19.209	-3.112	11.414
1.000	-8.000	0.264	0.230	32.626	-6.889	3.263
2.000	-6.889	0.107	0.075	35.833	-4.447	10.429
3.000	-4.447	0.154	0.132	21.528	-3.714	12.582
1.000	-9.000	0.295	0.258	35.551	-7.789	3.555
2.000	-7.789	0.119	0.084	38.946	-5.136	11.344
3.000	-5.136	0.175	0.151	23.811	-4.325	13.725
1.000	-10.000	0.327	0.286	38.386	-8.692	3.839
2.000	-8.692	0.131	0.093	41.997	-5.831	12.238
3.000	-5.831	0.197	0.170	26.019	-4.945	14.840

**Tabell 3.8** Utskrift av omgivningsförhållandena på olika delsträckor för en slang som utlagts som en hårnål längs ett svagt strömmande vattendrag. Temperaturen är lika i hela vattenmassan men strömmen är något starkare nedströms.

---

Delsträcka nr 1  
Längd 100

Vattentemperatur = .2 C  
Vattenhastighet = .2 m/s  
Slang på botten i rinnande vatten  
Huvudsakligen ström längs slangen  
Omgivningsparametern C= .292

---

Delsträcka nr 2  
Längd 200

Vattentemperatur = .2 C  
Vattenhastighet = .3 m/s  
Slang på botten i rinnande vatten  
Huvudsakligen ström längs slangen  
Omgivningsparametern C= .239

---

Delsträcka nr 3  
Längd 100

Vattentemperatur = .2 C  
Vattenhastighet = .2 m/s  
Slang på botten i rinnande vatten  
Huvudsakligen ström längs slangen  
Omgivningsparametern C= .292

---



**Tabell 3.9** Utskrift av isdiameter och upptagen effekt vid olika utgående brinetemperaturer för en slang som lagts ut längs ett strömmande vattendrag och uppdelats i tre delsträckor. Vattentemperaturen är konstant medan strömhastigheten ökar längre nedströms.

Delst nr	T-ut Grad-C	D-max m	D-min m	P-medel W/m	T-in Grad-C	P-tot kW
1.000	0.000	0.040	0.040	1.459	0.050	0.146
2.000	0.050	0.040	0.040	0.983	0.117	0.343
3.000	0.117	0.040	0.040	0.608	0.137	0.403
1.000	-1.000	0.041	0.040	8.749	-0.702	0.875
2.000	-0.702	0.040	0.040	5.900	-0.300	2.055
3.000	-0.300	0.040	0.040	3.647	-0.176	2.420
1.000	-2.000	0.080	0.063	12.720	-1.567	1.272
2.000	-1.567	0.052	0.040	11.305	-0.796	3.533
3.000	-0.796	0.040	0.040	7.269	-0.549	4.260
1.000	-3.000	0.123	0.099	15.904	-2.458	1.590
2.000	-2.458	0.081	0.048	14.721	-1.455	4.535
3.000	-1.455	0.059	0.044	10.872	-1.085	5.622
1.000	-4.000	0.170	0.140	18.863	-3.357	1.886
2.000	-3.357	0.112	0.071	17.506	-2.165	5.388
3.000	-2.165	0.087	0.069	13.256	-1.713	6.713
1.000	-5.000	0.222	0.183	21.636	-4.263	2.164
2.000	-4.263	0.146	0.095	20.160	-2.890	6.196
3.000	-2.890	0.118	0.095	15.561	-2.359	7.752
1.000	-6.000	0.277	0.231	24.280	-5.173	2.428
2.000	-5.173	0.182	0.122	22.700	-3.626	6.968
3.000	-3.626	0.152	0.124	17.798	-3.020	8.748
1.000	-7.000	0.337	0.282	26.799	-6.087	2.680
2.000	-6.087	0.221	0.150	25.148	-4.374	7.710
3.000	-4.374	0.189	0.156	19.913	-3.695	9.701
1.000	-8.000	0.401	0.337	29.247	-7.004	2.925
2.000	-7.004	0.262	0.180	27.516	-5.129	8.428
3.000	-5.129	0.229	0.189	21.985	-4.380	10.626
1.000	-9.000	0.469	0.396	31.595	-7.924	3.160
2.000	-7.924	0.306	0.212	29.818	-5.892	9.123
3.000	-5.892	0.271	0.226	24.005	-5.075	11.524
1.000	-10.000	0.541	0.458	33.890	-8.846	3.389
2.000	-8.846	0.352	0.246	32.056	-6.662	9.800
3.000	-6.662	0.316	0.265	25.955	-5.777	12.396

#### 4           EFFEKT OCH ISPÅFRYSNING FÖR TYPFALL

I detta kapitel redovisas för ett antal typfall beräknad effekt och ispåväxt på sjövärmeslang som funktion av den utgående brinetemperaturen. Effekten anges som den värmeeffekt som en slang av angiven längd tar upp från omgivande vatten och bottensediment (=kyleffekt på omgivningen). Medeleffekten erhålles genom att dividera med slanglängden. Ispåväxten anges som diametern hos den beräkningsmässigt cirkulära iscylindern runt slangen. Såväl värdet i början (max) som vid slutet på slangen redovisas.

Beräkningen är gjord med följande restriktioner:

\* De yttre förhållandena, dvs. vattentemperatur, strömhastighet och slangläge relativt botten, är konstanta längs hela slangen.

\* Beräkningen gäller enbart i sött vatten under vinterförhållanden, vid vattentemperatur mellan 0 och 4°C.

\* Beräkningsresultatet är osäkert för isdiametrar > 0,6 m, men redovisas ändå upp till 1 m diameter.

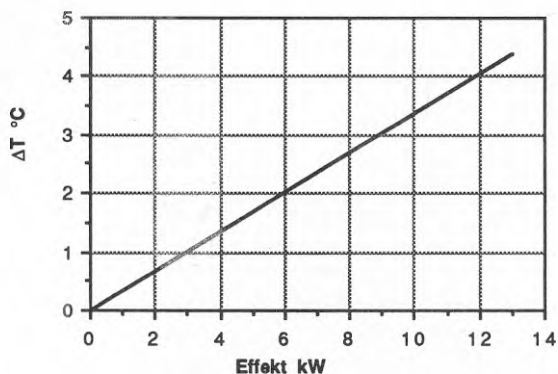
\* Kollektorslangan är tillverkad av PEL med ytterdiametern 40 mm och innerdiametern 32,6 mm. Beräkningarna genomförs för slanglängder mellan 100 och 400 m.

\* Brinevätskan består av en 27-procentig blandning av etylenglykol och vatten. Vätskans fysikaliska egenskaper anges vid -5°C och framgår av utskrift-exemplet i tabell 3.1. Brineflödet sätts till 0,75 l/s vilket ger turbulent strömning i slangen.

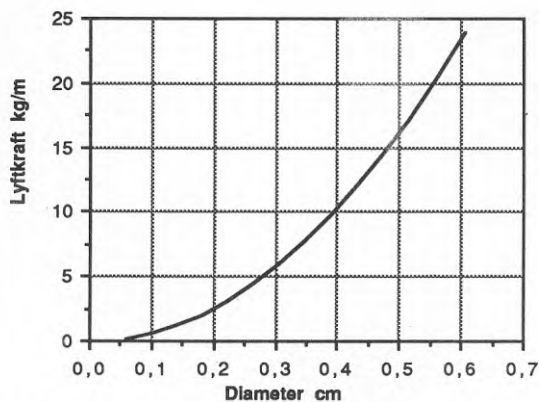
Den upptagna effekten medför att temperaturen ökar längs slangen. Temperaturskillnaden mellan ändpunkterna ges i fig 4.1 som funktion av effekten vid de använda flödesparamet-

rarna. Med hjälp av detta diagram kan den inkommande brinetemperaturen bestämmas.

Ispåväxten ger en lyftkraft som ökar med diametern enligt fig.4.2. Här förutsättes att inte något tyngre material, såsom sand eller annat minerogent material, fryser in i isen.



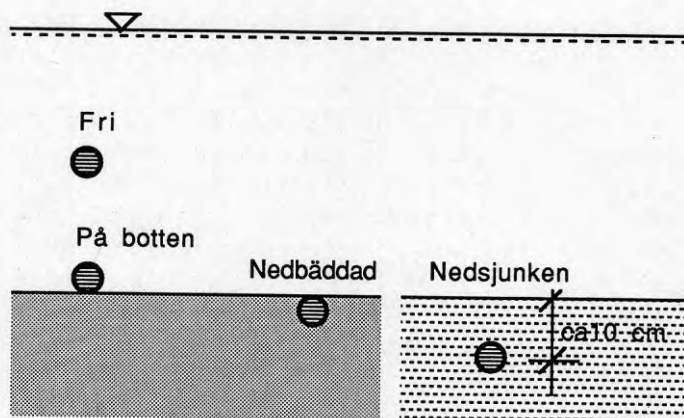
**Fig 4.1** Temperaturskillnaden mellan slangens ändrar som funktion av upptagen effekt.



**Fig 4.2** Lyftkraft på slangen som funktion av isdiameter.

De redovisade beräkningsfallen avser dels stillastående vatten vid temperaturen 0,3°C, 0,5°C, 1,0°C respektive 2,0°C och dels rinnande vatten vid temperaturen 0,05°C resp. 0,3°C och strömhastigheten 0,1 resp. 0,5 m/s.

Slangens läge anges som fri, på botten, nedbäddad respektive nedsjunken, vilka illustreras i fig 4.3. Bottenmaterialet förutsätts vara sand när slangens ligger på botten eller nedbäddad och gyttja eller annat löst organiskt material när den är nedsjunken.



**Fig 4.3** Olika läge på kollektorslang relativt botten.

#### 4.1 Stillastående vatten

Här redovisas i diagramform upptagen effekt och isdiameter som funktion av utgående brinetemperatur för de olika beräkningsfallen vid stillastående vatten. Kurvor för var femtionde meters slanglängd mellan 100 och 400 m finns inlagda. Observera att skalan på den vertikala axeln varierar mellan de olika beräkningsfallen.

Beräkningsfallen skiljer sig vad beträffar slangläge och vattentemperatur. Fallet "fri slang" har inte tagits med då det inte skiljer sig nämnvärt från "slang på botten".

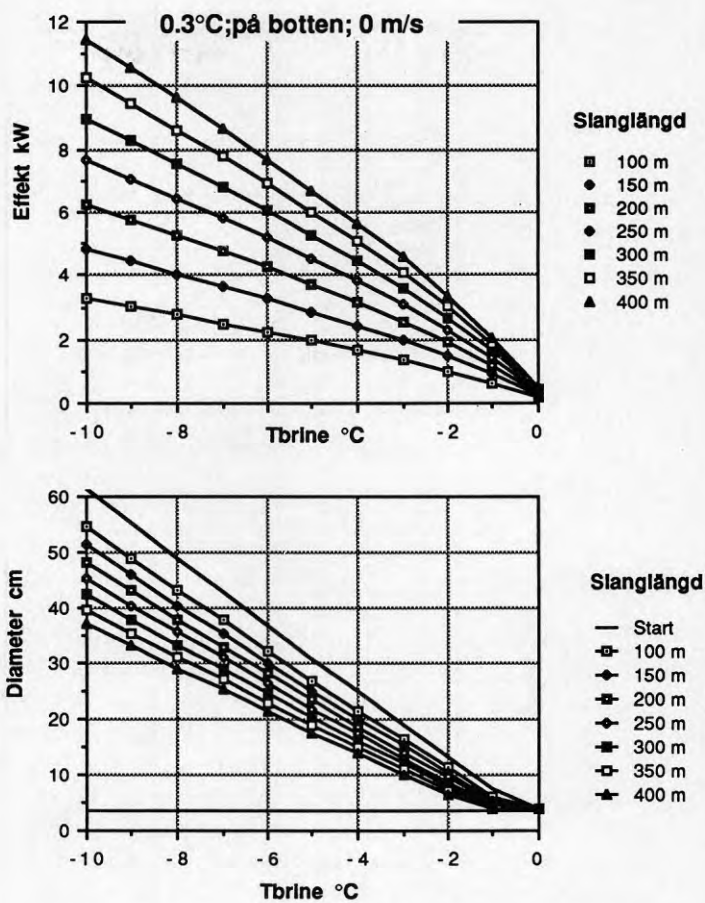
Vattentemperaturen skall avse förhållandena i höjd med slangen. Närmast botten ökar ofta temperaturen betydligt, speciellt vid plan botten på relativt litet djup (< 5 à 10 m). Ökningen kan uppgå till flera tiondels grad inom 10-20 cm avstånd från botten. Värmeuttaget minskar emellertid denna temperaturförhöjning, speciellt vid stora anläggningar med flera parallella slangar. För slang på botten, eller i olika grad nedsjunken, är det därför lämpligt att utgå från temperaturen på 5 à 10 cm höjd över botten, eller ännu högre vid stora kollektorer.

Användningen av diagrammen kan exemplifieras med en 300 m lång slang på botten vid en vattentemperatur av  $0,3^{\circ}\text{C}$ , se fig 4.4. Vid en utgående brinetemperatur av  $-6^{\circ}\text{C}$  är den upptagna effekten 6 kW, vilket motsvarar en medeleffekt längs slangen av 20 W/m. Den stationära isdiameteren blir i början av slangen (start) 36 cm och minskar till 25 cm vid slutet av slangen.

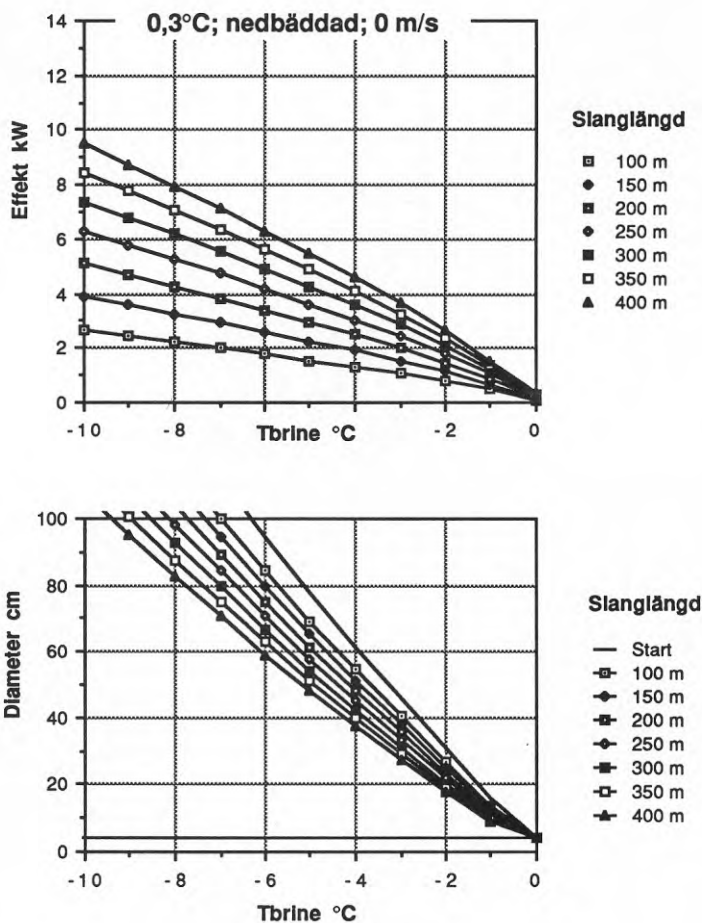
Kurvorna för olika slanglängder kan också tolkas som utvecklingen på olika punkter längs en slang. För vår 300 m-slang är således efter de första 100 m effektupptagningen 2,1 kW (medeleffekt 21 W/m) och isdiameteren 32 cm.

I det följande redovisas kurvor för de olika beräkningsfallen utan närmare kommentarer. Beskrivning av hur de kan användas vid dimensionering och kontroll av sjövärmekollektorer ges i kap. 5 och 6.

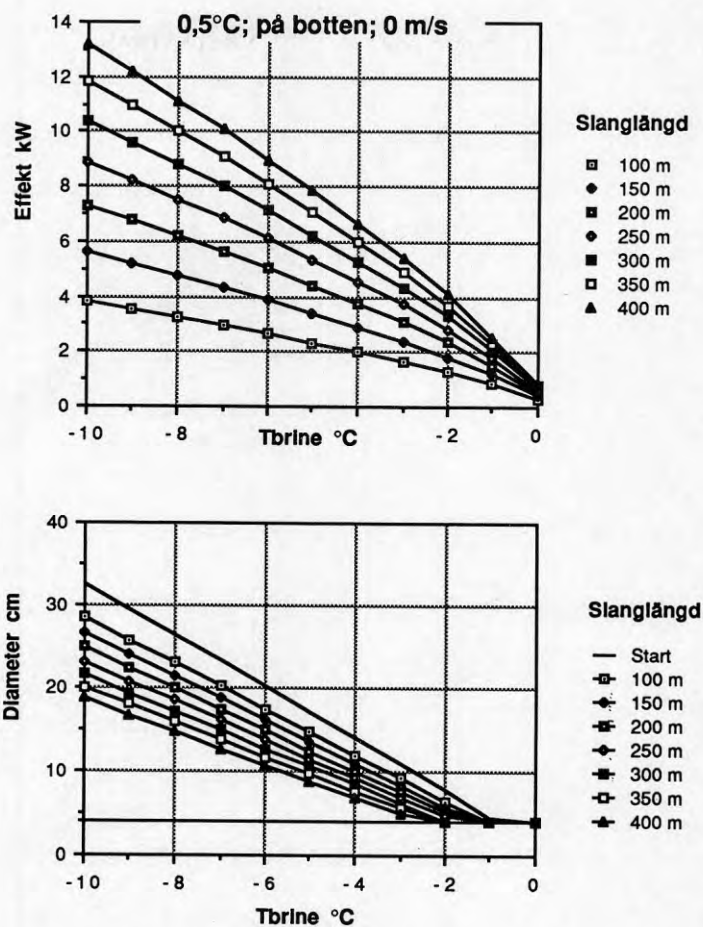




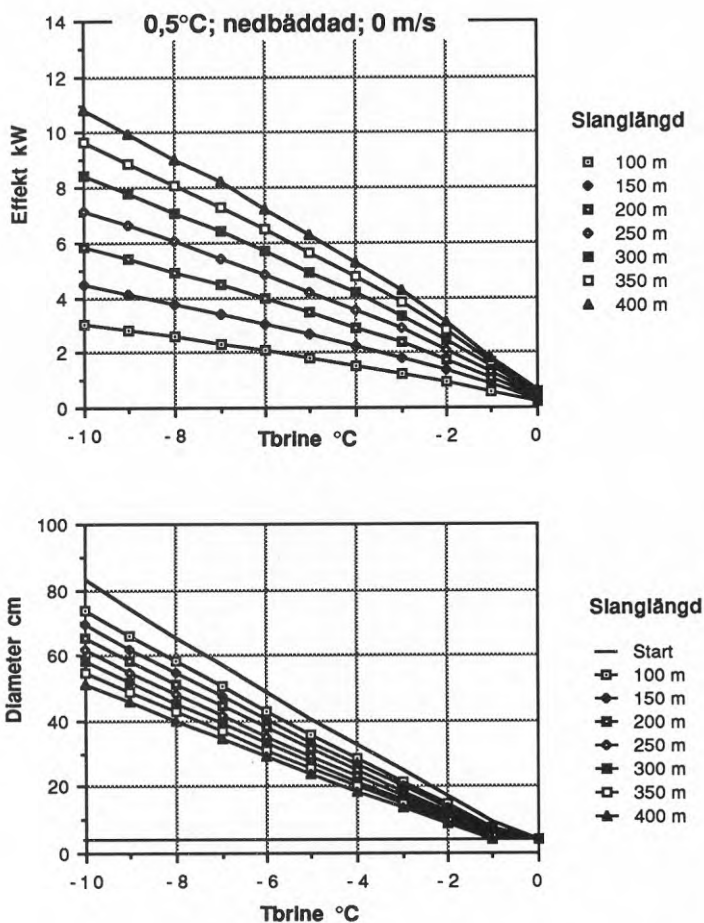
**Fig 4.4** Uptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Slang på botten, vattentemperatur 0,3°C, stillastående vatten.



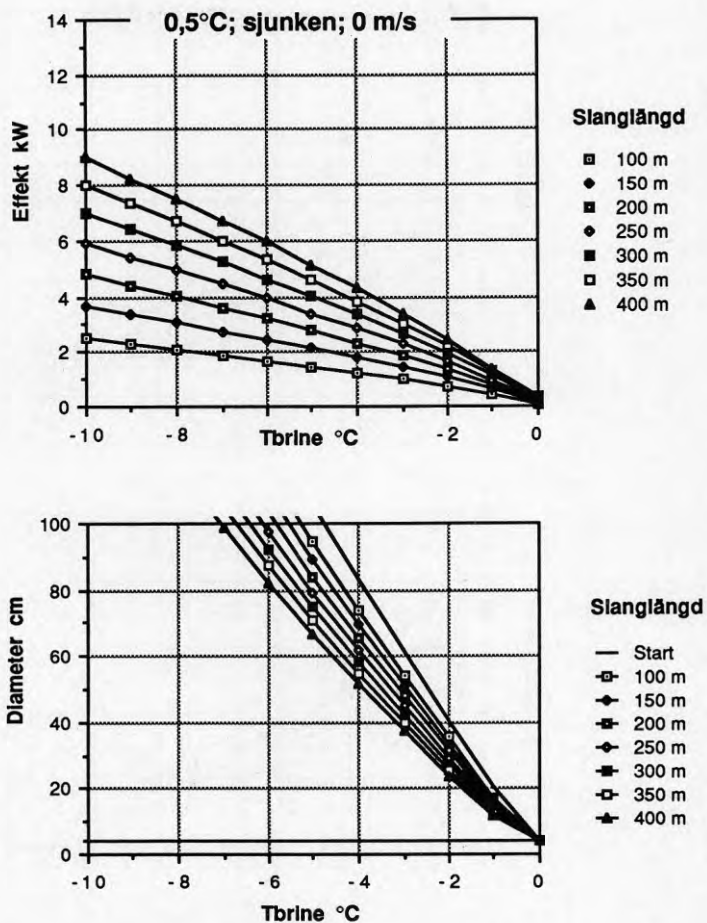
**Fig 4.5** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Nedbäddad slang, vattentemperatur 0,3°C, stillastående vatten.



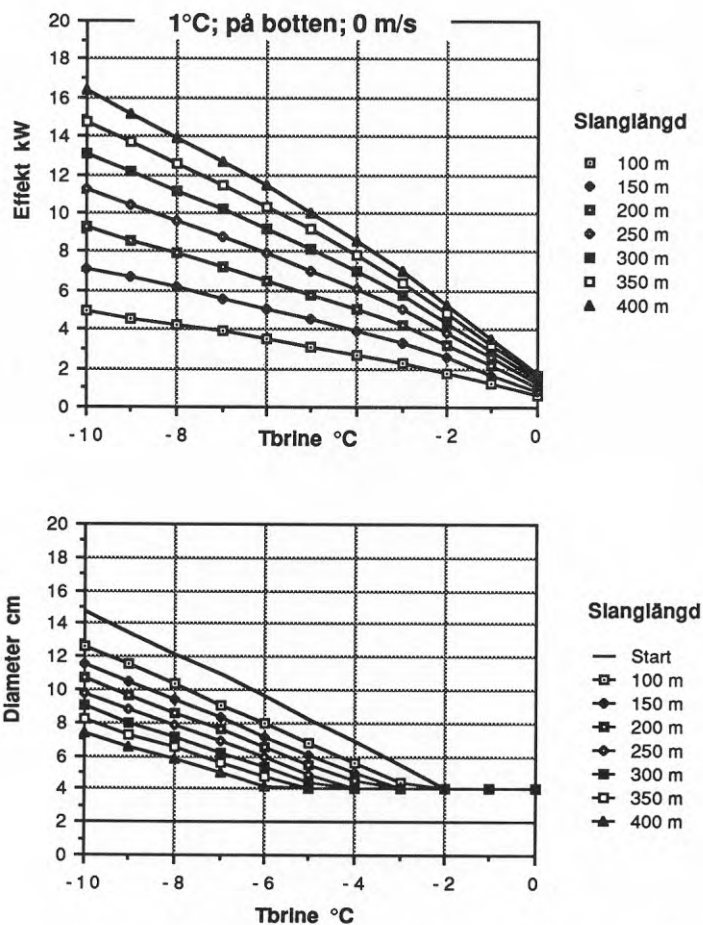
**Fig 4.6** Uptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Slang på botten, vattentemperatur 0,5°C, stillastående vatten.



**Fig 4.7** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Nedbäddad slang, vattentemperatur 0,5°C, stillastående vatten

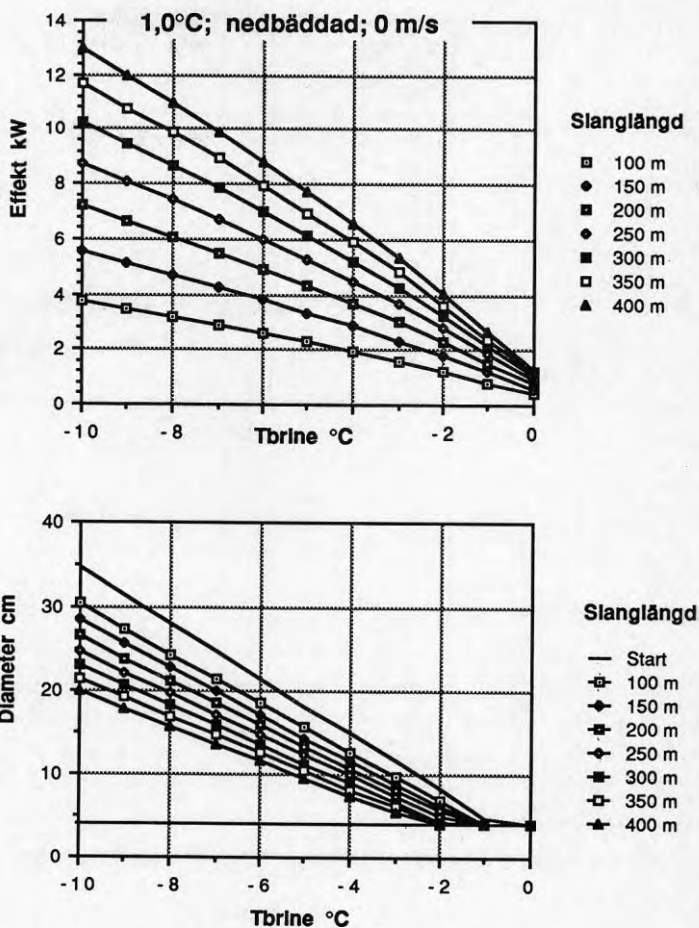


**Fig 4.8** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Nedsjunken slang, vattentemperatur 0,5°C, stillastående vatten.

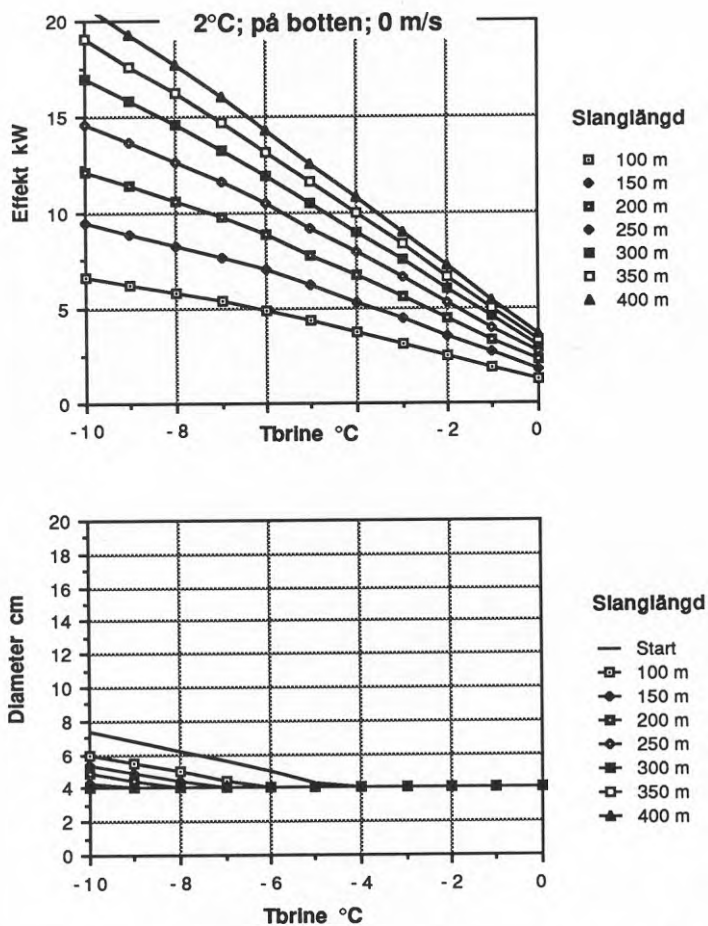


**Fig 4.9** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Slang på botten, vattentemperatur  $1,0^{\circ}\text{C}$ , stillastående vatten.

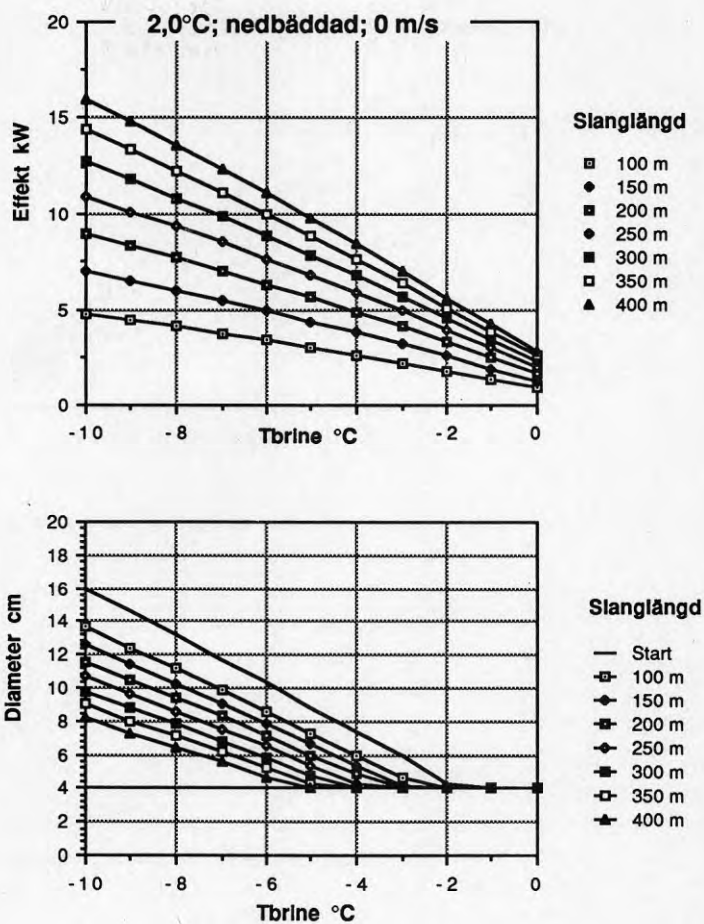




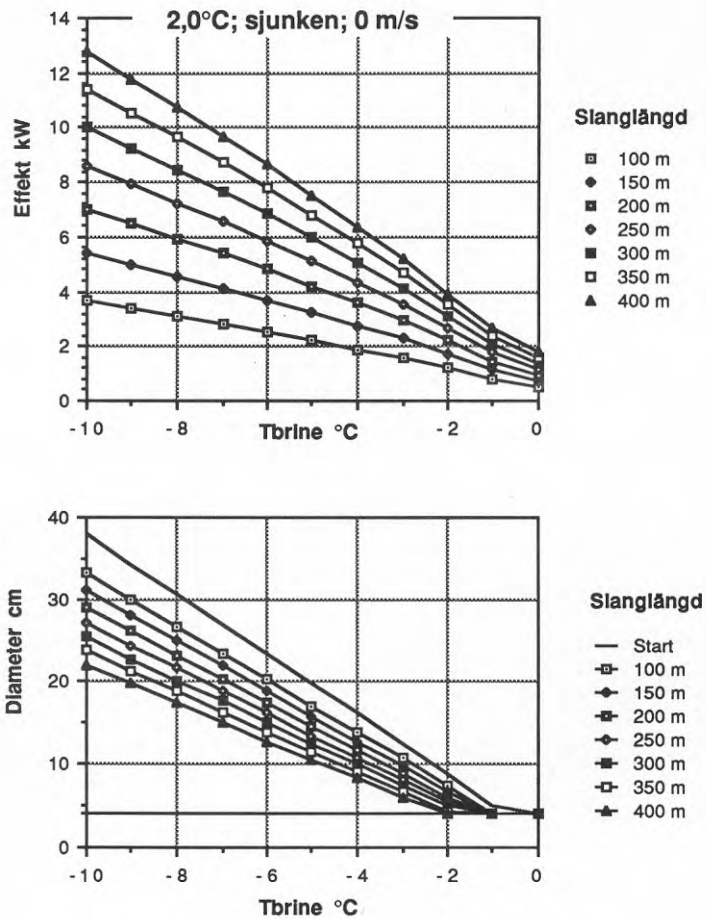
**Fig 4.10** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Nedbäddad slang, vattentemperatur 1,0°C, stillastående vatten.



**Fig 4.11** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Slang på botten, vattentemperatur  $2,0^{\circ}\text{C}$ , stillastående vatten.



**Fig 4.12** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Nedbäddad slang, vattentemperatur 2,0°C, stillastående vatten.



**Fig 4.13** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL  $\varnothing 40/32,6$  vid stationära förhållanden. Nedsjunken slang, vattentemperatur 2,0°C, stillastående vatten

## 4.2 Rinnande vatten

Effekt och isdiameter redovisas i diagram på samma sätt som för stillastående vatten.

Beräkningen för rinnande vatten gäller strikt endast inom ett intervall av Reynolds tal mellan 1000 och 10000 när slangen ligger på eller nedbäddad i botten (se Appendix A ekv.21). Den övre av dessa gränser kan komma att överskridas om strömhastigheten och/eller isdiameteren är stor. Vid en strömhastighet av 10 cm/s t ex svarar gränsen mot en diameter av 11 cm. Vid större värden på Reynolds tal blir beräkningsresultaten på "säkra sidan". Om noggrannare resultat önskas i dessa fall bör beräkningsmetoden justeras, t ex så att det yttre värmeöverföringstalet sätts till en konstant andel av motsvarande för fri slang.(se Svensson& Sörman 1983b)

Beräkningsfallen skiljer sig åt med avseende på slangläge, temperatur och strömhastighet. Även strömriktningen relativt slangen har betydelse för värmeupptagningen och har i typfallen ansatts vara till lika stor andel tvärgående som längsgående. Slangläget "nedsjunken" har inte tagits med eftersom botten i rinnande vatten är fast.

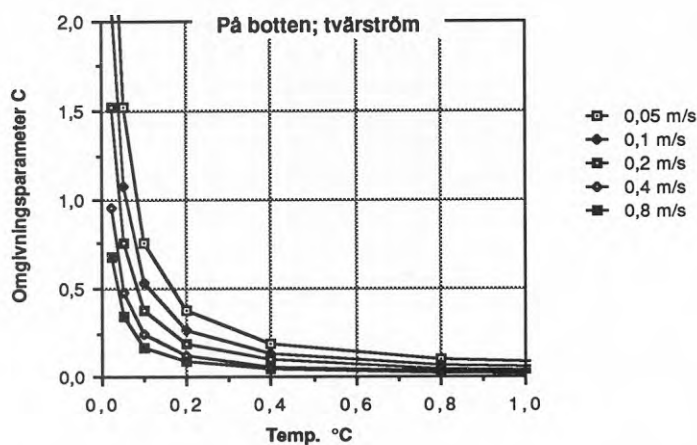
Temperaturen i strömmande vatten är i regel konstant från ytan till botten. Undantag är smala genomströmningssjöar eller sel, där genomströmningen är koncentrerad till ett kallt ytskikt om några meters tjocklek, medan underliggande vatten är varmare och stillastående. Strömhastigheten i ytskiktet är i dessa fall låg, endast några få cm/s.

Ström förbi kollektorslangen medför en väsentlig ökning av värmeöverföringstalet jämfört med stillastående vatten. Strömningen bör tas med i beräkningen när strömhastigheten överstiger ca 2 cm/s.

Den strömhastighet som skall anges är i fallet "fri slang" mitt för slangen. För "slang på botten" eller "nedbäddad slang" skall hastigheten på 5-10 cm höjd över botten användas. Observera att strömhastigheten avtar kraftigt mot botten så att det värde som skall användas kan vara betydligt lägre än medelhastigheten i vattendraget.

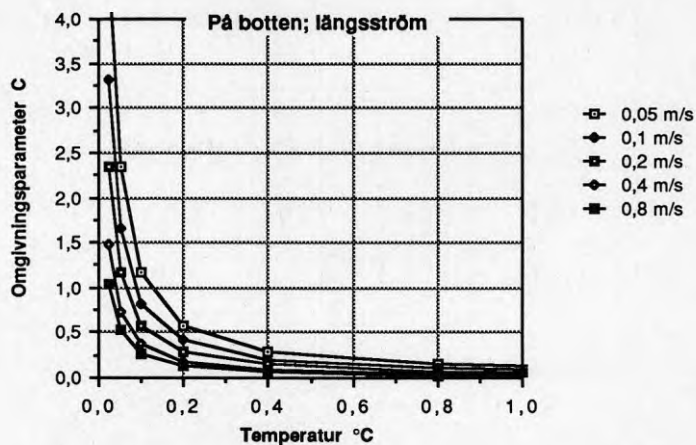
Antalet kombinationer av vattentemperatur, strömhastighet,

slangläge och orientering relativt strömriktningen blir stort. Endast ett fåtal av dessa kan redovisas här. Beräkningsmässigt kombineras dock parametrarna till en omgivningsparameter, C (se Appendix A ekv.24). Man får två skilda beräkningsfall om slangen ligger fritt i vattnet respektive om den ligger på eller nedbäddad i botten. För vardera av dessa fall får man samma värmeupptagning och ispåväxt vid ett visst värde på C, oavsett vilken kombination av temperatur, ström etc som C uttrycker. Omgivningsparameterns storlek som funktion av vattentemperaturen för olika fall visas i fig. 4.14-16.

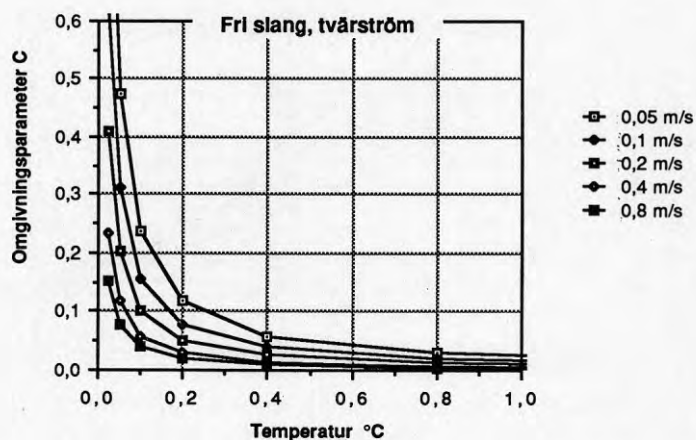


**Fig 4.14** Kurvor över omgivningsparametern C som funktion av vattentemperatur och strömhastighet. Slang på botten, tvärström.



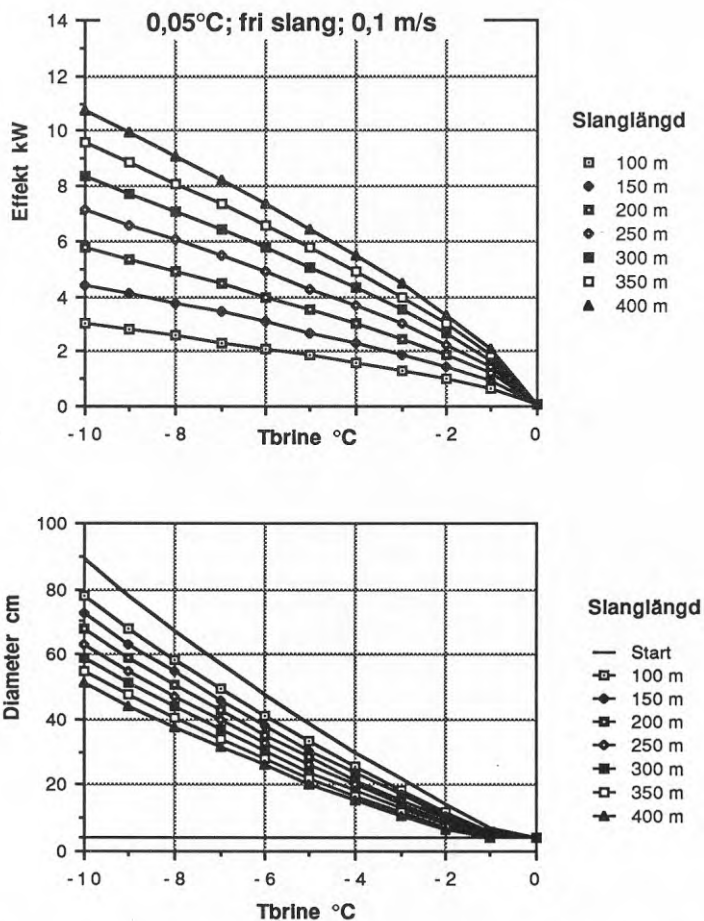


**Fig 4.15** Kurvor över omgivningsparametern C som funktion av vattentemperatur och strömhastighet. Slang på botten, längsström.

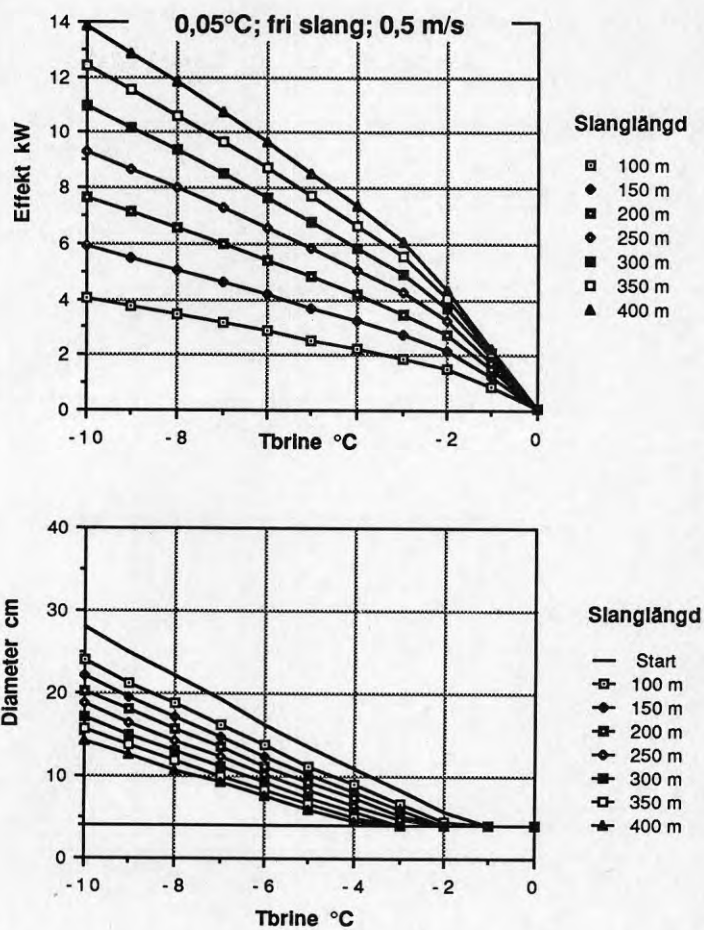


**Fig 4.16** Kurvor över omgivningsparametern C som funktion av vattentemperatur, och strömhastighet. Slang fritt i vattnet, tvärström.

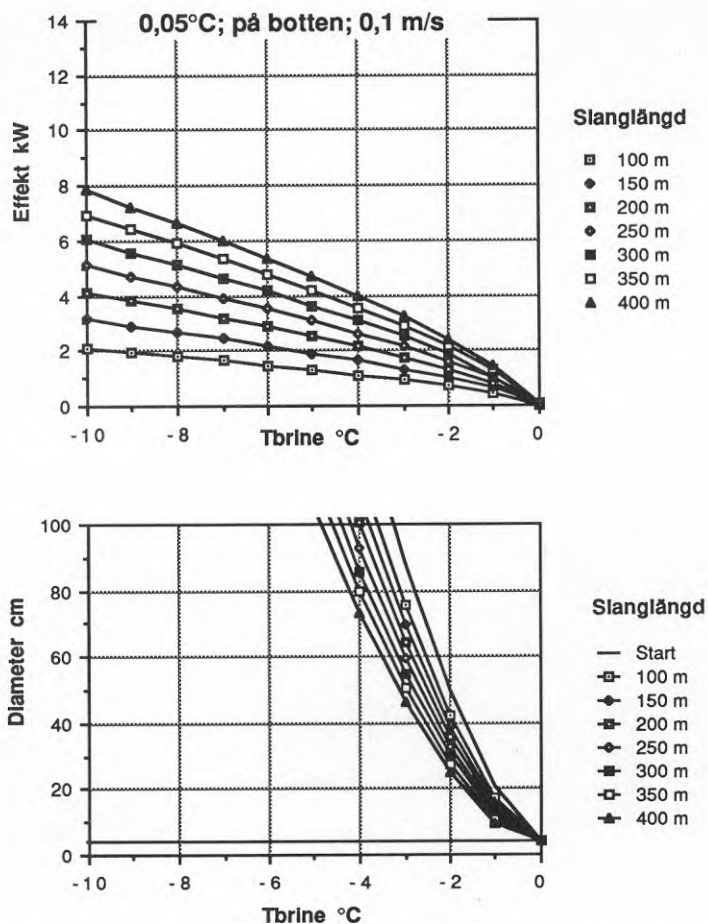
I det följande redovisas kurvor över effekt och isdiameter för de olika beräkningsfallen utan närmare kommentarer. Beskrivning av hur de kan användas vid dimensionering och kontroll av sjövärmekollektorer ges i kap. 5 och 6.



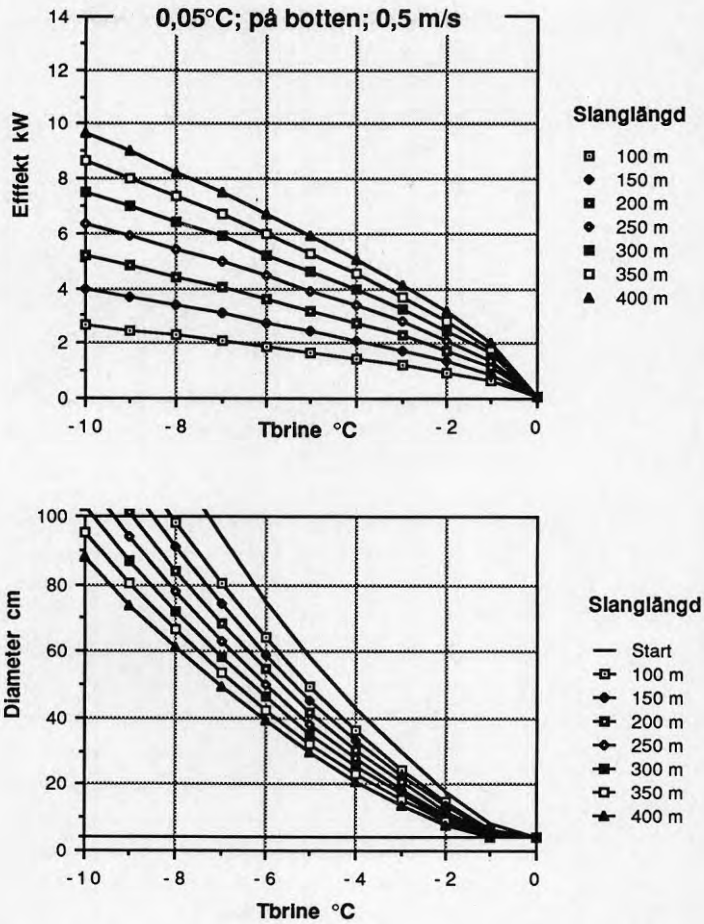
**Fig 4.17** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL Ø40/32,6 vid stationära förhållanden. Fri slang, vattentemperatur 0,05°C, strömhastighet 0,1 m/s.



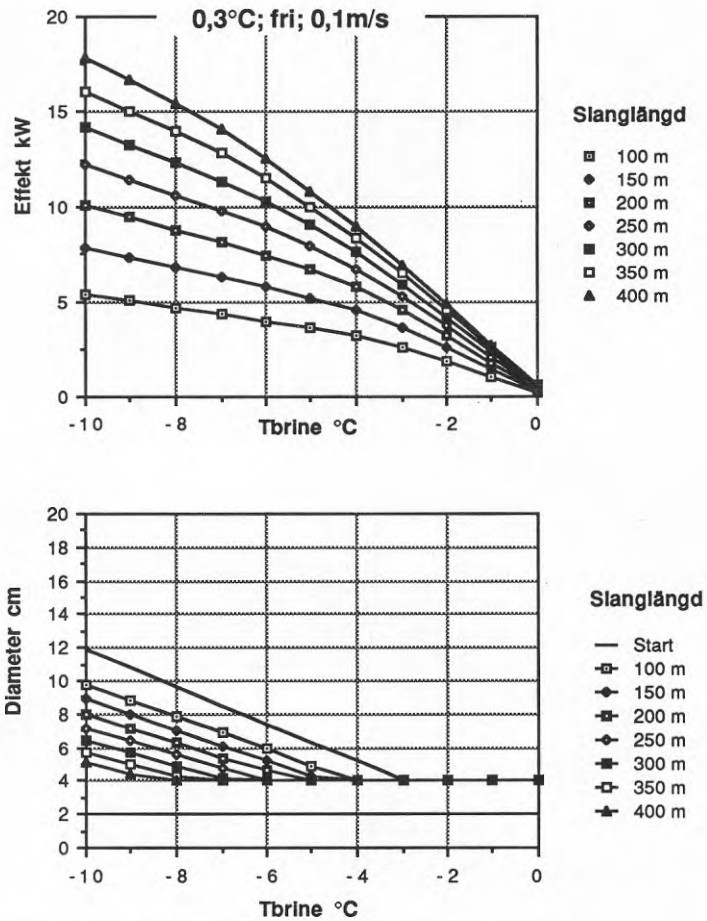
**Fig 4.18** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL Ø40/32,6 vid stationära förhållanden. Fri slang, vattentemperatur 0,05°C, strömhastighet 0,5 m/s.



**Fig 4.19** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL Ø40/32,6 vid stationära förhållanden. Slang på botten, vattentemperatur 0,05°C, strömhastighet 0,1 m/s.

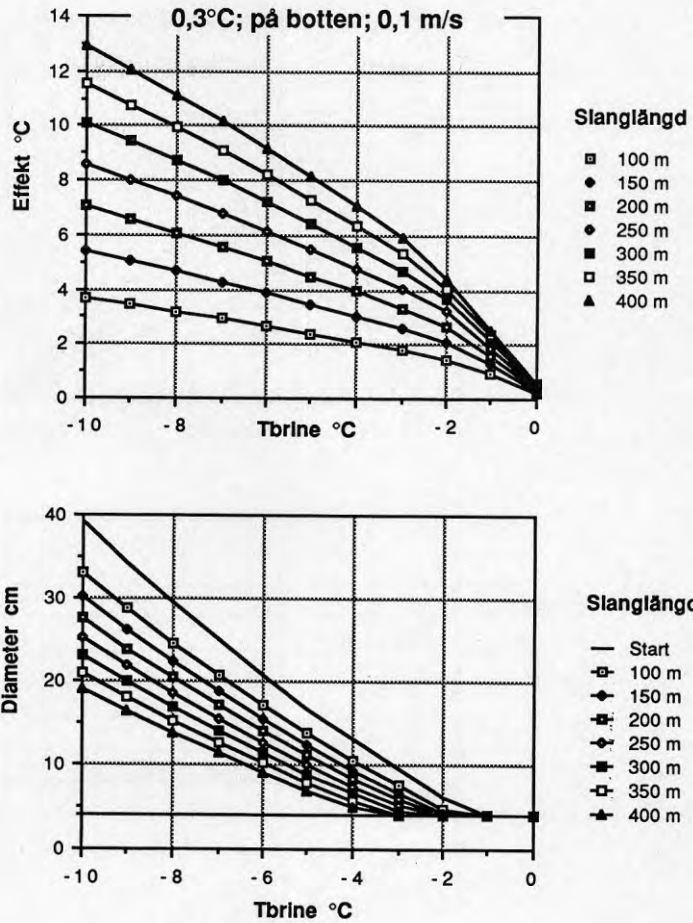


**Fig 4.20** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL Ø40/32,6 vid stationära förhållanden. Slang på botten, vattentemperatur 0,05°C, strömhastighet 0,5 m/s.

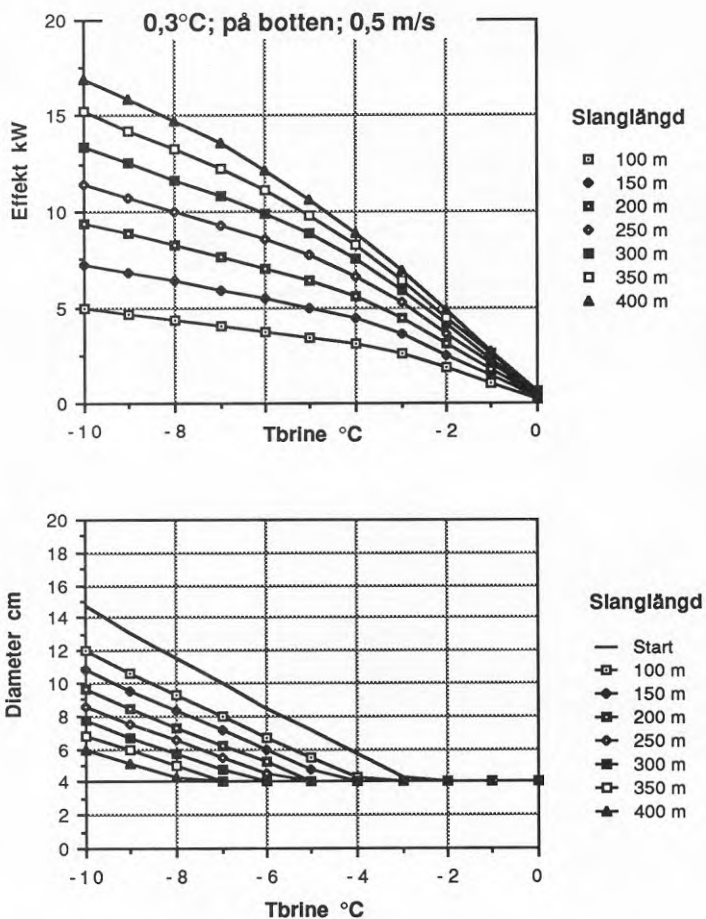


**Fig 4.21** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL Ø40/32,6 vid stationära förhållanden. Fri slang, vattentemperatur 0,3°C, strömhastighet 0,1 m/s.





**Fig 4.22** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL Ø40/32,6 vid stationära förhållanden. Slang på botten, vattentemperatur 0,3°C, strömhastighet 0,1 m/s.



**Fig 4.23** Upptagen effekt samt isdiameter för kollektorslang PEL Ø40/32,6 vid stationära förhållanden. Slang på botten, vattentemperatur 0,3°C, strömhastighet 0,5 m/s.

## 5 DIMENSIONERING

I detta kapitel beskrivs hur diagrammen i kapitel 4 kan användas för att dimensionera slanglängd, slangantal och förankring för en kollektor. Kollektorn försörjer en värmepump med kända prestanda.

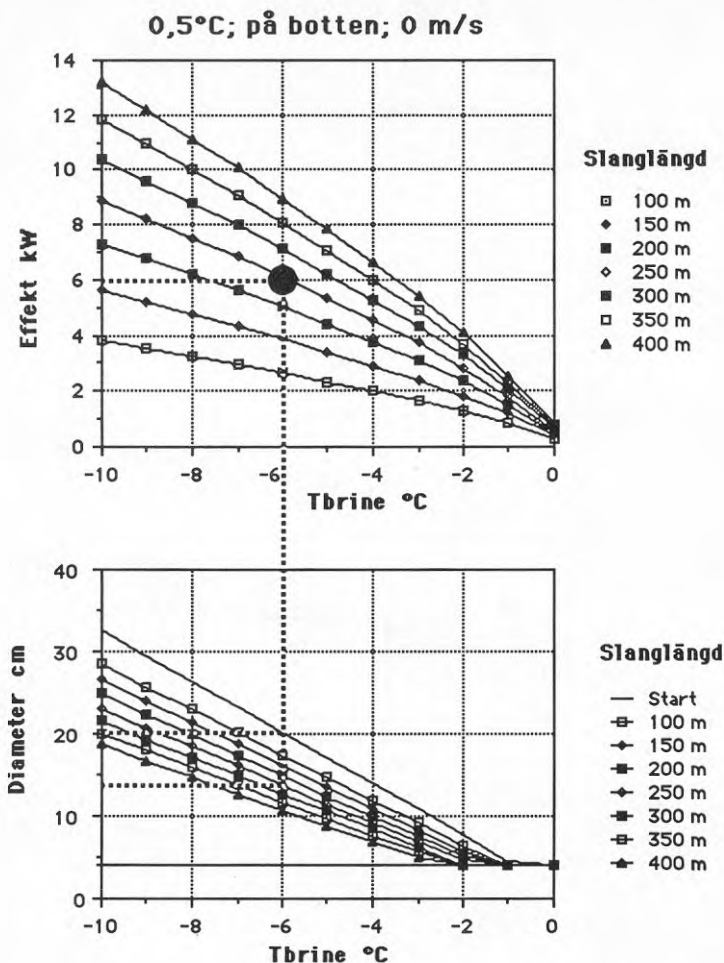
Vattentemperatur och strömhastighet måste vara kända och ges i form av dimensionerande värden för vinterförhållanden. Ofta saknas tillförlitliga mätningar. Val av dimensionerande värden måste då göras på grundval av erfarenhet och teoretiska beräkningar. Det bör observeras att temperaturen kan skilja sig väsentligt (inom intervallet 0-4°C) mellan olika vintrar. Mätdata från en säsong är således inte tillräckligt som underlag. Den som vill veta mera om vinterförhållanden i sjöar hänvisas till Svensson(1987), Sahlberg (1986), Bengtsson(1982) och Moberg(1981).

Som dimensioneringskriterium används antingen lägsta brinetemperatur eller också maximal isdiameter. Det är också möjligt, men betydligt mera komplicerat, att göra en ekonomisk optimering av kollektorn.

### 5.1 Dimensionering efter lägsta brinetemperatur

Värmepumpens driftpunkt ges i detta fall i form av ett visst effektbehov från värmekällan vid en viss inkommande brinetemperatur. Den senare kan lätt omräknas till utgående temperatur. Som riktvärde kan anges en inkommande brinetemperatur av -5°C och en utgående av -8°C. Detta motsvarar, med brineflödet 0,75 l/s, en effekt av 8,8 kW, vilken måste tas upp av kollektorn.

Dimensioneringsprincipen exemplifieras i fig 5.1 för slang på botten i stillastående vatten vid en dimensionerande vattentemperatur av 0,5°C. Vid värmepumpens driftpunkt anges effektbehovet från värmekällan (kyleffekten) till 6 kW och utgående brinetemperatur till -6°C. Detta ger en slanglängd av 250 m och medför en isdiameter av 20 cm i början av slangen, minskande till 14 cm i slutet. Den dimensionerande lyftkraften blir 2,5 kg/m enligt fig 4.2.

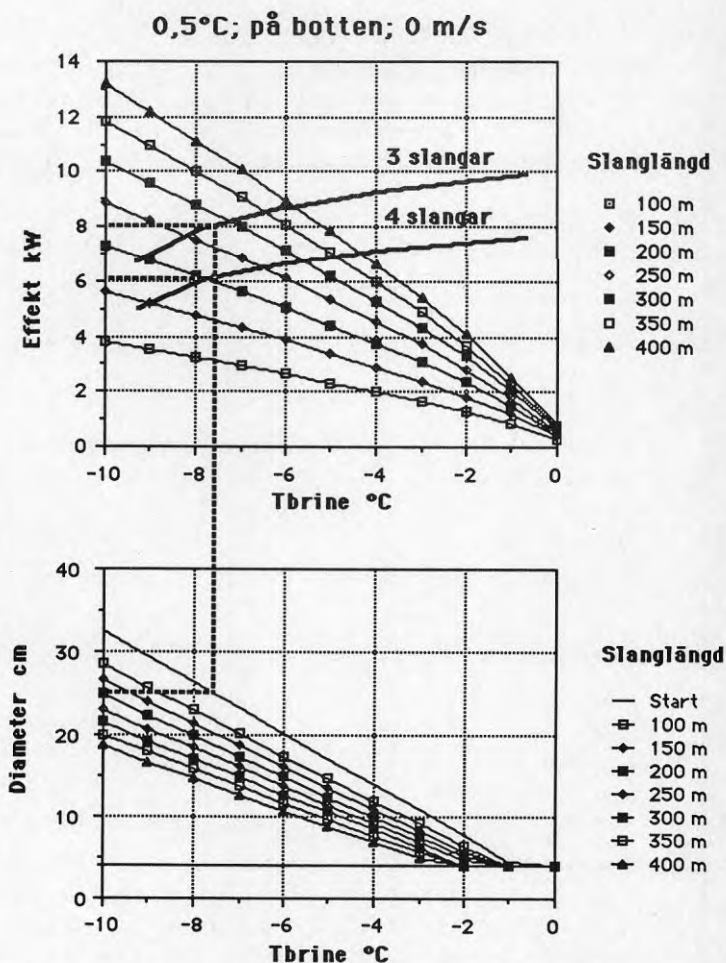


**Fig 5.1** Exempel på dimensionering av sjövärmeslang utgående från effektbehov och lägsta brinetemperatur.

Dimensioneringen tar inte hänsyn till sträckan mellan värmepumpen och strandkanten, där slangen är förlagd i mark. Värmeupptagning på denna sträcka medför såväl ett minskat effektbehov som ökad brinetemperatur för sjövärmedelens. Storleken på dessa kan bestämmas med dimensioneringsmetoder för ytjordvärme (se Rehn, Sundberg & Modin 1986). Överslagsmässigt kan man ansätta värmeupptagningen mellan värmepumpen och sjön till 10 W/m vid kontinuerligt uttag, om slangen ligger i lera eller vattenmättad sand.

## 5.2 Dimensionering efter max isdiameter

Om en största isdiameter (eller lyftkraft) anges som dimensioneringskriterium svarar denna direkt mot en lägsta brinetemperatur vid givna yttre förhållanden, som framgår av exemplet i fig 5.2. Exemplet utgår från en isdiameter av 25 cm, vilket ger en lägsta, utgående brinetemperatur av  $-7,5^{\circ}\text{C}$ .



**Fig 5.2** Exempel på dimensionering utgående från maximal isdiameter.

Slanglängden bestäms sedan av värmepumpens effektbehov. I

exemplet har antagits en större värmepump med kollektorn uppdelad på ett antal parallellkopplade slangar. Effektbehovet per slang fås genom att dividera det totala effektbehovet med antalet slangar. Effektbehovet (kyleffekten) per slang för tre respektive fyra slangar är inlagda i figuren. Erforderlig slanglängd kan avläsas till 200 m vid fyra slangar och 280 m vid tre slangar. Om man väljer en längre slanglängd förflyttas dimensioneringspunkten längs värmepumpens kyleffektkurva, så att brinetemperaturen blir högre och isdiametern mindre.

Förhållandet mellan slangantal och slanglängd bestäms så att kollektorn får en lämplig utformning med hänsyn till vattendjup, ägoförhållanden mm. Det är också en ekonomisk fråga. Flera kortare slangar ger flera dyrbara och känsliga kopplingar. Långa slangar ger större pumparbete.



### 5.3 Icke stationär istillväxt

Den dimensioneringsmetod som redovisats bygger på att stationära förhållanden uppnås vid dimensionerande förhållanden i värmekällan; sjön eller vattendraget. I praktiken är dock inte förhållandena konstanta i en sjö eller ett vattendrag under hela vintern. Likaså kan värmeuttaget med kollektorn variera, speciellt om värmepumpsystemet är dimensionerat för att täcka hela eller större delen av värmelasten. Det kan därför vara motiverat att beräkna hur snabbt istillväxten sker på kollektorslangarna för vissa fall. Man kan då kontrollera fall som är mera ogynnsamma än det dimensionerande. Det kan också vara gynnsamt att dimensionera kollektorn för det icke-stationära fallet, om man vet att de mest ogynnsamma yttre förutsättningarna och/eller värmeuttaget endast uppträder under en kort tid.

Det ligger utanför målsättningen med detta projekt att konstruera en modell för att simulera effektuttag och påfrysning för godtyckligt varierande omgivningsförhållanden och värmeuttag. Beräkningar för några specialfall finns redovisade i Appendix A. Här förutsattes att omgivningsförhållandena är konstanta under beräkningsperioden. Slang- och brineparametrarna är desamma som använts tidigare.

Två olika fall av värmeuttag har analyserats; konstant effektuttag respektive konstant brinetemperatur. I det senare fallet minskar effekten i takt med att isdiametern tillväxer, se fig.6.2. Till skillnad mot tidigare är beräkningen inte gjord för hela slangen, med varierande effekt och isdiameter, utan gäller enbart för en kort sträcka med konstanta förhållanden. Beräkningen är i första hand gjord för att man skall kunna kontrollera vad som händer i början av slangen, där normalt ispåfrysningen blir som störst.

Istillväxten kan relateras till den stationära isdiameter som uppnås vid samma förhållanden,  $D_{stat}$ , och en tidsskala,  $t'$ , för förloppet. Både vid konstant effektuttag och konstant brinetemperatur gäller följande uttryck:

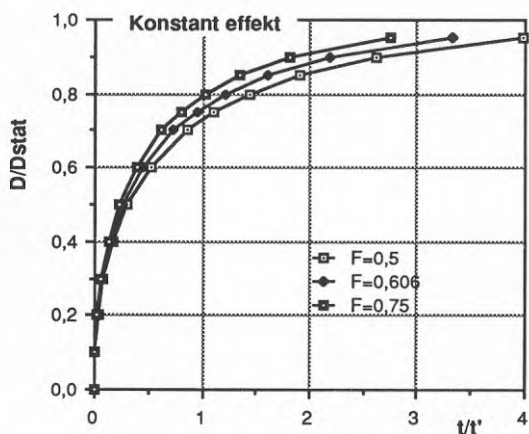
$$D/D_{stat} = f(t/t')$$

$$\text{där } t' = C (D_{stat})^{2-F} / A' \quad (\text{sekunder})$$

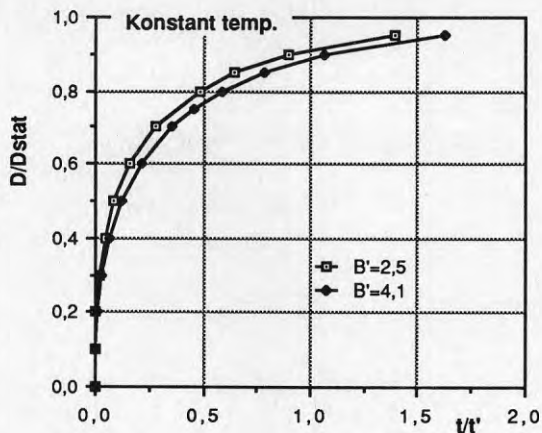
C är omgivningsparametern  
 $A' = 2,93 \cdot 10^{-8}$  är en konstant som  
 beror av isens egenskaper

I fallet med konstant effektuttag finns också ett svagt beroende av konstanten F, som ges i indata, se kap.3.1. Vid konstant brinetemperatur finns ett liknande beroende av en konstant  $B' = B + \ln(D_{\text{stat}})$ , där B är en kollektorparametersom skrivs ut tillsammans med indata vid användning av beräkningsprogrammet, se tabell 3.1.

Kurvor över istillväxten för dessa två fall visas i fig. 5.3 och 5.4. Observera att skalan längs tidsaxeln är olika i de båda fallen. 80% av den stationära isdiametern uppnås i fallet konstant effekt efter en tid som svarar mot  $t'$ , medan motsvarande tid vid fallet konstant brinetemperatur är  $0,5t'$ .



**Fig.5.3** Istillväxten på en kollektorslang vid konstant effektuttag. Isdiametern relateras till diametern vid stationära förhållanden och tiden till tidsskalan  $t'$ .



**Fig.5.4** Istillväxten på en kollektorslang vid konstant brinetemperatur. Isdiametern relateras till diametern vid stationära förhållanden och tiden till tidsskalan  $t'$ .

Som exempel kan tas ett fall med slang på botten i stillastående vatten vid vattentemperaturen  $0,5^{\circ}\text{C}$ . För detta fall gäller att  $F=0,75$ . Omgivningsparametern  $C$  beräknas med ekv.(16) i Appendix A till  $0,15$ .

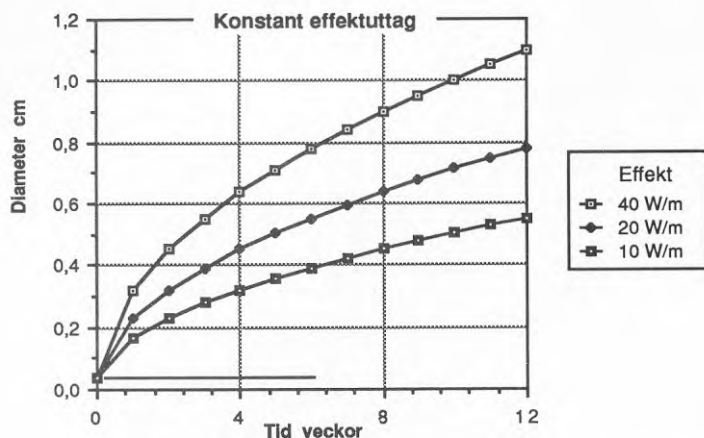
Den utgående brinetemperatur sätts till  $-7^{\circ}\text{C}$ , vilket enligt fig.4.6 vid stationära förhållanden ger en isdiameter i början av slangen av  $23\text{ cm}$  och en medeleffekt på de första  $100\text{ m}$  av slangen av ca  $28\text{ W/m}$ . Dessa data ger en tidsskala  $t'$  av  $9,4$  dygn.

Ur fig.5.3 kan då utläsas att man uppnår 80% av den slutliga isdiametern, dvs  $18,4\text{ cm}$ , efter ca 10 dygn om effektuttaget hålls på  $28\text{ W/m}$  under hela tiden. Brinetemperaturen kommer då successivt att sjunka under påfrysingsförloppet.

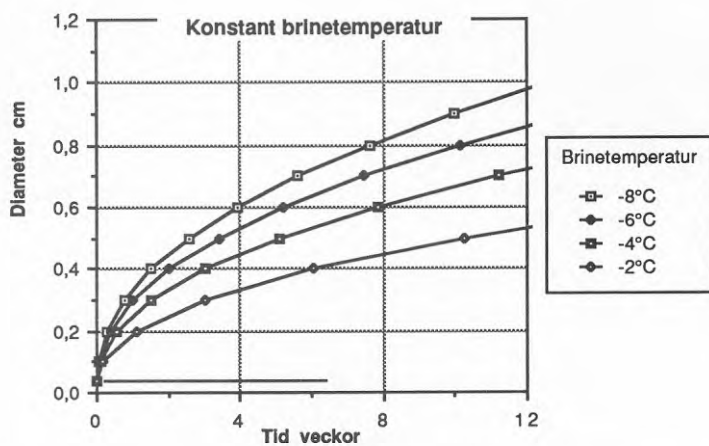
Om i stället brinetemperaturen hålls konstant vid  $-7^{\circ}\text{C}$  uppnås 80% av diametern efter knappt 5 dygn ( $B'=2,9$ ). Effekten är då betydligt högre än  $28\text{ W/m}$  i början för att sjunka mot detta värde.

Metoden ovan gäller inte när vattentemperaturen är  $\pm 0^{\circ}\text{C}$  då inga stationära förhållanden kan uppnås. I detta fall sker all värmeupptagning genom frysning. Isdiameters tillväxt för

fallen med konstant effektuttag respektive konstant brinetemperatur ges i fig.5.5 och 5.6. I det förra fallet ökar isens massa, och därmed förankringskraften, linjärt med tiden.



**Fig 5.5** Påfrysning på en kollektorslang vid vattentemperaturen  $\pm 0^\circ\text{C}$  och konstant effektuttag.



**Fig 5.6** Påfrysning på en kollektorslang vid vattentemperaturen  $\pm 0^\circ\text{C}$  och konstant brinetemperatur.

## 6 DRIFTKONTROLL OCH STYRNING

I de flesta fall kontrolleras inte vattentemperaturen och ispåväxten på kollektorslangarna vid driften av sjövärmepumpar. Det finns därför alltid en viss risk att kollektorn kan flyta upp och skadas vid tillfällena då vattentemperaturen blir lägre än den dimensionerande. Låga temperaturer uppträder i sjöar främst omkring isläggningen, speciellt om denna föregåtts av en period med kyla och vind.

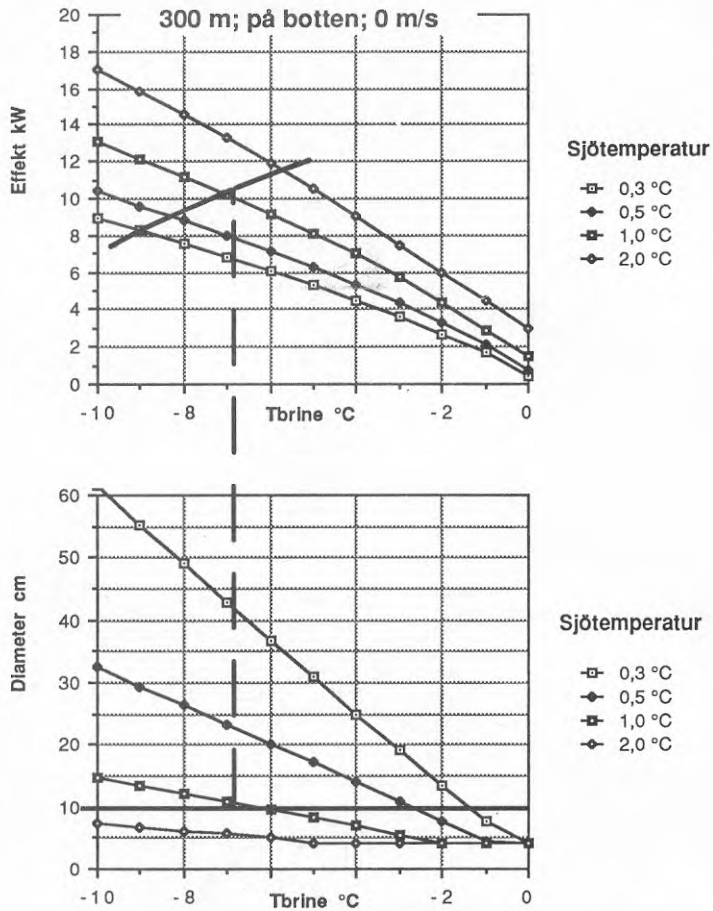
Vid sådana tillfällen finns det ett behov av att kunna bestämma när ispåväxten uppnått dimensionerande värde och kunna styra driften så att inte detta överskrides. Detta är speciellt viktigt i de fall då botten är lös och där inte infruset material bidrar till förankring av slangarna.

Beräkningsmodellen ger en möjlighet att, för en given anläggning, approximativt utvärdera isdiametern från rutinmätningar av brinetemperatur vid värmepumpen samt den upptagna effekten. Härigenom kan en enkel driftkontroll byggas upp vilken kan tillämpas även för små anläggningar.

Metoden förutsätter att fördelningen av is längs slangen är densamma i det aktuella fallet som i det stationära beräkningsfallet. Man måste också veta om slangen har likartade omgivningsförhållanden längs hela sin sträckning. I annat fall måste man göra en uppdelning i delsträckor med olika grad av nedsjunkning eller fördelning av strömhastighet och temperatur. Det senare blir speciellt fallet om slangen är placerad över ett stort djupintervall.

I det följande presenteras en metod att konstruera ett diagram för kontroll av ispåfrysningen utgående från de tidigare visade beräkningsresultaten. Som exempel väljs en anläggning med 300 m långa slangar liggande på botten. Samma vattentemperatur antas råda längs hela slangens sträckning (plan botten). Kurvorna över upptagen effekt och isdiameter vid olika vattentemperaturer är överförda från kap.4.1 och samlade i fig 6.1

I diagrammen är också inlagt driftdata för en värmepump och en dimensionerande istjocklek av 10 cm. Sjön förutsätts ha en gynnsamt hög dimensionerande temperatur av 1°C varför värmepumpsystemet kan dimensioneras för en upptagen effekt av 10 kW vid -7°C brinetemperatur ut.

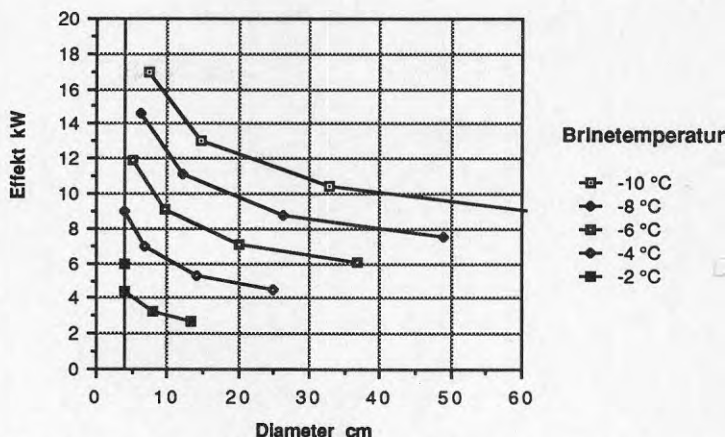


**Fig. 6.1** Effekt och isdiameter vid olika vattentemperaturer för 300 m sjövärmeslang på botten i stillastående vatten. Isdiametern avser början av slangen. I figuren är också inlagt ett exempel på dimensionering.

Kurvorna i diagrammen ovan gäller vid stationära förhållanden. Värmeupptagningen (effekten) vid en viss brinetemperatur förutsätter därvid att isdiametern i det undre diagrammet uppnått. Omvänt gäller dock att effekten, vid en viss isdiameter och brinetemperatur, blir densamma oavsett vattentemperaturen eller om istillväxt eller avsmältning sker. Detta beror på att temperaturen vid iscylinderns yta alltid är  $\pm 0^{\circ}\text{C}$ . De båda diagrammen ovan kan därför sammansättas till ett mera generellt diagram genom att avsätta samhörande värden för effekt och isdiameter vid olika brinetemperatur, fig 6.2. Detta



förfarande förutsätter att fördelningen av is längs slangen är likartad som i det stationära fallet.

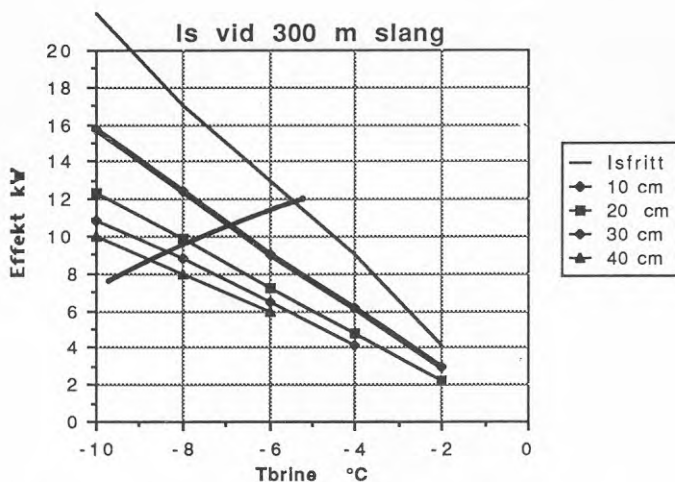


**Fig. 6.2** Upptagen effekt vid olika brinetemperatur som funktion av isdiameter i början av en 300 m lång slang på botten i stillastående vatten.

Diagrammet ovan visar hur effekten sjunker när is tillväxer på slangen. Till en början minskar effekten snabbt, men vid större diameter planar kurvorna ut. Det är alltså möjligt att dimensionera sjövärmekollektorer för stor ispåväxt förutsatt att tillfredställande förankring anordnas.

Diagrammet i fig.6.2 kan användas direkt för att avläsa isdiameter utgående från mätta värden på effekt och brinetemperatur. Det är emellertid enklare om man ritar om diagrammet så att effekten avsätts som funktion av brinetemperaturen för olika isdiameter. Detta har gjorts i fig. 6.3. Här är också värmepumpens driftkurva inlagd och den dimensionerande istjockleken markerad särskilt.

Kontrolldiagrammet i fig. 6.3 skall tolkas så att man har mindre is än den dimensionerande (i exemplet 10 cm) så länge man ligger över den kraftigare markerade 10 cm-kurvan. Detta gäller oavsett om värmepumpen går på full eller reducerad effekt. Före mätning av effekt och brinetemperatur måste man tillse att värmepumpen gått kontinuerligt under så lång tid att brinetemperaturen hunnit att stabiliseras, åtminstone en halv timme. Om värmepumpen körs intermittent är det värdena under drift som skall användas, inte medelvärden under längre tid.



**Fig. 6.3** Kontrolldiagram för bestämning av ispåväxt utgående från upptagen effekt och utgående brinetemperatur. 300 m slang på botten i stillastående vatten.

Olika driftstrategier kan utformas vilka tar hänsyn till dimensionerande islast på kollektorn. Ett visst mått av "trial and error" är dock nödvändigt, om inte vattentemperaturen i sjön är känd.

För värmepumpar som går i intermitterant drift, med full effekt under driftperioderna, räcker det att mäta utgående brinetemperatur. När denna sjunkit till dimensionerande värde, i exemplet ovan  $7^{\circ}\text{C}$ , kopplas reservvärme in under viss tid. Man kan t ex prova att koppla ur värmepumpen under dagtid (14 tim), då elströmmen är dyrast. Detta motsvarar en minskning av medeleffektuttaget på kollektorn med ca 60%. Om brinetemperaturen trots detta fortsätter att sjunka (under  $-7^{\circ}\text{C}$ ) under driftperioden måste ytterligare förkortning av drifttiden göras, tills dess brinetemperaturen stabiliseras på det dimensionerande värdet, i vårt exempel  $-7^{\circ}\text{C}$ . Om brinetemperaturen däremot ökar kan drifttiden ökas.

Om värmepumpen kan regleras så att den kan köras med reducerad effekt gör man på likande sätt. I första hand reglerar man ned effekten under dagtid och, om inte detta räcker, även under natten. I detta fall måste man dock ta hänsyn till såväl brinetemperatur som den aktuella effekten för kollektorn

(=värmepumpens kyleffekt) för att avläsa isdiametern i fig. 6.3.

Om man genom successiv provning kommer fram till ett effektuttag som håller isdiametern stabilt vid det dimensionerande värdet är det möjligt att läsa av vattentemperaturen i sjön från diagrammen i fig. 6.1. Man utgår då ifrån den aktuella effekten och isdiametern och letar upp den brinetemperatur som ger lika stort värde på vattentemperaturen i de båda diagrammen. Om t ex värmepumpen i exemplet måste minska effekten med 60%, från 10 till 4 kW, för att hålla isdiametern stabilt vid 10 cm bör vattentemperaturen vara ca 0,5°C. Om driften sker med konstant effekt blir brinetemperaturen knappt -3°C.

Isdiameters förändring med effekt och brinetemperatur blir större ju större isdiameter man arbetar med. Stora isdiameter ställer därför högre krav på mätnoggrannhet. För kollektorer som är avsedda att arbeta med stor isdiameter och har liten säkerhetsmarginal på förankringen bör man därför kontrollera beräkningsresultaten mot uppmätt isdiameter och på detta sätt kalibrera kontrolldiagrammet.

## 7 VARIERANDE FÖRHÅLLANDEN LÄNGS SLANGEN. EXEMPEL PÅ BERÄKNING

Om de yttre förhållandena varierar längs en kollektorslang får man en annan fördelning av värmeupptagningen jämfört med konstanta förhållanden. Även den totalt upptagna effekten påverkas. I än högre grad blir fördelningen av is längs slangen förändrad, vilket måste beaktas vid dimensionering av förankringen.

De typfall som redovisas i kap.4 är inte tillämpbara på fall med varierande yttre förhållanden. Varje sådant fall torde vara så speciellt att det inte heller är meningsfullt att göra beräkningar för typfall. Kontroll av ispåväxten, med den metod som beskrivs i kap.6, kan bara göras om man förutsätter att temperatur och ström längs slangen varierar på ett systematiskt sätt som ger en likformig fördelning av isen.

Beräkningsprogrammet SJÖKOLL kan tillämpas på fall med varierande förhållanden. Slangen indelas i delsträckor med godtycklig längd. För varje delsträcka anges nya parametrar, vilka beräkningsmässigt förutsättes vara konstanta inom delsträckan. Programmet medger maximalt sju delsträckor.

För att demonstrera programmets möjligheter skall här visas ett exempel från en stor sjövärmekollektor som ligger i en vik av Vättern. Kollektorn består av 84 PEH-slangar  $\varnothing 40/34$ , som ligger utlagda på botten i hårnålsform parallellt med varandra och ansluter till en gemensam fram- respektive returledning. Minsta djup, invid de gemensamma ledningarna, är ca 3 m och största djupet, vid slangarnas vändpunkt, är 8-10 m. Varje slang är 340 m lång. Brinevätskan är en 16% CaCl-lösning och dess totala flöde är  $5,04 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kollektorns dimensionerande effekt är 950 kW och isdiametern kan få uppgå till högst 30 cm.

Vattentemperaturen kan antas vara densamma från ytan ned till 3-5 m djup och inte understiga  $0,6^\circ\text{C}$  under ett medelår. Inom detta skikt sker en viss genomströmning. Mot större djup ökar temperaturen successivt (gäller vintertid). Under extremt kalla vintrar kan temperaturen i ytskiktet gå ned till  $0,2^\circ\text{C}$  som månadsmedelvärde, vilket uppenbarligen leder till risk för att dimensionerande isdiameter överskrides så att driften av värmepumpanläggningen måste begränsas under en period.

Tre olika exempel på upptagen effekt och isfördelning längs en slang vid olika utgående brinetemperatur visas i fig.7.1-3. Exempelen avser att visa hur vattentemperatur och strömhastighet inverkar i de mest ogynnsamma fallen. Följande parametervärden har använts för de olika delsträckorna:

<u>Delsträcka nr</u>		<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
Längd m		75	50	90	50	75
<b>Ex A</b>	Temp. °C	0,2	0,5	0,8	0,5	0,2
	Ström. cm/s	0	0	0	0	0
<b>Ex B</b>	Temp. °C	0,2	0,5	0,8	0,5	0,2
	Ström cm/s	2	0	0	0	2
<b>Ex C</b>	Temp. °C	0,3	0,7	0,9	0,7	0,3
	Ström cm/s	2	0	0	0	2

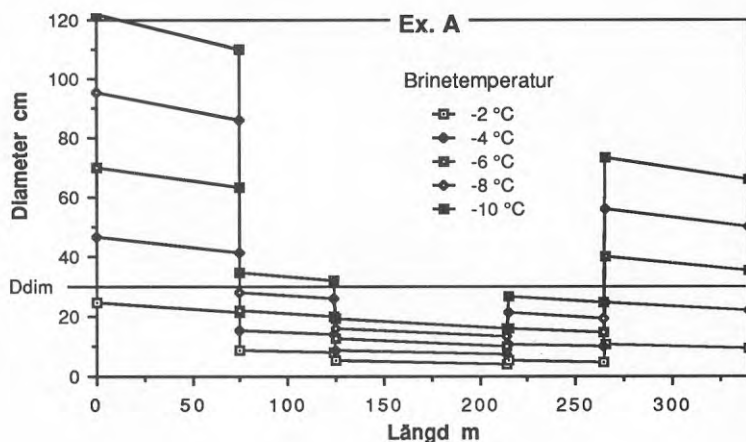
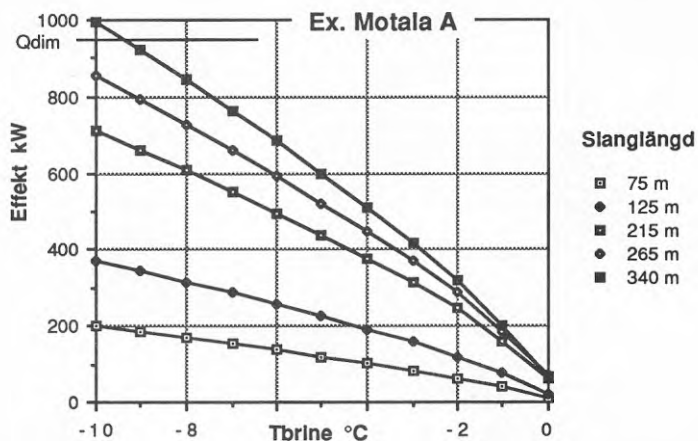
Diagrammen visar att isdiametern blir störst på den första delsträckan, för att sedan snabbt avta till ett minimum på den yttre delen av kollektorn, delsträcka 3. Denna delsträcka har också den största värmeupptagningen. Till skillnad från slangar i konstant miljö ökar åter isdiametern mot slutet av slangen. Som följd av att omgivningsparametrarna sätts konstanta inom delsträckorna får kurvan ett diskontinuerligt förlopp. En mera realistisk fördelning av ispåfrysningen fås om kurvorna utjämnas.

I det mest ogynnsamma fallet, ex.A, skulle värmeuttaget 950 kW (=33 W/m i genomsnitt) svara mot en brinetemperatur av  $-9,5^{\circ}\text{C}$  och en maximal isdiameter av 115 cm. Om isdiametern begränsas till 30 cm får utgående brinetemperaturen ej vara lägre än  $-2,5^{\circ}\text{C}$ , vilket ger en effekt av 370 kw. I det stationära driftfallet skulle således värmepumpen kunna köras med 39% av full effekt i detta fall.

Vid en ström av 2 cm/s tvärs kollektorns inom dess grunda delar, delsträcka 1 och 5, förbättras funktionen väsentligt, ex.B. Fullt effektuttag svarar här mot en brinetemperatur av något under  $-8^{\circ}\text{C}$  och en maximal isdiameter av ca 37 cm. En begränsning till 30 cm is svarar mot  $-7^{\circ}\text{C}$  brinetemperatur och en effekt av 840 kW.

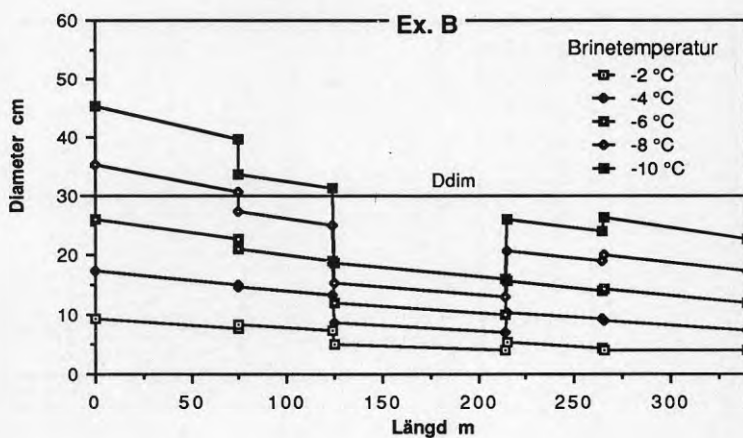
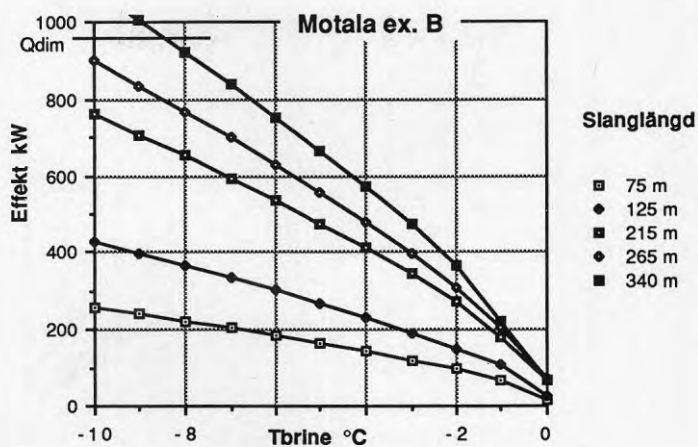
I ex. C har använts en något högre vattentemperatur tillsam-

mans med en ström av 2 cm/s. Denna parameterkombination medger fullt effektuttag. Maximal isdiameter blir då endast 20 cm.

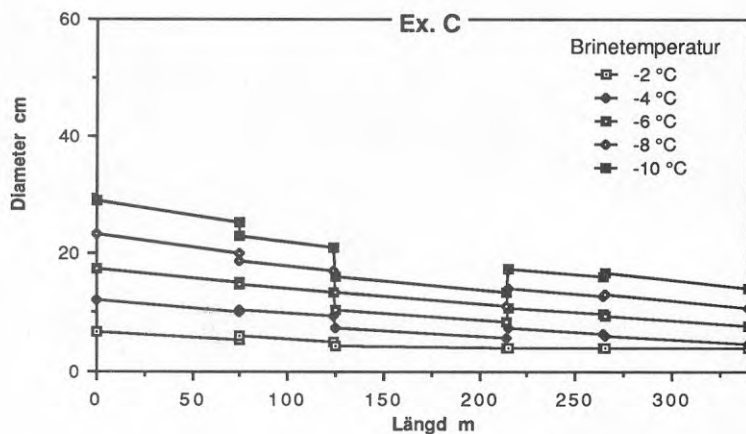
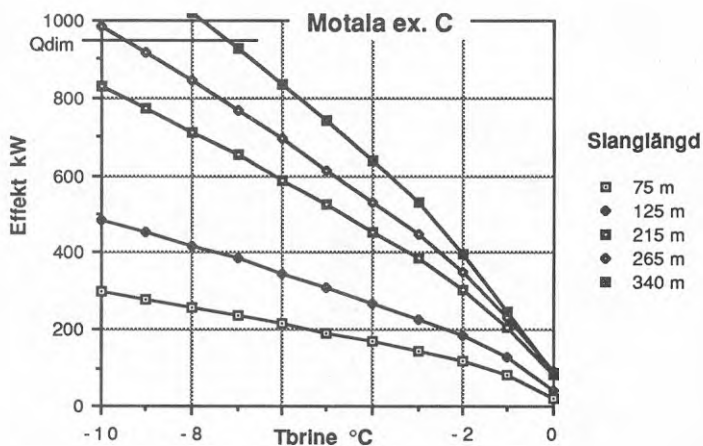


**Fig.7.1** Exempel på beräkning av upptagen effekt och isdiameter för en sjövärmekollektor med varierande förhållanden längs slangen. Använda beräkningsparametrar framgår av texten.





**Fig.7.2** Exempel på beräkning av upptagen effekt och isdiameter för en sjövärmekollektor med varierande förhållanden längs slangen. Använda beräkningsparametrar framgår av texten.



**Fig.7.3** Exempel på beräkning av upptagen effekt och isdiameter för en sjövärmekollektor med varierande förhållanden längs slangen. Använda beräkningsparametrar framgår av texten.

## 8 REFERENSER

- Bengtsson, L. (1982)  
Inverkan av värmeuttag på temperatur- och cirkulationsprocesser i istäckta sjöar. Tidskriften Vatten nr 1-1982, s.3-16
- Broman, B. (1984)  
Kartläggning av energiinnehåll i svenska sjöar vin tertid. I Davin, Nordling och Sandart "Sjöar och hav som värmekälla för värmepumpar", BFR-rapport R176:1984
- Ljung, L., Olin, C. och Tollin, J. (1986) Köldbärare i värmepumps- och värmeåtervinningsystem. BFR-rapport R11:1986
- Melinder, Å. (1985)  
Köldbärare för värmepumpstillämpningar. Studier av termodynamiska egenskaper och korrosion. BFR-rapport R114:1985
- Moberg, A. (1981)  
Mätningar av sjötemperatur vid SMHI. Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, Norrköping, HB-rapport nr. 45, 1981
- Rehn I., Sundberg, J. OCH Modin, B. (1986)  
Dimensionering av ytjordvärmekollektor. Beräkningar med simuleringsmodell. BFR-rapport R13:1986
- "Rörbok. Yttre rörledning" Utges av AB Gustavsbergs fabriker.
- Sahlberg J. (1986)  
A Hydrodynamic Model for Heat Content Calculations on Lakes and Sediments. BFR Document D19:1987
- Svensson, T. (1987)  
Temperatur och värmeomsättning i sjöar under vintern. BFR-rapport R97:1987
- Svensson, T och Sörman, L.-O. (1983a)  
Värmeupptagning med bottenförlagda slangar i stillastående vatten. Laboratieförsök. BFR-rapport R41:1983
- Svensson, T och Sörman, L.-O. (1983b)  
Värmeupptagning med bottenförlagda slangar i rinnande vatten. BFR-rapport R145:1983

## APPENDIX A

BERÄKNING AV UPPTAGEN EFFEKT OCH ISPÅFRYSNING FÖR  
SJÖVÄRMEKOLLEKTOR**A1 Bakgrund, restriktioner**

Med sjövärmekollektor avses här en värmeväxlare i form av en slang eller ett rör som läggs ut i en sjö eller ett vattendrag och som skall leverera värme till en värmepump. Kollektorslangen kan placeras fritt i vattnet, liggande på botten eller i olika grad nedsjunken i botten. Flera slangar kan parallellkopplas. Dimensionerande förhållanden inträffar vintertid då vattentemperaturen är nära fryspunkten och värmeuttaget leder till att en iscylinder fryser runt slangen, som måste förankras mot islyftkrafterna.

Analysen baseras på etablerade formler från litteratur om värmeväxling samt på försöksresultat för värmeväxlarslangar i stillastående och rinnande vatten vid förhållanden som efterliknar praktiska fall (Svensson & Sörman, 1983 a,b). Följande förenklingar eller inskränkningar görs:

- Stationära förhållanden antas råda. Den tid som åtgår för att uppnå detta behandlas i kapitel A.5.
- Värmeflödet från omgivningen betraktas som likformigt runt slangens periferi. Ispåfrysning antas vara cirkulär och oberoende av ev. infruset bottenmaterial.
- Yttre förhållanden såsom vattentemperatur, strömhastighet och slangläge relativt botten är konstanta (eller styckevis konstanta) längs slangen.

**A2 Värmeupptagning, teori**

För en ispåfrosen slang gäller att den upptagna effekten kan skrivas:

$$\text{där } q = \pi \cdot (-T_b) / \left[ \frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{1}{2\lambda_v} \ln \frac{d_s}{d_i} + \frac{1}{2\lambda_{is}} \ln \frac{d_y}{d_s} \right] \quad (1)$$

där

q är värmeflöde per m slang, W/m

$T_b$  är brinetemperaturen

$\alpha_i$  är det inre värmeövergångstalet

$\lambda_v, \lambda_{is}$  är väggmaterialets resp isens värmeledningstal

$d_i, d_s$  är slangens inner- resp ytterdiameter

$d_y$  är iscylinderns diameter

Ekv (8) utgår från att temperaturen på iscylinderns yta är  $\pm 0^\circ\text{C}$ . Obekanta är brinetemperaturen  $T_b$  och iscylinderns diameter  $d_y$ , varför ekv (1) kan förenklas till:

$$q_i = \frac{A \cdot (-T_b)}{B + \ln d_y} \quad (\text{W/m}) \quad (2)$$

där

$$A = 2\pi\lambda_{is}$$

$$B = \frac{2\lambda_{is}}{\alpha_i d_i} + \frac{\lambda_{is}}{\lambda_v} \cdot \ln \frac{d_s}{d_i} - \ln d_s$$

Parametern A är konstant ( $=14.07 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) medan B är specifik för den aktuella kollektorn.

Värmeflödet från omgivningen till iscylinderns yta kan skrivas som

$$q_y = \pi\alpha_y d_y T_a \quad (3)$$

där

$\alpha_y$  är det yttre värmeövergångstalet

$T_a$  är vattentemperaturen i höjd med slangens.

Vid stationärt tillstånd gäller att värmeflödet till isytan är lika stort som det upptagna värmeflödet, vilket ger:

$$d_y(B + \ln d_y) = \frac{A(-T_b)}{\pi\alpha_y T_a} \quad (4)$$

Ekv (4) utgör grunden för den fortsatta analysen. Ur denna kan iscylinderns diameter beräknas utgående från kända parametrar, varefter värmeflödet beräknas med ekv (1) eller (2).

Beräkningen startar från början av slangen med ett givet värde på brinetemperaturen  $T_b$ . Förändringen (ökningen) av brinetemperaturen längs slangen ges av följande uttryck:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_b}{dx} = q \quad (5)$$

där

$m$  är massflödet av brine i slangen, kg/s

$c$  är brinens värmekapacitet, J/kg · °C.

Genom insättning av ekv (2) erhålles

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_b}{dx} = \frac{A \cdot (-T_b)}{B + \ln d_y} \quad (6)$$

Med insättning av ett uttryck för  $\ln d_y$ , vilket skall härledas ur ekv (4), kan ekv (6) integreras och brinetemperaturen beräknas som funktion av längdkoordinaten  $x$ . Härur kan slutligen iscylinderns diameter  $d_y$  beräknas som funktion av  $x$  genom insättning av  $-T_b(x)$  i ekv (4).

Ovanstående beräkning gäller för en slang som är ispåfrusen längs hela sin längd. För en icke ispåfrusen slang kan värmeflödet från omgivningen till brinevätskan skrivas

$$q = \frac{\pi(T_a - T_b)}{\frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{1}{2\lambda_v} \ln \frac{d_s}{d_i} + \frac{1}{\alpha_y d_s}} \quad (7)$$

Detta uttryck kan i analogi med ekv (2) skrivas

$$q = \frac{A(T_a - T_b)}{B + \ln d_s + \frac{2\lambda_{is}}{\alpha_y d_s}} \quad (8)$$



I rinnande vatten är  $\alpha_y$  oberoende av brinetemperaturen. Även i stillastående vatten kan i allmänhet  $\alpha_y$  åsättas ett konstant värde, med hänsyn till att brinetemperaturen (riktigare slangens yttemperatur) endast förändras med någon grad längs slangens. Detta gäller dock inte i närheten av  $+4^{\circ}\text{C}$ . Med konstant värde på  $\alpha_y$  kan ekv (8) förenklas till

$$q = K(T_a - T_b) \quad (9)$$

där

$$K = \frac{A}{B} + \ln d_s + \frac{2\lambda_{is}}{\alpha_y d_s}$$

Insättning i ekv (5) ger

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{K}{mc} (T_a - T_b) \quad (10)$$

vilken har lösningen

$$T_b = T_a - (T_a - T_{b0}) \cdot e^{-\frac{K}{mc} \cdot x} \quad (11)$$

där

$T_{b0}$  är brinetemperaturen vid slangens början.

Slangen kan också vara påfrusen en sträcka i början och isfri på slutet. Gränsen mellan påfrusen och isfri slang beräknas genom att först bestämma den brinetemperatur som ges  $d_y = d_s$  ur ekv (4). Därefter beräknas den påfrusna sträckans längd,  $L_{is}$ , ur lösningen av ekv (6).

Den totala effekt som upptas av slangens bestäms av brinetemperaturens ökning från början till slutet av slangens,  $x=L$ .

$$Q = mc \cdot (T_{bL} - T_{b0}) \quad (12)$$

Brinetemperaturen vid slutet,  $T_{bL}$ , erhålles ur lösningen till ekv (6) eller ur ekv (11) med  $x=L$ .

### A3 Stillastående vatten

Värmeöverföring från vattnet till slang- eller isytan sker med egenkonvektion, vilken drivs av vattnets densitetsskillnad mellan väggen eller isytan och det fria vattnet. För en ispåfrusen slang vid vattentemperaturen  $<4^{\circ}\text{C}$  har följande approximativa uttryck härletts för det yttre värmeövergångstalet (Se Svensson & Sörman, 1983a)

$$\alpha_y = G \left[ \frac{(68.1 - 8.55 T_a) T_a}{d_y} \right]^{1/4} \quad (13)$$

Konstanten G har värdet 23.7 för en horisontell slang i fritt vatten. Vi antar att ekv (13) även ger en korrekt bild av värmeöverföringen för en bottenförlagd eller något nedsjunken slang. För dessa fall har försöksresultaten från Svensson & Sörman (1983a) simulerats, vilket redovisas i appendix 2. Bäst passning till försöksresultaten erhöles med följande G-värden:

Fri slang	G = 23.7
Slang på botten	G = 25
Nedsjunken till hjässan i sand	G = 10
Nedsjunken till 10 cm i torv	G = 4

Genom insättning ekv (4) kan nu iscyklinderns diameter  $d_y$  beräknas som funktion av  $T_b$  och  $T_a$ .

$$d_y^{3/4} (B + \ln d_y) = \frac{A(-T_b)}{G\pi T_a^{5/4} (68.1 - 8.55T_a)^{1/4}} \quad (14)$$

vilket kan förenklas till

$$d_y^{3/4} (B + \ln d_y) = C(T_a) \cdot (-T_b) \quad (15)$$

där

$$C(T_a) = A/G\pi T_a^{5/4} (68.1 - 8.55T_a)^{1/4} \quad (16)$$

Parametern  $C(T_a)$  benämnes i det följande "omgivningsparametern".

För en fri slang ( $G=23.7$ ) erhålls följande värden på  $G$  för olika  $T_a$ :

$T_a$	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0 °C
C	1.17	0.50	0.16	0.068	0.030	0.019

Ekv (15) kan nu användas för att beräkna isdiametern  $d_y$  som funktion av brinetemperaturen. Exempel på en sådan beräkning som gäller för fri slang,  $T_a=0.5^\circ\text{C}$  och  $B=4.1$ , ges i följande tabell:

$d_y$	0.04	0.06	0.08	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40 m
$T_b$	-0.50	-0.98	-1.49	-2.01	-3.34	-4.68	-7.38	-10.07 °C

Ett explicit uttryck för  $\ln d_y$  som funktion av  $T_b$  krävs för att kunna integrera ekv (6) och beräkna brinetemperaturens förändring längs slang. Följande uttryck ansätts och passas till ekv (15) i tre punkter

$$\ln d_y = F_1 + F_2[C \cdot (-T_a)]^{F_3} \quad (17)$$

Som passningspunkter används diametrarna 0.05 resp 0.2 resp 0.4 m. Anpassningen till den ursprungliga kurvan blir god för  $d_y$  upp till minst 0.6 m. Exempel på kurvanpassning ges i Figur A1.

Insättning av ekv (17) i ekv (6) och integrering ger:

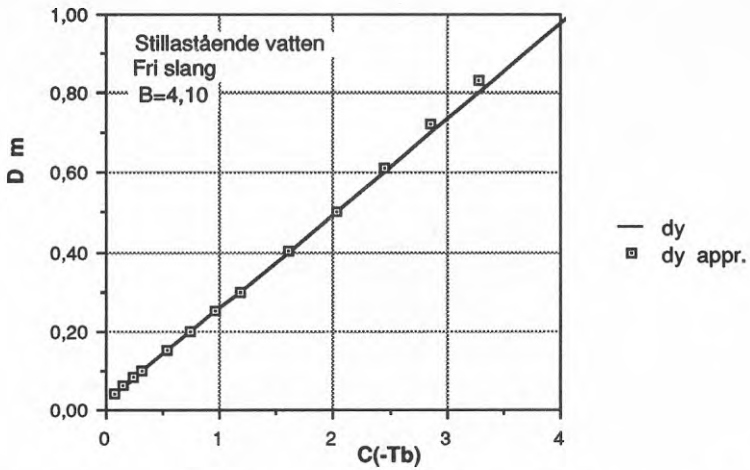
$$mc \cdot \frac{dT_b}{dx} = \frac{A(-T_b)}{B + F_1 + F_2 \cdot (C(-T_b))^{F_3}} \quad (18)$$

Efter integrering erhålles följande lösning:

$$(B+F_1) \cdot \ln\left(\frac{T_{b0}}{T_b}\right) + \frac{F_2 \cdot (C)^{F_3}}{F_3} \cdot \left[(-T_{b0})^{F_3} - (-T_b)^{F_3}\right] = \frac{A}{mc} x \quad (19)$$

Denna ekvation är analysens huvudresultat. För olika starttemperatur beräknas implicit brinetemperaturen och isdiameter (ur ekv (17)) som funktion av  $x$ . I beräkningsprogrammet beräknas  $x$  och  $d_y$  för ett antal värden på  $T_b$  utgående

från  $T_{b0}$  med ett temperaturintervall av  $0.2^{\circ}\text{C}$ . När  $x$  överskrider slanglängden  $L$  (eller delsträckelängden  $L_n$ ) interpoleras så att värden för  $x=L$  erhålles, varefter den fortsatta temperaturförändringen beräknas med ekv (11). Slutligen beräknas den upptagna effekten med ekv (12).



Figur A1

Exempel på kurvanpassning för den yttre diametern  $d_y$  som funktion av brinetemperaturen.

A4 Rinnande vatten

För en slang i rinnande vatten antas värmeöverföringen kunna beskrivas med följande generella uttryck för Nusselts tal (definition  $Nu = \alpha_y \cdot l / \lambda$ )

$$Nu = H \cdot Re_1^F \quad (20)$$

där

H och F är konstanter som beror på slangens läge relativt botten och strömriktningen. Reynolds tal definieras enligt följande:

$$Re_1 = \frac{U \cdot \pi d_y}{2\nu} \quad (21)$$

där

U är strömhastigheten i höjd med slangens eller 5–10 cm över botten  
 $\nu$  är vattnets kinematiska viskositet.

Inom intervallet  $1000 < Re_1 < 10\,000$ , vilket är realistiskt för de flesta kollektor-tillämpningar, ger handboksdata för en fri, tväranströmd slang  $H=0.791$  och  $F=0.606$ . Om slangens läge i strömriktningen uppges värmeöverföringen halveras. För en tväranströmd slang som ligger direkt på, respektive till hälften nedtryckt i en slät botten blir  $F=0.5$  och  $H=0.77$  resp  $0.25$  (Svensson & Sörman, 1983b). Man kan dock förvänta sig en mindre reduktion vid längsgående strömning i detta fall. Utgående från aktuella förhållanden väljes konstanterna H och F ur följande tabell:

Fritt i vattnet	$F = 0.606$
På botten eller nedtryckt	$F = 0.5$
	Längsström      Tvärström
Fritt i vattnet	$0.4 < H < 0.79$
På botten	$0.5 < H < 0.77$
Nedtryckt	$0.25 = H = 0.25$

Det yttre värmeöverföringstalet blir:

$$\alpha_y = \frac{2\lambda}{\pi d_y} \cdot H \cdot Re_1^F \quad (22)$$

Insättning i ekv (4) ger:

$$d_y^F (B + \ln d_y) = \frac{A \cdot (-T_b)}{T_a \cdot H \cdot 2\lambda \left(\frac{\pi U}{2\nu}\right)^F}$$

Detta uttryck kan skrivas analogt med ekv (15):

$$d_y^F (B + \ln d_y) = C'(T_a, U) \cdot (-T_b) \quad (23)$$

där omgivningsparametern för rinnande vatten får formen

$$C' = A/T_a \cdot H \cdot 2\lambda \left(\frac{\pi U}{2V}\right)^F \quad (24)$$

Omgivningsparametern beror således av vattentemperaturen, strömhastigheten och slangens läge. För en slang på botten, utsatt för i huvudsak tvärström ( $H=0.7$ ) erhålles följande värden på  $C'$  för olika  $T_a$  och  $U$ .

$T_a$	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	$^{\circ}\text{C}$
$U$	<hr/>					
0.02	2.64	1.32	0.66	0.26	0.13	
0.05	1.67	0.83	0.42	0.17	0.08	$C'$
0.10	1.18	0.59	0.30	0.11	0.06	
0.20	0.83	0.42	0.21	0.08	0.09	
	m/s					

Om man jämför den beräknade värmeöverföringen i stillastående resp rinnande vatten finner man att den påtvingade konvektionen dominerar för  $c/c' > 0.45$  vid  $d_y = 0.04$  m och  $C/C' > 0.74$  vid  $d_y = 0.3$  m. Detta innebär att formuleringen för rinnande vatten bör användas vid strömhastigheter större än 1–3 cm/s.

Den analoga uppbyggnaden av ekv (23) och ekv (15) innebär att samma beräkningsgång kan tillämpas för strömmande vatten som för stillastående vatten. Först omformas ekv (23) till ett explicit uttryck för isdiametern genom passning till ekv (17). Acceptabel noggrannhet erhålles upp till en isdiameter av ca 0.6 m. Därefter beräknas brinetemperaturen och isdiametern längs slangen och slutligen den upptagna effekten.



### A5 Istillväxt

De tidigare kapitlen har behandlat det stationära fallet då värmeflödet från omgivningen är i jämvikt med slangens värmeupptagning. För en icke ispåfrusen slang som ligger fritt i vattnet uppnås detta tillstånd snabbt, på mindre än en timme. Om vattentemperaturen sjunker så att det nya jämviktstillståndet svarar mot en viss ispåfrysning kommer det att ta en betydligt längre tid innan denna uppnås. I extremfallet att vattentemperaturen är vid fryspunkten uppnås aldrig något stationärt tillstånd. All värmeupptagning tas då genom isbildningsvärme. I andra fall sker istillväxt så länge som värmeflödet från omgivningen till iscyklernas yta är mindre än den uttagna effekten.

Slangar som sjunkit ned eller grävts ned i bottensedimenten upptar värme genom ledning från en begränsad omgivning som successivt kyls ned. Stationärt tillstånd uppnås därför inte. Dimensionering och drift görs i detta fall med beräkningsmetoder för jordvärmearläggningar, se Claesson m fl (1985), Rhen, Sundberg & Modin (1986). Slangar med liten nedsjunkning (storleksordningen högst 10 cm) upptar dock huvuddelen av värmeflödet från ovanliggande vatten och kan tillnärmelsevis uppnå stationärt tillstånd. Dessa behandlas här på samma sätt som sjövärmeslangar i vattnet och på botten.

Kännedom om påfrysningens tidsförlopp kan utnyttjas vid dimensionering av en sjövärmekollektor om man kan beräkna eller uppskatta hur lång tid under vintern som en dimensionerande temperatur uppträder. Så t ex kan temperaturen i en sjö bli mycket låg vid isläggningen om denna föregås av en kall och blåsig period. Därefter stiger temperaturen, speciellt i grunda sjöar, på grund av värme från sedimenten och solinstrålning (se Svensson, 1987). Man kanske kan uppskatta att en lägsta temperatur av  $0.3^{\circ}\text{C}$  uppträder under en månad för att därefter ha stigit till  $0.6^{\circ}\text{C}$ . Dimensioneringen kan då baseras på det sämsta av fallen stationär ispåfrysning vid  $T_a=0.6^{\circ}\text{C}$  eller ispåfrysning efter en månad vid  $0.3^{\circ}\text{C}$ .

Sällan eller aldrig är temperaturstatistiken för en sjö så detaljerad att varaktighetskurvor för sjötemperaturen kan upprättas som grund för dimensionering. Ett lämpligt angreppssätt blir då att utgående från tillgängliga uppgifter välja en rimlig dimensionerande vattentemperatur för det stationära fallet och därefter kontrollera risken (och kostnaden) för driftinskränkningar vid perioder med lägre temperatur. Även ur driftssynpunkt är insikt i påfrysningsförloppet värdefullt. Man kan t ex konstatera att vattentemperaturen vid ett tillfälle sjunkit till ett värde under den dimensionerande och uppskattar att detta tillstånd varar

högst en månad. Med ledning härav vill man kunna beräkna hur stor medeleffekt som kan tas ut ur kollektorn så att dimensionerande istjocklek (eller brinetemperatur) uppnås vid slutet av perioden. En ekonomisk strategi blir då att i första hand ta ut den tillgängliga medeleffekten genom körning nattetid på billig eltaxa.

I det följande redovisas fyra olika beräkningar av påfrysningens tidsutveckling, vilka kan utnyttjas för bedömningar enligt ovan. Dels behandlas ett fall med konstant brinetemperatur, dels ett med konstant uttagen effekt och slutligen motsvarande fall utan yttre värmeförsel (vattentemperaturen  $=0^{\circ}\text{C}$ ).

#### A5.1 Istillväxt vid konstant effektuttag

Istillväxt (och avsmältning) orsakas av skillnaden mellan den energi som tas upp av brineflödet och den energi som tillförs från omgivningen till iscylinderns yta. Genom isbildning frigörs den energi som behövs. Energibalansen per m slang kan tecknas:

$$q_{is} = q_i - q_y \quad (25)$$

där

$q_{is}$  är den effekt som frigörs vid frysning

$q_i$  är den upptagna effekten (=energiflödet från isytan till köldbäraren) enligt ekv (2)

$q_y$  är den från omgivningen tillförs iscylinderns yta, ekv (3)

Frysenergin bidrar till att öka iscylinderns diameter enligt följande:

$$q_{is} = l \cdot \rho_{is} \cdot \pi \cdot d_y \frac{1}{2} \frac{dd_y}{dt} \quad (26)$$

där

$l$  är smältentalpin  $= 333 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$

$\rho_{is}$  är isens densitet  $= 917 \text{ kg/m}^3$

Vid ett konstant värmeuttag är  $q_{is}=Q$  en konstant. Av ekv (2) framgår att brinetemperaturen successivt sjunker i takt med att isdiametern ökar. För att göra analysen mera generell uttryckes värmeuttaget  $Q$  i form av motsvarande stationära isdiameter  $d_{y \text{ stat}}$  vid givna yttre förhållanden, vilka uttryckes av omgivningskoefficienten  $C$  eller  $C'$ . Genom att kombinera ekv (3) och (23) erhålles:

$$Q = \frac{A}{C} \cdot d_{y \text{ stat}}^F \quad (27)$$

Denna ekvation är giltig även för stillastående vatten, med  $C'$  ersatt av  $C$  och  $F=0.75$ . I det följande används beteckningen  $C$  synonymt för båda fallen.

Insättning i ekv (25) ger nu:

$$d_y \cdot \frac{dd_y}{dt} = \frac{2A}{\rho_{is} \pi} \cdot \frac{1}{C} \cdot \left[ d_{y \text{ stat}}^F - d_y^F \right] \quad (28)$$

Genom att införa den relativa ispåväxten, som definieras enligt följande

$$r = d_y / d_{y \text{ stat}} \quad (29)$$

kan ekv (28) omformas till följande integraluttryck:

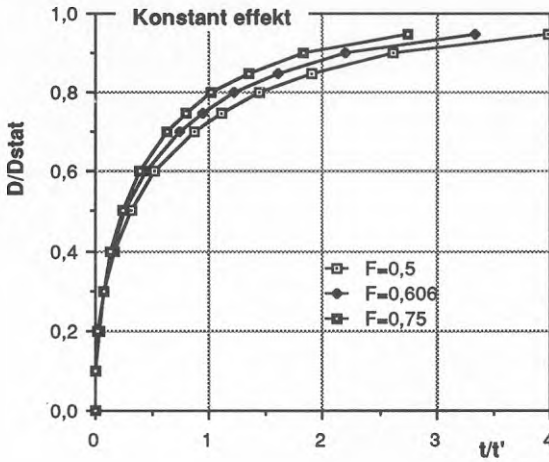
$$\int_0^r \frac{r}{1-r^F} dr = \frac{A'}{C \cdot d_{y \text{ stat}}^{2-F}} \cdot t \quad (30)$$

där

$A' = 2A / \rho_{is} \pi (= 2.93 \cdot 10^{-8})$  är en konstant som uttrycker isens termiska egenskaper.

För en given anläggning ( $F = \text{konstant}$ ) kan vi således få en generell kurva över istillväxtens tidsberoende, vilken enbart styrs av parametern  $A'/C \cdot d_{y \text{ stat}}^{2-F}$ .

Lösningen av ekv (30) för de tre aktuella värdena på konstanten  $F$  ges i diagrammet, figur A.2.



Figur A2 Istillväxten på en kollektorslang vid konstant effektuttag. Diagrammet ger den relativa isdiametern som funktion av ett dimensionslöst tidsuttryck.

Av diagrammet kan utläsas att ca 80% av den slutliga isdiametern uppnås då tidsuttrycket

$$t / \frac{C d_y^{2-F} \text{stat}}{A'} = 1$$

En lämplig tidsskala,  $t'$ , för förloppet kan därför definieras av

$$t' = \frac{C d_y^{2-F} \text{stat}}{A'} \quad (31)$$

Som exempel kan tas en slang på botten i stillastående vatten, med ett effektuttag av 30 W/m och vattentemperaturen  $0.5^\circ\text{C}$ . För denna gäller att  $F=0.75$ . Ekv (16) ger  $C=0.16$ . Den stationära isdiametern  $d_{y \text{ stat}}$  kan beräknas ur ekv (27) till 0.24 m. Insättning i ekv (31) ger tidsskalan  $t'=10.6$  dygn.

### A5.2 Istillväxt vid konstant brinetemperatur

Vid konstant brinetemperatur kan energibalansen vid isytan från ekv (2), (3) och (25) skrivas:

$$q_{is} = \frac{A(-T_b)}{B + \ln d_y} - d_y \pi \alpha_y T_a \quad (32)$$

Parametern  $\pi \alpha_y T_a$  i högerledet kan uttryckas som funktion av förhållandena vid stationärt tillstånd, ekv (4), vilken ger:

$$\pi \alpha_y T_a = \frac{A(-T_b)}{d_{ystat} (B + \ln d_{ystat})} \quad (33)$$

Insättning av ekv (33) och uttrycket för istillväxt, ekv (26), i ekv (32) ger:

$$l \cdot \rho_{is} \pi d_y \frac{1}{2} \frac{dd_y}{dt} = \frac{A(-T_b)}{B + \ln d_y} - d_y \frac{A(-T_b)}{d_{ystat} (B + \ln d_{ystat})}$$

Detta uttryck omformas och förenklas med införande av den tidigare definierade relativa påfrysningen  $r = d_y/d_{ystat}$  och följande konstanter.

$$A' = 2A/l\rho_{is} \cdot \pi$$

$$B' = B + \ln d_{ystat}$$

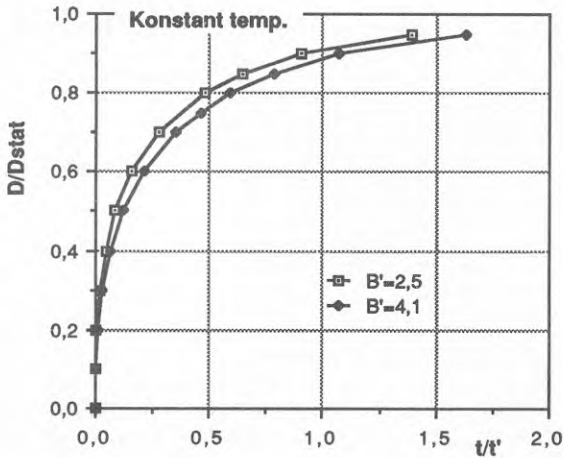
Den resulterande ekvationen kan integreras enligt följande:

$$\int_0^r \frac{r}{B' + \ln r - r} dr = \int_0^t \frac{A'(-T_b)}{B' d_{ystat}^2} \cdot dt$$

Men enligt ekv (23) (eller (15)) gäller att  $-T_b/B' = d_{ystat}^F/C$ , vilket insatt ger:

$$\int_0^r \frac{r dr}{B' + \ln r - r} = \frac{A'}{C d_{ystat}^{2-F}} \cdot t \quad (35)$$

Den dimensionslösa tidsparametern i högerledet är densamma som för fallet med konstant effektuttag, ekv (30). I fallet ovan styrs dock förloppet även av parametern  $B' (=B + \ln d_{y,stat})$ . Lösningen av ekv (35) för några olika värden på  $B'$  ges i figur A.3.



Figur A3 Istillväxten på en kollektorslang vid konstant brinetemperatur. Diagrammet ger den relativa isdiametern som funktion av ett dimensionslöst tidsuttryck för olika värden på  $B' (=B + \ln d_{y,stat})$ .

Diagrammet visar att parametern  $B'$  spelar en underordnad roll för tidsutvecklingen inom det intervall som är realistiskt för en  $\phi 40$  PEL-slang. Kurvorna över istillväxten har ungefär samma form som motsvarande vid konstant effektuttag. Tidsförloppet är emellertid snabbare. Värdet  $r=0,8$  (80% av slutlig isdiameter) uppnås då den dimensionslösa tiden  $t/t'$  har värdet 0,5, vilket är hälften av motsvarande värde vid konstant effektuttag. Förloppets tidsskala kan i fallet med konstant brinetemperatur sättas till  $0,5A' \cdot d_{y,stat}^{2-F} / C$ .

### A5.3 Istillväxt i nollgradigt vatten

I nollgradigt vatten sker ingen värmeöverföring från vattnet till kollektorslangen. Hela värmeuttaget tillgodoses genom isbildning. Stationärt tillstånd kan således ej uppnås.



Istillväxten beräknas, liksom tidigare, för fallen med konstant effektuttag resp konstant brinetemperatur. I det förra fallet gäller:

$$q_{is} = q_0 \quad (38)$$

där

$q_0$  är ett konstant effektuttag, W/m.

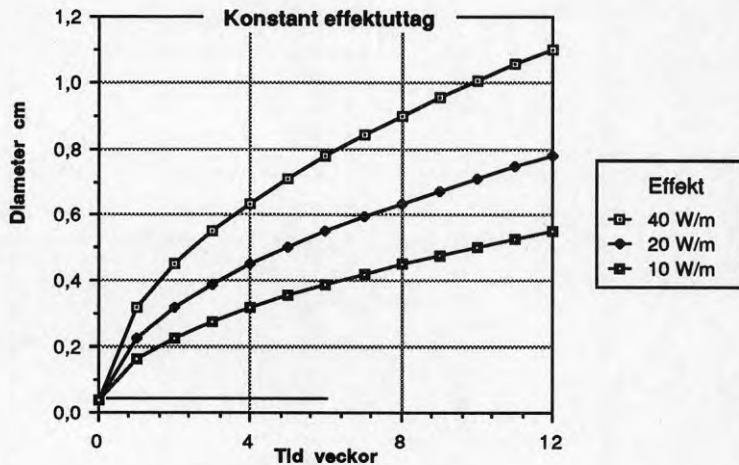
Insättning av  $q_{is}$  enligt ekv (26) och integrering ger följande lösning:

$$d_y^2 = d_s^2 + \frac{4q_0}{\pi l \rho_{is}} \cdot t \quad (37)$$

Kurvor över istillväxten som funktion av tiden för några olika värden på värmeuttaget ges i figur A4. Isens lyftkraft, vilken är proportionell mot dess volym, tillväxer linjärt med tiden enligt följande:

$$\text{Lyftkraft (kg/m)} = \frac{\pi}{4}(d_y^2 - d_s^2)(\rho - \rho_{is}) = \frac{q_0 t}{l} \cdot \frac{\rho - \rho_{is}}{\rho_{is}} \quad (38)$$

Som exempel kan tas ett värmeuttag av 20 W/m, vilket ger en ökning av islyftkraften per meter slang med 3.3 kg per vecka.



Figur A4

Påfrysning på  $\phi 40$  mm kollektorslang vid vattentemperaturen  $\pm 0^\circ\text{C}$  och konstant effektuttag.

Om värmeuttag görs vid konstant brinetemperatur beräknas effektupptagningen med ekv (2). Jämvikt mellan frysvärmet  $q_{is}$  och den upptagna effekten,  $q_b$ , ger:

$$\pi \rho_{is} \cdot d_y \frac{1}{2} \frac{dd_y}{dt} = \frac{A(-T_b)}{B + \ln d_y}$$

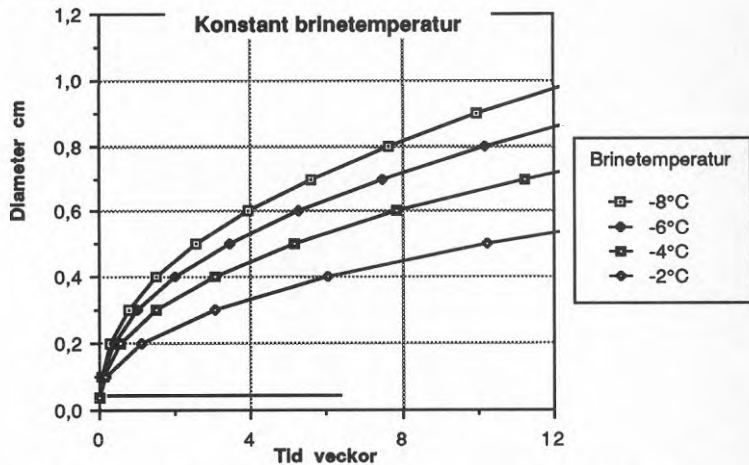
Efter separation av variabler och integrering erhålles:

$$\int_{d_s}^{d_y} d_y (B + \ln d_y) dd_y = \frac{2}{\pi \rho_{is}} \cdot (-T_b) \cdot \int_0^t dt$$

vilken har lösningen

$$d_y^2 [(B-0.5) + \ln d_y] = d_s^2 [(B-0.5) + \ln d_s] + 2A'(-T_b) \cdot t \quad (39)$$

Den första termen i högerledet kan i allmänhet försummas. Den motsvarar den tid det tar att frysa en volym motsvarande slangens tvärsnitt, vilket endast tar någon eller några få timmar. Påfrysningens tidsförlopp bestäms i detta fall dels av brinetemperaturen, dels av parametern B (se ekv 2), vilken är specifik för den valda kollektorslangen och dess brineflöde. Ett rimligt värde på B för en standard PEL-slang  $\phi 40$  mm är omkring 4.1. Istillväxten för detta fall visas i figur A.5.



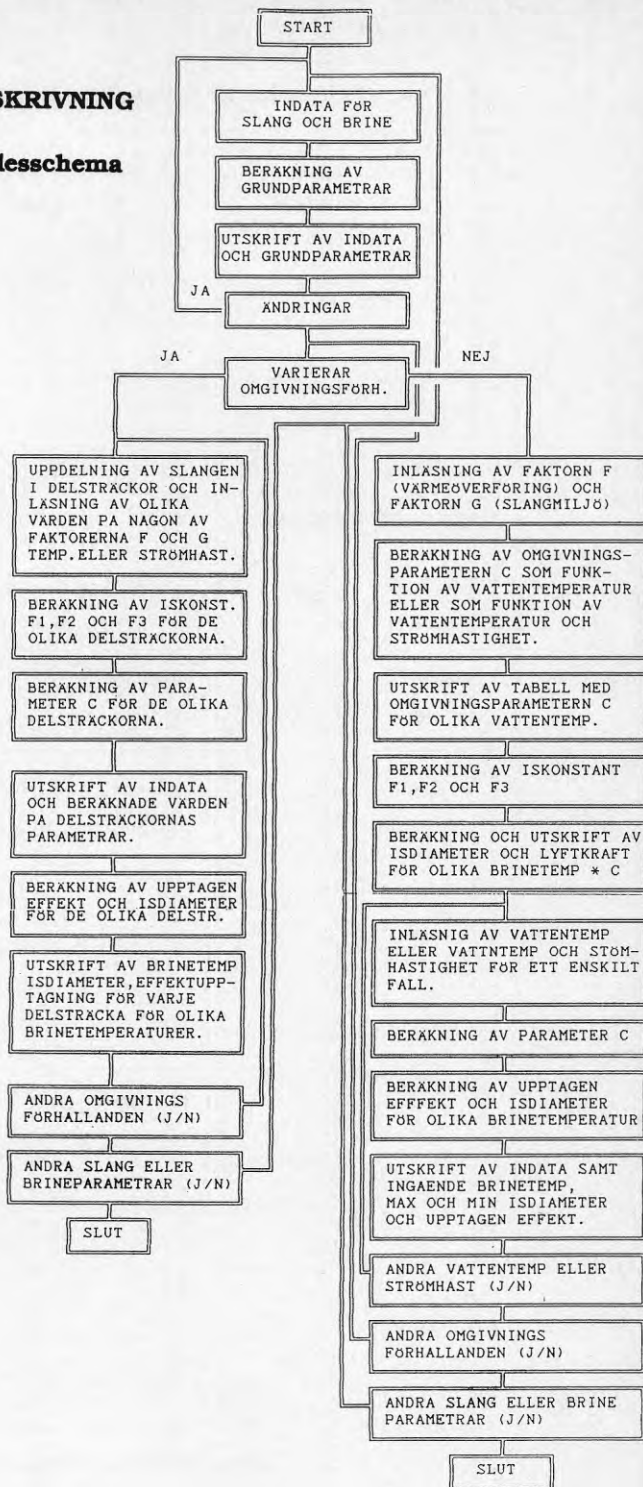
Figur A5

Påfrysning på en kollektorslang med  $B=4.1$  vid  $\pm 0^\circ\text{C}$  vattentemperatur och konstant brinetemperatur.

## Appendix B

## PROGRAMBESKRIVNING

## B1 Flödesschema



## B2 Parameterlista

## PARAMETERLISTA - SJÖKOLL.EXE

BETECKN.	FÖRKLARING	ENHET
L%	Slanglängd	m
N%	Antal slangar	
A\$	Kollektors beteckning	
B\$	Slangtyp	
C\$	Typ av brinevätska	
E\$ F\$ G\$	Svar	
H\$ I\$ J\$	Svar	
K\$	Svar	
B	Kollektorparameter (värmemotstånd)	
C	Omgivningsparameter	
C(1-8)	Omgivningsparameter för olika delsträckor	
D	Minimidiameter hos slang och iscylinder	m
D1	Innerdiameter hos slangen	m
D2	Ytterdiameter hos slangen	m
D3	Maxdiameter hos slangen och iscylinder	m
D5-7	Passningspunkter för kurvanpassning	
E1-3	Passningspunkter för kurvanpassning	
F	Konstant för olika typ av värmeöverföring	
F1-3	Approximeringskonstanter för isdiametern	
F(4-10)	Konstant F för olika delsträckor	
F(11-38)	Approx.konst för isdiameter på olika delst.	
G	Slangmiljöfaktor	
G1	Värmeledningstal slangmaterialet	W/mK
G2	Brinevätskans densitet	kg/m <sup>3</sup>
G3	Brinevätskans viskositet	m <sup>2</sup> /s
G4	Brinevätskans värmeledningstal	W/mK
G5	Brinevätskans värmekapacitet	J/kgK
G6	Prandtl's tal	
G7	Nusselts tal	
G8	Inre värmeövergångstal	
G9	Slangmaterialets densitet	kg/m <sup>3</sup>
G(11-18)	Slangmiljöfaktorer för olika delsträckor	
I	Räknare	
K	Lyftkraft hos slang och brinevätska	kg/m
K1	Hjälpparameter vid isfri slang	
KL	Lyftkraften hos den ispåfrusna slangen	kg/m
L1	Avståndet till isfri slang	m
L(2-10)	Delsträckornas längd	m
N1	Antalet delsträckor	
P1	Upptagen medeleffekt av en slang	W/m
P2	Totalt upptagen effekt av kollektorn	kW
P(1-9)	Upptagen medeleffekt på olika delsträckor	W/m
PT	Totalt upptagen effekt av kollektorn	kW
Q	Totalt brineflöde	m <sup>3</sup> /s
Q1	Brineflöde per slang	m <sup>3</sup> /s
R	Reynolds tal	
S	Utgående brinetemperatur till kollektorn	°C
T	Passningstemp för isfrontens läge	°C
T1	Omgivningstemperatur vid slangen	°C
T2	Vattentemperaturen	°C
T(3-10)	Vattentemperaturen vid olika delsträckor	°C
U	Ingående brinetemp på olika delsträckor	°C
U1	Utgående brinetemp på olika delsträckor	°C
U2	Strömhastigheten hos vattnet	m/s
U(3-10)	Strömhastigheten på olika delsträckor	m/s
V	Strömhastigheten hos brinevätskan	m/s
X	Hjälpvariabel	
Y	Hjälpvariabel	
Z	Hjälpvariabel	

## B3 Programkod

```

10 REM ***** SJÖKOLL *****
20 REM *
30 REM * Ett program för beräkning av ispåfrysning på och effekt-
40 REM * upptagning från kollektorer i rinnande och stilla vatten.
50 REM *
60 REM * Skapat av Torbjörn Svensson och Lars-Ove Sörman
70 REM * Inst. för vattenbyggnad
80 REM * Chalmers tekniska högskola
90 REM * 412 96 Göteborg
100 REM *
110 REM *
120 REM * Version 1.2 Uppdaterad 88-02
130 REM *****
135 REM
140 DIM G(20),F(40),T(15),U(15),P(15)
150 CLS
160 PRINT "***** Beräkning av ispåfrusen kollektor *****"
170 LPRINT "***** Beräkning av ispåfrusen kollektor *****"
180 LPRINT
190 INPUT "Var är kollektorn belägen ";A$
200 PRINT " Inläsning av data för kollektorn"
210 ON ERROR GOTO 200
220 PRINT
230 INPUT " Slanglängd m ";L%
240 INPUT " Antal slangar ";N%
250 INPUT " Slangmaterial ";B$
260 INPUT " Densitet kg/m3";G9
270 INPUT " Värmeledningstal W/mK";G1
280 INPUT " Innerdiameter -m";D1
290 INPUT " Ytterdiameter m";D2
300 PRINT
310 INPUT " Brinevätska ";C$
320 INPUT " Densitet kg/m3";G2
330 INPUT " Viskositet m2/s";G3
340 INPUT " Värmeledningstal W/mK";G4
350 INPUT " Värmekapacitet J/kgK";G5
360 PRINT
370 INPUT " Totalt flöde m3/S";Q
380 PRINT
390 LET Q1=Q/N%
400 LET PI=3.14159265#
410 LET V=Q1*4/(PI*D1^2)
420 ON ERROR GOTO 200
430 PRINT " Strömhastighet ";V; "m/s"
440 LET R=V*D1/G3
450 PRINT " Reynolds tal ";R
460 LET G6=G3*G2*G5/G4
470 PRINT " Prandtl's tal ";G6
480 LET G7=.116*G6^.3333*(R^.6667-125)
490 PRINT " Nusselts tal ";G7
500 LET G8=G7*G4/D1
510 PRINT " Inre värmeövergångstal";G8
520 PRINT
530 REM ===== "Beräkning av kollektorparametern B =====
540 LET B=4.48/(G8*D1)+2.24/G1*LOG(D2/D1)-LOG(D2)
550 PRINT " Parametern B ";B
560 PRINT
570 PRINT "Vill du ändra något inläst värde ??? (J/N)";E$
580 INPUT E$
590 IF E$="J" OR E$="j" GOTO 200
600 LPRINT A$
610 LPRINT " Slanglängd m";L%
620 LPRINT " Antal slangar ";N%
630 LPRINT " Slangmaterial ";B$

```

```

640 LPRINT "                               Densitet           kg/m3";G9
650 LPRINT "                               Värmeledningstal  W/mK";G1
660 LPRINT "                               Innerdiameter      m";D1
670 LPRINT "                               Ytterdiameter      m";D2
680 LPRINT "
690 LPRINT "                               Brinevätska           ";C#
700 LPRINT "                               Densitet           kg/m3";G2
710 LPRINT "                               Viskositet          m2/s";G3
720 LPRINT "                               Värmeledningstal  W/mK";G4
730 LPRINT "                               Värmekapacitet     J/kgK";G5
740 LPRINT "
750 LPRINT "                               Totalt flöde         m3/s";Q
760 LPRINT "
770 LPRINT " Strömhastighet ";V;" m/s"
780 LPRINT " Reynolds tal    ";R
790 LPRINT " Prandtl's tal   ";G6
800 LPRINT " Nussels tal      ";G7
810 LPRINT " Inre värmeövergångstal";G8
820 LPRINT " Parametern B    ";B
830 ON ERROR GOTO 200
840 PRINT
850 PRINT " Är kollektorn utsatt för varierande omgivningsförhållanden"
860 PRINT " så att den måste uppdelas i flera delsträckor J/N "
870 INPUT ;K#
880 IF K#="J" OR K#="j" THEN GOTO 3400
890 REM ===== Beräkning av yttre värmeöverföring , coeff C =====
900 ON ERROR GOTO 890
910 GOSUB 1730
920 REM ===== Beräkna algoritm för isdiameter i subrutin =====
930 ON ERROR GOTO 930
940 GOSUB 2850
950 REM ===== Här startar beräkning för varje enskilt fall =====
960 CLS
970 LPRINT A#
980 IF F=.75 THEN GOTO 1110
990 REM ===== Gäller för stilla vatten =====
1000 PRINT "***** Rinnande vatten *****"
1010 LPRINT "***** Rinnande vatten *****"
1020 INPUT "Strömhastighet = ";U2
1030 IF U2>2 GOTO 1020
1040 IF U2<0 GOTO 1020
1050 INPUT "Vattentemperatur = ";T2
1060 IF T2<0 GOTO 1050
1070 IF T2>4 GOTO 1050
1080 C=INT(1000*12.56/(924000!^F*G*T2*U2^F)+.5)/1000
1090 LPRINT "Temperatur = ";T2;" Strömhastighet = ";U2;"Omgivningsparameter C="
C
1100 GOTO 1170
1110 PRINT "***** Stillastående vatten *****"
1120 LPRINT "***** Stillastående vatten *****"
1130 INPUT "Vattentemperatur = ";T2
1140 C=INT(1000*4.4786/(G*T2^1.25*(68.1-8.55*T2)^.25)+.5)/1000
1150 LPRINT "Temperatur = ";T2;" Omgivningsparameter C =";C
1160 LPRINT
1170 REM ===== Utskrift av tabellhuvud =====
1180 PRINT TAB(3);"T-ut";TAB(15);"T-in";TAB(27);"D-max";TAB(39);"D-min";TAB(50)
"P-medel";TAB(62);"P-total"
1190 PRINT TAB(2);"grad-C";TAB(14);"grad-C";TAB(29);"m";TAB(41);"m";TAB(52);"W/
";TAB(64);"kW"
1200 LPRINT TAB(3);"T-ut";TAB(15);"T-in";TAB(27);"D-max";TAB(39);"D-min";TAB(50)
"P-medel";TAB(62);"P-total"
1210 LPRINT TAB(2);"grad-C";TAB(14);"grad-C";TAB(29);"m";TAB(41);"m";TAB(50);"W
m";TAB(62);"kW"
1220 REM ===== Loop för olika starttemperaturer =====
1230 FOR S=0 TO -10 STEP -1
1240 REM ===== Beräkna temperatur och läge av isfronten =====
1250 T=-((LOG(D2)-F1)/F2)^(1/F3)/C
1260 IF T>S THEN GOTO 1300
1270 REM ===== Is finns i början på slangen =====
1280 LET T=S :LET L1=0 :LET D3=D2

```



```

1290 GOTO 1340
1300 L1=((-S)^F3-(-T)^F3)*C^F3*F2/F3+(B+F1)*LOG(S/T))*Q1*G2*G5/14.07
1310 LET D3=EXP(F1+F2*(C*(-S))^F3)
1320 IF L1>L% THEN GOTO 1380
1330 REM ===== Is finns längs hela slangen =====
1340 LET K1=14.07/(B+LOG(D2)+T2*C/D2^F)
1350 LET U=T2-(T2-T)*EXP(-K1*(L%-L1)/(Q1*G2*G5))
1360 LET D=D2
1370 GOTO 1500
1380 LET T=S
1390 REM =====
1400 REM ===== Aterhoppadress =====
1410 LET Z=X
1420 X=((-S)^F3-(-T)^F3)*C^F3*F2/F3+(B+F1)*LOG(S/T))*Q1*G2*G5/14.07
1430 LET T=T+.2
1440 IF X<L% THEN 1400
1450 REM ===== Beräkning av upptagen effekt =====
1460 REM ===== U betecknar interpolerad temperatur vid slangens ände =====
1470 REM =====
1480 LET U=T-.4+.2*(L%-Z)/(X-Z)
1490 LET D=EXP(F1+F2*(C*(-U))^F3)
1500 REM ===== Hoppadress vid isfri slang =====
1510 REM ===== Beräkning av medeleffekten =====
1520 LET P1=Q1*G2*G5*(U-S)/L%
1530 REM =====
1540 REM ===== Beräkning av totaleffekten =====
1550 LET P2=Q1*G2*G5*(U-S)*N%/1000
1560 REM =====
1570 REM =====Utskrift av tabellvärden =====
1580 PRINT USING "###.### " ;S,U,D3,D,P1,P2
1590 LPRINT USING "###.### " ;S,U,D3,D,P1,P2
1600 NEXT S
1610 PRINT "Skall flera fall beräknas ? (J/N) "
1620 INPUT H$
1630 IF H$="J" OR H$="j" THEN 950
1640 PRINT "Vill du räkna på andra omgivningsförhållanden (J/N) "
1650 INPUT I$
1660 IF I$="J" OR I$="j" THEN 850
1670 PRINT "Vill du räkna på andra slang- eller brineparametrar (J/N)"
1680 INPUT J$
1690 IF J$="J" OR J$="j" THEN 200
1700 PRINT "***** Programkörningen avslutad *****"
1710 END
1720 REM ===== Programmet slut =====
1730 REM =====
1740 REM ===== Subrutin för beräkning av yttre värmeöverföring =====
1750 CLS
1760 PRINT "***** Bestämning av yttre värmeöverföring *****"
1770 PRINT
1780 PRINT "***** Hur är kollektorn förlagd ? *****"
1790 PRINT
1800 PRINT "Stillastående vatten          sätt F=0.750 "
1810 PRINT "Fritt i rinnande vatten          sätt F=0.606 "
1820 PRINT "På botten i rinnande vatten      sätt F=0.500 "
1830 PRINT
1840 INPUT " Ange värdet på konstanten F ";F
1850 IF F=.75 THEN 1890
1860 IF F=.606 THEN 1890
1870 IF F=.5 THEN 1890
1880 GOTO 1840
1890 PRINT
1900 PRINT
1910 IF F=.75 THEN GOTO 2320
1920 PRINT "***** Slang förlagd i rinnande vatten *****"
1930 PRINT "***** Nusselts tal = G * (Reynolds tal) ^";F "*****"
1940 IF F<.6 THEN 1970
1950 PRINT "          Fri slang          0.4 < G < 0.791 "
1960 GOTO 2000
1970 PRINT "          Slang på botten    0.5 < G < 0.77 "
1980 PRINT "          Nerbäddad slang    G = 0.25 "

```

```

1990 PRINT
2000 INPUT "Ange värde på konstanten G ";G
2010 IF G<.2 GOTO 2000
2020 IF G>.8 GOTO 2000
2030 REM =====
2040 REM ===== Formel för beräkning av omgivningsparametern C =====
2050 REM ===== T1 är omgivningstemperaturen =====
2060 REM ===== U1 är stömhastigheten =====
2070 DEF FNC(T1,U1)=INT(1000*12.56/(924000!^F*G*T1*U1^F)+.5)/1000
2080 REM ===== Tabellutskrift av omgivningparametern C =====
2090 PRINT
2100 LPRINT
2110 LPRINT "***** Kollektor i rinnande vatten i ";A$ "*****"
2120 LPRINT "F = ";F,"G = ";G
2130 LPRINT
2140 LPRINT "Omgivningsparametern C "
2150 PRINT
2160 PRINT "Omgivningsparametern C "
2170 PRINT
2180 PRINT TAB(5);"T";TAB(12);"U=";TAB(15);"0.05";TAB(26);"0.1";TAB(38);"0.2";T
B(50);"0.4";TAB(62);"0.8 m/s"
2190 LPRINT
2200 LPRINT TAB(2);"T";TAB(10);"U=";TAB(15);"0.05";TAB(26);"0.1";TAB(38);"0.2";
AB(50);"0.4";TAB(62);"0.8 m/s"
2210 PRINT "-----"
2220 LPRINT "-----"
2230 LET T1=.025
2240 WHILE T1<2
2250 LPRINT USING "###.### " ;T1,FNC(T1,.05),FNC(T1,.1),FNC(T1,.2),FNC(T1,.5)
FNC(T1,1)
2260 PRINT USING "###.### " ;T1,FNC(T1,.05),FNC(T1,.1),FNC(T1,.2),FNC(T1,.5)
FNC(T1,1)
2270 LET T1=T1*2
2280 WEND
2290 INPUT "När du läst färdigt tryck på J och ge return";K$
2300 IF K$="J" OR K$="j" THEN 2310 ELSE 2290
2310 RETURN
2320 REM ==== Beräkning av yttre värmeöverföring i stilla vatten ====
2330 REM ==== Alfa Y = G * ((68.1-B.55*T1) * T1/D) ^ 0.25 =====
2340 PRINT "***** Slang förlagd i stillastående vatten ***** "
2350 PRINT
2360 PRINT " Fri slang G = 23.7 "
2370 PRINT " Slang på botten G =25 "
2380 PRINT " Nerbäddad slang G =10 "
2390 PRINT " Nedsjunken slang G =4 "
2400 PRINT
2410 INPUT "Ange värdet på konstanten G ";G
2420 IF G=23.7 GOTO 2470
2430 IF G=25 GOTO 2470
2440 IF G=10 GOTO 2470
2450 IF G=4 GOTO 2470
2460 GOTO 2410
2470 REM =====
2480 REM ===== Formel för beräkning av omgivningskoefficienten C =====
2490 REM ===== T1 är omgivningstemperaturen =====
2500 DEF FND(T1)=INT(1000*4.4786/(G*T1^1.25*(68.1-B.55*T1)^.25)+.5)/1000
2510 REM =====
2520 REM ===== Tabellutskrift av omgivningsparametern C =====
2530 PRINT
2540 PRINT " ***** Kollektor i stillastående vatten i ";A$ " *****"
2550 LPRINT
2560 LPRINT " ***** Kollektor i stillastående vatten i ";A$ " *****"
2570 PRINT "F = ";F,"G = ";G
2580 LPRINT "F = ";F,"G = ";G
2590 LPRINT
2600 LPRINT " Omgivningsparametern C "
2610 PRINT
2620 PRINT " Omgivningsparametern C "
2630 LPRINT
2640 LPRINT " T"," C"

```

```

2650 PRINT " T", " C"
2660 PRINT "-----"
2670 LPRINT"-----"
2680 LET T1=.025
2690 WHILE T1<.5
2700 PRINT USING "###.###" ";T1,FND(T1)
2710 LPRINT USING "###.###" ";T1,FND(T1)
2720 LET T1=T1*2
2730 WEND
2740 FOR T1=.6 TO 1 STEP .2
2750 PRINT USING "###.###" ";T1,FND(T1)
2760 LPRINT USING "###.###" ";T1,FND(T1)
2770 NEXT T1
2780 FOR T1=1.5 TO 4 STEP .5
2790 PRINT USING "###.###" ";T1,FND(T1)
2800 LPRINT USING "###.###" ";T1,FND(T1)
2810 NEXT T1
2820 INPUT "När du läst färdigt tryck på J och ge return";F#
2830 IF F#="J" OR F#="j" THEN 2840 ELSE 2820
2840 RETURN
2850 REM=====
2860 REM ===== Subrutin för approximativ beräkning av isdiameter =====
2870 REM '===== kring en påfrusen kollektorslang =====
2880 REM ===== D5-7 och E1-3 är passningspunkter för kurvanpassning =====
2890 REM ===== av  $\ln(D)=f(C*(-T))$  =====
2900 REM =====
2910 CLS
2920 D5=LOG(.05)
2930 D6=LOG(.2)
2940 D7=LOG(.4)
2950 E1=.05^F*(B+D5)
2960 E2=.2^F*(B+D6)
2970 E3=.4^F*(B+D7)
2980 Y=(D7-D5)/(D6-D5)
2990 REM =====
3000 REM =====  $\ln(D)$  approximeras av funktionen  $F1+F2*(C*(-T))^F3$  =====
3010 REM ===== Först passningsberäknas konstanten F3 =====
3020 REM =====
3030 F3=.1
3040 F3=F3+.02
3050 X=(E3^F3-E1^F3)/(E2^F3-E1^F3)
3060 IF X<Y THEN 3040
3070 F3=F3-.02
3080 Z=(E3^F3-E1^F3)/(E2^F3-E1^F3)
3090 F3=F3+.02*(Y-Z)/(X-Z)
3100 F2=(D6-D5)/(E2^F3-E1^F3)
3110 F1=D5-F2*E1^F3
3120 REM =====
3130 REM ===== Utskrift av tabellhuvud =====
3140 PRINT "***** Approximering av stationär isdiameter *****"
3150 PRINT "F1=";F1,"F2=";F2,"F3=";F3
3160 PRINT
3170 PRINT
3180 LPRINT "***** Approximering av stationär isdiameter *****"
3190 LPRINT "F1=";F1,"F2=";F2,"F3=";F3
3200 LPRINT
3210 LPRINT
3220 REM =====
3230 PRINT "C*(-Tbrine) ", "D , m", "Lyftkraft ,kg/m"
3240 PRINT "-----"
3250 LPRINT "C*(-Tbrine)", "D , m", "Lyftkraft ,kg/m"
3260 LPRINT "-----"
3270 REM ===== Lyftkraften hos slang och brinevätska = K =====
3280 LET K=PI*D1^2/4*(1000-G2)+PI/4*(D2^2-D1^2)*(1000-G9)
3290 FOR X=.2 TO 3 STEP .2
3300 LET D=EXP(F1+F2*X^F3)
3310 LET D=INT(1000*D+.5)/1000
3320 LET LK=INT(100*(K+PI/4*(D^2-D2^2)*83)+.5)/100
3330 PRINT USING "###.###" ";X,D,LK
3340 LPRINT USING "###.###" ";X,D,LK

```

```

3350 NEXT X
3360 INPUT "När du läst färdigt tryck på tangent J och ge return";G#
3370 IF G#="J" OR G#="j" THEN 3380 ELSE 3360
3380 RETURN
3390 PRINT
3400 PRINT
3410 INPUT "Hur många delsträckor skall varje kollektorslang uppdelas i (max 7)
;N1
3420 FOR I=1 TO N1
3430 PRINT "Hur lång är delsträcka ";I
3440 INPUT ;L(I+1)
3450 PRINT
3460 NEXT I
3470 ON ERROR GOTO 3410
3480 FOR I=1 TO N1
3490 PRINT "Hur är delsträcka ";I "belägen ? "
3500 PRINT "Ange konstanterna F och G "
3510 PRINT "Ange vattentemperatur och vattenhastighet"
3520 INPUT "Konstant F=";F(3+I)
3530 IF F(3+I)=.75 GOTO 3570
3540 IF F(3+I)=.606 GOTO 3570
3550 IF F(3+I)=.5 GOTO 3570
3560 GOTO 3520
3570 INPUT "Konstanten G=";G(10+I)
3580 REM ===== Kontroll av parametrarna =====
3590 IF F(3+I)=.606 GOTO 3650
3600 IF F(3+I)=.5 GOTO 3650
3610 IF G(10+I)=23.7 GOTO 3670
3620 IF G(10+I)=25 GOTO 3670
3630 IF G(10+I)=10 GOTO 3670
3640 IF G(10+I)=4 GOTO 3670
3650 IF G(10+I)<.25 GOTO 3570
3660 IF G(10+I)>.77 GOTO 3570
3670 INPUT "Vattentemperatur =";T(2+I)
3680 IF T(2+I)<0 GOTO 3670
3690 IF T(2+I)>4 GOTO 3670
3700 INPUT "Vattenhastighet ="; U(2+I)
3710 IF U(2+I)<0 GOTO 3700
3720 IF U(2+I) >2 GOTO 3700
3730 NEXT I
3740 ON ERROR GOTO 3480
3750 REM ===== Beräkning av iskonstanterna =====
3760 FOR I=1 TO N1
3770 D5=LOG(.05)
3780 D6=LOG(.2)
3790 D7=LOG(.4)
3800 E1=.05^F(3+I)*(B+D5)
3810 E2=.2^F(3+I)*(B+D6)
3820 E3=.4^F(3+I)*(B+D7)
3830 Y=(D7-D5)/(D6-D5)
3840 F3=.1
3850 F3=F3+.02
3860 X=(E3^F3-E1^F3)/(E2^F3-E1^F3)
3870 IF X<Y THEN 3850
3880 F3=F3-.02
3890 Z=(E3^F3-E1^F3)/(E2^F3-E1^F3)
3900 F(30+I)=F3+.02*(Y-Z)/(X-Z)
3910 F(20+I)=(D6-D5)/((E2^F(30+I))-(E1^F(30+I)))
3920 CLS
3930 F(10+I)=D5-F(20+I)*E1^F(30+I)
3940 NEXT I
3950 REM ===== Beräkning av delsträckans omgivningsparameter C =====
3960 FOR I=1 TO N1
3970 IF U(2+I)=0 THEN GOTO 4000
3980 C(I)=INT(1000*12.56/(924000!^F(3+I)*G(10+I)*T(2+I)*U(2+I)^F(3+I))+.5)/1000
3990 IF U(2+I)<>0 THEN GOTO 4010
4000 C(I)=INT(1000*4.4786/(G(10+I)*T(2+I)^1.25*(68.1-B.55*T(2+I))^25)+.5)/1000
4010 NEXT I
4020 REM ===== Utskrift av delsträckornas parametrar =====
4030 FOR I=1 TO N1

```

```

4040 PRINT "Delsträcka nr";I
4050 LPRINT "Delsträcka nr";I
4060 PRINT "Längd";L(1+I)
4070 LPRINT "Längd";L(1+I)
4080 PRINT
4090 LPRINT
4100 REM PRINT "Iskonstanter"
4.10 REM LPRINT "Iskonstanter"
4120 REM PRINT "F"(10+I) "=";F(10+I), "F"(20+I) "=";F(20+I), "F"(30+I) "=";F(30+I)
4130 REM LPRINT "F"(10+I) "=";F(10+I), "F"(20+I) "=";F(20+I), "F"(30+I) "=";F(30+I)
4140 PRINT "Vattentemperatur T"(2+I) "=";T(2+I)
4150 LPRINT "Vattentemperatur =" ;T(2+I) "C"
4160 PRINT "Vattenhastighet U"(2+I) "=";U(2+I)
4170 LPRINT "Vattenhastighet =" ;U(2+I) "m/s"
4180 IF F(3+I)=.75 THEN PRINT "Slang i stillastående vatten"
4190 IF F(3+I)=.75 THEN LPRINT "Slang i stillastående vatten"
4200 IF G(10+I)=23.7 THEN PRINT "Slangen fritt i vattnet"
4210 IF G(10+I)=23.7 THEN LPRINT "Slangen fritt i vattnet"
4220 IF G(10+I)=25 THEN PRINT "Slangen på botten"
4230 IF G(10+I)=25 THEN LPRINT "Slangen på botten"
4240 IF G(10+I)=10 THEN PRINT "Slangen nerbäddad på botten"
4250 IF G(10+I)=10 THEN LPRINT "Slangen nerbäddad på botten"
4260 IF G(10+I)=4 THEN PRINT "Slangen nersjunken i botten"
4270 IF G(10+I)=4 THEN LPRINT "Slangen nersjunken i botten"
4280 IF U(2+I)=0 THEN GOTO 4480
4290 IF F(3+I)=.606 THEN PRINT "Slangen fritt i rinnande vatten"
4300 IF F(3+I)=.606 THEN LPRINT "Slangen fritt i rinnande vatten"
4310 IF F(3+I)=.5 GOTO 4370
4320 IF G(10+I) > .6 THEN PRINT "Huvudsakligen ström tvärs slangen"
4330 IF G(10+I) > .6 THEN LPRINT "Huvudsakligen ström tvärs slangen"
4340 IF G(10+I) < .6 THEN PRINT "Huvudsakligen ström längs slangen"
4350 IF G(10+I) < .6 THEN LPRINT "Huvudsakligen ström längs slangen"
4360 IF F(3+I)=.75 GOTO 4480
4370 IF F(3+I)=.606 GOTO 4480
4380 IF G(10+I)=.25 GOTO 4460
4390 IF F(3+I)=.5 THEN PRINT "Slang på botten i rinnande vatten"
4400 IF F(3+I)=.5 THEN LPRINT "Slang på botten i rinnande vatten"
4410 IF G(10+I) > .6 THEN PRINT "Huvudsakligen ström tvärs slangen"
4420 IF G(10+I) > .6 THEN LPRINT "Huvudsakligen ström tvärs slangen"
4430 IF G(10+I) < .6 THEN PRINT "Huvudsakligen ström längs slangen"
4440 IF G(10+I) < .6 THEN LPRINT "Huvudsakligen ström längs slangen"
4450 GOTO 4480
4460 PRINT "Nerbäddad slang på botten av rinnande vatten"
4470 LPRINT "Nerbäddad slang på botten av rinnande vatten"
4480 PRINT "Omgivningsparametern C=";C(I)
4490 LPRINT "Omgivningsparametern C=";C(I)
4500 PRINT "-----"
4510 LPRINT "-----"
4520 NEXT I
4530 REM ===== Utskrift av tabellhuvud =====
4540 PRINT TAB(3); "Delst";TAB(13); "T-ut";TAB(23); "D-max";TAB(33); "D-min";TAB(42); "P-medel";TAB(53); "T-in";TAB(62); "P-tot "
4550 LPRINT TAB(3); "Delst";TAB(13); "T-ut";TAB(23); "D-max";TAB(33); "D-min";TAB(42); "P-medel";TAB(53); "T-in";TAB(62); "P-tot "
4560 PRINT TAB(5); "nr";TAB(12); "Grad-C";TAB(25); "m";TAB(34); "m";TAB(43); "W/m";TAB(51); "Grad- C";TAB(64); "kW"
4570 LPRINT TAB(5); "nr";TAB(12); "Grad-C";TAB(25); "m";TAB(34); "m";TAB(43); "W/m";TAB(51); "Grad- C";TAB(64); "kW"
4580 REM ===== Loop för olika starttemperaturer =====
4590 FOR S=0 TO -10 STEP -1
4600 LET U1=S
4610 FOR I=1 TO N1
4620 T=-((LOG(D2)-F(10+I))/F(20+I))^(1/F(30+I))/C(I)
4630 IF T>U1 THEN GOTO 4670
4640 REM ===== Is finns i början på slangen =====
4650 LET T=U1;LET L1=0;LET D3=D2
4660 GOTO 4710
4670 L1=(((-U1)^F(30+I)-(-T)^F(30+I))*C(I)^F(30+I)*F(20+I)/F(30+I)+(B+F(10+I))*DG(U1/T))*Q1*G2*G5/14.07
4680 LET D3=EXP(F(10+I)+F(20+I)*(C(I)*(-U1))^F(30+I))

```



```

4690 IF L1>L(1+I) THEN GOTO 4750
4700 REM ===== Is finns på hela slangen =====
4710 LET K1=14.07/(B+LOG(D2)+T(2+I)*C(I)/D2^F(3+I))
4720 LET U=T(2+I)-(T(2+I)-T)*EXP(-K1*(L(1+I)-L1)/(Q1*G2*G5))
4730 LET D=D2
4740 GOTO 4850
4750 LET T=U1
4760 REM ===== Återhopsadress =====
4770 LET Z=X
4780 X=(((-U1)^F(30+I)-(-T)^F(30+I))*C(I)^F(30+I)*F(20+I)/F(30+I)+(B+F(10+I))*L
G(U1/T))*Q1*G2*G5/14.07
4790 T=T+.2
4800 IF X<L(1+I) THEN GOTO 4760
4810 REM ===== Beräkning av upptagen effekt =====
4820 REM ===== U betecknar interpolerad temperatur vid delsträckans slut =====
4830 LET U=T-.4+.2*(L(1+I)-Z)/(X-Z)
4840 LET D=EXP(F(10+I)+F(20+I))*C(I)*(-U)^F(30+I))
4850 REM ===== Hoppadress vid isfri slang =====
4860 REM ===== Beräkning av medeleffekten =====
4870 LET P(1+I)=Q1*G2*G5*(U-U1)/L(1+I)
4880 REM ===== Beräkning av totaleffekten =====
4890 LET P(2+I)=Q1*G2*G5*(U-U1)*N%/1000
4900 LET PT=PT+P(2+I)
4910 REM =====Utskrift av tabellvärden =====
4920 PRINT USING "####.### ";I,U1,D3,D,P(1+I),U,PT
4930 LPRINT USING "####.### ";I,U1,D3,D,P(1+I),U,PT
4940 X=0
4950 LET U1=U
4960 NEXT I
4970 LET PT=0
4980 PRINT
4990 LPRINT
5000 NEXT S
5010 GOTO 1640

```



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 870400-4  
från Statens råd för byggnadsforskning till Chalmers  
tekniska högskola, Inst. för vattenbyggnad, Göteborg.**

**R65: 1988**

**ISBN 91-540-4920-2**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6708065**

**Abonnemangsgrupp:  
W. Installationer**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 7853  
103 99 Stockholm**

**Cirkapris: 42 kr exkl moms**