



Institutionen för vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola

Department of Hydraulics
Chalmers University of Technology

ISSN 0348 - 1069

Värmeupptagning med bottenförlagda kylslangar i stillastående vatten

Laboratorieförsök

Torbjörn Svensson

Lars - Ove Sörman

Report

Göteborg 1982

Series B : 36



Institutionen för Vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola

Department of Hydraulics
Chalmers University of Technology

VÄRMEUPPTAGNING MED BOTTENFÖRLAGDA
KYLSLANGAR I STILLASTÅENDE VATTEN

Laboratorieförsök

Torbjörn Svensson
Lars-Ove Sörman

Report

Series B:36

Göteborg 1982

Adress: Institutionen för Vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg

Telefon: 031/81 01 00

VÄRMEUPPTAGNING MED BOTTENFÖRLAGDA
KYLSLANGAR I STILLASTÅENDE VATTEN

Laboratorieförsök

Torbjörn Svensson
Lars-Ove Sörman

Denna rapport hänförs sig till forskningsanslag
800036-4 från Statens råd för byggnadsforskning
till Inst. för vattenbyggnad, CTH, Göteborg.

INNEHÅLL

Sid.

BETECKNINGAR	4
SAMMANFATTNING	5
1 INLEDNING, BAKGRUND	7
2 PROJEKTETS MÅLSÄTTNING	8
3 TEORETISK BAKGRUND	9
3.1 Allmänna förutsättningar	9
3.2 Värmeledningsekvationen	11
3.3 Villkor för ispåfrysning	14
3.4 Värmeövergångstal	14
3.4.1 Inre värmeövergångstal α_i	16
3.4.2 Yttre värmeövergångstal α_y	17
3.5 Värmeupptagning genom is- påfrysning	18
4 FÖRSÖKSANORDNING	22
4.1 Försökssuppställning, funktions- krav	22
4.2 Bassäng	22
4.3 Temperaturreglering av botten- materialet	24
4.4 Brineslingan	24
4.5 Temperaturreglering	26
4.6 Temperaturmätning	26
4.7 Värmeinflödesmätning	27
4.8 Istjockleksmätare	28
5 FÖRSÖKSFÖRFARANDE OCH UTVÄRDERING	30
5.1 Försöksserier	30
5.2 Mätförfarande och utvärdering	30
5.3 Felanalys	31
6 FÖRSÖKSRESULTAT	33
6.1 Allmänt	33
6.2 Värmeupptagning och ispåväxt för varje mätserie	34
6.3 Sammanställning av försöksresultat	51
6.4 Isbildning kring slangen	55
6.4.1 Allmänt	55
6.4.2 Iscylinderns form	55
6.4.3 Effektupptagning under istillväxt	57
6.4.4 Iscylinderns tillväxthastighet	58
7 LITTERATURFÖRTECKNING	60

BETECKNINGAR

A, B	konstanter	
C	värmekapacitivitet	J/kg ^o C
d _i	slangens innerdiameter	m
d _s	slangens ytterdiameter	m
d _y	iscylinderns diameter	m
g	gravitationskonstanten	m/s ²
Gr	Grashofs tal	
K ⁻ , K [~]	värmegenomgångstal för rör	W/m ^o C
l, L	karakteristisk längd	m
L _{is}	isens smältvärme	J/kg
Nu	Nusselts tal	
P	elektrisk effekt i värmare	W
Pr	Prandtls tal	
q	upptagen värmeeffekt per m slang	W/m
Q _b	brineflöde	m ³ /s
r	radiell koordinat	m
R	elektrisk resistans hos värmare	Ω
Re	Reynolds tal	-
T	temperatur	^o C
T _a	vattentemperatur i nivå med slang	^o C
T _b	brinetemperatur	^o C
T _i	temperatur vid slangens innervägg	^o C
T _s	temperatur vid slangens yttervägg	^o C
u	strömhastighet	m/s
U	elektrisk spänning över värmare	V
α _i	inre värmeöverföringstal	W/m ² ^o C
α _y	yttre värmeöverföringstal	W/m ² ^o C
β	vattnets volymsutvidgningskoefficient	^o C ⁻¹
ΔT	temperaturskillnad mellan vatten och brine	^o C
ΔT	temperaturskillnad mellan vatten och röryta	^o C
λ	värmeledningstal	W/m ^o C
λ _v	slangväggs värmeledningstal	W/m ^o C
λ _{is}	isens värmeledningstal	W/m ^o C
ρ	densitet	kg/m ³
ρ _{is}	densitet hos is	kg/m ³
ν	kinematisk viskositet	m ² /s

SAMMANFATTNING

Sjöar används i växande utsträckning som värmekälla för värmepumpar och ett stort antal villavärmepumpar har installerats med slangar utlagda på botten av en närbelägen sjö som värmeupptagare. Dimensionering av sådana värmeupptagare sker överslagsmässigt. I vissa fall har haverier, i form av uppflytning pga ispåväxt, inträffat. I denna rapport redovisas resultat av uppmätt värmeupptagningsförmåga hos bottenförlagda slangar vid olika brinetemperatur och vattentemperatur. Resultaten kan tjäna som dimensioneringsunderlag för slangsystem förutsatt att vattentemperaturen och graden av nedsjunkning i botten är kända.

Försöken har utförts i en 80 cm djup bassäng, där vattentemperaturen och värmeflödet från botten kunnat regleras. Värmeupptagningen har mätts på en slang av PEL med dimensionen $\varnothing 40/32,6$, vilken är den vanligen använda typen.

I rapporten redovisas teorin för värmeupptagning med en fritt upphängd, horisontell slang. Denna används dels för jämförelse med de erhållna försöksresultaten men kan också användas för att överföra försöksresultaten till andra slangdimensioner och material.

Försöksresultaten redovisas i form av kurvor över upptagen effekt, q , som funktion av temperaturskillnaden ΔT mellan brineväskskan (25% etylenglykol) och omgivande vatten (figur 6.1, 6.2 på sid. 53). Approximativt kan resultaten lineariseras till följande enkla form

$$q = K' \cdot \Delta T$$

Konstanten K' är specifik för den valda slangdimensionen, brineflödet etc. och varierar med de yttre förutsättningarna.

För slang som ligger direkt på botten är K' 6,5-7,5 W/m $^{\circ}\text{C}$ för vattentemperaturer i intervallet 1,0 till 3,3 $^{\circ}\text{C}$. Vid vattentemperaturen 0,5 $^{\circ}\text{C}$ planar kurvan ut vid en effekt av 20-22 W/m och ökar därefter endast långsamt. Vid temperaturer över 1 $^{\circ}\text{C}$ är värmeuttag över 40 W/m möjliga. Värmeöverföringen till slang som ligger direkt på botten synes vara lika effektiv som om slang- en hänger fritt i vattnet enligt den teoretiska beräkningen, utom i fallet med den lägsta undersökta vattentemperaturen, 0,5 $^{\circ}\text{C}$.

För en slang som nedbäddas till hjässan i sand är K' ca 4,5 W/m $^{\circ}\text{C}$ inom hela temperaturintervallet 0,5-4 $^{\circ}\text{C}$ upp till ett ΔT av ca 5 $^{\circ}\text{C}$ ($q \approx 20$ W/m). Därefter ökar K' något för de högre vattentemperaturerna.

För en slang som täckts med 10 cm vattenmättad torv uppmättes K' till ca 2-2,5 W/m $^{\circ}\text{C}$ för ΔT upp till 6 $^{\circ}\text{C}$ (vid $T_a = 2,5^{\circ}\text{C}$). Ispåväxten blir i detta fall

kraftig och tidsförloppet långsamt. För ett verkligt fall blir K' -värdet ytterligare något lägre än det uppmätta pga att istillväxten i modellen var begränsad nedåt.

Ispåväxten på slangens är ganska liten i de båda första fallen när vattentemperaturen överstiger 1°C . Vid $0,5^{\circ}\text{C}$ börjar is att bildas vid en brinetemperatur av -1°C och ökar till ca 5 cm tjocklek vid -4°C för slang på botten och till 8 cm för en nedbäddad slang.

Istillväxten är kraftigare nedåt i bottenmaterialet än uppåt i vattnet. En avsevärd del av isklumpen runt slangens består således av fruset bottenmaterial.

Värmepumpar som utnyttjar sjöar, vattendrag eller havsområden som värmekälla har kommit till allt större användning under de senaste åren. Byggforskningsrådet har anslagit medel till flera experimentprojekt men stöder även mera grundläggande forskning på området. Tekniken är, i lämpliga lägen, lönsam gentemot uppvärmning med olja, elpannor och fasta bränslen, speciellt när det gäller större anläggningar.

I huvudsak tillämpas två metoder för värmeupptagning. Det öppna systemet innebär att vatten pumpas upp från sjön och avger värme direkt till värmepumpens förångare. Denna måste vara konstruerad för att arbeta vid temperaturer nära fryspunkten och med liten temperaturdifferens mellan in- och utgående vatten. För temperaturer under $5-6^{\circ}\text{C}$ används s.k. strilförångare vilka dimensioneras för att ge full effekt vid lägst $2-2,5^{\circ}\text{C}$ inkommande vattentemperatur. Effekten avtar sedan successivt till noll vid $0-0,5^{\circ}\text{C}$.

I slutna system sker värmeupptagning genom en sluten cirkulationskrets (köldbärarkrets) genom ett medium med lägre fryspunkt än vatten. Den vanligaste utformningen består i PEL-slangar, vilka utlägges på botten av vattenområdet. Även andra, mera kompakta värmeväxlare har dock byggts. Som värmeupptagande medium (köldbärare) används i regel blandningar av vatten och etylenglykol, men även propylenglykol, saltlösningar eller alkoholer är möjliga att använda.

En bottenförlagd kylslang påfrysas med is om vattentemperaturen är nära $\pm 0^{\circ}\text{C}$ och köldbärarens temperatur är några grader under noll. För att förhindra uppflytning måste i vissa fall slangen förankras eller nedtyngas. Om bottenmaterialet har tillräcklig densitet kan man dock sannolikt påräkna att det infrusna bottenmaterialet ger tillräcklig stabilitet för att förhindra uppflytning.

Bottenförhållandena i sjöar, vattendrag och kustvatten varierar kraftigt från stenrik morän till lös dybotten. Slangens läge relativt botten kan då också variera från att till stor del ligga fritt i vattnet till att vara nedsjunken fler dm i dyn. Detta påverkar naturligtvis värmeupptagningsförmågan hos slangen. Bäst värmeupptagning erhålles med slangen fritt i vattnet och den förbättras radikalt av strömmar och vågpåverkan. Sämre värmeupptagningsförmåga erhålles för nedsjunkna slangar, men detta kompenseras till en del av den högre sedimenttemperaturen samt av att större påfrysning kan accepteras. För de båda extremfallen med slangen fritt i vattnet resp. kraftigt nedsjunken (eller nedgrävd) kan värmeupptagningen relativt väl beräknas. Slangar som ligger direkt på botten eller endast något nedsjunkna utgör en kombination av de båda fallen. Man är här hänvisad till att experimentellt bestämma värmeupptagning och påfrysning för att få ett gott dimensioneringsunderlag.

Projektet syftar till att bestämma värmeflödet till en kylslang från omgivande vatten och bottenmaterial som funktion av köldbärandevätskans temperatur. Dessutom bestämmas storleken på den påfrysning som erhålls.

Försöken utföres i stillastående vatten vid de temperaturförhållanden som är typiska för sjöar vintertid, dvs 0-4°C, och med naturligt förekommande värmeflöden från bottensedimenten till vattnet. Slangdimensioner, typ av köldbärandevätska och vätskeflöden väljes efter utbildad praxis, men resultaten skall med teoretiska metoder kunna överföras även till andra utformningar. För att efterlikna naturliga förhållanden skall försöken göras med olika bottenmaterial, sand resp. vattenrika organiska sediment samt med olika grad av nedsjunkning.

3 TEORETISK BAKGRUND

3.1 Allmänna förutsättningar

Värmetillförseln från omgivningen till en slang som är förlagd på botten i ett stillastående vattenområde sker genom tre skilda processer. Dessa är:

- o Värmeöverföring från omgivande vatten genom termisk konvektion och värmeledning
- o Värmeledning från underliggande sediment
- o Frysning av vatten kring slangen.

Frysning uppträder vid låga vattentemperaturer och resulterar i att ett isskikt utbildas kring slangen. I de delar som befinner sig under bottennivån blir isen blandad med bottenmaterialet. Is som bildas i fria vattnet blir ren och påfallande klar.

Värmeledning från sedimenten till en slang beror av bottenmaterialets temperatur och värmeledningsförmåga. Temperaturen minskar successivt under vintern i en sjöbotten pga värmeavgivning till ovan liggande vatten och genom kylning med slangar. Värmeupptagningen från bottenmaterialet kommer därigenom successivt att minska. Avståndet mellan slangarna spelar också in genom att, av symmetriskäl, endast värmeflödet från en remsa med slangdelningens bredd kan tillföras slangen. Detta bidrar också till att minska värmeupptagningen från sedimenten under senare delen av vintersäsongen.

Strömning av porvatten i bottensedimenten kan bidra till att höja värmeöverföringen från sedimenten till slangen. Sådana rörelser kan vara naturliga grundvattenströmmar eller termisk konvektion. I de flesta fall torde effekten härav dock vara liten och den har ej beaktats vid föreliggande studie.

Värmeöverföringen från det fria vattnet till slangen betingas av vattnets rörelser intill slangen. I stillastående vatten uppstår en egenkonvektion pga kylningen kring slangen. Egenkonvektionens riktning blir beroende av om vattentemperaturen är högre eller lägre än $+4^{\circ}\text{C}$ (för sötvatten), där vattnet har sin högsta densitet. Vid lägre temperaturer, $0-4^{\circ}\text{C}$, vilka normalt uppträder i sjöar vintertid, ger kylningen vid slangen upphov till en stigande kallvattensplym medan vatten från bottennära skikt strömmar mot slangen för att ersätta den stigande plymen. I varmare vatten blir det avkylda vattnet tyngre än det omgivande och lägger sig i ett skikt närmast botten. Temperaturen inom detta skikt kommer så småningom att bli nära $+4^{\circ}\text{C}$ om inte naturlig blandning och strömmar bryter upp skiktningen.

En sammanfattande bild av de processer som bidrar till att överföra värme till en bottenförlagd kylslang ges i fig. 3.1.

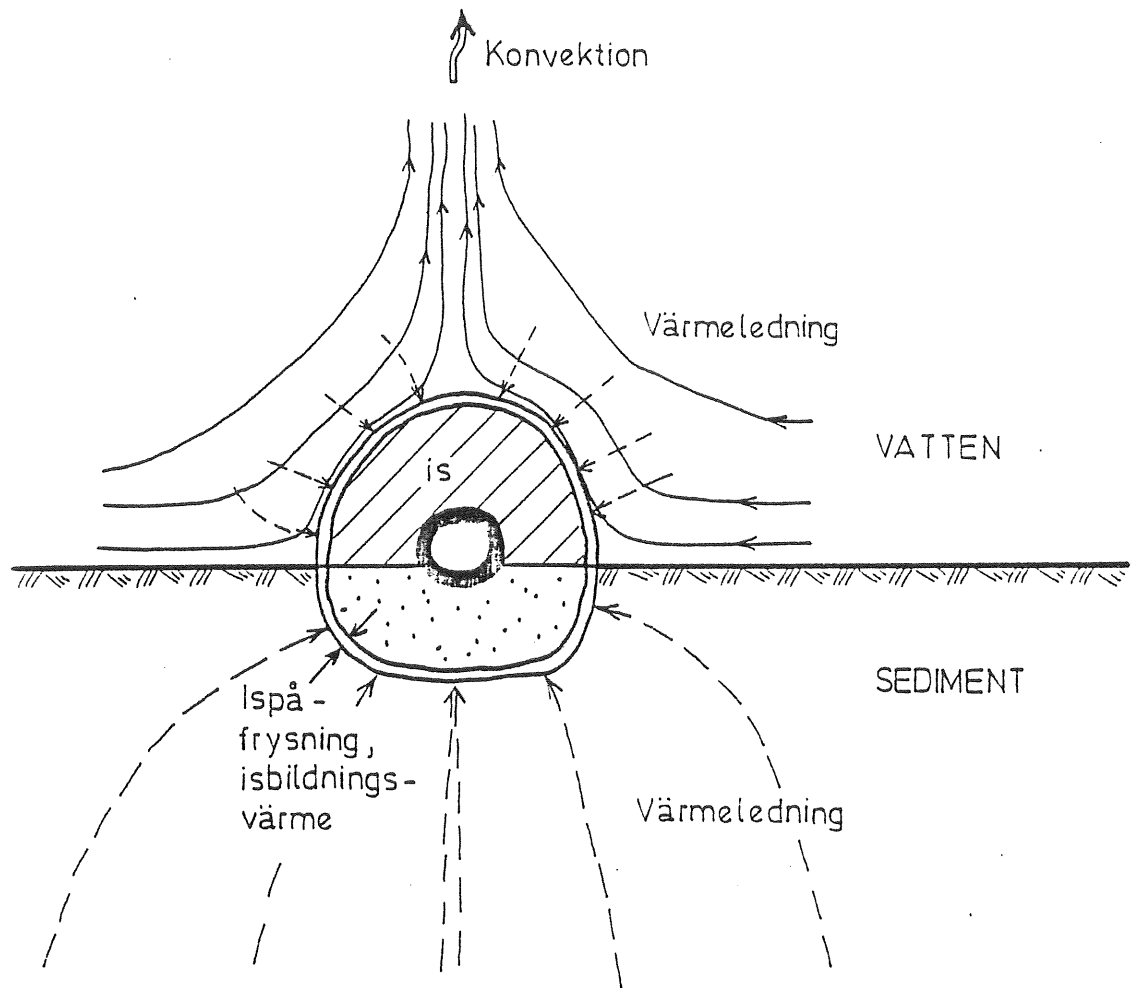


Fig. 3.1 Principskiss av de processer som överför värme från omgivningen till en bottenförlagd kylslang.

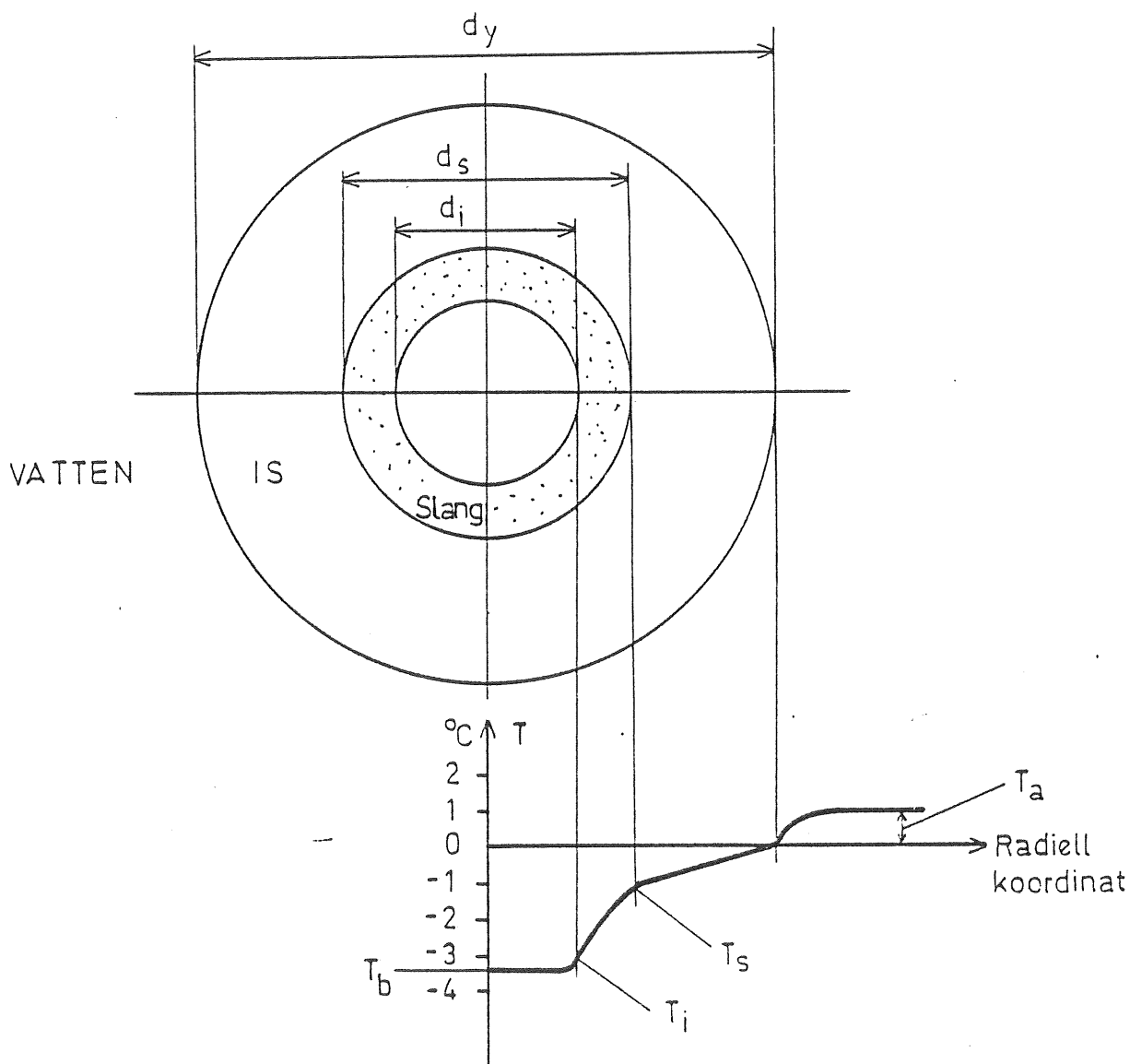
Från isens yta leds värme radiellt genom isen och slangväggen till det värmeupptagande mediet, köldbärarvätskan. Detta värmeflöde bestäms av köldbärarvätskans temperatur och av isens tjocklek, eftersom värmeledningsegenskaperna och temperaturen vid isytan, $\pm 0^{\circ}\text{C}$, är konstanta. Ytterligare ispåfrysning sker om värmeöverföringen från vattnet och sedimenten är mindre än värmeledningen in till slangens medan avsmältning sker i det motsatta fallet.

Med en ökande ispåväxt på slangens ökar värmeöverföringen från omgivningen, eftersom storleken av den kalla ytan ökar. Värmeledningen genom iscylindern blir däremot lägre. Detta bör medföra att istjockleken relativt snabbt konvergerar mot ett stationärt värde vid konstant värmeuttag eller köldbärartemperatur.

3.2 Värmeledningsekvationen

I detta avsnitt skall värmeflödet till en slang analyseras. Slangen antas vara omfrusen med ett jämntjockt islager och förutsättes till att börja med ligga fritt i vattnet. De modifikationer som betingas av närheten till botten kommer att beröras senare. För en fritt upphängd, horisontell slang finns uppgifter i litteraturen som kan direkt utnyttjas för att beräkna ispåfrysning och värmeupptagning. Detta fall utgör därför ett lämpligt jämförelsematerial för laboratorieförsöken.

En principskiss av den isomfrusna slangen visas i figur 3.2 tillsammans med använda beteckningar och en antagen temperaturfördelning i radiell led.



Figur 3.2 Principskiss av isomfrusen slang i fritt vatten samt den radiella temperaturfördelningen.

Vid stationärt tillstånd är det radiella värmeflödet lika stort genom alla ytor på olika avstånd från den inre slangväggen till isytan. Detta ger följande uttryck för värmeflödet mot slangen.

$$q = \lambda \cdot 2\pi \cdot r \cdot \frac{dT}{dr} \quad \dots \quad (3.1)$$

där

q är värmeflödet mot slangen per m slang [W/m]
 λ är värmeledningstalet [W/m °C]
 r är radiell koordinat [m]
 T är temperaturen [°C]

Denna ekvation integreras mellan slangens inre begränsningsyta med temperaturen T_i och isytan, där temperaturen är 0°C.

$$\frac{q}{2\pi\lambda} \cdot \int_{d_i/2}^{d_y/2} \frac{dr}{r} = \int_{T_i}^0 dT \quad \dots \quad (3.2)$$

Integralen i vänstra ledet uppdelas i en del för rörväggen och en del för isskiktet varvid följande uttryck erhålles:

$$\frac{q}{2\pi} \left(\frac{1}{\lambda_v} \cdot \ln \frac{d_s}{d_i} + \frac{1}{\lambda_{is}} \ln \frac{d_y}{d_s} \right) = -T_i \quad \dots \quad (3.3)$$

där

λ_v är slangväggens värmeledningstal
 λ_{is} är isens värmeledningstal

Ur ekv. (3.3) kan värmeflödet lösas ut.

$$q = \frac{-2\pi T_i}{\frac{1}{\lambda_v} \ln \frac{d_s}{d_i} + \frac{1}{\lambda_{is}} \ln \frac{d_y}{d_s}} \quad \dots \quad (3.4)$$

Ur denna ekvation kan värmeflödet beräknas som funktion av temperaturen invid rörväggen och av isdiametern. Övriga ingående parametrar är konstanta för en viss tillämpning.

Temperaturen vid rörväggen och isdiametern är normalt inte kända utan måste relateras till brinetemperaturen T_b och omgivningstemperaturen T_a . Härtill krävs kännedom om värmeutbytet mellan vätskan i röret och rörväggen respektive mellan omgivande vatten och isytan. Detta beror i sin tur av strömningsförhållandena i resp. vätska varför värmeutbytet kan variera inom

vida gränser för en given temperaturdifferens mellan vätskan och den fasta ytan. Vanligen uttryckes detta värmeutbyte med ett värmeöverföringstal vars storlek bestäms experimentellt. Värmeöverföringstalet definieras enligt följande:

$$q = \alpha_i \pi d_i (T_i - T_b) \quad \dots \quad (3.5)$$

där α_i är det inre värmeöverföringstalet mellan brinevätska och rörvägg

$$q = \alpha_y \pi d_y (T_a - 0) \quad \dots \quad (3.6)$$

där α_y är det yttre värmeöverföringstalet mellan vatten och isyta

Temperaturdifferensen mellan brinevätska och rörvägg blir

$$\frac{q}{\alpha_i \pi d_i} = T_i - T_b \quad \dots \quad (3.7)$$

På motsvarande sätt blir omgivningstemperaturen enligt ekv. (3.6)

$$\frac{q}{\alpha_y \pi d_y} = T_a \quad \dots \quad (3.8)$$

Genom att addera ekv. (3.3), (3.7) och (3.8) kan värme-flödet lösas ut som funktion av temperaturdifferensen mellan omgivande vatten och brinevätskan. Detta uttryck blir:

$$q = \frac{\pi (T_a - T_b)}{\frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{1}{2\lambda_v} \ln \frac{d_s}{d_i} + \frac{1}{2\lambda_{is}} \ln \frac{d_y}{d_s} + \frac{1}{\alpha_y d_y}} \dots \quad (3.9)$$

eller

$$q = K^- \cdot \Delta T \quad \dots \quad (3.10)$$

där

$$K^- = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{1}{2\lambda_v} \ln \frac{d_s}{d_i} + \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_y}{d_s} + \frac{1}{\alpha_y d_y}} \dots \quad (3.11)$$

Det kan observeras att ekv. (3.9) eller (3.10) gäller även för det fall att slangen ej är ispåfrusen. I detta fall är $d_y = d_s$ och följaktligen $\ln(d_y/d_s) = 0$.

Om slangen är ispåfrusen kan man utnyttja randvillkoret att temperaturen är $\pm 0^\circ\text{C}$ vid isytan och erhåller då följande uttryck för värme-flödet som funktion av brine-temperaturen.

$$q = K'' \cdot (-T_b) \quad \dots \quad (3.12)$$

där

$$K'' = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{1}{2\lambda_v} \ln \frac{d_s}{d_i} + \frac{1}{2\lambda_{is}} \ln \frac{d_y}{d_s}} \quad \dots \quad (3.13)$$

Ekv. (3.10) och (3.12) utgör grunden för praktisk dimensionering av värmeupptagande slangsystem. Utvärderingen och redovisningen av föreliggande laboratorieförsök med bottenförlagda slangar har därför gjorts så att koefficienterna K' och K'' skall kunna bestämmas för olika fall.

3.3 Villkor för ispåfrysning

Isskiktet runt slangen tillväxer i tjocklek om värmeledningen från isens yta in till brinevätskan överstiger värmeförlusten från omgivande vatten. Denna isotillväxt beskrivs av följande ekvation:

$$\rho_{is} \cdot L_{is} \cdot \pi \cdot d_y \cdot \frac{1}{2} \frac{dd_y}{dt} = K''(-T_b) - \pi \alpha_y d_y T_a \quad \dots \quad (3.14)$$

där ρ_{is} är isens densitet

L_{is} är isens smältvärme

För det stationära fallet gäller att $d(d_y)/dt = 0$ och ekv. (3.14) kan då användas för att beräkna den resulterande istjockleken vid ett konstant värmeuttag.

$$d_y = \frac{K''(-T_b)}{\pi \alpha_y T_a} \quad \dots \quad (3.15)$$

Ekvation (3.15) löses genom passning, eftersom uttrycket för K'' i sig innehåller den yttre diametern d_y .

3.4 Värmeövergångstal

Värmeövergångstalen uttrycker den samlade inverkan av värmeledning och konvektion (fri eller påtvingad) in till den fasta ytan. Dessa förlopp styrs av följande dimensionslösa tal.

$$\text{Nusselts_tal} \quad Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad \dots \quad (3.16)$$

där l är en karakteristisk längd för den aktuella geometrin

α är värmeövergångstalet

λ är vätskans värmeledningstal

Nusselts tal har bestämts experimentellt för ett antal olika fall och ger direkt värmeövergångstalet:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{l} \quad \dots (3.17)$$

Grashofs tal $\text{Gr} = \frac{g \beta L^3 \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad \dots (3.18)$

där g är gravitationskonstanten
 β är vätskans volymsutvidgningskoefficient
 L är en karakteristisk höjd hos den värmeöverförande ytan
 ΔT är temperaturskillnaden mellan ytan och vätskan
 ν är vätskans kinematiska viskositet

Grashofs tal uttrycker i princip drivkraften för den termiska egenkonvektionen i en vätska. För rent vatten är $\text{Gr} = 0$ vid temperaturen $+4^\circ\text{C}$ pga att vattnet här har sin maximala densitet och således $\beta = 0$.

Prandtls tal $\text{Pr} = \frac{\nu_{\text{OC}}}{\lambda} \quad \dots (3.19)$

där ν är vätskans kinematiska viskositet
 ρ " " densitet
 c " " värmekapacitivitet
 λ " " värmeledningstal

Prandtls tal är en temperaturberoende materialkonstant för vätskan. För rent vatten vid $\pm 10^\circ\text{C}$ är Pr lika med 13,0.

Reynolds tal $\text{Re} = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad \dots (3.20)$

där u är hastigheten hos den strömmande vätskan
 d är diametern " " " "

Reynolds tal karakteriserar vätskans strömningstillstånd. Vid rörströmning gäller att flödet är laminärt för $\text{Re} < 2300$ och fullt turbulent för $\text{Re} > 4000$. Därmed kan strömningen vara av båda typerna beroende bl.a. på vilka störningar som flödet utsättes för.

För beräkning av värmeövergångstalet utgår man från experimentellt bestämda värden på Nusselts tal. Dessa i sin tur är funktioner av de övriga dimensionslösa talen. Ur villkoren för dynamisk likformighet kan man visa att följande funktionssamband gäller vid påtvingad respektive naturlig konvektion.

Påtvungad konvektion (ex. rörströmning)

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Naturlig konvektion

$$Nu = f(Pr, Gr)$$

För bestämning av α_v för värmeupptagande kylslangar vid vattentemperaturer under $+4^\circ\text{C}$ räcker det således i princip att variera värdet på Gr inom möjliga intervall.

3.4.1 Inre värmeövergångstalet, α_i

För strömning i rör har följande formler för Nusselts tal bestämts:

Laminär strömning

$$Nu = 3,65 + \frac{0,067 \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot d}{l} \right)}{1 + 0,045 \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot d}{l} \right)^{2/3}} \dots (3.21)$$

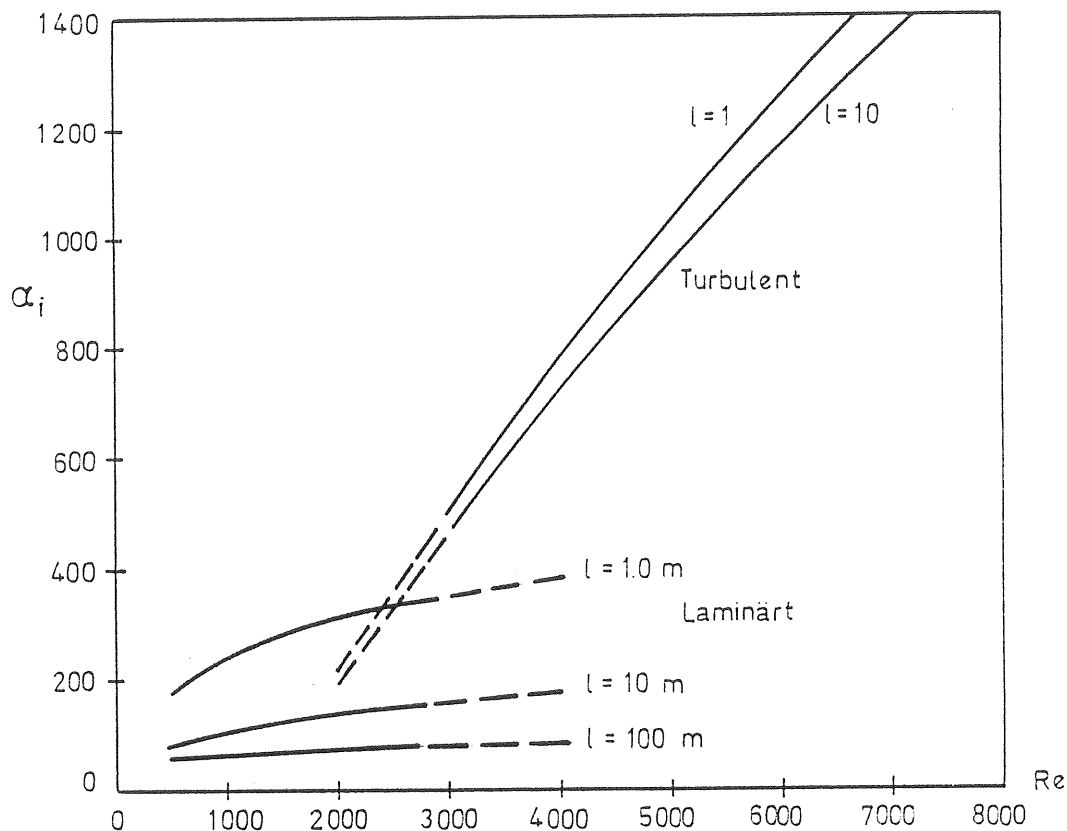
Turbulent strömning

$$Nu = 0,116 (Re^{2/3} - 125) \cdot Pr^{1/3} \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{2/3} \right] \dots (3.22)$$

I dessa formler betecknar d rörets inre diameter. Formlerna ger ett medelvärde på Nu från rörets början till sträckan l .

Vid laminär strömning inverkar rörlängden väsentligt på Nu vid korta rörlängder ($l/d < \sim 2000$). Vid längre rörlängder närmar sig Nu det konstanta värdet 3,65. I fig. 3.3 visas i diagramform Nu som funktion av Re för olika rörlängder.

Vid turbulent strömning är inverkan av rörlängden betydligt mindre än vid laminär strömning och i praktiken försumbar för $l/d > \sim 100$. En kontinuerlig ökning av Nu , och därmed av värmeövergångstalet, sker med ökande Reynolds tal, se fig. 3.3.



Figur 3.3 Värmeövergångstal mellan strömmande vätska i ett rör och rörväggen vid laminär resp. turbulent strömning. Diagrammet ger α_i som funktion av Re vid olika rörlängder. Rördiameter, $d_i=32,6$ mm, Prandtl's tal $Pr=30$, vilket gäller för etylenglykol i 25% lösning vid temperaturen -3°C .

3.4.2 Yttre värmeövergångstal, α_y

Ett fritt upphängt, horisontellt rör omgivet av stillastående vatten betraktas här. Vid kylning av röret uppstår en naturlig konvektion i ett tunt, laminärt skikt runt röret och en smal plym som för bort det avkylda vattnet. Om vattentemperaturen är högre än 4°C sjunker den avkylda plymen och vid lägre temperatur än 4°C stiger den uppåt. Värmeövergången mellan röret och omgivande vatten ges av följande formel

$$Nu = 0,53 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad \dots (3.23)$$

Vid beräkning av Gr , ekv. (3.18) användes den yttre diametern, d_s eller d_y , som karakteristisk längd, L . De temperaturberoende materialkonstanterna β och ν sättes medelvärde inom intervallet ΔT .

Ekvation (3.23) är begränsad till att gälla inom intervallet $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$. Detta innebär att formeln inte kan användas vid temperaturer nära $+4^\circ\text{C}$ där volymsutvidgningskoefficienten β , och därmed Gr är lika med noll.

För ett ispåfruset rör och vattentemperatur under $+4^{\circ}\text{C}$ kan ett förenklat uttryck för värmeöverförings-talet härledas enligt följande:

$$\text{Nu} = 0,53 \left(\text{Pr} \cdot \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/4} \cdot (\bar{\beta} T_a)^{1/4} \cdot d_y^{3/4}$$

Insättning i ekv. (3.17) med $l = d_y$ ger:

$$\alpha_y = 0,53 \left(\text{Pr} \cdot \frac{g \lambda}{\nu^2} \right)^{1/4} \left(\frac{\bar{\beta} T_a}{d_y} \right)^{1/4}$$

Uttrycket inom den första parentesen är en konstant med värdet $4,0 \cdot 10^{12}$. Ett approximativt uttryck för $\bar{\beta}$ kan sättas till, $\bar{\beta} = (68,1 - 8,55 T_a) 10^{-6}$. Med dessa uttryck erhålles:

$$\alpha_y = 23,7 \cdot \left[\frac{(68,1 - 8,55 T_a) T_a}{d_y} \right]^{1/4} \dots (3.24)$$

Värdet på α_y varierar mellan ca 60 och 160 för vattentemperaturer mellan $0,1^{\circ}\text{C}$ och 4°C och diametern d_y mellan 4 och 20 cm. För t.ex. $T_a = 0,5^{\circ}\text{C}$ och $d_y = 0,10 \text{ m}$ erhålles $\alpha = 100$.

För slangar som ligger på botten kan man förvänta sig lägre värden på α_y än ovanstående pga strömningens friktion mot botten. Därtill kommer att en större eller mindre del av slangens periferi ej har direkt kontakt med vattnet utan ligger an mot bottenmaterialet. Detta minskar den värmeupptagande ytan mot vattnet. Värmetillförseln till de undre delarna sker i stället genom ren värmeledning i bottensedimenten mot slangen, se figur 3.1. Vid studium av värmeupptagningsförmågan hos en bottenförlagd slang krävs alltså att både den konvektiva värmeöverföringen från vattnet och värmeledningen från underliggande sediment behandlas samtidigt.

3.5 Värmeupptagning genom ispåfrysning

I detta avsnitt skall ispåfrysningen kring en slang i fritt vatten närmare penetreras. Enligt ekv. (3.14) kan utvecklingen av isfronten kring en slang skrivas:

$$\frac{d d_y}{dt} = \frac{2 K'' (-T_b)}{\rho_{is} L_{is} \pi d_y} - \frac{2 \alpha_y T_a}{\rho_{is} L_{is}} \dots (3.25)$$

Insättes K'' enligt ekv. (3.13) och α_y enligt ekv. (3.24) erhålles:

$$\frac{d d_y}{dt} = \frac{2}{\alpha_{is} L_{is}} \left\{ \frac{(-T_b)}{2\lambda_{is} \left(\frac{2\lambda_{is}}{\alpha_i d_i} + \frac{\lambda_{is}}{\lambda_v} \ln \frac{d_s}{d_i} - \ln d_s + \ln d_y \right)} - 23,7 T_a \left[\frac{(68,1 - 8,55 T_a) T_a}{d_y} \right]^{1/4} \right\} \dots (3.26)$$

Ekv. (3.26) kan skrivas på följande förenklade sätt genom att sammanföra de konstanter som ingår

$$\frac{d d_y}{dt} = A \left\{ \frac{2\lambda_{is} (-T_b)}{d_y (B + \ln d_y)} - \frac{f(T_a)}{d_y^{1/4}} \right\} \dots (3.27)$$

där konstanterna A och B och funktionen $f(T_a)$ bestäms genom identifiering med ekv. (3.26).

Ekv. (3.27) kan lösas med numeriska metoder. Här skall endast ett specialfall beräknas, nämligen den stationära isdiametern som uppnås efter lång tid.

Vid stationära förhållanden erhålles ur ekv. (3.27)

$$d_{y\infty}^{3/4} (B + \ln d_{y\infty}) = \frac{2\lambda_{is} (-T_b)}{f(T_a)} \dots (3.28)$$

där $d_{y\infty}$ står för isdiametern efter lång tid.

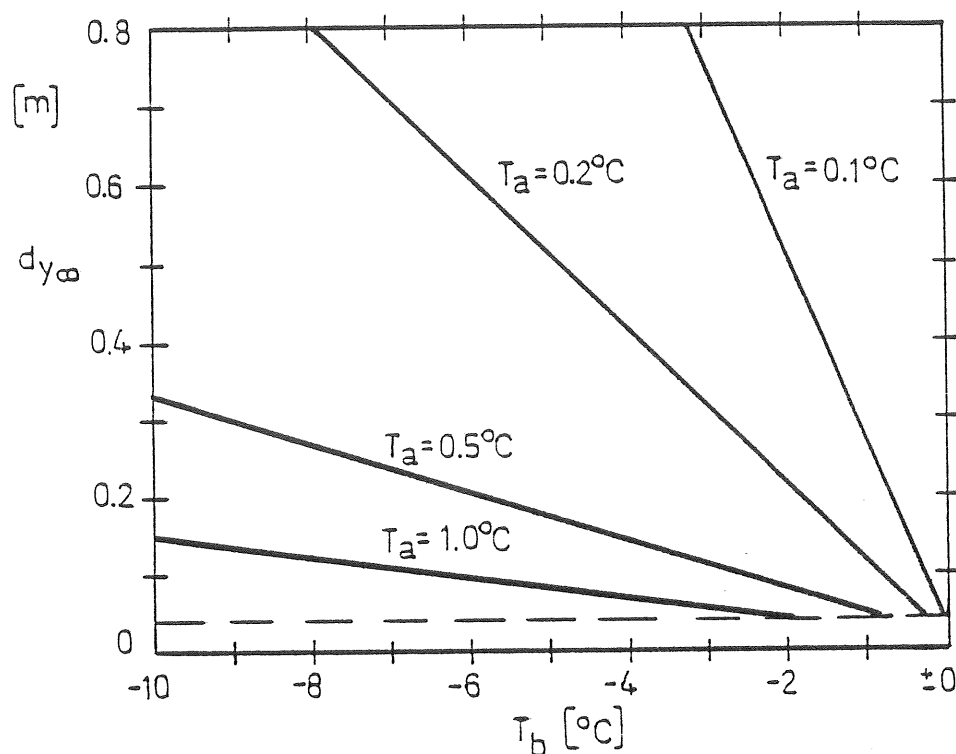
Representativa parametervärden vid vårt laboratorieförsök är följande:

$$\begin{aligned} d_i &= 0,0326 \text{ m} & \alpha_i &= 500 \\ d_s &= 0,040 \text{ m} & \lambda_{is} &= 2,24 \text{ W/m } ^\circ\text{C} \\ \lambda_v &= 0,36 \text{ W/m } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Detta ger $B = 4,8$ för vilket isdiametern $d_{y\infty}$ ges i fig. 3.4.

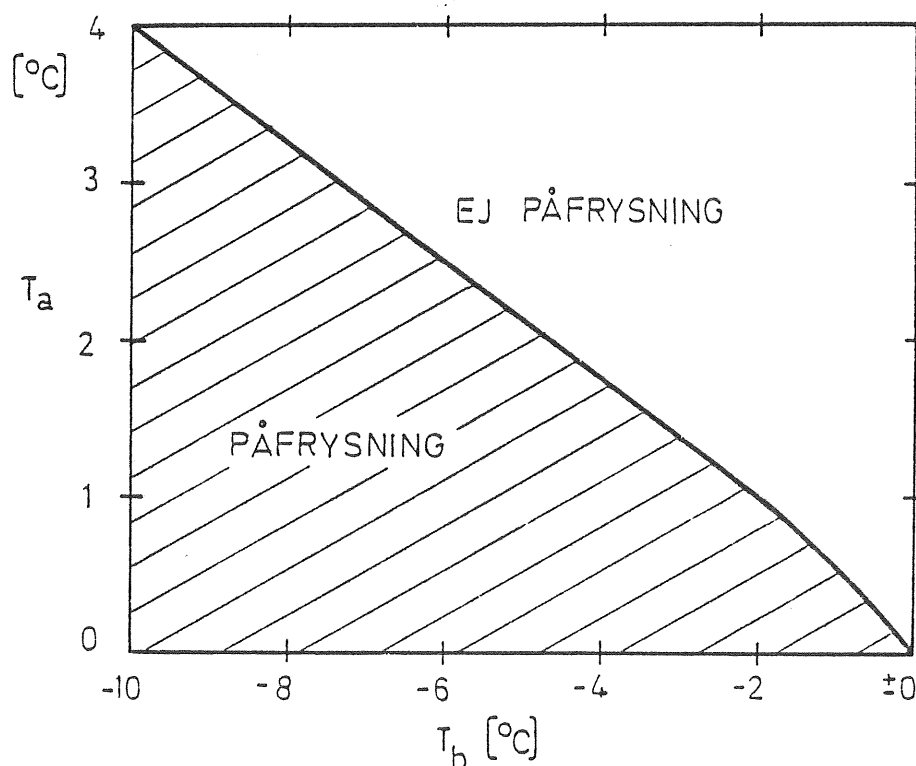
Villkoret för att ispåfrysning skall ske på slangen är att $d_{y\infty}$ överstiger slangens ytterdiameter d_s , i vårt fall 40 mm. Detta villkor kan uttryckas med hjälp av ekv. (3.28) enligt följande:

$$\left[\frac{(-T_b)}{f(T_a)} \right]_{\text{krit}} = \frac{d_s^{3/4}}{2\lambda_{is}} (B + \ln d_s) \dots (3.29)$$



Figur 3.4 Stationär isdiameter $d_{y\infty}$ vid frysning kring horisontell slang i fritt vatten. T_b är köldbärarvätskans temperatur och T_a omgivande vattens. Övriga parametervärden framgår av texten ovan.

Med data för vårt laboratorieförsök blir högerledet i ekv. (3.29) lika med 0,0309. Villkoren för ispåfrysning i detta fall illustreras i figur 3.5.

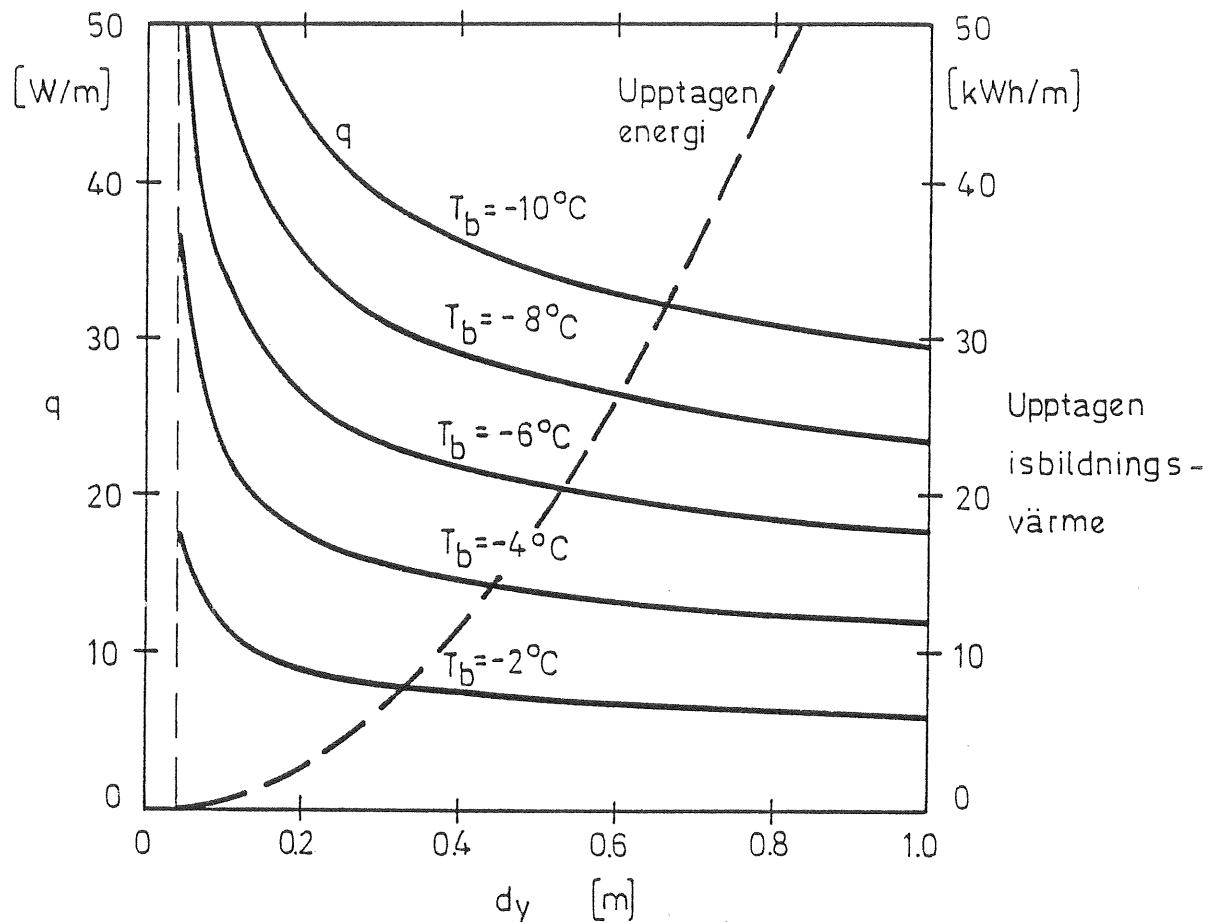


Figur 3.5 Villkor för ispåfrysning på en fri horisontell slang med data representativa för vårt laboratorieförsök

Värmefflödet till en ispåfrusen slang är i första hand en funktion av isdiametern d_y och brinetemperaturen T_b enligt ekv. (3.12) och (3.13). Med tidigare definition av konstanten B kan värmefflödet skrivas:

$$q = \frac{2\lambda_{is}\pi(-T_b)}{B + \ln d_y} \quad \dots (3.30)$$

Med $B = 4,8$ erhålles värmefflödet enligt fig. 3.6. I figuren har också lagts in den upptagna energimängden genom isbildning som funktion av diametern d_y .



Figur 3.6 Upptagen värmeeffekt för en ispåfrusen slang samt det upptagna isbildningsvärmets. Data representativa för vårt laboratorieförsök.

4 FÖRSÖKSANORDNING

4.1 Försöksuppställning, funktionskrav

Värmeupptagningsförmågan hos bottenförlagda slangar har uppmätts i en laboratoriebasäng på Chalmers tekniska högskola. Försöksanläggningen skall kunna efterlikna de förhållanden som råder i sjöar, främst vintertid, och i övrigt uppfylla följande krav:

- o Inga horisontella värmeflöden till basängen genom dess väggar (ger konvektionsströmmar)
- o Temperaturen i vattnet och under basängens botten skall kunna hållas konstant
- o Mycket noggrann temperaturhållning ($\pm 0,01^{\circ}\text{C}$) hos den värmeupptagande kylvätskan (brine)
- o Temperaturmätning i vatten och bottenmaterial med en noggrannhet av $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$
- o Mätning av värmeupptagning med en noggrannhet av $\pm 10\%$

Försöksutrustningens principiella utformning framgår av figur 4.1. Den centrala delen är basängen, som är placerad i V-sektionens klimatrum, där temperaturen kan styras inom $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ i intervallet $-30^{\circ}\text{C} - +15^{\circ}\text{C}$. Försöksslingan på vilken värmeupptagningsförmågan skall bestämmas utgöres av PEL-slang $\varnothing 40/32,6$. Slingan är utlagd på botten av basängen eller något nedgrävd i bottenmaterialet.

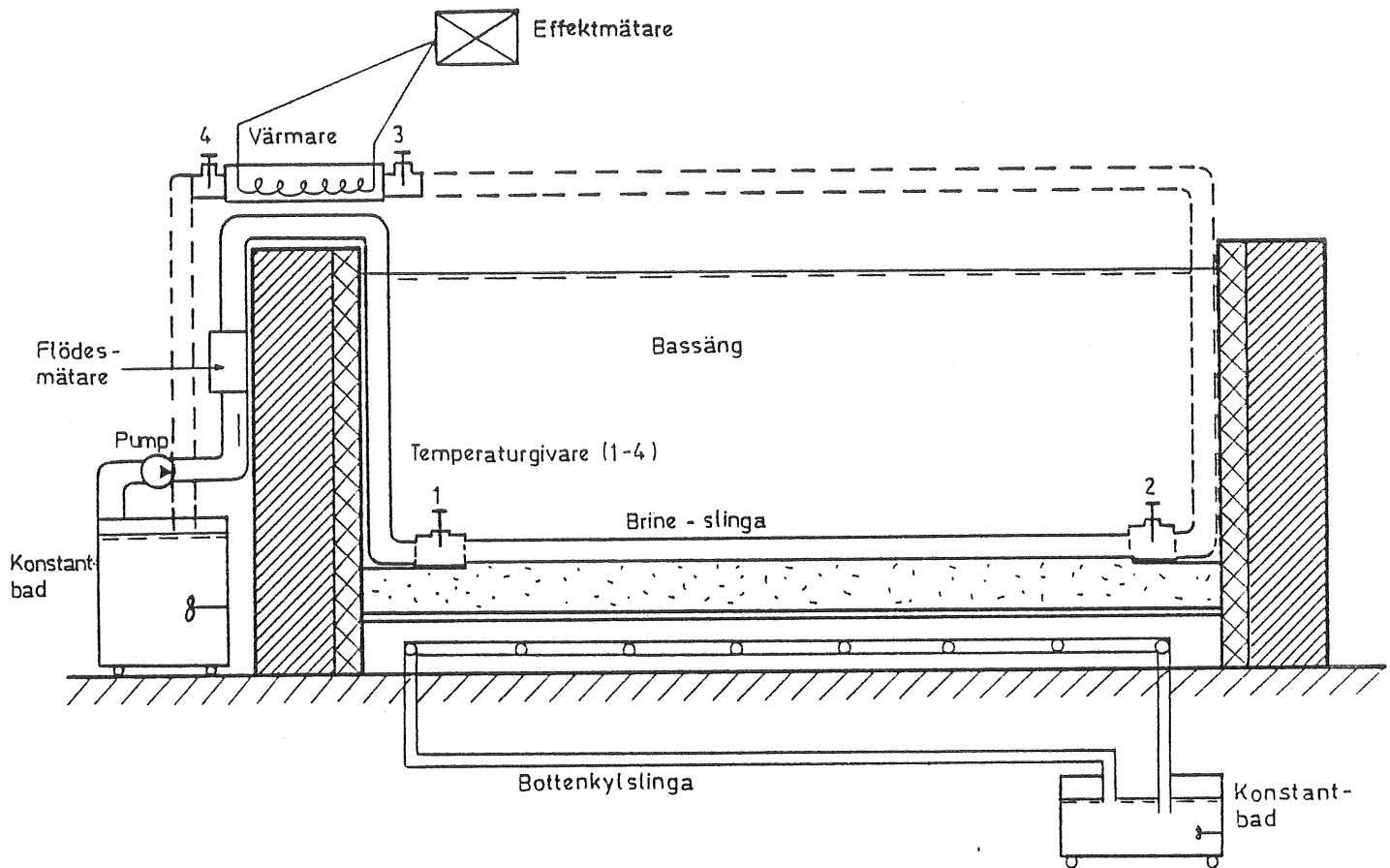
För att kunna mäta värmeupptagningen samt styra de yttre miljöbetingelserna finns temperaturregleringsutrustning, temperaturregistreringsutrustning, istjockleksmätare m.m. Försöksuppställningens olika delar beskrivs i detalj i följande avsnitt.

4.2 Bassäng

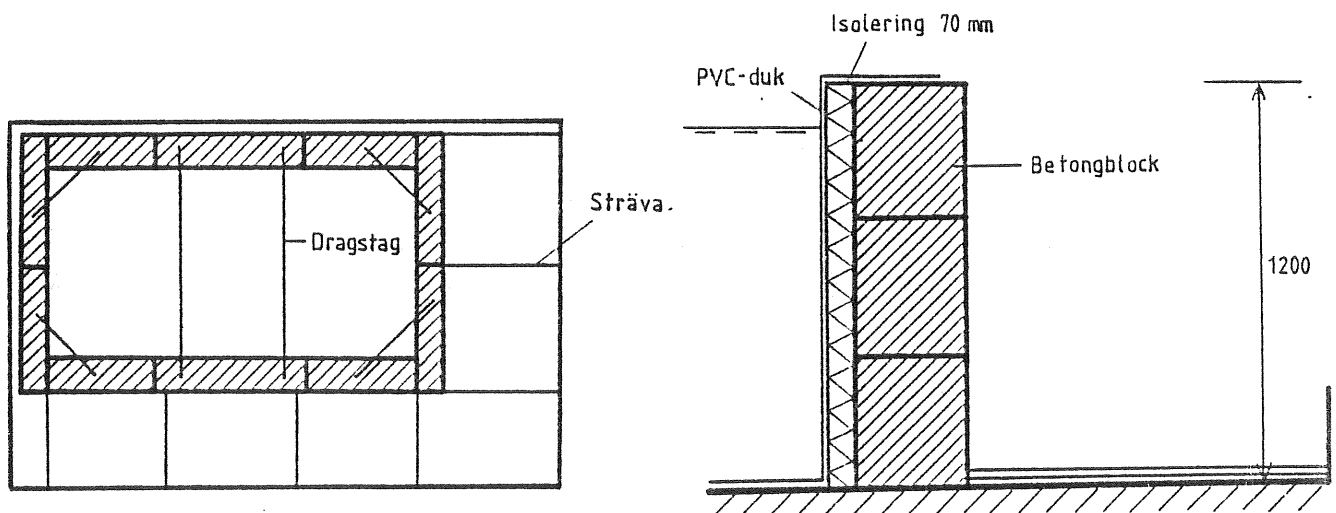
Bassängen är uppbyggd av betongblock med måtten $1850 \times 350 \times 400$ (längd $\times$ bredd $\times$ höjd). Dessa block har byggts samman till en bassäng med innermåtten 5600×3000 och djupet 1200 mm , fig. 4.2.

Betongblocken är invändigt isolerade med 70 mm styrolit. Med denna isolering erhålles ett värmeflöde av totalt 10 W genom bassängens väggar vid en temperaturdifferens av 1°C mellan vattnet och luften i rummet.

Som tätning mot vattnet är bassängen invändigt klädd med en plastpresenning (poolduk) av PVC. För att stabilisera mot glidning och stjälpning är bassängen försedd med strävor och dragband enligt figur 4.2.



Figur 4.1 Principskiss av försöksutrustning för bestämning av värmeupptagning hos en bottenförlagd kylslinga.

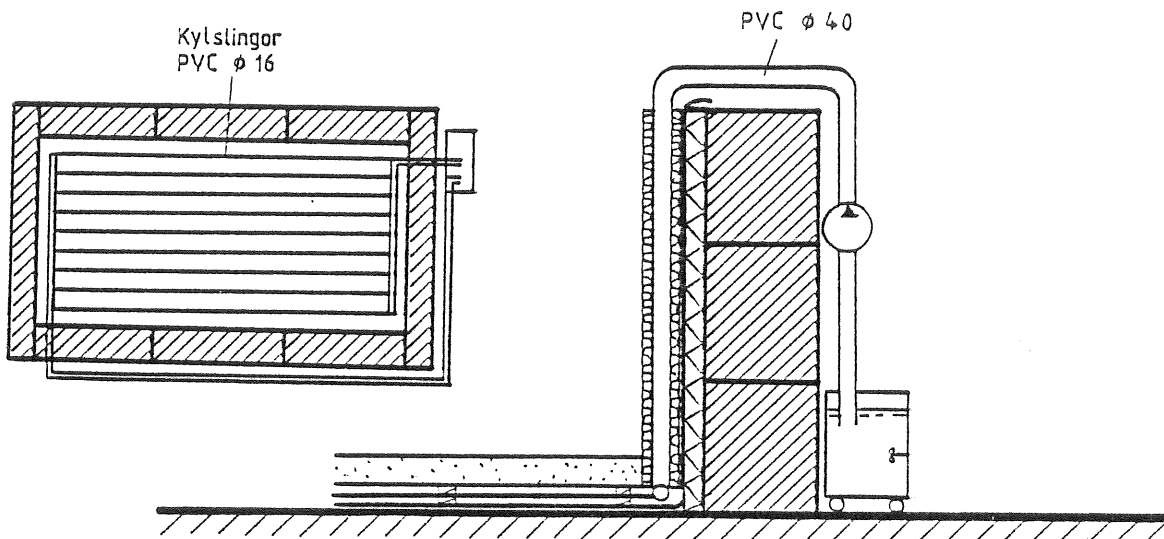


Figur 4.2 Försöksbassängens uppbyggnad.

4.3 Temperaturreglering av bottenmaterialet

På botten av bassängen är uppbyggt en blindbotten på vilken ett lager av sand resp. torv lagts ut. Härigenom kan olika bottenförhållanden i en sjö simuleras. Temperaturen i bottenskiktet och värmeflödet från botten till ovan liggande vatten regleras med hjälp av ett slutet rörsystem, figur 4.3.

Rörsystemet utgöres av 8 st tryckrör av PVC $\varnothing 16$ mm med till- och frånledningar av tryckrör $\varnothing 40$ mm. De vertikala stigarrören från blindbotten är isolerade från bassängvattnet.



Figur 4.3 Uppbyggnad av bassängens botten. Temperaturreglering med slingor under blindbotten

Temperaturen i det 22 l stora systemet regleras med ett 12 liters konstantbad. Värmeflödet från betonggolvet under bassängen uppgick till ca 400 W under försökets gång. En kontinuerlig kyleffekt av 300-360 W måste därför tillföras för att ett önskvärt värmeflöde till bassängvattnet av 40-100 W ($2-5 \text{ W/m}^2$) skall kunna upprätthållas. Värmeflöden av denna storlek är typiska för grunda partier av sjöar under vintern.

4.4 Brineslingan

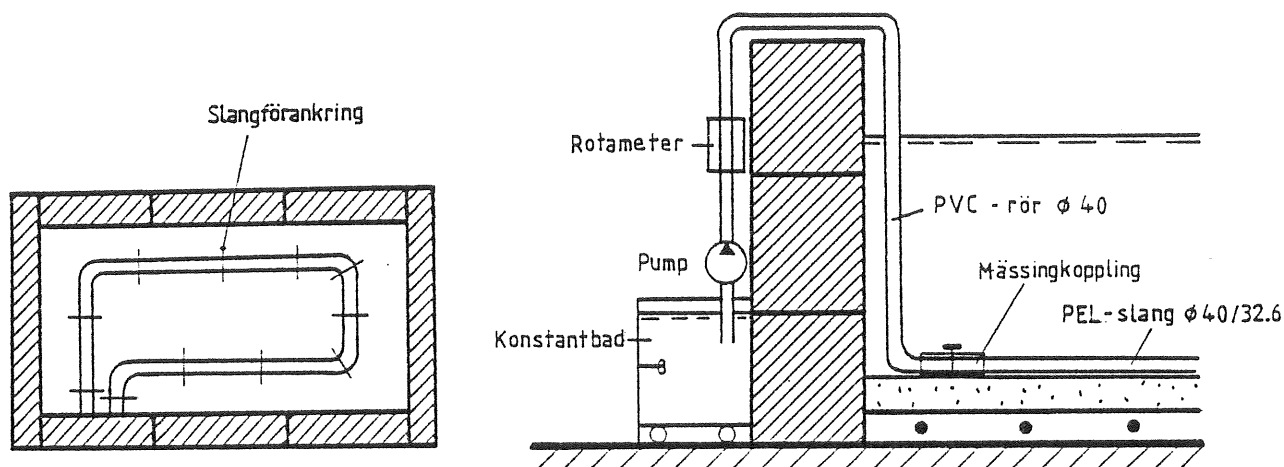
Den värmeupptagande slingan utgöres av en 10,7 m lång PEL-slang $\varnothing 40/32,6$. PEL-slangen är utlagd enligt fig. 4.4. I början och slutet är slangen ansluten till T-kopplingar av mässing med insticksrör för temperaturgivare. Till- och frånledningen utgöres av tryckrör i PVC $\varnothing 40$.

På tilloppssidan av slangen är en cirkulationspump och en flödesmätare av typ rotameter monterad. På frånledningen finns en värmepatron som utnyttjas för bestämning av den upptagna värmeeffekten. Temperatur-

givare för mätning av brinetemperaturen finns placerade vid PEL-slangens ändar samt före och efter värmepatronen. Tillloppstemperaturen till PEL-slangen regleras av ett 22 l konstantbad.

För att hindra slangen att flyta upp i samband med is-påfrysning är den fästsurrad vid botten i 11 punkter enligt figur 4.4.

Som cirkulerande köldmedium i brineslingan användes en lösning av 27% (viktsprocent) teknisk etylenglykol (Esso Glykol). Blandningen har följande termodynamiska och hydrauliska egenskaper:



Figur 4.4 Utläggning och montage av brine-slingan i bassängen

Temperatur	Densitet	Viskositet	Värme- kapacitet	Värme- konduktivitet
T °C	ρ kg/m ³	μ cP	c J/g °C	λ
+10	1038	2,7	3,78	0,52
+ 5	1040	3,2	3,77	0,51
± 0	1041	3,7	3,76	0,50
- 5	1042	4,3		0,49

Med cirkulationspumpen kan ett maximalt flöde av 0,37 l/s uppnås. Detta motsvarar ett Reynolds tal av 3360 vid temperaturen -5°C och 3905 vid ±0°C. Flödet bör vara så stort att strömningen är turbulent så att osäkerheter beträffande det inre värmeövergångstalet, se figur 3.3, inte skall spela in. Samtidigt bör flödet vara så litet att temperaturdifferensen mellan slangens ändar blir större än 0,1°C. Med flödet 0,37 l/s blir temperaturdifferensen 0,14°C vid en värmeupptagning av 20 W/m.

4.5 Temperaturreglering

För att åstadkomma de önskade temperaturerna hos bassängvatten, brinelösning och sediment har vi gjort på följande sätt:

Bassängvatten

Bassängsvattnets temperatur har reglerats i intervallet $0,5 - 8^{\circ}\text{C}$ med hjälp av klimatrummets temperaturstyrning. Efter kylning av vattnet under omrörning till önskad temperatur har lufttemperaturen ställts in på den aktuella nivån. Temperaturen i bassängen är då konstant. Under försökets gång bidrar värmeflödet från botten till att öka temperaturen närmast botten något medan huvuddelen av vattenmassan har konstant temperatur.

Brinelösningen

Temperaturregleringen av brinelösningen sker med hjälp av ett 22 liters konstantbad av fabrikat Hetofrig CB5. Konstantbadet har en kyleffekt av 300-500 W och dess temperatur kan regleras till ett konstant värde inom $\pm 1/100^{\circ}\text{C}$. I vissa fall har uppvärmningen i den yttre slingan och värmepatronen överstigit badets kylkapacitet. Ytterligare ett konstantbad har då utnyttjats så att den totala kyleffekten uppgått till 600-800 W.

Sedimentuppvärmning

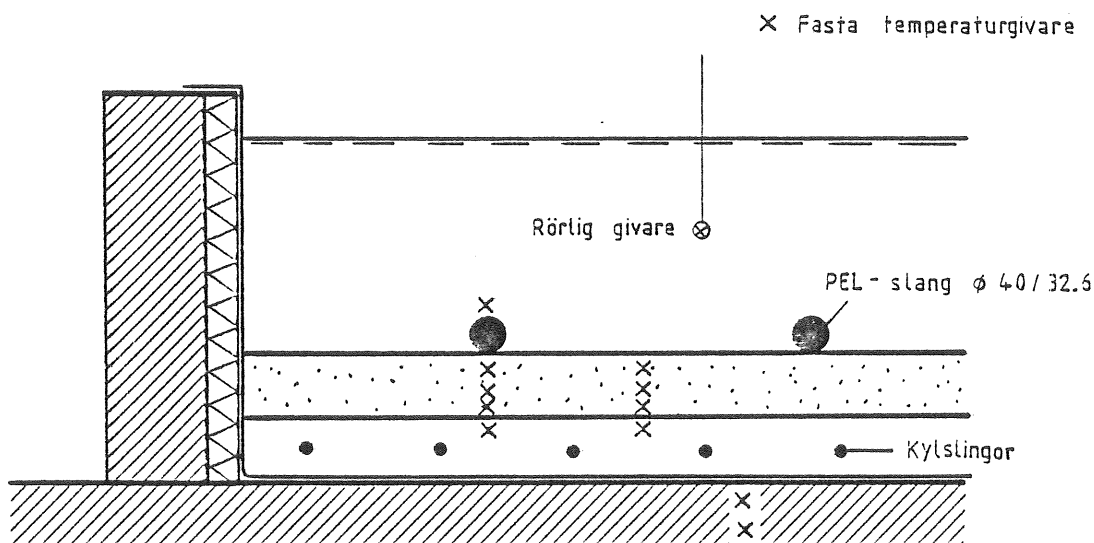
För att åstadkomma ett reglerat värmeflöde genom sedimentet (sand resp. torv) har ett slutet cirkulationssystem enl. kap. 4.2 anordnats under sedimenten. Därigenom kan vattentemperaturen på vattnet under blindbotten styras med hjälp av ett konstantbad på liknande sätt som vid brine-lösningen.

4.6 Temperaturmätning

Temperaturen i anläggningen mäts i 11 fasta och en rörlig mätpunkt, se figur 4.5. Med hjälp av den rörliga temperaturgivaren kan temperaturen i bassängsvattnet mätas i ett stort antal punkter.

Temperaturen i sanden mäts med sex givare. Tre punkter ligger mitt under slangen och tre punkter mitt emellan slangarna. En temperaturgivare ligger alldeles under blindbotten och en givare är fäst på slangens ytteryta.

Två givare finns nerborrade i betongplattan under bassängen för att mäta värmeflödet från omgivande mark och byggnad.



Figur 4.5 Placering av temperaturmätpunkter

Temperaturgivarna utgöres av halvledarelement av typ AD590 vilka monterats på en liten mässingplatta och tätats mot omgivande vatten med silikongummi. Givarna är individuellt kalibrerade mot en referenstermometer av typ HP 2804A och anslutna till en omkopplingsenhet. Avläsning görs med ett digitalt instrument av typ Schlumberger Solartron 7055. Noggrannheten i temperaturmätningen kan uppskattas till $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

4.7 Värmefflödesmätare

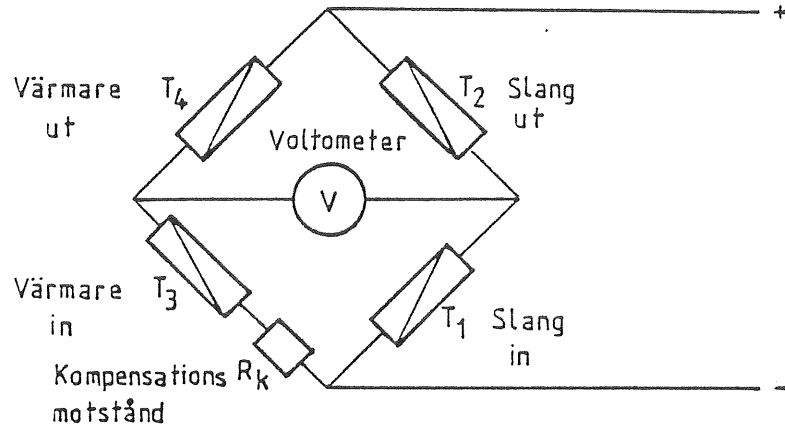
Den upptagna värmeeffekten mätes med två olika metoder. Dels bestämmes vätskeflödet och temperaturskillnaden över slingan och dels värmes flödet med hjälp av elpatroner (se figur 4.1) så att temperaturskillnaden över slingan blir lika stor som över värmaren varvid den tillförda eleffekten blir lika stor som den upptagna värmeeffekten.

Flödet mätes med hjälp av en rotameter vilken kalibrerats vid olika temperaturer med hjälp av mätglas och stoppur.

Temperaturmätningen i slingan ställer höga krav på noggrannhet. Som mätgivare användes termistorer, vilka utvalts för att vara så lika varandra som möjligt. Givarna har kalibrerats före och efter varje mätserie. Den relativa noggrannheten i kalibreringen torde vara ca $\pm 1/100^{\circ}\text{C}$.

Temperaturgivarna är monterade i dykrör som kapats så att termistorn sitter fritt i vätskeflödet.

Vid användning av jämförelsemetoden kopplas de fyra termistorerna i en bryggkoppling enligt figur 4.6. Ett variabelt motstånd R kopplas i serie med termistor 3 för att kompensera för olikheterna i termistorernas resistans. Motståndet kalibreras så att bryggan



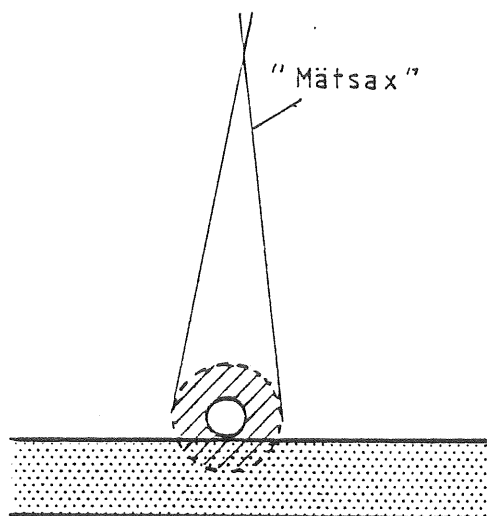
Figur 4.6 Kopplingsschema för termistorerna 1-4 vid jämförelse av uppvärmningen i slangen och i värmaren

är balanserad när alla givare har samma temperatur. Kalibrering görs vid olika temperaturer. Vid mätning justeras effekten hos värmepatronen tills bryggan är balanserad. Temperaturskillnaden mellan 3 och 4 resp. 1 och 2 är då lika inom en avvikelse av $0,01^{\circ}\text{C}$ med hänsyn till temperatursvängningar under kalibreringen.

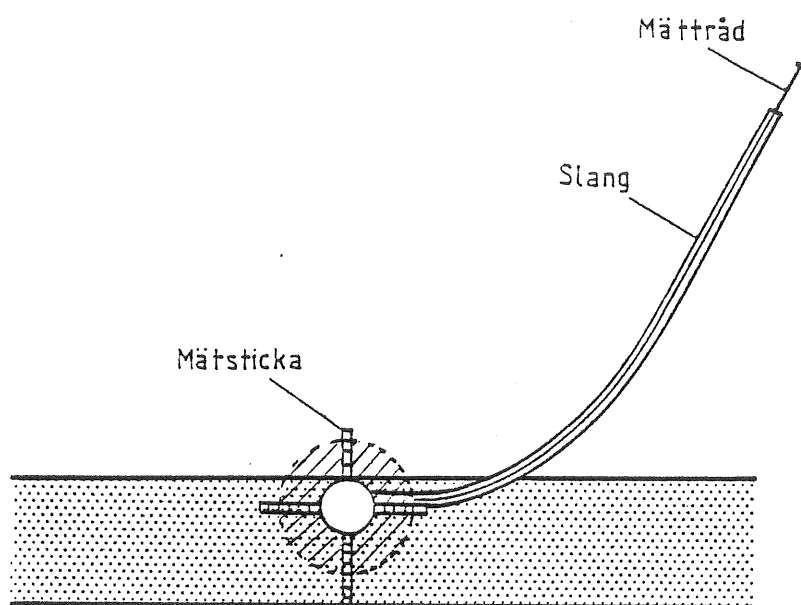
Genom att olika kalibreringsförfaranden användes kan de båda metoderna anses vara oberoende av varandra. Tillförlitligheten hos resultaten blir därför bättre än om en metod användes.

4.8 Istjockleksmätare

Istillväxten på slangen bestämdes vid den första mätserien, då slangen var utlagd ovanpå botten, med hjälp av en lång saxformad mätsticka enligt fig. 4.7. Vid försöken med slangen nere i botten användes två fasta mätpunkter där en styv tråd i en plastslang användes som mätsticka enligt figur 4.8.



Figur 4.7 Mätning av is-diameter med "mätsax"



Figur 4.8 Mätning av ispåväxt med slang och tråd

5. FÖRSÖKSFÖRFARANDE OCH UTVÄRDERING

5.1 Försöksserier

Tre försöksserier har genomförts, vilka avser att täcka in vanligen förekommande bottenförhållanden och vintertemperaturer i sjöar. Vid den första försöksserien har slangen legat på en slät sandbotten, vid den andra nedbäddad i sand till hjässan och vid den tredje nedsänkt 10 cm i vattenmättad torv.

För varje försöksserie har effektupptagning och ispåväxt uppmätts vid olika vattentemperatur och brinetemperatur enligt följande tabell:

Tabell 5.1 Översikt över försöksserier

Försöks- serie nr	Vatten- temp. °C	Brine- temp. °C
1	5.6	+1 - +4
1 } Slang på	4.0	-1,5 - +3
1 } sand-	3.3	-3 - +2
1 } botten	2.0	-3 - +1
1 }	1.0	-4.5 - +0.5
1 } Nedbäddad	0.5	-4.5 - ±0
2 } till hjäs-	5	-1 - +4
2 } san i	4	-5 - +3
2 } sand	2	-5 - +1
2 } Nedsänkt	0.5	-5 - -0.5
3 } 10 cm i	2.5	-3.5 - +1
3 } torv	1.0	-2.3 - ±0

Bottenmaterialalets temperatur, och därmed värmeflödet till ovanliggande vatten, har ej kunnat varieras beroende på att tidsåtgången för detta blir för lång. I stället har i de flesta försöken en konstant temperaturskillnad av 0,5°C hållits mellan bassängens vatten och vattnet under blindbotten. Detta svarar mot ett värmeflöde av ca 2 W/m².

5.2 Mätförfarande och utvärdering

För var och en av försökspunkterna har upptagen värmeeffekt uppmätts efter det att ett stationärt tillstånd inträtt. Med slangen liggande på botten har inställningstiden varit någon timme. I de övriga fallen med nedbäddad slang har inställningstiden varit så lång att endast ett försök per dygn kunnat genomföras. I de fall då ispåfrysning skett har tiden för att uppnå stationärt tillstånd i vissa fall varit ännu längre och avläsning har då skett en gång per dygn.

Varje mätning har omfattat följande parametrar:

- o Temperatur i fasta mätpunkter 1-11, se fig. 4.6
- o Temperaturprofil i bassängvattnet mellan slingorna
- o Temperatur hos brinevätskan, punkt 1
- o Temperaturdifferens över slingan, ΔT_{12}
- o Flödet av brinevätska, Q_b
- o Tillförd elektrisk spänning, u , till värmare för balans i bryggkopplingen
- o Istjocklek

Tillförd effekt till värmaren beräknas med Ohms lag, $P = u^2/R$, där R är värmarens resistans.

Utgående från temperaturdifferensen beräknas den upptagna värmeeffekten enligt följande:

$$q = \rho c \cdot Q_b \cdot \Delta T_{12} / L \quad \dots\dots (5.1)$$

där ρc är brinevätskans värmekapacitet per volymsenhet och Q_b och ΔT_{12} är flödet och temperaturdifferensen. L är slanglängden mellan mätpunkterna.

Effektmätning med hjälp av värmaren har pga begränsad kylkapacitet hos konstantbadet endast kunnat göras upp till en värmeupptagning motsvarande ca 30 W/m. Effekter utöver denna nivå har bestämts enbart från temperaturdifferensmätningen.

5.3 Felanalys

Det totala felet i den bestämda värmeupptagningen blir sammansatt av alla ingående delfel i de formler som används för att beräkna värmeflödet. För temperaturdifferensmetoden erhålles genom logaritmering och differentiering av ekv. 5.1 följande uttryck för det relativa felet:

$$\left| \frac{dq}{q} \right| = \frac{d(\rho c)}{\rho c} + \frac{dQ_b}{Q_b} + \frac{d(\Delta T_{12})}{\Delta T_{12}} + \frac{dL}{L} \quad \dots\dots (5.2)$$

Felet i värmekapacitativiteten uppskattas till $\pm 1,5\%$ och i brineflödet till $\pm 5\%$. Felet i temperaturdifferensen består dels av ett kalibreringsfel som tidigare angivits till $\pm 0,01^\circ\text{C}$ och dels av ett avläsningsfel pga svängningar under avläsningen. Avläsningsfelet uppskattas till $\pm 0,005^\circ\text{C}$. Fel i temperaturdifferensmätningen kan också uppkomma genom ojämn blandning i slangen, skillnader i egenuppvärmning hos termistorerna, olika värmeledning genom fästansordningarna för termistorerna samt genom avläsningsinstrumentets onoggrannhet. Dessa fel har i möjligaste mån sökts elimineras och torde

vara försumbara. Felet i mätsträckans längd kan också inkludera den inverkan som erhålles pga att en sträcka av 5 cm närmast mätpunkten består av en mässingkopp-ling som har bättre värmeupptagning än motsvarande slangsträcka. Felet härav uppgår till högst 1%. Insättes dessa värden i ekv. (5.2) erhålles följande feluppskattning:

$$\left| \frac{dq}{q} \right| = \frac{7,5}{100} + \frac{0.015}{\Delta T_{12}}$$

Det relativa felets storlek beror således på ΔT_{12} och därmed på det upptagna värmefflödet. Vid en värmeupptagning av 40 W/m är felet $\pm 12\%$, vid 20 W/m $\pm 17\%$, vid 10 W/m $\pm 26\%$ och vid 5 W/m $\pm 45\%$.

I den andra metoden förutsättes att den tillförda elektriska effekten till värmaren är lika med den upptagna värmeeffekten i slingan. Felet vid bestämningen av värmeupptagningen per längdmeter slang blir då:

$$\left| \frac{dq}{q} \right| = \frac{dP}{P} + \frac{dL}{L} \quad \dots\dots (5.3)$$

där den sista termen har samma värde som tidigare.

Felet i bestämning av upptagen effekt beror dels på hur väl man lyckas balansera bryggan att ge lika stor temperaturdifferens över värmaren som över slingan och dels på noggrannheten i effektmätningen. Detta kan tecknas

$$\begin{aligned} dP &= \frac{\partial P}{\partial \Delta T_O} \cdot d\Delta T_O + \frac{\partial P}{\partial U} dU + \frac{\partial P}{\partial R} dR = \\ &= \rho c Q_b \cdot d\Delta T_O + 2 \frac{U}{R} dU + \left(\frac{U}{R} \right)^2 \cdot dR \quad \dots\dots (5.4) \end{aligned}$$

där ΔT_O är det temperaturfel som kvarstår vid balansering av bryggan. Detta består i sin tur av ett kalibreringsfel som tidigare angivits till $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Felet i spänningsmätningen uppgår till $\pm 0,7\%$ och i resistensbestämningen $\pm 0,05\%$. Representativa värden för övriga parametrar är $Q_b = 0,35$ l/s, $U = 100$ V och $R = 50\Omega$. Detta ger följande sammanlagda fel:

$$\left| \frac{dq}{q} \right| = \frac{24}{P} + \frac{1}{100} = \frac{2,2}{q} + \frac{1}{100}$$

Felet beror även här på det upptagna värmefflödet och uppgår vid $q = 40$ W/m till $\pm 7\%$, vid 20 W/m till $\pm 12\%$, vid 10 W/m till $\pm 23\%$ och vid 5 W/m till $\pm 45\%$.

Det beräknade felet blir således något mindre än för metoden med temperaturdifferensmätning. Genom att utnyttja båda metoderna och ta medelvärde av deras resultat torde noggrannheten i den slutliga bestämningen bli ytterligare något bättre.

6. FÖRSÖKSRESULTAT

6.1 Allmänt

Resultaten från varje försöksserie redovisas separat i kap. 6.2. I kap. 6.3 görs en sammanställning av de olika fallen och jämförelse med teoretiskt beräknad värmeupptagning för en fritt upphängd slang. Isbildningen kring slangarna beskrivs närmare i kap. 6.4.

Varje försöksserie omfattar mätningar vid konstant omgivningstemperatur och presenteras i diagramform med kommenterande text.

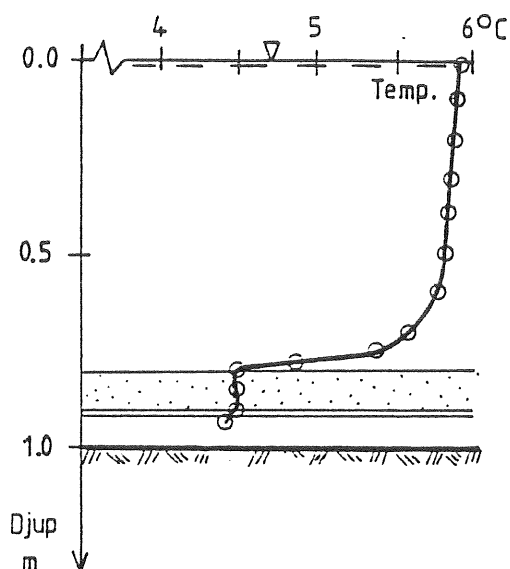
Det första diagrammet visar en representativ temperaturprofil genom bassängvattnet och bottenmaterialet mitt emellan slangarna. Variationer i temperaturen under försökets gång redovisas i texten.

Det andra diagrammet redovisar den uppmätta värmeupptagningen hos slangen som funktion av temperaturskillnaden mellan bassängvattnet och brinevätskan. Brinetemperaturen bestäms därvid som medelvärdet av in- och utgående brinetemperatur i slangen. Vattnets temperatur mäts i höjd med slangens centrum mitt emellan slangarna, då slangen ligger på botten. Då slangen är nerbäddad i botten har vattentemperaturen vid botten mitt emellan slangarna använts för beräkning av temperaturskillnaden.

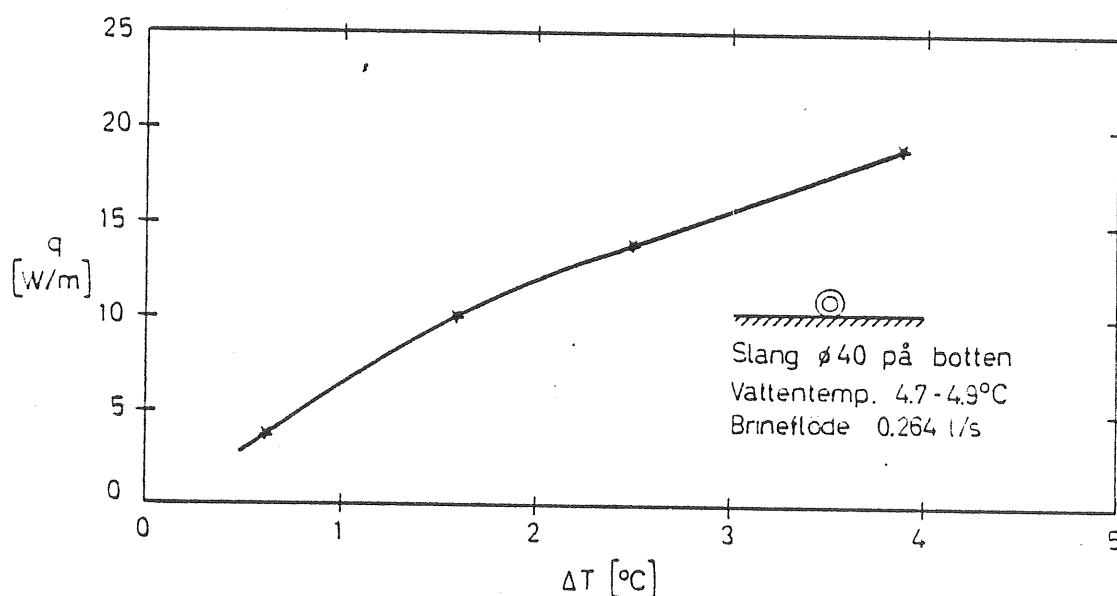
I förekommande fall redovisas också slutvärdet av tjockleken hos den is som utbildas kring slangen som funktion av brinetemperaturen. Istjockleken bestäms som medelvärdet från två mätpunkter vid slangens början och slut.

6.2 Värmeupptagning och ispåväxt för varje mätserie

6.2.1 Slang på botten. Vattentemperatur $4,8^{\circ}\text{C}$

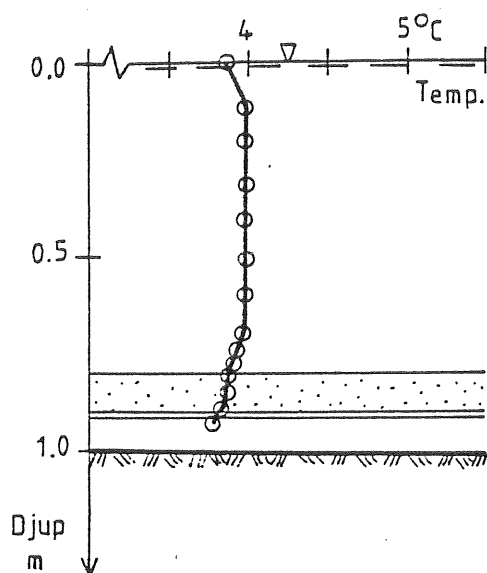


Temperaturen i huvuddelen av bassängens vatten var under försöket ca $5,75^{\circ}\text{C}$. Värmeuttaget medförde att temperaturen vid botten sjönk till ca $4,5^{\circ}\text{C}$ och att en stabil temperaturskiktning bildades närmast botten. Temperaturen två centimeter över botten (centrumhöjd slangen) pendlade under försöket mellan $4,7$ och $4,9^{\circ}\text{C}$. Inget värmeflöde tillfördes under försöket från botten.

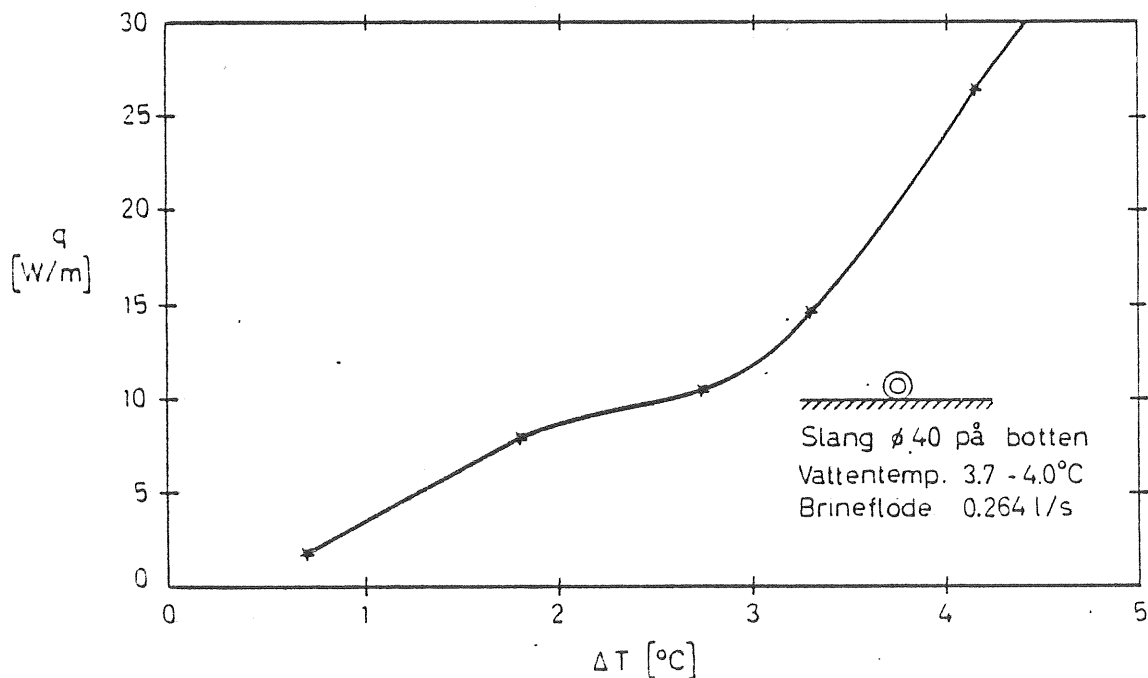


Effektupptagningen ökar långsamt med sänkt brinetemperatur. Försöket avbröts vid en brinetemperatur av $+0,75^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 4,25^{\circ}\text{C}$) då värmeupptagningen uppgick till 20 W/m . Trögheten i effektupptagning i detta temperaturintervall beror på att vattentemperaturen ligger nära vattnets densitetsmaximum, varför konvektionen kring den nerkylda slangen är svag.

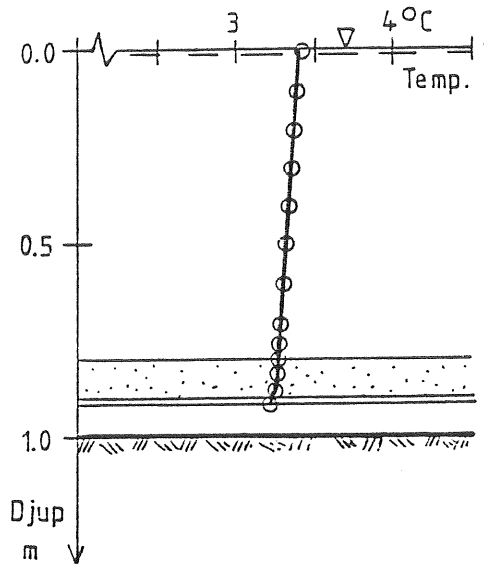
6.2.2 Slang på botten. Vattentemperatur +3,8°C



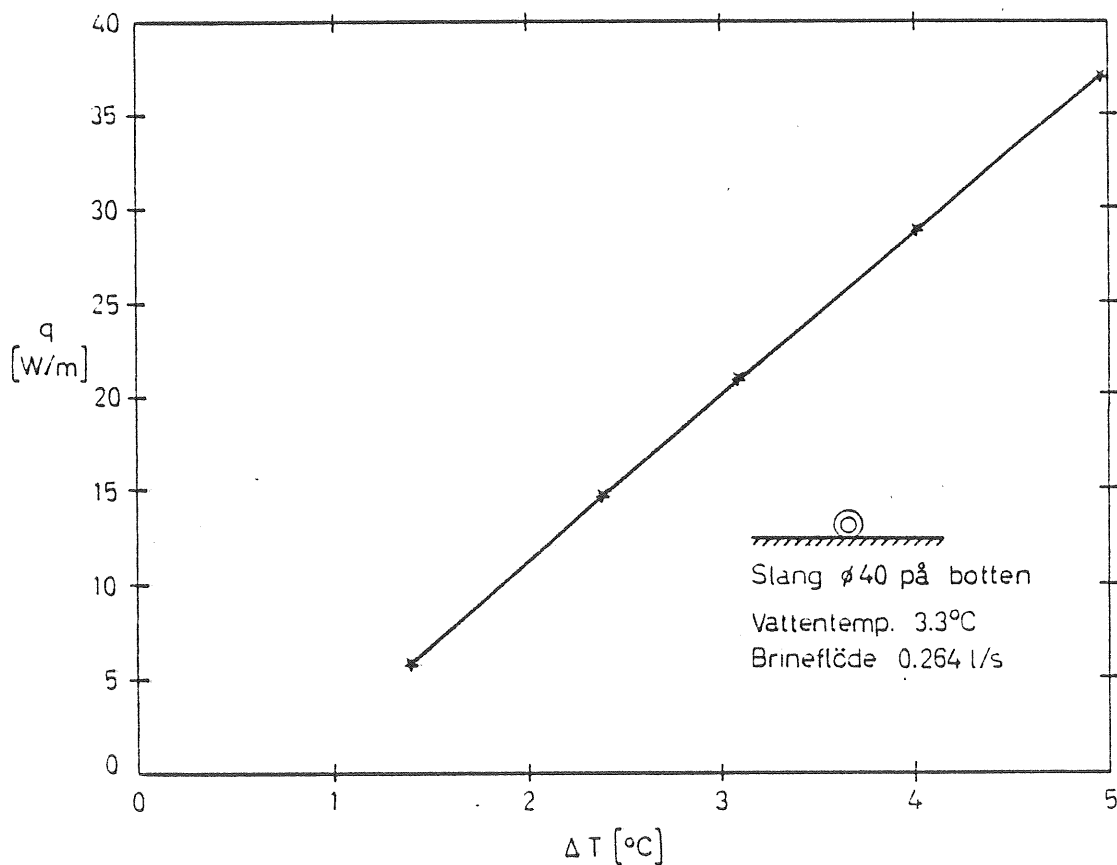
Huvuddelen av vattenmassan i bassängen höll under försöket en temperatur av ca 4°C. Inget värmefflöde tillfördes från botten. En liten sänkning av temperaturen vid botten kunde registreras under värmeuttag. Temperaturen två centimeter över botten (centrumhöjd slang) kom därför att pendla mellan 3,7 och 4,0°C.



Effektupptagningen ökar till en början långsamt med sänkt brinetemperatur liksom i fall 6.2.1. När brinetemperaturen sänks till ±0°C och därunder ökar effektupptagningen kraftigt. Detta kan tolkas så att konvektionen till att börja med är svag, men ökar kraftigt då temperaturen på slangens utsida sjunkit till under 3°C.

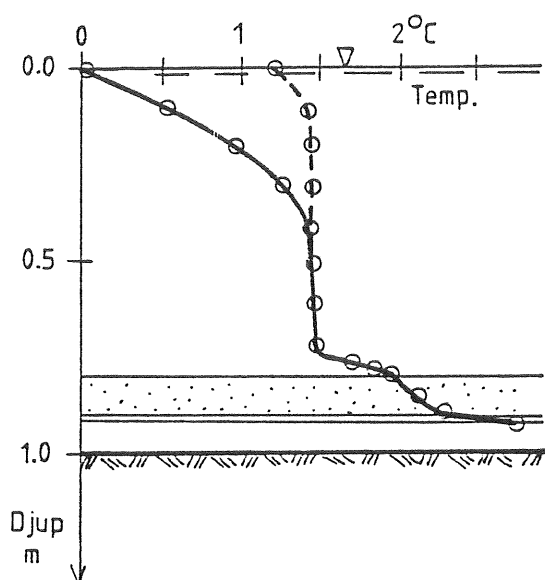
6.2.3 Slang på botten. Vattentemperatur $+3,3^{\circ}\text{C}$ 

Bassängens vattentemperatur hölls under försöket mellan $3,2$ och $3,5^{\circ}\text{C}$ två centimeter över botten (centrumhöjd slang). Inget värmefflöde tillfördes från botten.

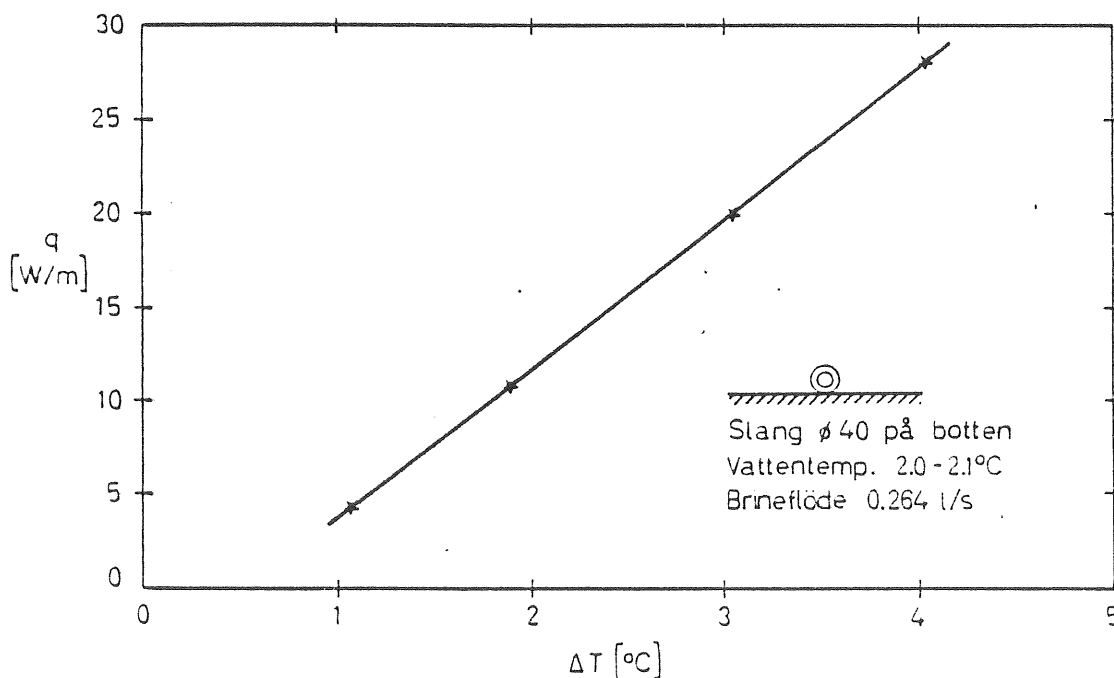


Effektupptagningen ökar kraftigt och i stort sett linjärt med sänkt brinetemperatur för $\Delta T > 1,5^{\circ}\text{C}$. Därunder är ökningen långsammare.

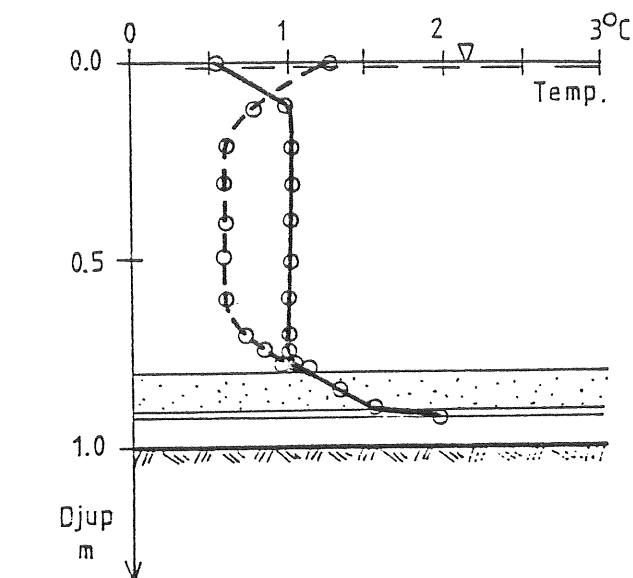
Vid en temperaturdifferens av 4°C upptas en effekt av 28 W/m jämfört med 23 W/m vid vattentemperaturen $+3,8^{\circ}\text{C}$.

6.2.4 Slang på botten. Vattentemperatur $+2,0^{\circ}\text{C}$ 

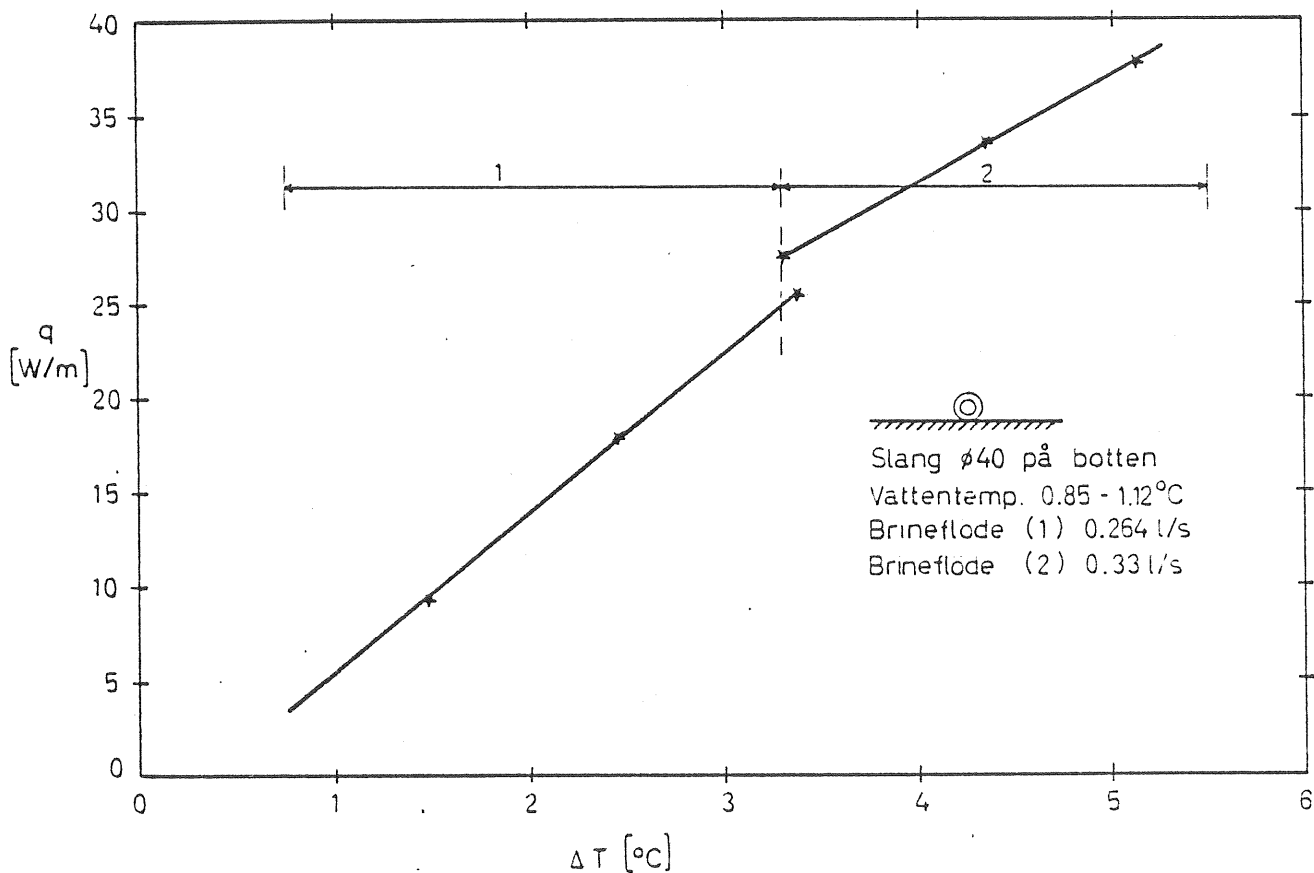
Huvuddelen av bassängens vatten hölls under försöket vid $1,5^{\circ}\text{C}$. Några centimeter över botten börjar temperaturen stiga på grund av värmeflödet (ca 3 W/m^2) från sedimenten. Temperaturen två centimeter över botten (centrumhöjd slang) pendlade mellan $+1,9$ och $+2,1^{\circ}\text{C}$. Närmast ytan sjönk temperaturen under försökets gång på grund av att temperaturen i rummet hölls låg.



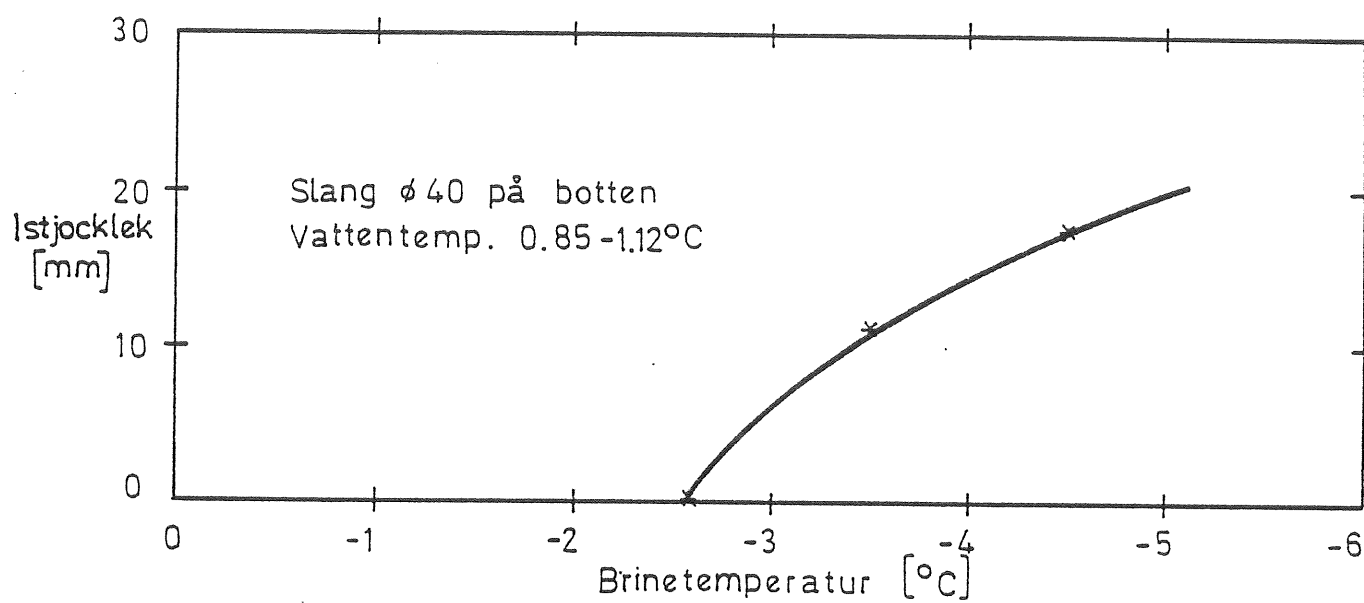
Effektupptagningen ökar snabbt med sänkt brinetemperatur och följer i stort sett samma kurva som vid vattentemperaturen $+3,3^{\circ}\text{C}$. Även i detta fall förmärks en viss "tröghet i starten".

6.2.5 Slang på botten. Vattentemperatur $+1,0^{\circ}\text{C}$.

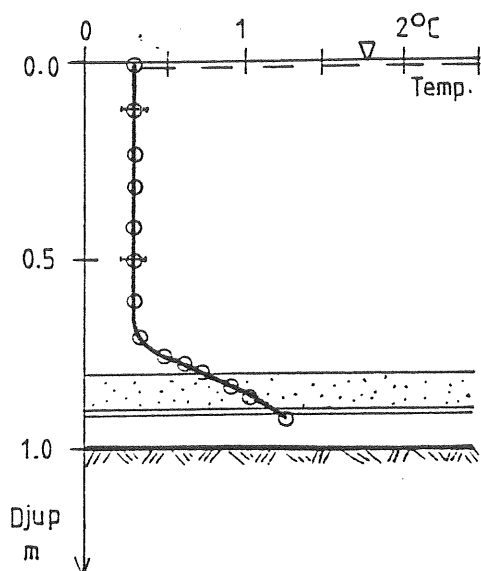
Bassängens vatten varierade under försöket i temperatur mellan $0,5$ och $1,0^{\circ}\text{C}$. I nivå med slangen har dock variationen varit mindre, eller ca $0,8-1,1^{\circ}\text{C}$. Variationen berodde främst på att försöket tog lång tid, vilket medförde att värmeuttaget ur bassängen måste ersättas från ytan.



Effektupptagningen ökar på likartat sätt som i försöken vid $+2$ och $+3^{\circ}\text{C}$. Vid brinetemperaturen -2°C uppstod svängningar i värmeupptagningen, troligen orsakade av tillfälliga övergångar till laminär strömning i delar av slangen. Svängningarna försvann efter höjning av brineflödet. Ökningen av brineflödet orsakade även en höjning av effektupptagningen med ca 10%.

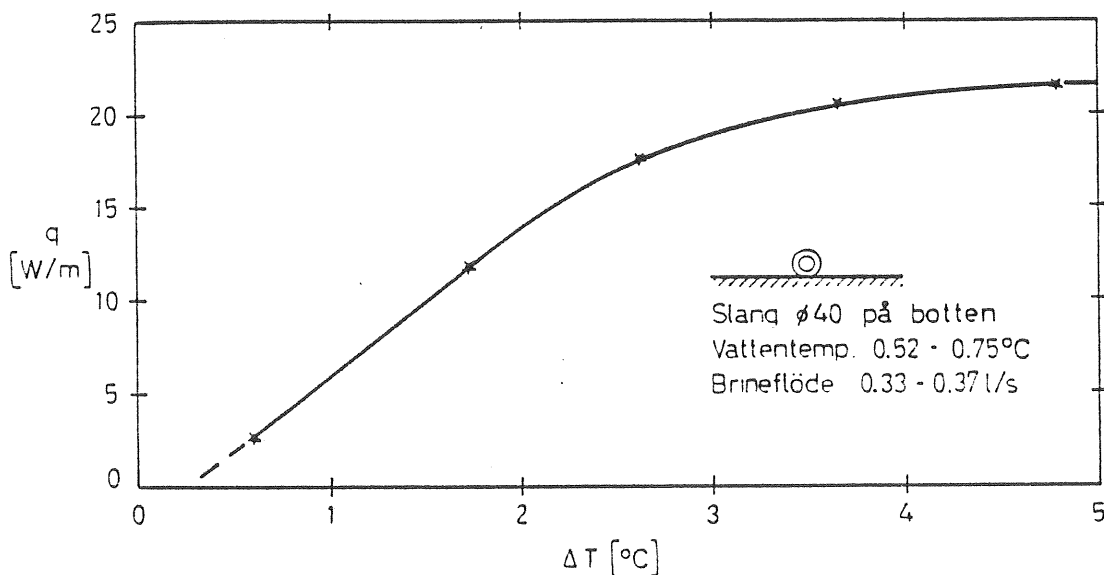


Is börjar att bildas på slangen vid en brinetemperatur av $-2,7^{\circ}\text{C}$. Vid den lägsta provade brinetemperaturen, $-4,5^{\circ}\text{C}$, hade isen tillväxt till 17 mm i tjocklek.

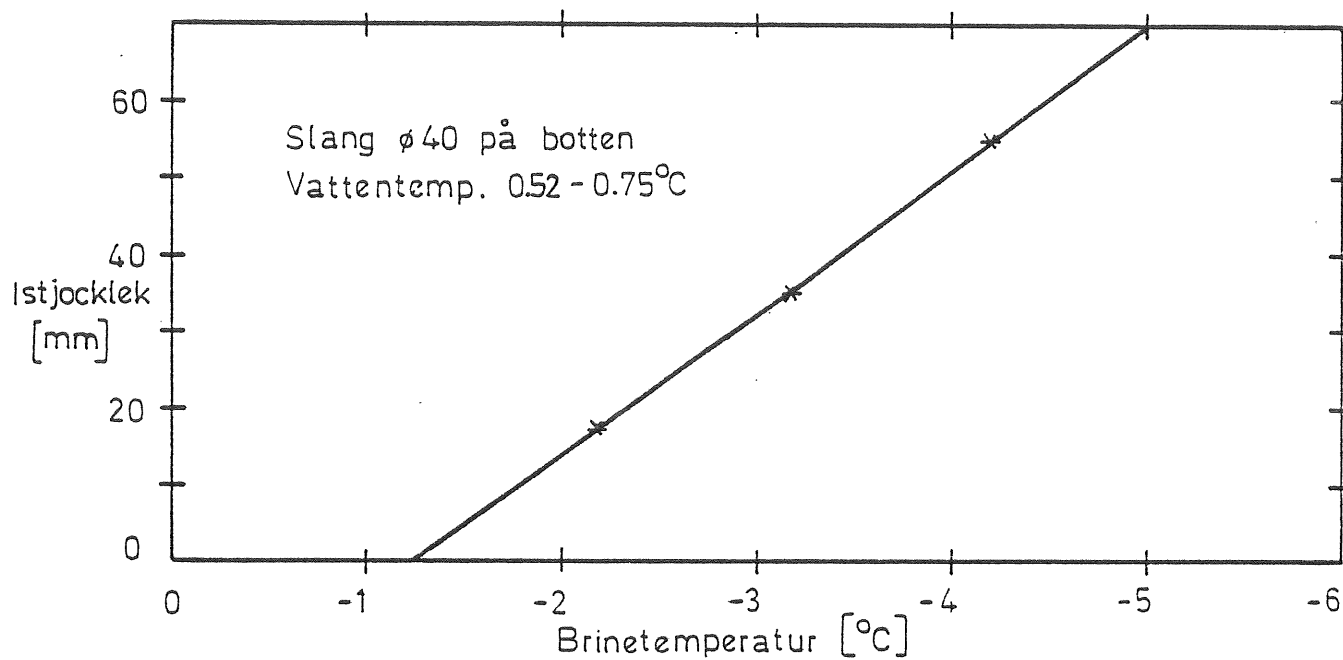
6.2.6 Slang på botten. Vattentemperatur $+0,5^{\circ}\text{C}$.

Bassängens vatten höll sig under försöket vid en temperatur av ca $0,3^{\circ}\text{C}$. Några centimeter över botten börjar temperaturen att stiga och når vid botten ca $0,7^{\circ}\text{C}$ på grund av värmeflödet genom sanden. Värmeflödet var ca $2,5\text{W/m}^2$.

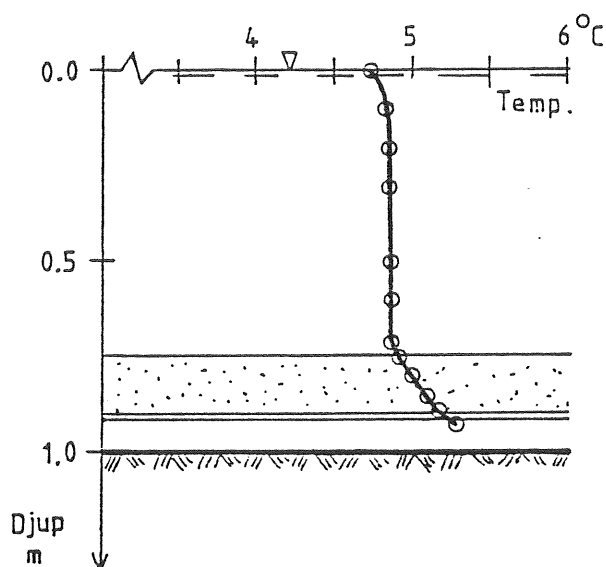
I höjd med slangens centrum varierade temperaturen mellan $0,5$ och $0,7^{\circ}\text{C}$, där den lägsta temperaturen erhöles i slutet av försöket.



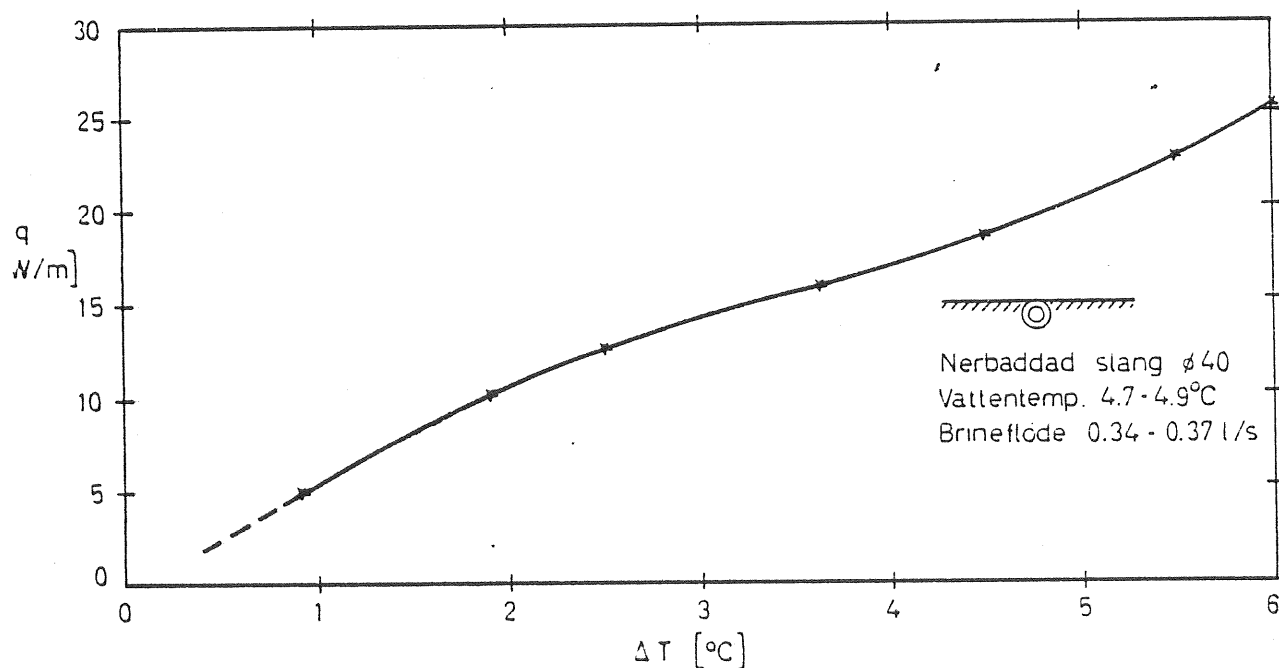
Effektupptagningen ökar till en början snabbt, men ökningen avtar vid brinetemperaturer lägre än $1,5^{\circ}\text{C}$. För brinetemperaturer lägre än -4°C synes inte någon ytterligare ökning av effekten ske. Den markanta utplaningen av effektkurvan beror i huvudsak på ispåväxt på slangen. Kurvformen kan emellertid också ha påverkats av att vattentemperaturen varierat under försökets gång. En rimlig korrektion för detta innebär en sänkning av q med 1W/m för de tre mittersta mätpunkterna, varvid kurvan får ett svagt stigande förlopp även vid stora ΔT .



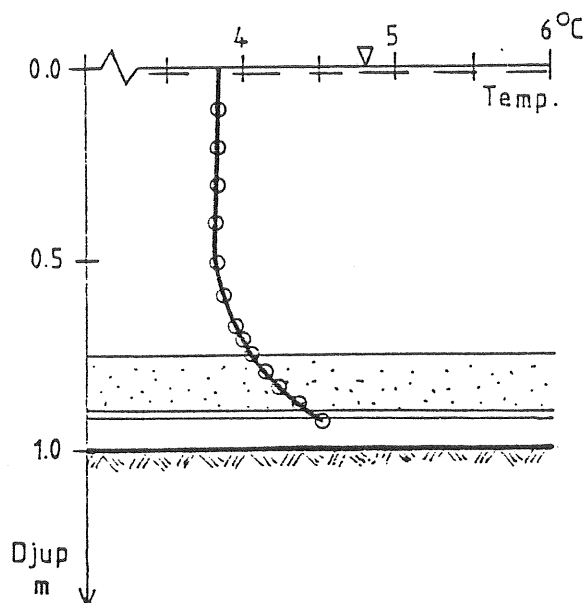
Vid en brinetemperatur under $-1,5^{\circ}\text{C}$ börjar ett isskikt att bildas. Detta når vid brinetemperaturen $-4,25^{\circ}\text{C}$ en tjocklek av 55 millimeter.

6.2.7 Nerbäddad slang. Vattentemperatur $+4,8^{\circ}\text{C}$.

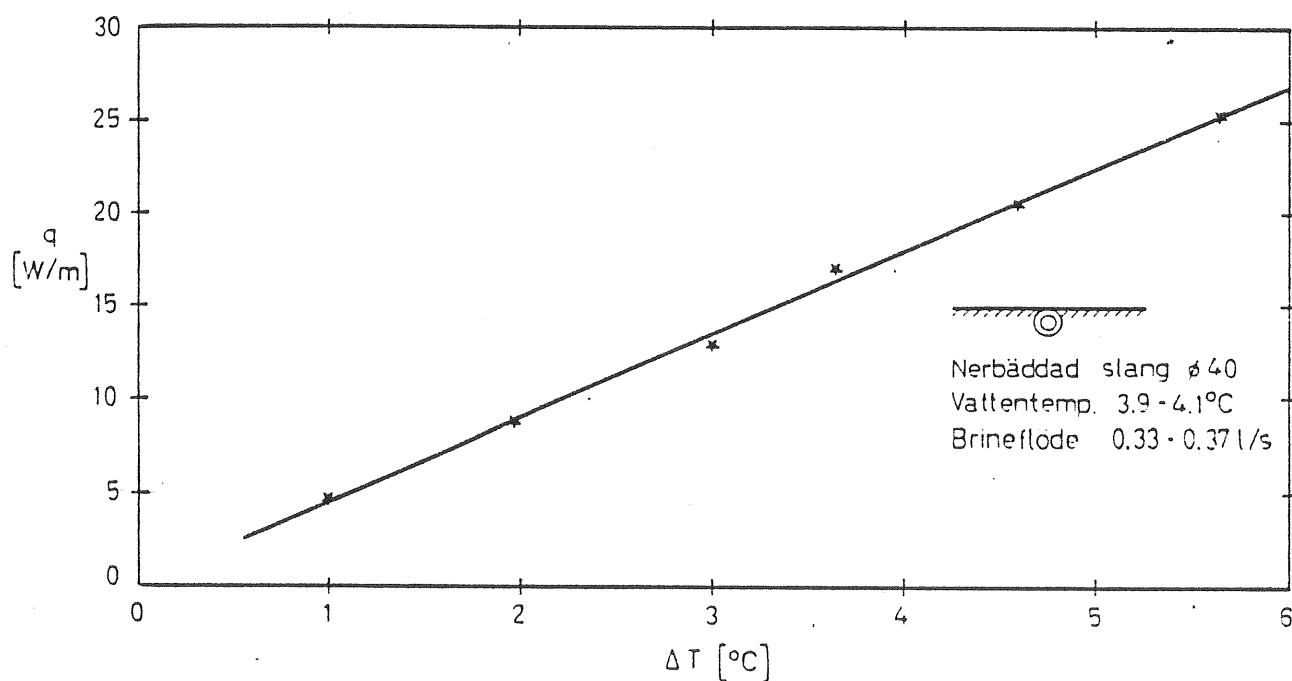
Bassängens vatten hade under försöket en temperatur av ca $+5^{\circ}\text{C}$. Temperaturgradienten genom botten uppgick till 0.35°C vilket motsvarar ett värmefflöde av ca $1,5 \text{ W/m}^2$ från sedimenten.



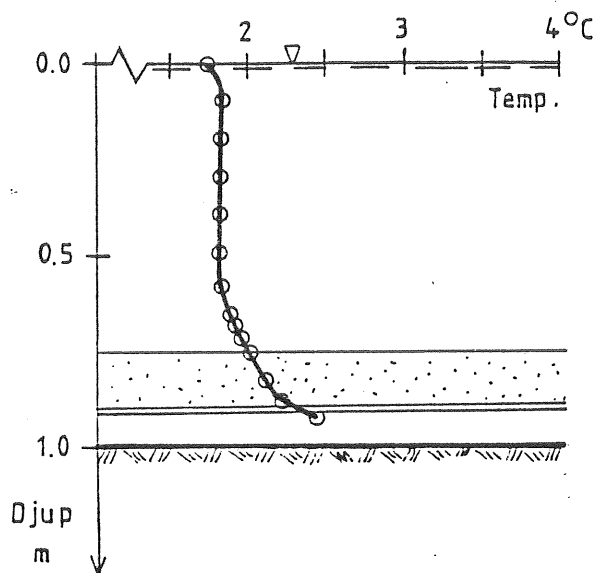
Effektupptagningen ökar tämligen jämnt med sjunkande brinetemperatur och uppgår till ca 17 W/m^2 vid $\Delta T = 4^{\circ}\text{C}$. Den snabbare ökningen i början beror troligen på att helt stationära förhållanden inte hunnit utbildas. Senare under försöket utbildades ett kallare bottenskikt och värmeutbytet mellan vatten och slang försämrades.

6.2.8 Nerbäddad slang. Vattentemperatur $+4,0^{\circ}\text{C}$ 

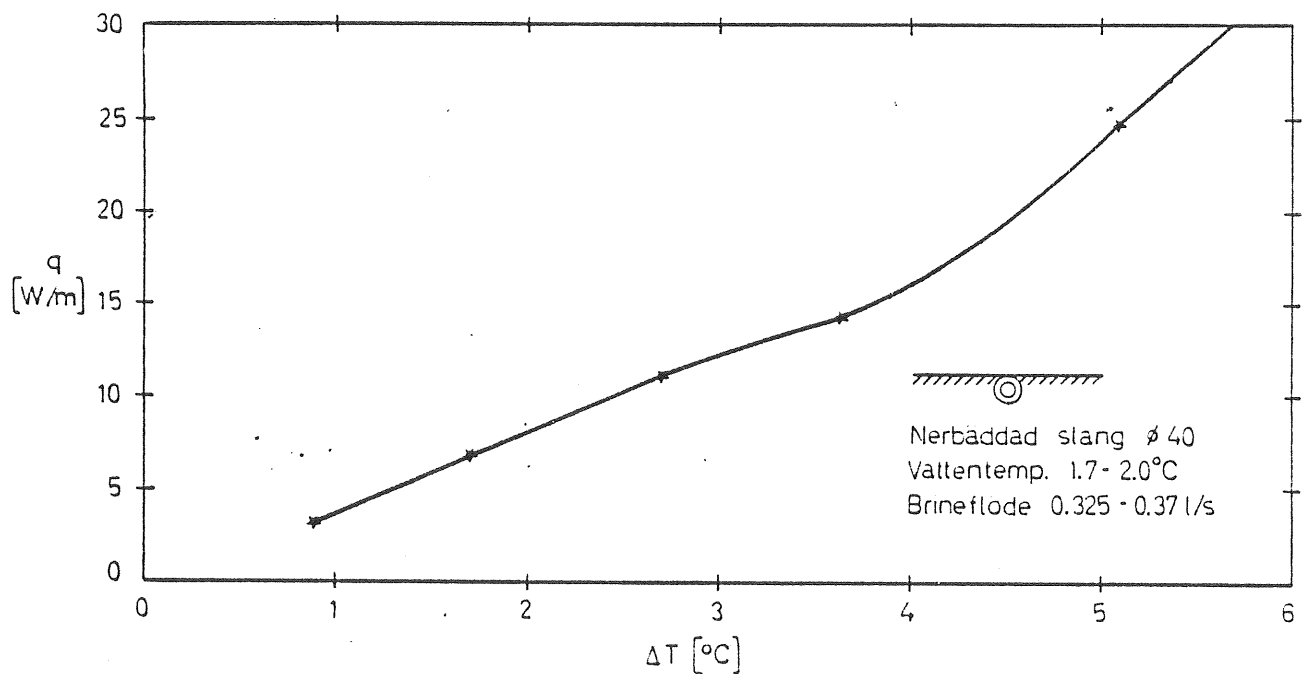
Bassängens vattentemperatur varierade under försöket mellan $3,8$ och $4,2^{\circ}\text{C}$ vid botten. Temperaturfallet genom sandskiktet uppgick till ca $0,5^{\circ}\text{C}$ vilket motsvarar ett värmefflöde av ca 2 W/m^2 .



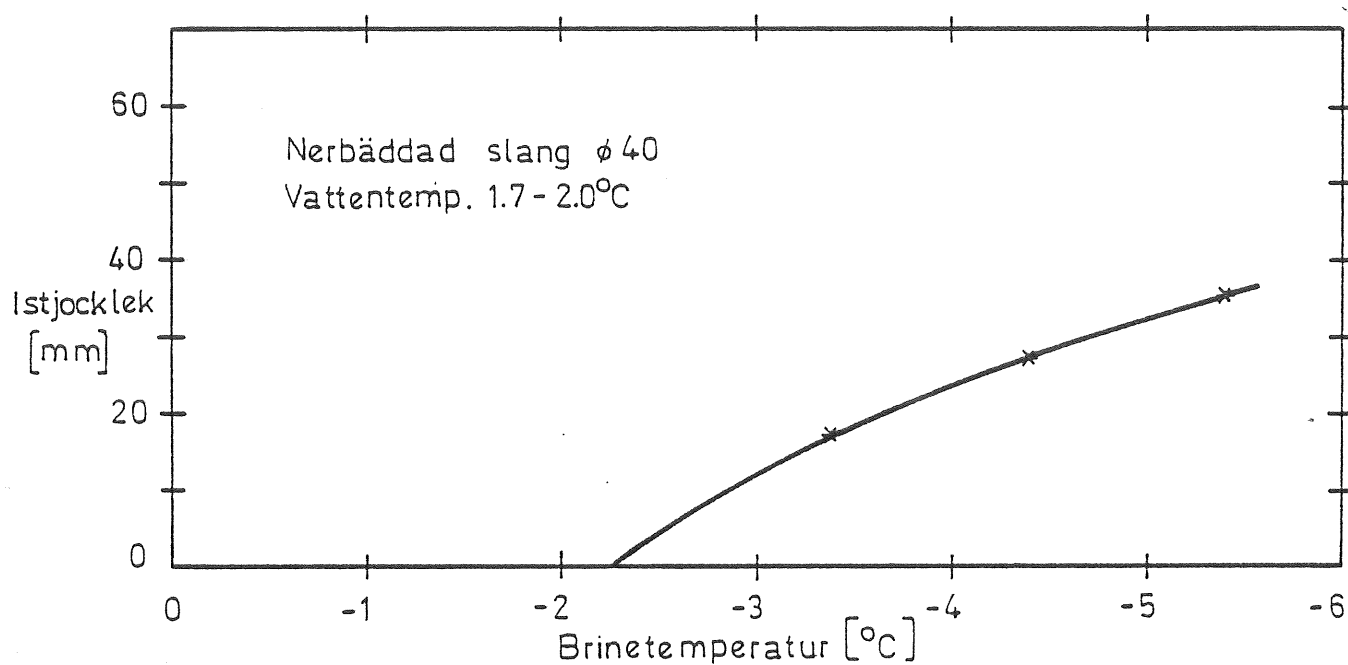
Effektupptagningen stiger nästan linjärt med sänkt brinetemperatur. Vid temperaturdifferensen $\Delta T = 4^{\circ}\text{C}$ är den upptagna effekten 18 W/m jämfört med 23 W/m för motsvarande fall med slang på botten. För stora värden på ΔT ökar effektupptagningen något snabbare än kurvan ovan och uppgår till $42,5 \text{ W/m}$ vid temperaturdifferensen $8,4^{\circ}\text{C}$.

6.2.9 Nerbäddad slang. Vattentemperatur $+2^{\circ}\text{C}$.

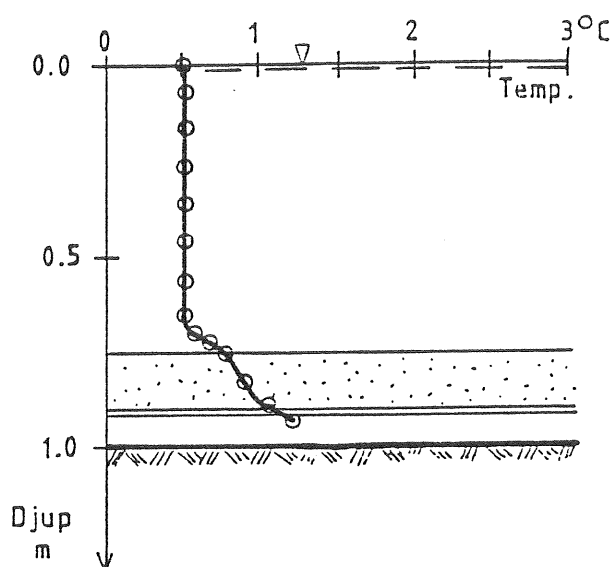
Bassängens vattentemperatur var ca $1,75^{\circ}\text{C}$. Vid botten steg temperaturen till $2,0^{\circ}\text{C}$ på grund av värmeflödet genom sanden, vilket uppgick till ca 2 W/m^2 .



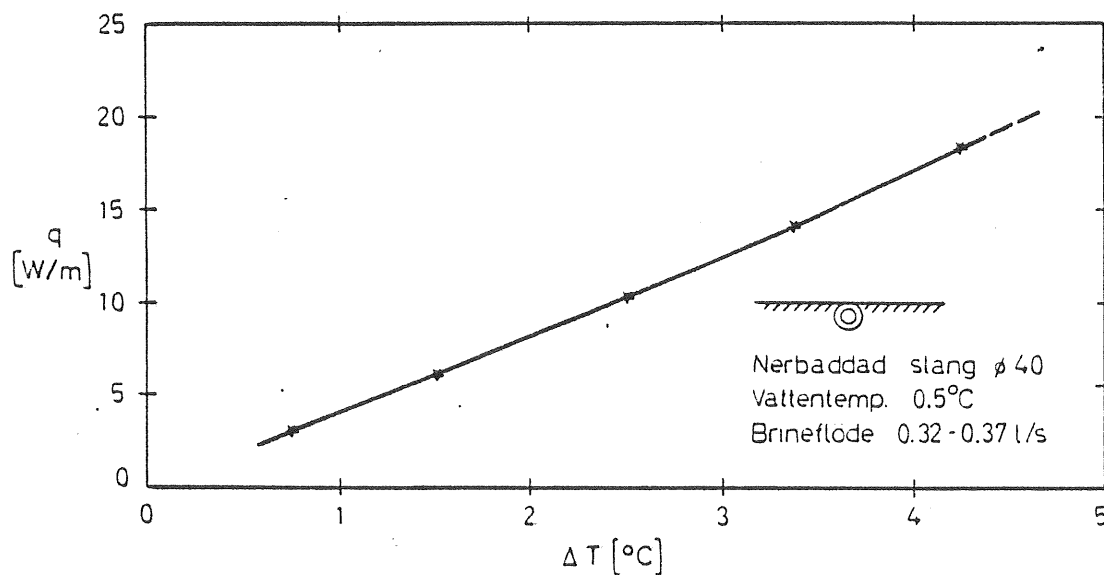
Effekten ökar till en början långsamt, men stiger snabbare när brinetemperaturen sänks under -2°C . Vid denna temperatur börjar också is att bildas på slangen. Den snabbare ökningen av effekten fortsätter även för större ΔT än i diagrammet. En mätning vid $\Delta T = 7,2^{\circ}\text{C}$ gav effekten $40,4 \text{ W/m}$.



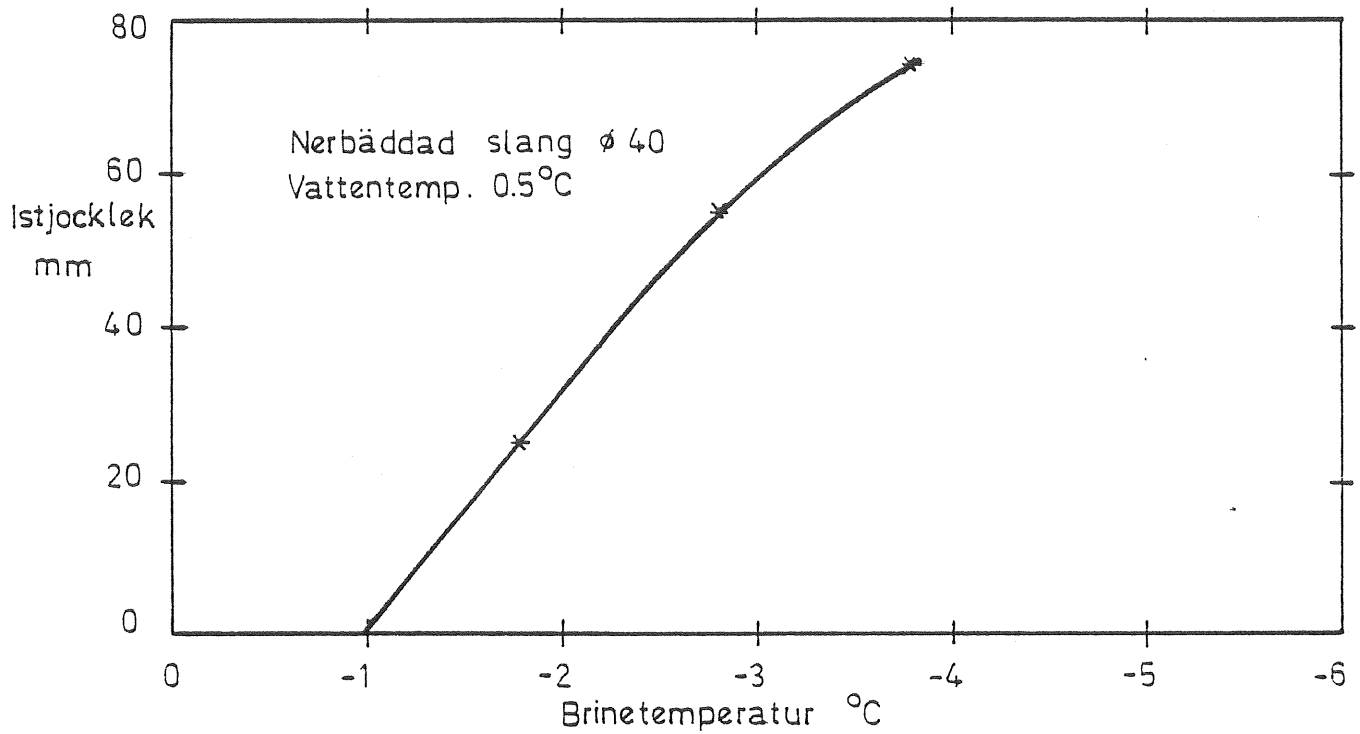
Den största istillväxten sker ner i sanden, medan vatt-
nets konvektion gör att istillväxten uppåt begränsas.
Vid brinetemperaturen $-5,5^{\circ}\text{C}$ var istjockleken horison-
tellt ut från slangen 35 mm och uppåt endast 7 mm. Det-
ta innebär att huvuddelen av värmeflödet till slangen
tillförs från vattnet.

6.2.10 Nerbäddad slang. Vattentemperatur $+0,7^{\circ}\text{C}$.

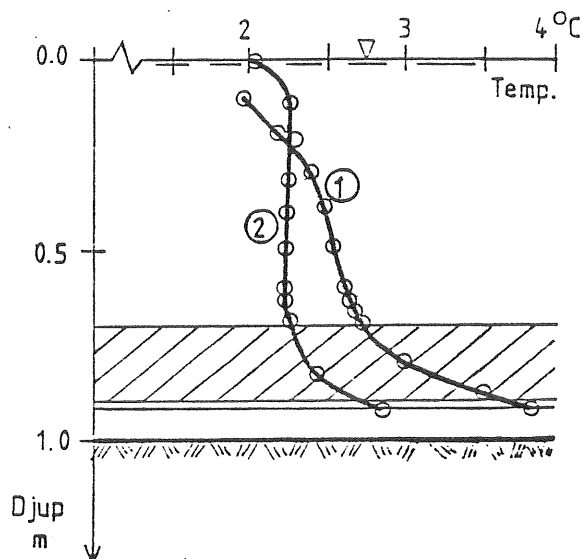
Bassängens vattentemperatur varierade under försöket mellan $+0,4$ och $0,6^{\circ}\text{C}$. Vid botten var variationerna mellan $+0,6$ och $0,8^{\circ}\text{C}$. Temperaturfallet över botten var $0,5^{\circ}\text{C}$ vilket motsvarar ett värmefflöde av ca 2 W/m^2 .



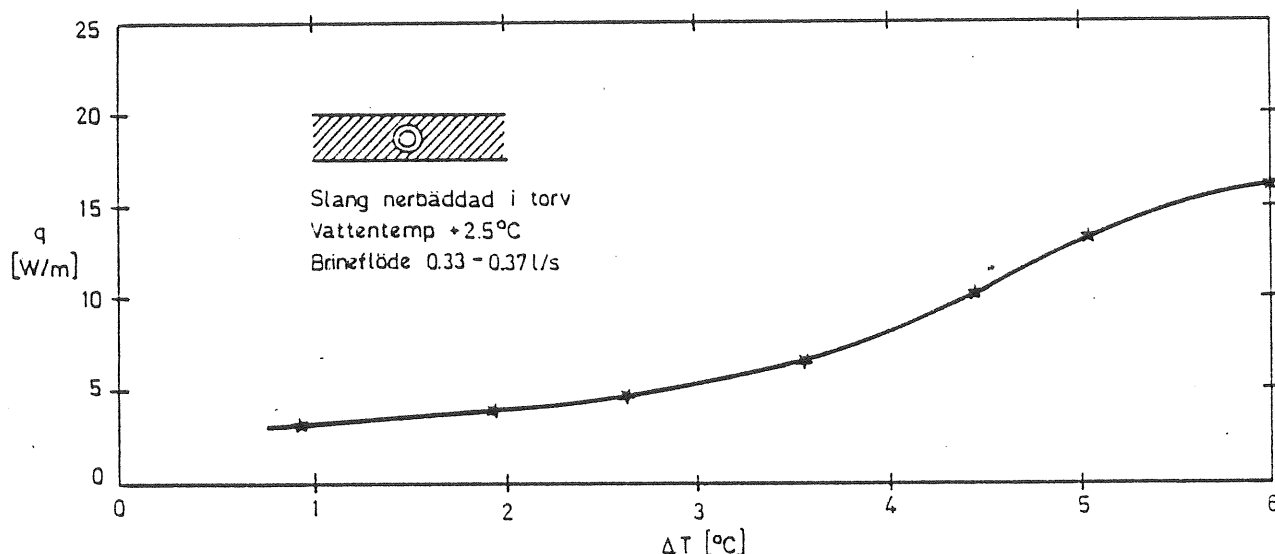
Effektupptagningen stiger långsamt och i stort sett linjärt. Till skillnad från fallet med slang på botten avstannar inte ökningen av effektupptagningen trots att kraftig ispåfrysning sker. Högsta uppmätta effekt är 18 W/m vilket uppnås vid $\Delta T = 4,2^{\circ}\text{C}$.



Ispåfrysning på slangen börjar vid en brinetemperatur av $-1,0^{\circ}\text{C}$ och istjockleken ökar kraftigt med sänkt brinetemperatur. Vid brinetemperaturen $-3,85^{\circ}\text{C}$ är isskiktets tjocklek 72 mm som medelvärde längs slangen. Ovanför slangen blev istjockleken 45 mm på grund av den bättre värmeförseln där genom konvektion i vattnet.

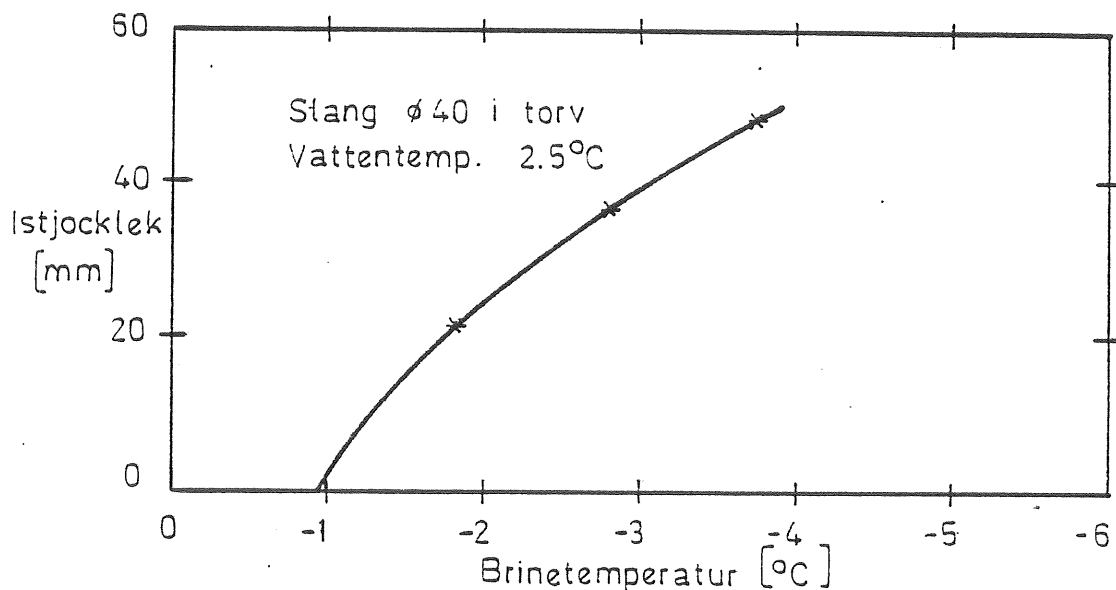
6.2.11 Slang i torv. Vattentemperatur $+2,5^{\circ}\text{C}$ 

Huvuddelen av bassängens vatten höll under försöket en temperatur mellan $2,25$ och $2,75^{\circ}\text{C}$. Kurva 1 representerar temperaturfördelningen i början av försöket och kurva 2 i slutet av försöket. Temperaturfallet genom torvskiktet är ca $0,5^{\circ}\text{C}$ vilket motsvarar ett värmeflöde av ca $1,5 \text{ W/m}^2$.



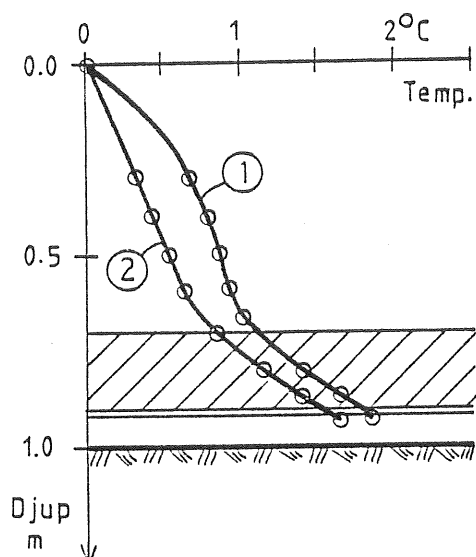
Effektupptagningen ökar långsammare än i de två tidigare försöksserierna och uppgår som högst till 16 W/m vid en temperaturdifferens ΔT av 6°C . Den låga värmeupptagningen beror på att värmeöverföringen sker genom värmeledning i material med låg värmeledningsförmåga och små temperaturgradienter.

I jämförelse med motsvarande fall med slang nedsjunken i en lös sjöbotten, kan försöksresultaten här antas ge något för hög värmeupptagning. Detta beror dels på torvskiktets begränsade tjocklek nedåt och dels på att packningen av torven runt slangen visade sig vara ofullständig (se även kap.6.4).

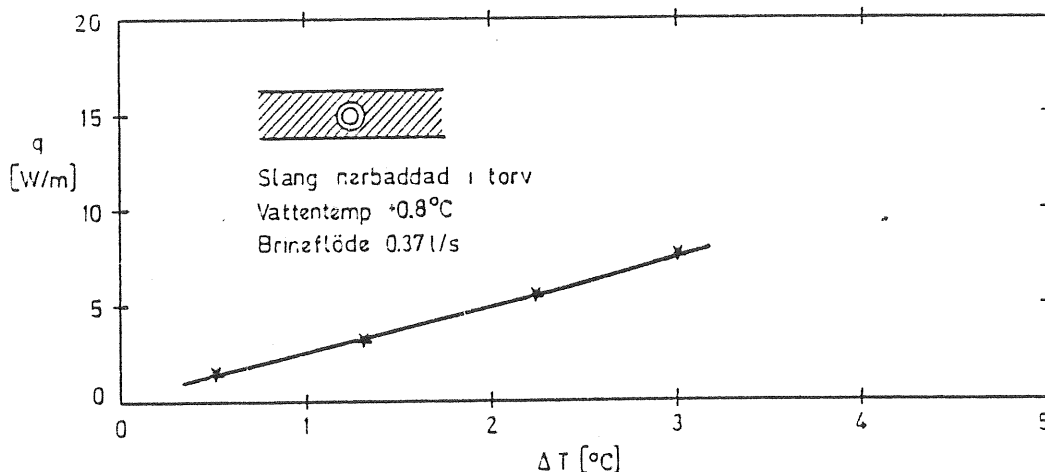


Vid en brinetemperatur av ca $-1,0^{\circ}\text{C}$ börjar istillväxten på slangen. Istjockleken ökar kraftigt med sänkt brinetemperatur och är vid en brinetemperatur av $-3,7^{\circ}\text{C}$ 47 mm som medelvärde längs slangen.

Istjockleken är emellertid betydligt mindre ovanför och under slangen än horisontellt ut från densamma, se kap.6.4. I ett praktiskt fall med slanger nedsjunkna i sjöbotten skulle man förvänta sig en större istillväxt nedåt från slangen.

6.2.12 Slang i torv. Vattentemperatur $+0,8^{\circ}\text{C}$.

Bassängen var under försöket istäckt. Kurva 1 representerar temperaturfördelningen i början av försöket och kurva 2 i slutet av försöket. Temperaturen vid botten sänktes under försöket från $1,0$ till $+0,7^{\circ}\text{C}$. Temperaturfallet från blindbotten till torvöverytan var ca $1,0^{\circ}\text{C}$ vilket motsvarar ca $3,0 \text{ W/m}^2$.



Effektupptagningen ökar långsamt och uppgår till $7,5 \text{ W/m}$ vid den sista mätpunkten där temperaturdifferensen mellan temperaturen vid botten av bassängen och brinen var $3,0^{\circ}\text{C}$. Istillväxten hade då inte helt avstannat (tjocklek 63 mm) varför en något lägre effektupptagning kan förväntas vid stationärt tillstånd. Som nämnts i föregående fall kan försöket även antas ge en viss överskattning av effekten pga torvskiktets begränsade tjocklek och ofullständig packning runt slangen.

6.3 Sammanställning av försöksresultat

De tidigare redovisade kurvorna över effektupptagning som funktion av temperaturskillnaden mellan brinevätskan och omgivande vatten har sammanställts i fig. 6.1 och 6.2 för fallen med slang på resp. nedbäddad i sand. Som jämförelse har motsvarande kurvor beräknats teoretiskt för fallet med fritt upphängd, horisontell slang, fig. 6.3.

Lutningen på kurvorna motsvarar värdet K' , se ekv. (3.10), vilket kan användas för praktisk dimensionering av slangsystem.

För slang liggande på botten finns en spridning på K' -värdet mellan ca 4,5 och 7,5 W/m⁰C. Det lägre värdet hänförs till vattentemperaturen +4⁰C och små värden på ΔT resp. vattentemperaturen 0,5⁰C och stora värden på ΔT . För de övriga fallen faller K' inom intervallet 6,5-7,5 W/m⁰C.

Samtliga kurvor i fig. 6.1 visar en tendens att gå mot ett värde som är några tiondels grad över nollpunkten. Detta kan, förutom av bristande mätnoggrannhet, bero på valet av referensnivå för mätning av vattentemperaturen. Om temperaturen mätts vid rörets hjässa i stället för vid dess mitt skulle ΔT genomgående blivit ett par tiondels grader lägre och kurvorna följaktligen närmare anpassat sig mot origo. Detta skulle också medföra en liten ökning av de bestämda K' -värdena.

Mätningarna sträcker sig upp till ett upptagen effekt av max 40 W/m, men för vattentemperaturer över 2⁰C torde kurvorna kunna extrapoleras till högre värden. För vattentemperaturen 1⁰C bör man, på grund av ispåfrysningen inte räkna med högre effekt än 40 W/m och vid 0,5⁰C inte högre än 20 W/m.

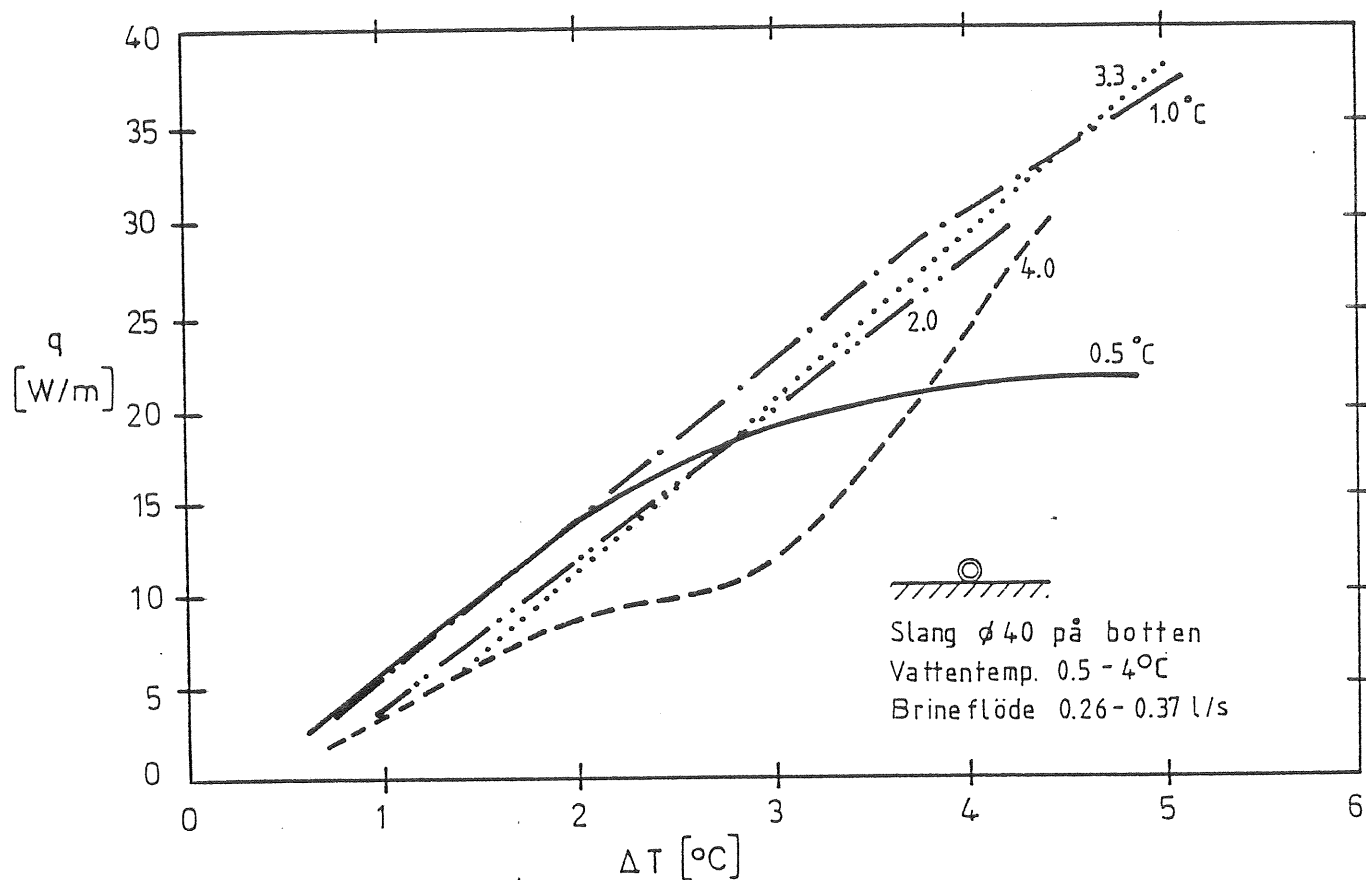
För en nedbäddad slang ökar värmeupptagningen likformigt för alla mätserier upp till 20 W/m vid $\Delta T = 4,5^{\circ}\text{C}$. Detta motsvarar ett K' -värde av 4,3 W/m⁰C, dvs lägre än i fallet med slang på botten. Vid större ΔT ökar successivt kurvans lutning och därmed K' , för vattentemperaturerna 2 och 4⁰C. Effekttuttag av över 40 W/m är möjliga vid dessa temperaturer. Vid den lägsta temperaturen, 0,5⁰C, är det rimligt att anta att kurvan flackar ut. Det maximala uttag som kan göras vid stationära förhållanden bör därvid inte bli mycket större än 20 W/m. En direkt jämförelse kan göras mellan uppmätt värmeupptagning med slang på resp. nerbäddad i botten och de teoretiskt beräknade kurvorna för fri slang, fig. 6.3. Härav framgår, något överraskande, att slangen på botten är en lika effektiv eller t.o.m. effektivare värmväxlare som den fria slangen. Ett genomsnittligt värde på K' för den fria slangen är 6.0 W/m⁰C mot 6,5-7,5 W/m⁰C för slang på botten och 4,3 W/m⁰C för nerbäddad slang.

Vid den teoretiska beräkningen införs nya felkällor i form av osäkerhet om strömningstillstånd och inre övergångstal, rörväggens tjocklek och värmeledningstal, isens värmeledningstal och det yttre värmeövergångstalet. Tillsammans med felen i effektmätningen innebär detta att skillnaden mellan teoretiskt beräknade värden och uppmätta värden för slang på botten ligger inom felmarginalen, Två markanta skillnader finns dock. Vid vattentemperaturen $0,5^{\circ}\text{C}$ nåddes vid försöken som högst en effekt av 20 W/m medan den beräknade kurvan visar en kontinuerlig ökning, vilket troligen kan förklaras av temperaturvariationerna under försökets gång. Vid vattentemperaturen 4°C erhöles vid försöken en lägre effekt än den teoretiska vid små ΔT .

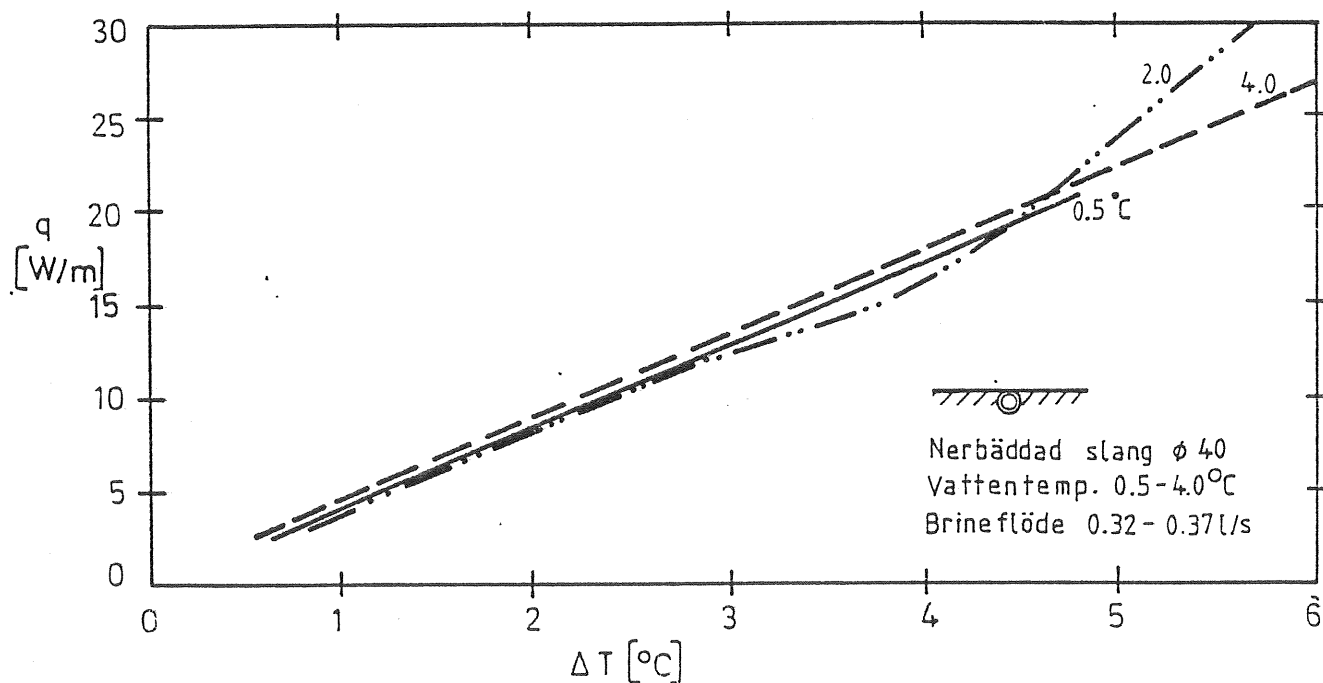
Vid försöken med slangen nedsänkt 10 cm i torv erhöles lägre värmeupptagningsförmåga än för en ytligt nerbäddad slang. Försöket är emellertid inte helt representativt för ett verkligt fall med slang nedsjunken i en lös sjöbotten och redovisas därför ej här, Värmeledning i bottenmaterialet och isbildning kring slangen ger också så långsamma förlopp, att stationära förhållanden är svåra att uppnå. Dimensioneringen bör i detta fall baseras på beräkningar av de transienta förloppen. För enkla överslagsberäkningar torde det vara rimligt att använda ett K' -värde av $2-2,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$.

Sammantaget ger resultaten av dessa mätningar underlag för dimensionering av slangsystem som ligger på botten eller ytligt nedbäddade. Vid användning av diagrammen 6.1, 6.2 och 6.3 eller de redovisade K' -värdena måste emellertid hänsyn tas till att dessa gäller för vissa definierade slang- och flödesförhållanden. För andra fall, t.ex. andra slangdimensioner eller annan brinevätska, måste en omräkning göras utgående från ekv. (3.11).

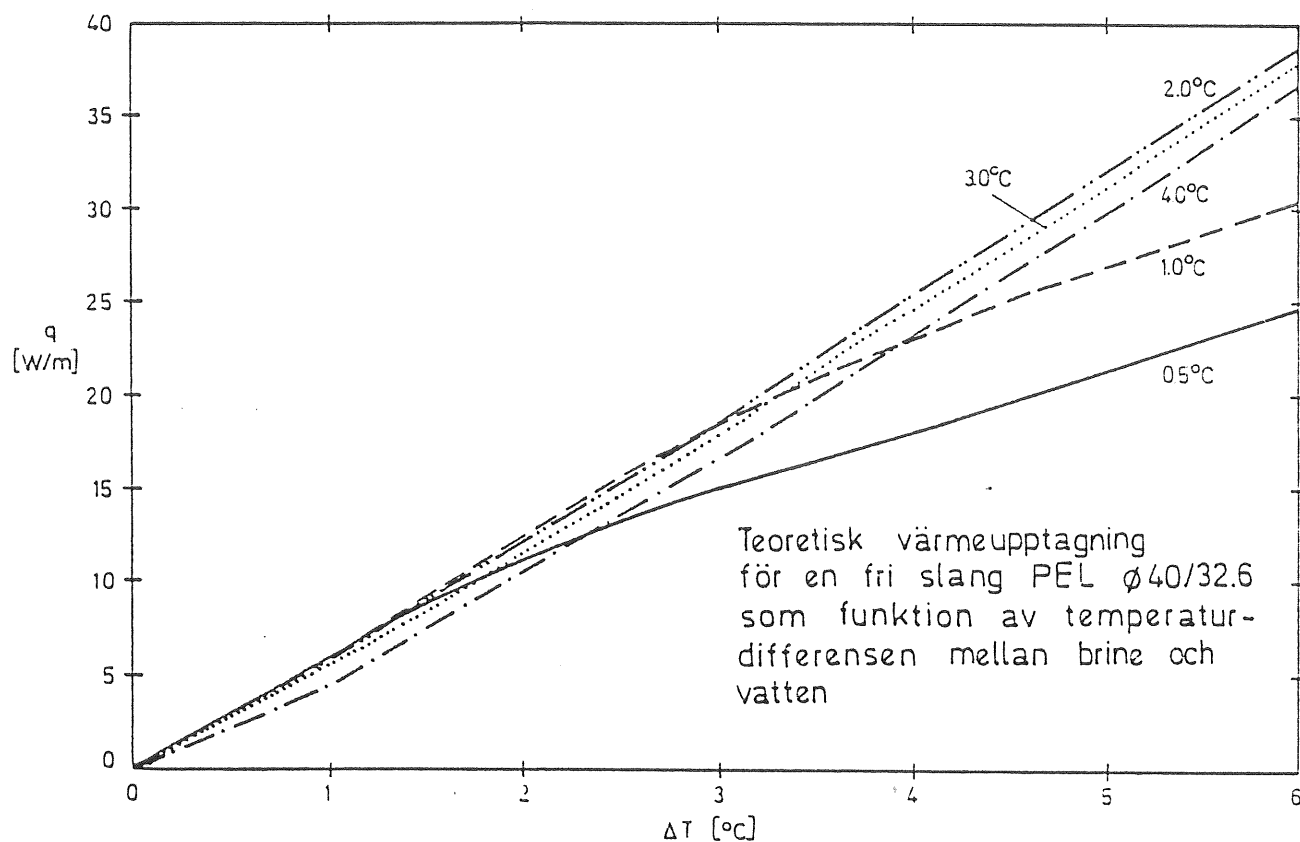
En väsentlig slutsats av försöken är att vattentemperaturen har liten inverkan på dimensioneringen inom intervallet $1-4^{\circ}\text{C}$. För lägre temperaturer än $0,5^{\circ}\text{C}$ spelar isbildningen kring slangarna en dominerande roll. En väsentlig faktor är också nedsjunkningen i bottensedimenten, vilken medför en försämring av värmeupptagningen och ökad ispåfrysning.



Figur 6.1 Värmeupptagning med slang på sandbotten som funktion av temperaturdifferensen mellan omgivande vatten och brinevätska. Sammanställning av försöksresultat för olika vattentemperaturer.



Figur 6.2 Värmeupptagning med till hjässan nedbäddad slang i sandbotten som funktion av temperaturdifferensen mellan omgivande vatten och brinevätska. Sammanställning av försöksresultat för olika vattentemperaturer.



Figur 6.3 Teoretiskt beräknad värmeupptagning för fritt upphängd, horisontell slang, som funktion av temperaturdifferensen mellan omgivande vatten och brinevätska. Kurvor för olika vattentemperaturer.

6.4 Isbildning kring slangen

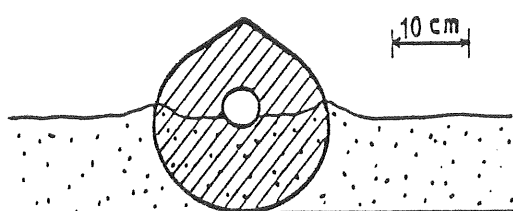
6.4.1 Allmänt

Villkoren för istillväxt diskuteras i kap. 3.1 och analyseras närmare i kap. 3.5. Avgörande för ispåväxten är vattentemperaturen och, för tillväxten nedåt i bottenmaterialet, temperaturgradienten i botten.

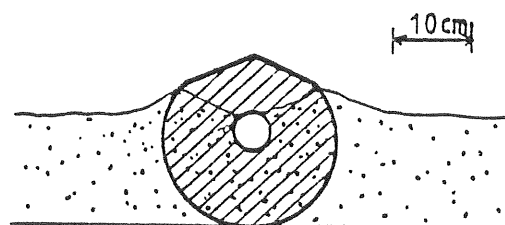
I naturen sjunker temperaturgradienten i sedimenten efterhand under vintern på grund av värmeförlust till vattnet, vilket medför att isskiktet hela tiden kan tillväxa nedåt. Ett stationärt tillstånd kan därför endast tillnärmelsevis uppnås i praktiken.

6.4.2 Iscylinderns form

När temperaturen på slangytterytan under försöken sänktes till vattnets fryspunkt tillväxte ett skikt av mycket slät och klar is på slangen, Isens form och påverkan på bottenmaterialet framgår av fig. 6.4 och 6.5. Figur 6.4 visar utseendet vid försöket med slang på botten och med vattentemperaturen $+0,5^{\circ}\text{C}$ och brinetemperaturen $-4,2^{\circ}\text{C}$. Fig. 6.5 visar utseendet för den nerbäddade slangen vid vattentemperaturen $+0,5^{\circ}\text{C}$ och brinetemperaturen $-3,85^{\circ}\text{C}$.



Figur 6.4 Ispåväxt på bottenlagd slang



Figur 6.5 Ispåväxt på nerbäddad slang

Som framgår av figurerna fryser bottenmaterialet in i isen samtidigt som en viss deformation sker av bottenmaterialet. Överst på iscylindern utbildas en liten ås till följd av konvektionsströmmarna kring iscylindern.

Nedåt tillväxte isen vid låg vattentemperatur till botten på sandskiktet. Det är troligt att en viss ytterligare istillväxt skulle ha skett om sandskiktet vore tjockare. Den förhindrade istillväxten torde också innebära att värmeflödet till slangen blivit något större än det annars skulle blivit.

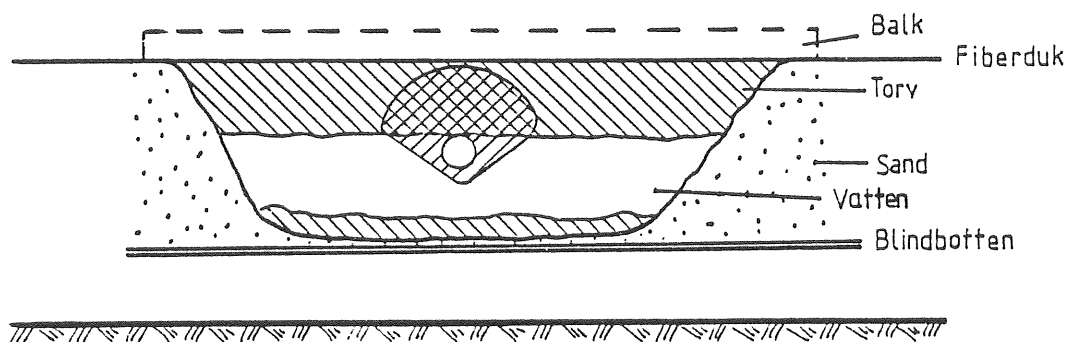
Vid upptining av iskorven kvarstår de vallar som bildats vid den maximala isradien. Vid upprepad frysning och tining torde därför slangen bli liggande mellan vallar av bottenmaterial. Den nerbäddade slangen visade sig efter upptining vara frilagd utefter hela sin längd enligt fig. 6.6. Härav följer att en till en början nerbäddad slang efter några års drift kan komma att inta samma läge som den på botten lagda slangen.



Figur 6.6 Nerbäddad slang efter upptining

Efter sista försöket med slang på botten bestämdes lyftkraften på slangen. En bit av slangen med omgivande iscylinder kapades av och de ingående delarna (slang, sand, is) viktbestämdes. Provet visade att brineslingan, om den är fri från luft och ligger an mot botten i hela sin längd (så att frysning sker ner i bottenmaterialet), får en trefaldig säkerhet mot uppflytning.

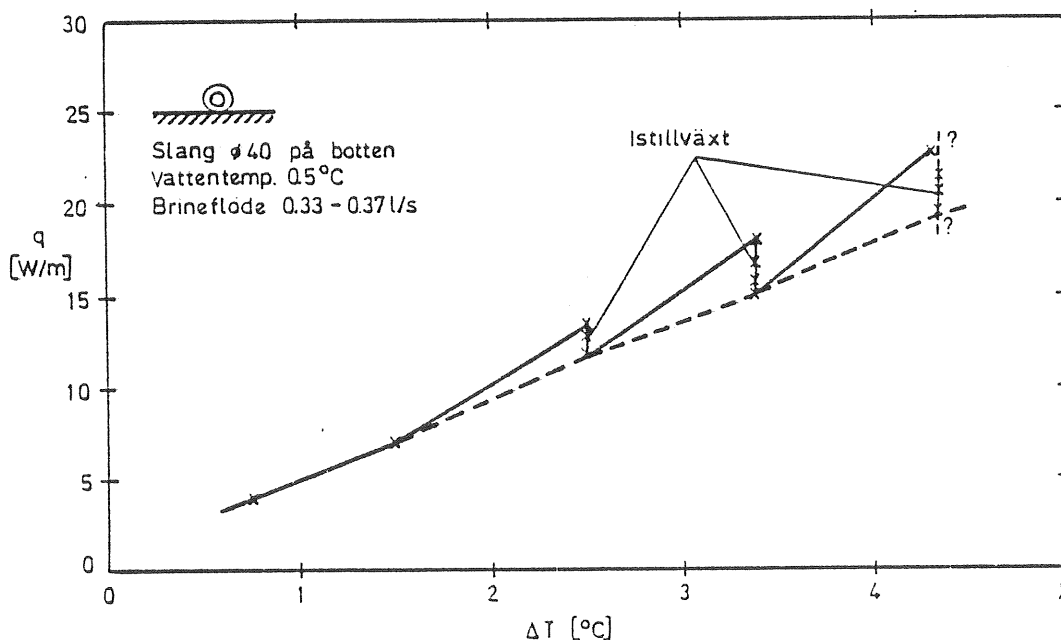
I försöket med slang i torv erhöles en mera assymetrisk iscylinder enligt fig. 6.7. Till detta bidrag dels närheten till de övre och undre begränsningsytorna vilket bör medföra att iscylindern blir tillplattad uppifrån och nedifrån. Emellertid visade det sig också att torvvattenblandningen separerat så att ett fritt vattenskikt uppkommit under slangen, som framgår av fig. 6.7. Inom vattenskiktet kan temperaturen utjämnas genom konvektion vilket medför att värmeflödet från skiktet under blindbotten till slangen ökar med minskad ispåväxt som följd. Det är dock troligt att torvskiktet på delar av slanglängden varit jämnare fördelat och istjockleken därmed större.



Figur 6.7 Uppmätt tvärsnitt vid slutet av försöket i torv. Vid den aktuella sektionen hade torvskiktet separerat och ett fritt vattensikt bildats under slangen.

6.4.3 Effektopptagning under istillväxt

När brinetemperaturen sänks stegvis, som i våra försök, ökar temperaturgradienten i isen och därmed värmeflödet till slangen. Värmeflödet från vattnet till isen ökar ej samtidigt varför det sker tillväxt av isen. Den isbildningsvärme som därmed frigörs kommer att tillföras brinelösningen. I och med att isen tillväxer minskar temperaturgradienten genom isen varigenom värmeflödet sjunker tills balans åter råder mellan värmeförseln till isytan och värmeledningen genom isen. Ett exempel från dessa ickestationära förlopp redovisas i fig. 6.8. Tillfälligt är det således möjligt att öka effekttuttaget genom utnyttjande av isbildningsvärm.



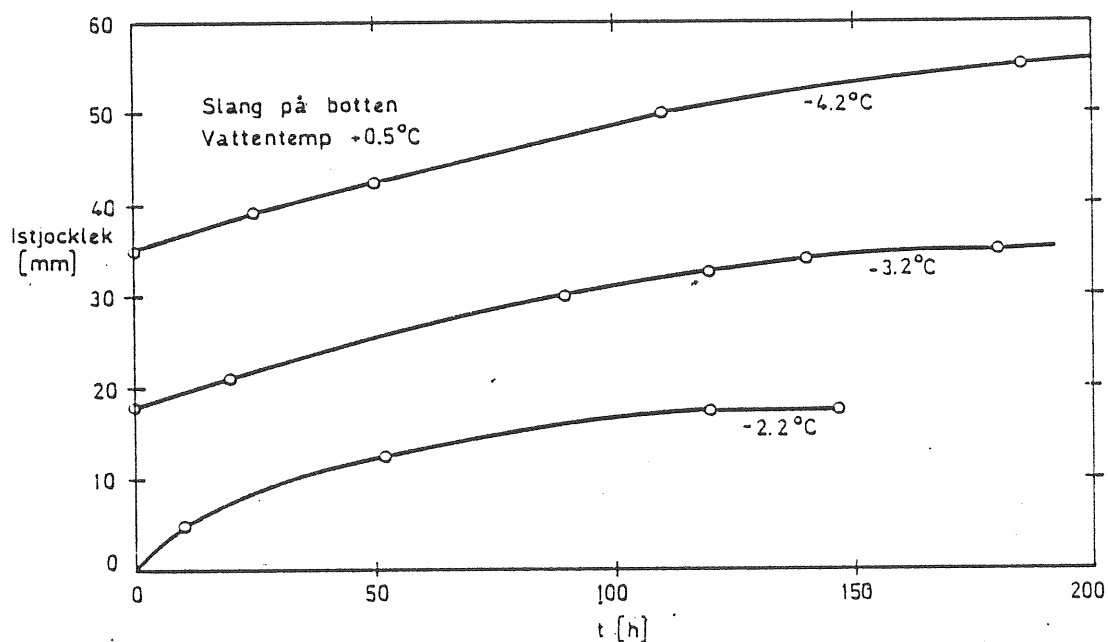
Figur 6.8 Effektopptagningen i samband med istillväxt vid stegvis sänkning av brinetemperaturen.

6.4.4 Iscylinderns tillväxthastighet

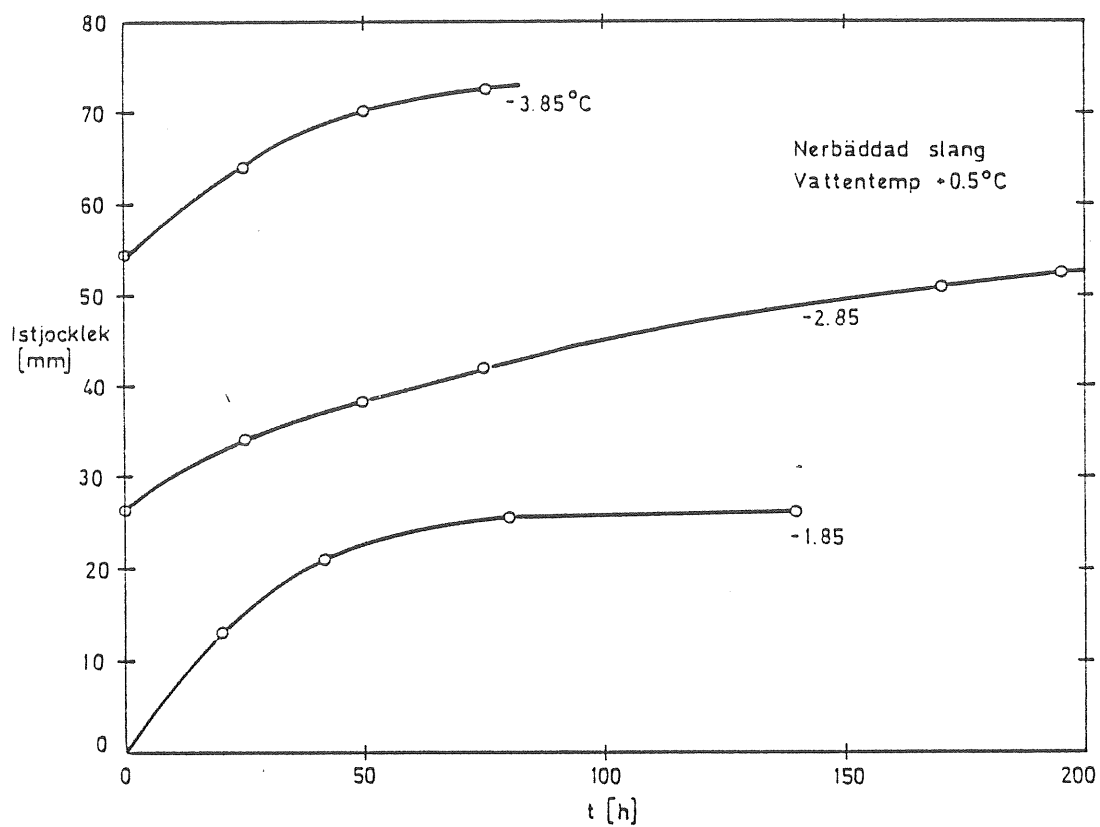
Tidsförloppet för istillväxten på slang på botten resp. nedbäddad slang redovisas i fig. 6.9 och 6.10. Tiden för att uppnå stationärt tillstånd uppgår till i storleksordningen 100 timmar.

För slang nere i torv (eller motsvarande) blir tiden att uppnå stationärt tillstånd ännu längre, men försöken ger härvidlag inga relevanta resultat och redovisas därför ej.

De uppmätta tidsförloppen kan jämföras med de som kan beräknas teoretiskt för fri slang enligt ekv. (3.27). Någon sådan jämförelse har dock av tidsskäl ej kunnat genomföras.



Figur 6.9 Tidsförloppet av istillväxten för slang på botten vid vattentemperaturen 0,5°C och olika brinetemperaturer.



Figur 6.10 Tidsförloppet av istillväxten för slang
nerbäddad till hjässan i sand.
Vattentemperatur $0,5^{\circ}\text{C}$

7. LITTERATUR

Svensson, T., Degerman, E., Jansson, B. och Westerlund, S. (1980): "Energiutvinning ur sjö- och havssediment. En förstudie". Statens råd för byggnadsforskning. Rapport R76:1980.

—— "Installationsteknik". Påbyggnadskurs Vh3 och Vp3. Chalmers Tekniska Högskola, Avd.f.installationsteknik. Kompendium K9:1980.

Gustafsson, L., Marklund, E.: "Utredning. Fältnätning och Laboratieförsök avseende egenskaper hos sjöförlagd kollektor som värmekälla vid villavärmepumpar". Examensarbete i kylteknik, Kungl. Tekniska Högskolan, Inst.f.mekanisk värmeteorik och kylteknik, 1980.

