



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

R58:1989

Sjövärmeprojekt Motala Väster

**Utvärdering och analys av värmekälla
och värmepump**

**Kjell Schroeder
Torbjörn Svensson**

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	
Plac	Sex

R/TU

Bygghforskningsrådet

R58:1989

SJÖVÄRMEPROJEKT MOTALA VÄSTER

Utvärdering och analys av värmekälla och värmepump

Kjell Schroeder

Torbjörn Svensson

Denna rapport hänför sig till ett forskningsanslag
850226-4 från Statens råd för byggnadsforskning till
Energiteknisk Mätcentral vid Chalmers Tekniska
Högskola, Göteborg.

REFERAT

Sjövärmeprojektet Motala Väster är landets hittills största sjövärmeprojekt med slutet system och har en sjövärmekollektor bestående av sammanlagt ca 90 km PEH-slang. Anläggningen försörjer två bostadsområden med inalles 1 600 lägenheter med 4,5 MW basvärme och samkörs med befintliga oljepannor. Värmekälla är en vik av Vättern. Värmeuttaget görs med tre kollektorenheter bestående av slangar utlagda på sjöbotten plant eller i spiralform.

I rapporten är intresset till stor del fokuserat på kollektorn och utnyttjandet av värmekällan, då det i första hand är dessa delar, som är av utvecklingskaraktär.

Driften av anläggningen har varit utsatt för en hel del störningar och fel. Dessa har i huvudsak varit knutna till den maskinella utrustningen och till problem med samkörningen med värmepannorna. Under den 43 månader långa utvärderingsperioden har anläggningen haft en medelvärmefaktor = 1,84. Anläggningen har varit avstängd under långa tider för reparation, bl a har alla förångartuber bytts ut mot nya av titan p g a korrosion.

Sjövärmekollektorn har i stort sett fungerat bra under uppföljningsperioden. Den är dimensionerad för ett värmeuttag av 33 Watt per meter slang och en maximal isdiameter av omkring 30 cm vid en dimensionerande vattentemperatur av 0,6°C. Mätningarna visar att kollektorns värmeupptagning fungerat som beräknat eller något bättre när den är ispåfrusen, medan den fungerat något sämre än beräknat när den är isfri, p g a försmutsning. En jämförelse mellan de båda kollektortyperna, plan resp. spiral, visar att värmeupptagningsförmågan är nära nog likvärdig, eller obetydligt bättre för spiralkollektorn.

I Bygghälsningsrådets 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.

R58:1989

ISBN 91-540-5019-7

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm
Svenskt Tryck Stockholm 1989

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD		5
SAMMANFATTNING		7
1	INLEDNING - BAKGRUND	9
2	PROJEKTFÖRUTSÄTTNINGAR	11
2.1	Bostadsstiftelsen Platen; värmebehov och distributionsnät	11
2.2	L E Lundbergs förvaltningsaktiebolag; värmebehov och distributionsnät	12
2.3	Projekteringsdata	13
2.4	Värmekälla	14
2.4.1	Vättern som värmekälla	15
2.4.2	Temperaturförhållanden i Motalaviken	16
2.4.3	Bedömning av tillgänglig värmemängd	17
2.4.4	Vågor och bottenförhållanden	18
2.4.5	Slutsatser	19
3	TEKNISK BESKRIVNING	20
3.1	Systemöversikt	20
3.2	Värmepumpen	22
3.3	Kollektorsystemet	23
3.4	Inkoppling	29
3.5	Ombyggnader	31
3.5.1	Elpanna och nytt styrsystem	31
3.5.2	Förångaren, rekonstruktion	32
3.5.3	Rekonstruktion och modifiering av kompressorn	32
4	UPPFÖLJNINGSPROGRAMMETS SYFTE	33
4.1	Teknisk utvärdering av kollektorn	33
4.2	Tekniska aspekter på värmepumps-systemet	33
4.3	Ekonomisk utvärdering	34
5	MÄTNINGAR OCH BEARBETNING AV MÄTDATA	36
5.1	Mätdatainsamling	38
5.2	Mätningar vid mätboden och i ventilbyggnaden	39
5.2.1	Utomhustemperatur	39
5.2.2	Temperaturer före och efter sjökollektorns tre enheter	39
5.2.3	Flöden i sjökollektorn	41
5.2.4	Energi från sjökollektorn	41

5.3	Mätningar i värmepumpsbyggnaden	42
5.3.1	Temperaturer i brine vid värmepumpen	43
5.3.2	Flöde genom värmepumpens kondensor	43
5.3.3	Temperaturer före och efter kondensor	43
5.3.4	Energi från värmepumpen	44
5.3.5	Elenergier	44
5.3.6	Status	44
5.4	Mätningar i undercentralerna	44
5.4.1	Energimätningar	44
5.4.2	Temperaturmätningar	44
5.4.3	Status	45
5.5	Temperaturmätningar i sjön	45
5.6	Erfarenheter av mätsystemet	47
5.6.1	Temperaturmätningar i brineledningen	47
5.6.2	Temperaturmätningar vid värmepumpen och undercentraler	47
5.6.3	Flödesmätningar	48
5.6.4	Temperaturgivare i sjön	48
6	MÄTRESULTAT OCH ERFARENHETER - VÄRMEPUMPEN	49
6.1	Drifttillgänglighet	49
6.2	Driftresultat	52
6.2.1	Driftresultat på månadsbasis	52
6.2.2	Jämförelse med dimensioneringsdata	54
6.2.3	Energiredovisning	57
6.3	Reglerproblem	58
6.3.1	Samkörning med värmecentralerna	58
6.3.2	Effektreglering	59
6.3.3	Elpanna	60
6.4	Korrosionsskador	61
7	RESULTAT - VÄRMEKÄLLA	63
7.1	Vattentemperaturer	63
7.2	Temperaturstatistik	67
8	RESULTAT - KOLLEKTOR	69
8.1	Effekt och brinetemperatur	69
8.2	Jämförelse mellan kollektorenheterna	72
8.3	Ispåväxt på kollektorslangar	73
8.4	Utvärdering av värmeupptagningsförmåga	76
8.5	Praktiska erfarenheter av kollektor- systemet	80
8.6	Driftövervakning av ispåfrysning	83
	REFERENSER	87
	BETECKNINGAR	88
	BILAGOR	89 ff

FÖRORD

Utvärderingen av sjövärmeprojektet Motala Väster har varit ett lagarbete. Kjell Schroeder vid Mätcentralen vid Chalmers Tekniska Högskola har varit projektansvarig och Torbjörn Svensson vid Institutionen för Vattenbyggnad har varit konsult.

Torbjörn har utfört den mycket omfattande utvärderingen av sjökollektorn medan Kjell har haft ansvaret för mätdatainsamling samt hur anläggningen har uppfört sig i övrigt med problem o d.

Utvärderingen har varit både problemfylld och tidsödande. Ett stort antal stopp och andra driftstörningar hos värmepumpen har gjort det svårt att få sammanhängande mätperioder. Även våra mätningar har tidvis varit utsatta för störningar, som åsknedslag, strömavbrott, för hög temperatur i mätboden och på annat sätt krånglande utrustning. Våra givare har också vid olika tillfällen spelat oss spratt. Så var t ex våra sjötemperaturgivare i början av mätperioden utmärkta mottagare av Sveriges Radios utsändningar över långvägssändaren i Motala.

Under sådana förhållanden är man beroende av hjälpande händer och goda arbetskamrater och vi vill därför här passa på att tacka alla dem, som hjälpt oss att få den här rapporten till stånd.

Speciellt vill vi rikta vårt tack till följande personer:

- Sven Anderson vid MSK i Motala. Sven, som de senaste åren haft ansvaret för anläggningen, har i alla möjliga och omöjliga sammanhang ställt upp med hjälp. Utan honom hade vi knappast nått målet.
- Hans Bäckberg vid Mätcentralen. Hans har under de sista ett och ett halvt åren av projektet haft ansvaret för att mätningarna fungerat och att mätdata har varit relevanta. Hans har också tagit fram en stor del av bildmaterialet till rapporten.
- Lars-Ove Sörman och Bengt Carlsson vid Institutionen för Vattenbyggnad. Lars-Ove och Bengt har tillverkat och kalibrerat sjötemperaturgivarna och dessutom monterat dem på deras platser i sjön. De har också lagt ned mycket arbete på kontrollmätningar och felsökning. Lars-Ove har dessutom arbetat en del med bildmaterialet.

- Leif Nilsson och Håkan Larsson vid Mätcentralen. Leif har skött programeringen av vår mätdator och Håkan har varit ansvarig för installation av Mätcentralens givare och mätutrustning.

Göteborg i mars 1989

Kjell Schroeder

Torbjörn Svensson

SAMMANFATTNING

Sjövärmeprojektet Motala Väster är landets hittills största sjövärmeprojekt med slutet system och har en sjövärme Kollektor bestående av sammanlagt ca 90 km PEH-slang. Anläggningen försörjer två bostadsområden med ialles 1 600 lägenheter med 4,5 MW basvärme och samkörns med befintliga oljepannor. Värmeälla är en vik av Vättern. Värmeuttaget görs med tre kollektorenheter, varav två består av parallellt utlagda slangar, c/c 34 cm, på botten och den tredje av ett nätverk av spiralutlagda slangar, som når 2,5 m över botten. Kollektorenheterna sammanbinds med värmepumpen via en gemensam, 1,4 km lång brinekulvert.

Anläggningen har byggts med stöd av byggforskningsrådet, som också gett bidrag till uppföljning och utvärdering. I denna rapport slutredovisas resultaten av uppföljningsprogrammet. Intresset är till stor del fokuserat på kollektorn och utnyttjandet av värmeällan, då det i första hand är dessa delar, som är av utvecklingskaraktär.

Driften av anläggningen har varit utsatt för en hel del störningar och fel. Dessa har i huvudsak varit knutna till den maskinella utrustningen och till problem med samkörningen med värmepannorna. Även dessa erfarenheter redovisas ingående i rapporten.

Under den 43 månader långa uppföljningsperioden har anläggningen haft en registrerad drifttid av endast 7 200 timmar. Som bäst har anläggningen haft en utgående dygnsmedeleffekt på 4,8 MW och värmefaktorn 2,35 vid en förångningstemperatur på ca 1,9°C och avgiven temperatur på ca 75°C. Medelvärdet av värmefaktorn sett över hela uppföljningsperioden har dock varit 1,84 och under långa perioder har värmefaktorn varit under 1,5.

Flera orsaker har bidragit till den dåliga verkningsgraden. Så har t ex returtemperaturen till värmepumpens kondensor genomgående varit högre än avsett p g a problem med samkörningen med värmecentralerna. Vidare har värmesystemet haft för dålig ackumulerande förmåga för att värmepumpen skulle kunna köras i on/off-drift på ett effektivt sätt. Värmepumpens kompressor har dessutom varit feldimensionerad.

Bland de fel, som uppstått i anläggningen, är rostangreppen på förångartuberna det allvarligaste. Samtliga tuber fick bytas ut mot nya av titan samtidigt som ett katodiskt rostskydd installerades. Kompressorhjulet fick rostangrepp under renoveringsarbetet och man passade då på att byta detta mot ett, som var korrekt dimensionerat.

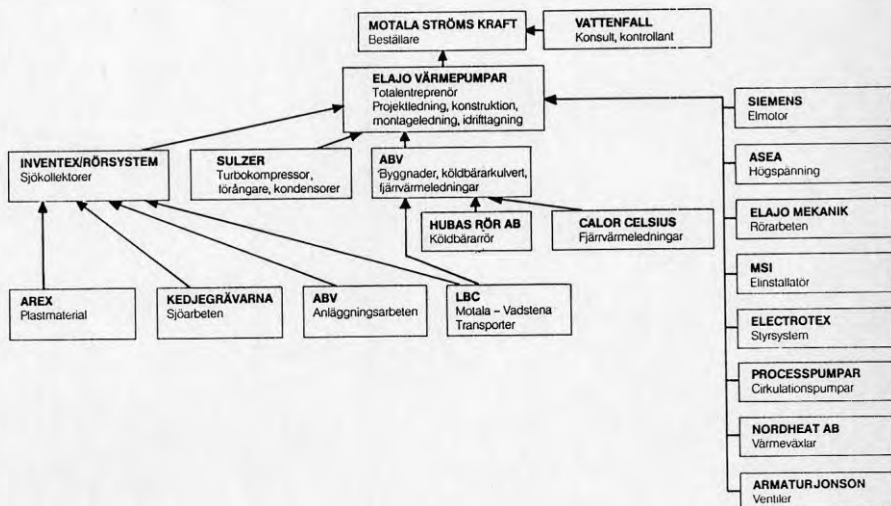
Sjövärme-kollektorn har i stort sett fungerat bra under uppföljningsperioden. Den är dimensionerad för ett värmeuttag av 33 Watt per meter slang och en maximal isdiameter av omkring 30 cm vid en dimensionerande vattentemperatur av 0,6°C. Mätningarna visar att kollektorns värmeupptagning fungerat som beräknat eller något bättre när den är ispåfrusen, medan den fungerat något sämre än beräknat när den är isfri, p g a försmutsning. Strömningen i området har stor betydelse för värmeöverföringen, speciellt när sjön inte är istäckt. En jämförelse mellan de båda kollektortyperna, plan resp. spiral, visar att värmeupptagningsförmågan är nära nog likvärdig, eller obetydligt bättre för spiralkollektorn.

Vattentemperaturen i kollektorområdet var lägre än dimensionerande värden under februari 1985 samt i januari och februari 1986 och 1987. Dessa vintrar var extremt kalla och de månadsmedelvärden på 0,2-0,3°C, som då uppmättes i Motalasvikens ytskikt är de lägsta som uppmätts under en period av 18 år. Som en följd av den låga vattentemperaturen fick värmepumpanläggningen stängas av under 10 dagar i februari 1986 och köras med reducerad effekt under ytterligare 4 dagar p g a för stor ispåväxt på kollektorslangarna. Med hänsyn till risken för låga vattentemperaturer, har i efterhand särskild utrustning installerats för att övervaka istjockleken på slangarna. Man har också kompletterat belastningen av kollektorslangarna med "strumpor" fyllda med singel för att eliminera risken för upplyftning p g a islyftkrafter.

1 INLEDNING, BAKGRUND

Projekt Motala V initierades av Motala Ströms Kraft AB år 1982, som ett led i att minska oljeförbrukningen och att bidra till att utveckla och demonstrera ny energiteknik. Tanken var att ersätta delar av den oljebaserade värmeproduktionen för två bostadsområden i västra delen av Motala med värmepumpbaserad basvärme. Förstudier för projektet initierades inom ramen för Statens Vattenfallsverks program för Värmepumpar och Solenergi med Per-Ivar Nylander som projektledare.

På dåvarande stadium hade man demonstrerat användningen av stora värmepumpar för fjärrvärmenät i några få anläggningar med grundvatten, sjövattnen eller avloppsvattnen som värmekälla. Det var därför naturligt att söka efter sådana värmekällor till det aktuella projektet. Som konsult för att utreda förutsättningar för värmeuttag engagerades VIAK AB, och det stod snart klart att grundvatten eller sjövattnen i öppna system inte var lämpliga som värmekälla. Ett slutet sjövärmesystem med värmeväxlare (kollektor) i form av slangsystem i sjön skulle däremot kunna användas, men det saknades erfarenheter av så stora kollektorsystem, som här var aktuella. Projektets utvecklingskaraktär motiverade att Byggnadsrådet (BFR) gick in som medfinansierare genom ett experimentbyggnadslån, och även gav bidrag till mätning och utvärdering av anläggningen. BFR:s engagemang avsåg i första hand kollektorn.



Figur 1.1 Projektorganisation för värmepumpprojekt Motala Väster.

Vattenfall svarade för att ta fram förfrågningsunderlag för anläggningen, som senare uppfördes med ELAJO Värme-pumpar som totalentreprenör och med en rad underentreprenörer. Projektorganisationen framgår av figur 1.1. Kollektorn konstruerades och byggdes av Inventex AB och AB Rörssystem gemensamt, med Hans Jelbring som huvudansvarig för dimensionering och utformning.

2 PROJEKTFÖRUTSÄTTNINGAR

Anläggningen Motala V projekterades under 1984 för att förse två befintliga bostadsområden, med sammanlagt ca 1600 lägenheter, med basvärme. De två områdena, som tillhör bostadsstiftelsen Platen respektive L E Lundbergs förvaltningsaktiebolag, fick tidigare sin uppvärmning från två oljeeldade panncentraler, en i vardera området. Den sammanlagda panneffekten var 15 MW och årsenergiförbrukningen var vid projekteringen ca 25 GWh.

Värmen skulle produceras via en värmepumpsanläggning och befintliga pannor skulle användas vid topplast. Som värmekälla till värmepumpen hade förundersökningar anvisat sjövärme ur Motalaviken med värmeväxlare (kollektor) i form av slangsystem på botten eller i vattnet. De tidvis låga vattentemperaturerna uteslöt användningen av ett s k öppet sjövarmesystem, där sjövattnet pumpas direkt upp till en förångare eller värmeväxlare på land. Kollektorn skulle delas upp i tre enheter för att bli möjliga jämförelser mellan olika kollektortyper.

Vid projekteringen togs hänsyn till en planerad framtida utbyggnad av värmelasten. Bl a fanns tankar på en anslutning av Mariebergssbadet i Motala Folkets Park samt anslutning till ett planerat fjärrvärmenät. Den planerade utbyggnaden av värmepumpsanläggningen skulle då omfatta en utökning av sjökollektorn med två enheter och en ombyggnad av värmepumpen för att möjliggöra att den levererade värmeeffekten ökades från 4,5 MW till 8 MW.

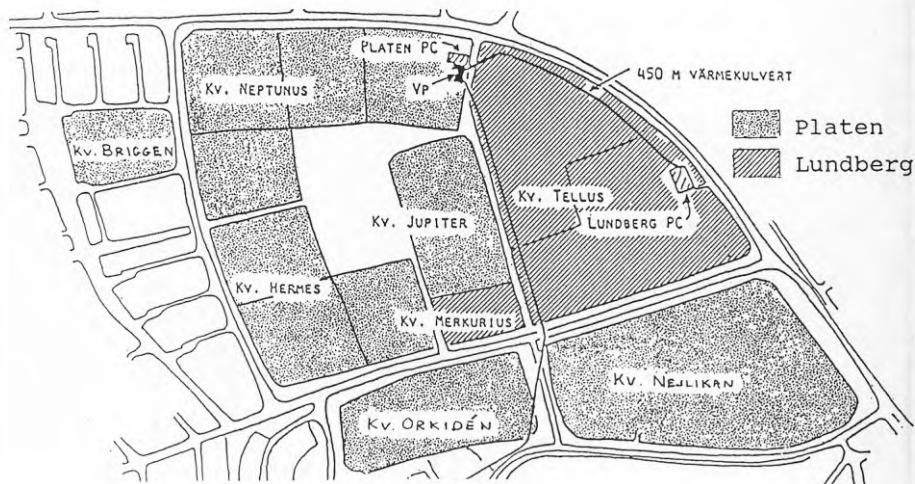
2.1 Bostadsstiftelsen Platen; värmebehov och distributionsnät

Kvarteren Neptunus, Hermes, Jupiter, Briggen, Orkidén och Nejlikan hör alla till bostadsstiftelsen Platen och förses med värme från en panncentral inom området. Totala antalet lägenheter i dessa kvarter uppgår till ca 1100. Även en kyrka och en skola inom området förses med värme från samma panncentral. Den primära bruksarean inom området uppgick vid projekteringen till totalt ca 82 000 m².

I områdets panncentral fanns vid denna tid tre oljeeldade pannor med tillsammans 3*3,7 MW effekt.

Maximalt effektbehov uppskattades till 6,8 MW och under 1984 var årsenergibehovet för dessa kvarter 18,0 GWh. Med 80 % pannverkningsgrad motsvarade detta 2119 m³ olja av kvalitet E05 per år.

De undercentraler, som finns i dessa kvarter, är dimensionerade så, att det krävs en framledningstemperatur av ca 75°C för att klara störttappningar av tappvarmvatten. Detta medförde, att speciell uppmärksamhet måste riktas på den värmeväxlare, som planerades mellan värmepumpen och Platens fjärrvärmekrets. Om temperaturen på vattnet från värmepumpen blev för låg, så skulle någon av pannorna i Platens värmecentral gå igång. Detta borde undvikas utom i de fall då värmehövet blev större än vad värmepumpen kunde leverera.



Figur 2.1 Översikt över uppvärmda bostadsområden.

2.2 L E Lundbergs förvaltningsaktiebolag; värmehov och distributionsnät

Till Lundbergs panncentral är anslutna ca 500 lägenheter belägna i kvarteren Tellus och Mercurius. I det senare ligger även ett affärscentrum. Totala primära bruksarean var 40 950 m².

Lundbergs panncentral innehåller två större och en mindre panna med en total effekt av 3,9 MW.

Maximalt effektbehov från Lundbergs panncentral är 3,2 MW och under 1984 uppskattades det totala energibehovet till 7,4 GWh. Med en uppskattad pannverkningsgrad av 70 % motsvarar detta ett oljebehov av 1000 m³ olja av kvalitet E04 per år.

Från och med augusti 1985 har man vid Lundbergs panncentral övergått till eldningsolja av kvalitet E01.

2.3 Projekteringsdata

Följande data låg till grund för projekteringen enligt en komplettering till BFR-ansökan 1984-02-16.

<u>Enhet</u>	<u>PC Neptunus</u>	<u>PC Tellus</u>	<u>Totalt</u>
Oljebehov	2119 m ³ /år	1000 m ³ /år	3119 m ³ /år
Oljekvalitet	E05	E04 ¹	
Energiinnehåll	10,82 MWh/m ³	10,6 MWh/m ³	
Pannverkningsgrad	80 %	70 %	
Oljepris	2050 kr/m ³	2100 kr/m ³	
Medelpris netto- värme	237 kr/MWh	283 kr/MWh	250 kr/MWh
Netto energibehov	18,0	+ 7,4	= 25,4 GWh/år
Framtida energi- behov vid 15 % besparing	15,3	+ 6,3	= 21,6 GWh/år
Framtida effekt- behov			9 MW
Energi från vp storlek 4,5 MW			17,7 GWh/år
Årsvärmefaktor (baserad på erfa- renheter från bl a Visby)			2,2
El till vp			8,0 GWh/år
Elpris för vp			200 kr/MWh

Investeringarna uppskattades totalt till 16 Mkr. I detta ingår investering i sjökollektorer med uppskattningsvis 5 Mkr.

Vidare uppskattades att kostnader kunde tillkomma på grund av att följande problem kunde uppstå:

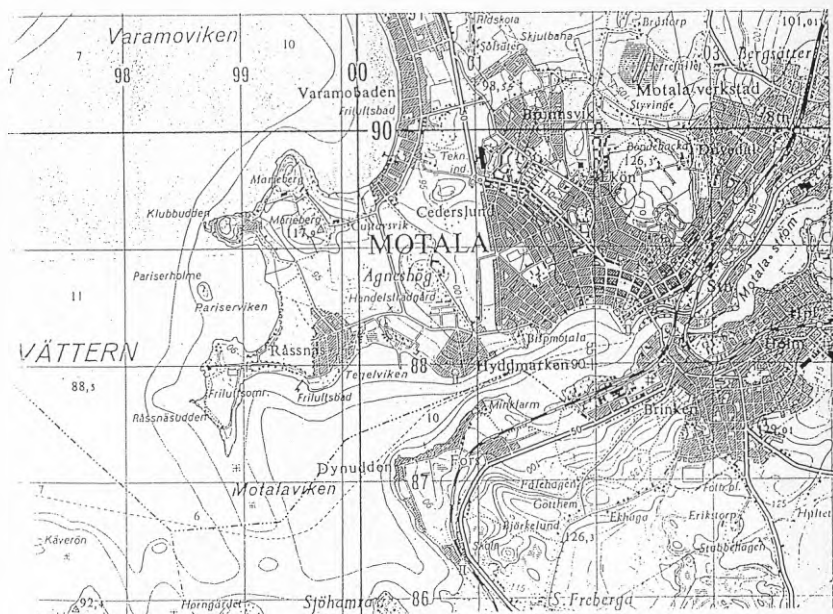
¹ PC Tellus, dvs Lundbergs panncentral övergick till eldningsolja E01 under augusti 1985.

- Effekten räcker ej till och kollektorerna kompletteras första året med en enhet (1,5 MKr).
- En kollektorenhet havererar helt under de första driftåren på grund av otillräcklig förankring mot storm och ispåfrysning eller materialfel, nötning påvisas och enheten byts efter 5 - 7 år. Byte av hela kollektorn efter 5 driftår, kan ses som en rimlig skattning av eventuella haveriers ekonomiska konsekvenser.

En redovisning av värmepumpens elkostnader återfinns i bilaga 2.

2.4 Värmevärmekälla

I förundersökningen diskuterades två möjliga lägen för sjövärmeeuttag, nämligen i Varamoviken nordväst om bostadsområdet, eller i Motalaviken söder därom (se figur 2.2). Varamoviken utgör en del av den större Motalabukten, medan Motalaviken är mera avgränsad och därtill utgör inlopp till Motala Ström. I det följande sammanfattas och kommenteras de undersökningar, som ligger till grund för värmeeuttaget till värmepumpen.



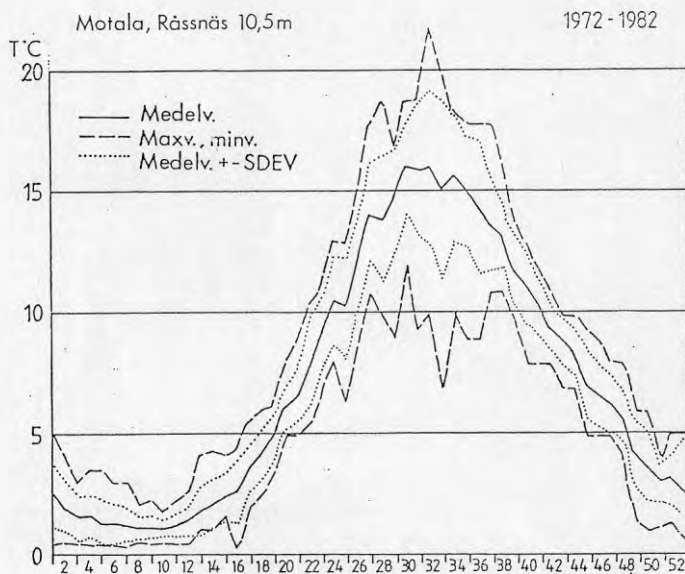
Figur 2.2 Översikt över Motala med angränsande vattenområden.

2.4.1 Vättern som värmekälla

Vättern är Sveriges andra sjö i storlek och därtill över 100 m djup. Sjön utgör således ett enormt värmemagasin, vilket innebär att den kyls ned långsamt på hösten och förblir tämligen kall under sommaren. Istäcke på hela sjön bildas bara vart annat år i genomsnitt, och isläggningen sker i så fall tidigast i slutet av januari. Motalabukten, som till största delen är mindre än 20 m djup, torde däremot isläggas nästan varje år.

Förutsättningarna för värmeuttag i sjön bör bedömas med hänsyn till:

- vattentemperaturen på olika djup; speciellt under vintern.
- tillgänglig värmemängd under vintern.
- bottenförhållanden samt skyddsaspekter med hänsyn till is, vågor, båttrafik, fiske m m.



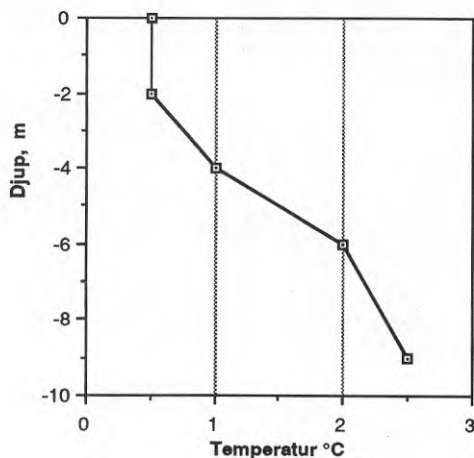
Figur 2.3 Temperaturstatistik från Motala vattenverks vattenintag på 10,5 m djup under åren 1972-82. Kurvorna baseras på veckomedelvärden av dagliga avläsningar. (Från Svensson & Broman, 1983)

En sammanställning av befintliga temperaturdata och en översiktlig värdering av förutsättningar för värmeuttag på olika platser runt Vättern har gjorts av Svensson och Broman (1983). Data från Motala vattenverks intag på 10,5 m djup i Motalabukten (utanför Motalaviken) visas i figur 2.3. Medeltemperaturen under de kallaste månaderna, februari och mars, var omkring 1°C och de lägsta värdena 0,3-0,4°C.

2.4.2 Temperaturförhållanden i Motalaviken

Vattentemperaturen i Motalaviken kan förväntas skilja sig något från den i Motalabukten främst p g a den grundtröskel på 3-6 m djup, som avgränsar viken från Motalabukten och hindrar ett direkt vattenutbyte på större djup, se figur 2.2.

Under tröskelnivån kan vattnet förväntas vara mer eller mindre stillastående (stagnant) under vintern, då viken är istäckt och under uppvärmningsperioden på våren och försommaren. Under vintern torde det ske en svag uppvärmning av bottenvattnet efter isläggningen p g a värmeavgivning från sedimenten. Temperaturprofilen i figur 2.4, som uppmättes i samband med bottenundersökning (VIAK AB) i slutet av januari 1984 kan sägas stödja denna tolkning.



Figur 2.4 Temperaturprofil i Motalaviken den 30 januari 1984.

Inom ytskiktet kan temperaturen förväntas vara mycket nära den på motsvarande nivå i Motalabukten utanför Motalaviken p g a inverkan av genomströmningen av Mo-

tala Ström. Under vintern bör dessa värden vara några tiondels grader lägre än de som uppmätts på 10,5 m djup (figur 2.3). Genomströmningen uppgår till 40 m³/s som genomsnitt och bör vara koncentrerad till ett skikt från ytan ned till tröskelnivån, utom i samband med vår- och höstomblandningen då vattnet är homogent blandat. Inom ytskiktet kan genomströmningen beräknas ge en strömhastighet av ca 1 cm/s i Motalavikens bredare del. Vattenkraftregleringen nedströms gör att flödet är ojämnt fördelat, med 50-60 m³/s under vardagsdygn och oftast 5-10 m³/s under helger.

Viss information om ytskiktets temperatur kan också fås från SMHI:s mätningar vid Motala kraftverk, ca 5 km nedströms Motalaviken. Vattnet från det strömmande skiktet i Motalaviken har här blandats homogent och vid kall väderlek kanske kylts ned obetydligt (storleksordning några hundra grader). En sammanställning av dessa data gjordes 1986, efter det att värmepumpen tagits i drift, och visas i form av månadsvärden för vintermånaderna i tabell 2.1. T_{med} står för medelvärde för hela mätperioden, S_{td} för standardavvikelse av månadsmedelvärdena och T_{min} för lägsta uppmätta månadsmedelvärde. Av tabellen framgår att den kallaste månaden är februari, med en medeltemperatur i vattnet av 0,45 °C. Det är rimligt att anta att månadsmedeltemperaturen i undre delen av ytskiktet i Motalaviken, på 4-5 m djup, som lägst är 0,5-0,6 °C.

Tabell 2.1 Statistik över månadsmedeltemperaturer vid Motala kraftverk 1970-1985.

	Dec	Jan	Febr	Mars	April
T_{med}	1,73	0,64	0,45	0,93	3,49
S_{td}	0,99	0,46	0,32	0,61	1,17
$T_{med} - S_{td}$	0,74	0,18	0,13	0,32	2,32
T_{min}	0,32	0,20	0,18	0,3	1,3
1985	1,3	0,5	0,18	0,3	1,3
1986			0,18		

2.4.3 Bedömning av tillgänglig värmemängd

Den värmemängd som finns tillgänglig för uttag i Motalaviken under vintern, då viken är islagd, bedömdes före projektet utgående från följande överslagsberäkningar. Dessa avser den yttre delen av Motalaviken, väster om sundet vid Hyddmarken.

- Genomströmmande älvvatten i ytskiktet. En temperatursänkning av 0,01 °C motsvarar en effekt av 1,8 MW.

- Värmeinnehållet i djupvattnet under tröskelnivån. Temperaturprofilen i figur 2.4 motsvarar en energimängd inom djupintervallet 4-12 m av ca 7 GWh vid kylning till 0,5°C, eller en effekt av 2,4 MW under 4 månader.
- Värmetillskott från botten. Ett uppskattat medelvärmefflöde från botten av 1 W/m² inom djupintervallet 3-10 m ger ett värmetillskott av ca 2 MW vilket till största delen torde bidra till uppvärmning av vattnet under tröskelnivån.

Slutsatsen av dessa överslag blev att det planerade värmeuttaget på 2,8 MW endast skulle ge en liten påverkan på de naturliga temperaturförhållandena i viken under vintern. Om värmeuttaget sträcker sig ned under tröskelnivån är det dock sannolikt att tjockleken på det homogena ytskiktet ökar något. I den större Motalabukten skulle inverkan av värmeuttaget bli försumbar.

2.4.4 Vågor och bottenförhållanden

Motalabukten är, genom sin storlek, kraftigt utsatt för vågor, vilka kan beräknas ge strömhastigheter överstigande 0,4 m/s ned till ca 10 m djup. En dykinspektion av botten i två parallella linjer åt NNV från udden vid Marieberg, se figur 2.2, visade också tecken på bottenerosion och sandtransport till ett avstånd av ca 400 m från stranden, där 10-11 m djup uppnåddes. På mindre djup var botten hård och delvis stenbemängd. I Motalabukten förekommer också situationer då s k issörpa bildas, vid öppet vatten, kallt väder och kraftig vind. Iskristaller bildas vid ytan och blandas ned i vattnet till några meters djup och kan fästa på föremål vid botten och ev lyfta dessa.

Motalaviken skyddas mot inkommande stora vågor av grundområdena vid mynningen så att påverkan av bottenströmmar blir väsentligt mindre än i bukten utanför. Issörpa bör inte heller vara något stort problem i Motalaviken. Däremot utgör sjöfarten inom viken en riskfaktor som måste beaktas. Inom farleden, som går genom viken, bör inte kollektorslangar läggas, och hänsyn måste också tas till befintliga småbåtshamnar och trafik i anslutning till dessa.

Ekolodning, dykinspektion och enkel bottenprovtagning utfördes i slutet av januari 1984 av VIAK AB i norra delen av Motalaviken, mellan Tegelviken-Råssnäsbadet och farleden, se figur 2.2. Lodningen skedde längs linjer med 50 m avstånd och ligger till grund för den djupkarta som upprättats, se figur 3.6.

Dykinspektionen och bottenprovtagningen visade att

botten ned till mellan 6 och 7 m djup är fast och består av sand med inslag av grus och växtdelar. Denna botten är delvis hård och på sina ställen förekommer mindre stenar på botten. På större djup än 7 m är botten lös och består av gyttjig lera med inslag av något sand eller silt. I den västra delen av området sträcker sig den lösa botten till ett något mindre djup. Den våta volymvikten hos bottenprov från 7 resp. 9 m djup bestämdes till 1,25 resp. 1,10 ton/m³. Dessa prover togs genom att trycka ned plexiglasrör till 20-30 cm djup i botten.

2.4.5 Slutsatser

Slutsatserna av förundersökningarna kan sammanfattas enligt följande:

- Vattentemperaturen i såväl Motalabukten som i Motalaviken är så låg att endast sjövärmearläggningar av indirekt typ, med en värmväxlare placerad i sjön (kollektor), kan komma i fråga.
- I Motalabukten krävs att kollektorn placeras på minst 10 m djup p g a våg- och ispåverkan. Detta förslag förkastades av kostnadsskäl.
- I Motalaviken kan kollektorn placeras i norra delen inom ett område med djup mellan 2,5-3 m ned till 10-12 m. Vattentemperaturen inom den grundare delen bör ha ett månadsmedelvärde under den kallaste månaden, februari, av i genomsnitt 0,5-0,6°C.

3 TEKNISK BESKRIVNING

3.1 Systemöversikt



Figur 3.1 Översikt över värmepumpenläggning Motala Väster.

Värmepumpanläggningen Motala V visas översiktligt i figur 3.1 och består av följande huvuddelar:

- Kollektor; 3 enheter med transportledningar.
- Ventilbyggnad.
- Brinekulvert, 1 400 m.
- Värmepump, 4,5 MW.
- Värmekulvert till Lundbergs panncentral samt inkopplingar på värmedistributionssystemen.

Värmepumpen är installerad i en byggnad, som är placerad omedelbart intill bostadsstiftelsens Platen värme-central, till vilken anläggningen är förbunden via en kort kulvert, figur 3.1. L E Lundbergs värme-central är ansluten till anläggningen via en 450 m lång kulvert.



Figur 3.2 Platens panncentral med värmepumpsbyggnaden i bakgrunden.

Sjökollektorn är ansluten till värmepumpen via en 1400 m lång, 500 mm diameter, oisolerad glasfiberarmerad plastkulvert förlagd i mark. Centrumavståndet mellan de två rören i kulverten är 800 mm. Rören har tillverkats av HOBAS Rör AB i Emmaboda.

Anslutningen mellan sjökollektorns tre enheter och plastkulverten har gjorts i en ventilbyggnad. Denna är

en betongbyggnad med 4,0 x 4,5 m golvarea och 2,5 m invändig höjd. Ventilbyggnaden är belägen vid stranden intill kollektorn och befinner sig till större delen under mark. I ventilbyggnaden finns även mätutrustning för flöde och temperaturer i de tre kollektordelarna.



Figur 3.3 Lundbergs panncentral.

Det är det stora kollektorsystemet, som utvinner värme ur det kalla vätternvattnet, som gör denna värmepumpsanläggning unik. Kollektorn består av sammanlagt 90 km PEH-rör och är den största i sitt slag, som byggs.

Sjökollektorn består av tre separata enheter. Två av dessa är plana, dvs slangarna är utlagda plant på botten av sjön. Den tredje, som är av typ liggande spiral, är betydligt mer kompakt än de plana. Kollektorenheterna är utlagda på sjöbotten inom ett område där djupet är 2,5 till 12 meter.

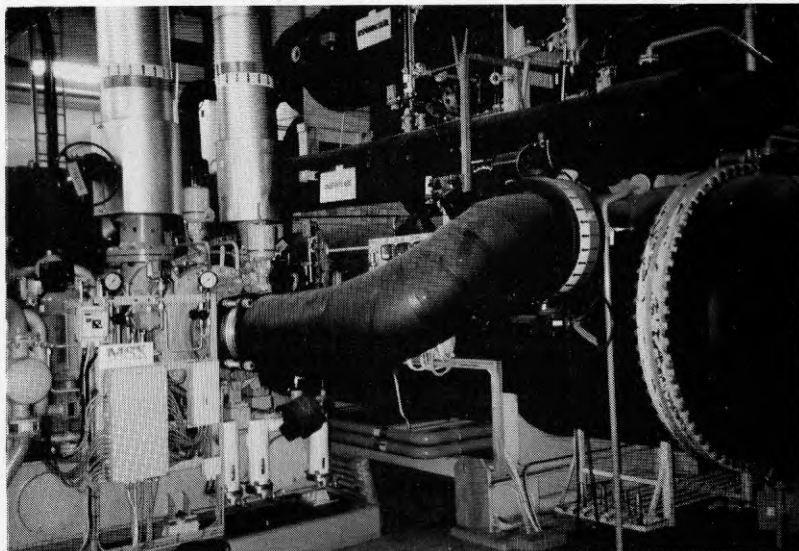
3.2 Värmepumpen

Värmepumpen har som drivkälla en vattenkyld elmotor, med 3,25 MW märkeffekt. Till denna är kopplad en tvåstegs turbokompressor, som är av fabrikat Sulzer.

Som köldmedium användes R12 och avgiven värmeeffekt är angiven till 4,5 MW. Värmepumpen är dimensionerad för en senare utbyggnad till 8 MW avgiven effekt, då med

R500 som köldmedium. Som köldbärare har använts vatten innehållande 16 % CaCl_2 med tillsats av rostinhibitorer av typ Mitco R23L och Mitco R10.

I efterhand har anläggningen kompletterats med en 1,2 MW elpanna inkopplad i serie med värmepumpen. Inkopplingen är gjord så, att värmepumpen kan förbikopplas under de perioder då elpannan användes. Likaså kan elpannan förbikopplas om enbart värmepumpen skall vara i drift.



Figur 3.4 Värmepumpen med kompressorn till vänster och tubförångaren till höger.

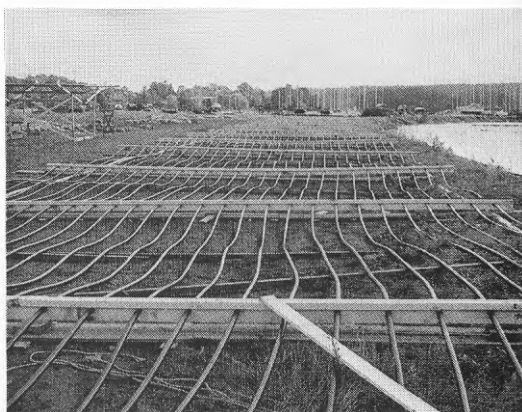
Den byggnad, som inrymmer värmepumpen, har en golvarea på ca 260 m². Utrymmena är fördelade på en maskinhall med värmepump, värmeväxlare och cirkulationspumpar, utrymme för transformator, utrymme för lågspänningsstälverk med reglercentral, utrymme för högspänningsstälverk samt ett utrymme, som sedermera har fått inrymma en elpanna.

3.3 Kollektorsystemet

Sjövärme-kollektorn består av sammanlagt 90 km PEH-slang med ytterdiametern 40 mm och 3 mm vägg tjocklek. Kollektorn är uppdelad i tre enheter med en nominell effekt av 950 kW vardera. Ursprungligen avsågs att välja tre olika leverantörer för att ge beställaren större möj-

ligheter att utvärdera deras olika prestanda och kvalitet i övrigt. Av ekonomiska skäl valdes dock samma leverantör för hela kollektorn, men med två olika utföranden på kollektorenheterna.

Två av enheterna är av typ PLAN, och utgörs av 84 st parallella, bottenförlagda, 360 m långa PEH-slangar i hårnålsform. Den tredje enheten, av typ SPIRAL, är väsentligt mera kompakt och består av liggande slangspiraler med 2,5 m diameter, vilka delvis skjutits in i varandra. Slangspiralererna har en längd av 12 m. Antalet slangar är 108 och varje slang har en längd av 272 m. Principen för de båda kollektortyperna framgår av nedanstående figurer.



Figur 3.5 a

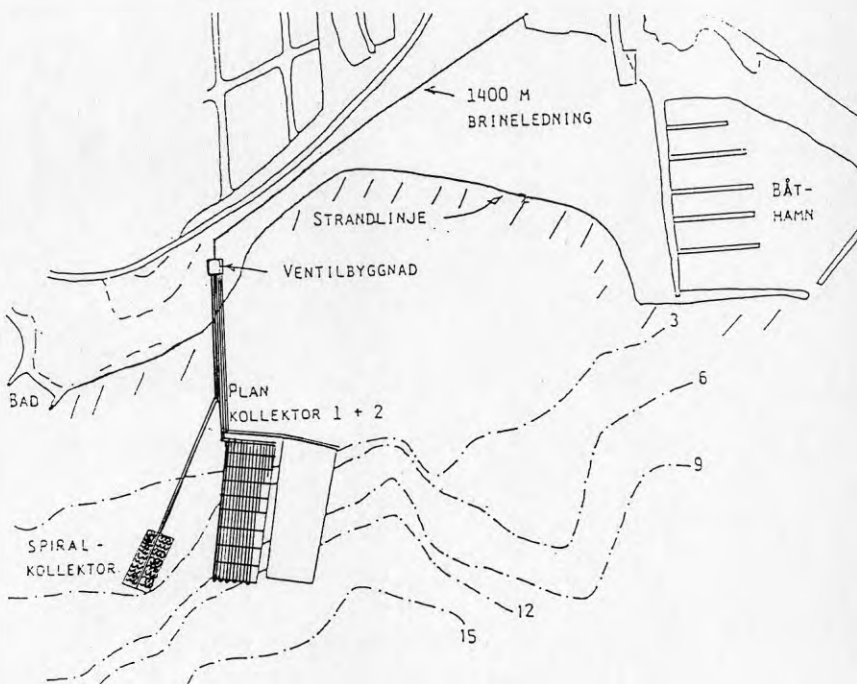
Foto av plankollektorn vid monteringen på land.



Figur 3.5 b Foto av spiralkollektorn före sänkning på den avsedda platsen.

De båda plana kollektorenheterna täcker ett område med varierande djup inom intervallet 2,5 till 12 m, se figur 3.6. Spiralkollektorn är utlagd på 5 m djup inom ett område med plan sandbotten. Kollektorn bildar således ett nätverk av slangar från 2,5 m djup till botten.

Slangarna i respektive kollektorenhet är svetsade till en gemensam fram- respektive returledning av PEH, med dimensionen $\phi 225/200$. Från plankollektorns stamledningar utgår slangar endast åt ena sidan, medan spiralkollektorn har slangar på båda sidor. De sex stamledningarna går till en ventilbyggnad, som är nedsänkt i marken ett tjugotal meter upp på land, och kopplas där samman med en köldbärarkulvert vilken går till värmepumpens förångare. I ventilbyggnaden finns avstängningsventiler för var och en av kollektorenheterna.



Figur 3.6 Karta över slangarnas placering i Motalaviken.

Kollektorn är belastad med singel för att motverka uppkommande islyftkrafter. På de plana kollektorenheterna placerades singellasten över de tvärgående träförbanden, c/c 8 m, som håller slangarna på plats, se figur 3.7. Spiralkollektorn belastades med två breda, längsgående singelsträngar på ömse sidor om stamled-

ningen. I båda fallen kan man räkna med en extra säkerhet mot islyftkrafter genom infrysning av bottenmaterial. Spiralkollektorn kan dessutom fördela lasten på ett effektivt sätt genom att frysa samman i kontaktpunkterna mellan slangarna.



Figur 3.7 Foto av slangar på botten och singelbelastning.

Tabell 3.1 Data för sjövärmekollektorenheterna i Motala V

	PLAN	SPIRAL
Slangmaterial	PEH	PEH
Slangdimension	40/34	40/34
Tryckklass	NT6	NT6
Slanglängd	340 m	272 m
Antal slangar	84	108
Total slanglängd	28,6 km	29,4 km
Slangdelning	33 cm	34 cm
Bottendjup	2,5-12 m	5 m
Bottenareal	62*172 m	34*75 m
Dimensionerande effekt	33 W/m	33 W/m

Kollektorns dimensionering baseras på en vattentemperatur av $0,6^{\circ}\text{C}$ och en lägsta inkommande köldbärartemperatur till värmepumpen av -6°C . Den dimensionerande islasten och dess fördelning över kollektorn har ej specificerats explicit, varken av beställaren eller av leverantören. Det var också en betydande osäkerhet hur påfrysningen skall beräknas, med hänsyn dels till vattentemperaturens variation i vertikalled, dels till strömningen. Den kontrakterade, totala belastningen med singel på respektive kollektorenhet var 200 ton (vikt under vatten), vilket motsvarar en genomsnittlig kraft av $6,6\text{ kg per m slang}$, eller lyftkraften av påfrusen is med en diameter av ca 30 cm. Leverantören uppger att man påfört ytterligare singel på varje kollektorenhet som säkerhetsmarginal, samt att slangarnas anläggning mot botten ger en betydande extra säkerhet genom att bottenmaterialet fryser in. Detta gäller då i första hand på djup mindre än 6 m där botten är fast.

Kollektorn har konstruerats av Inventex Aqua AB, som också svarat för byggandet, tillsammans med Rörsystem AB. Kollektorslangarna monterades samman på land med träförband i enheter om 6 slangar. Till varje sådan enhet svarar ett segment av tillopps- och returledning med korta grenledningar $\phi 40$ påsvetsade, vilka elmuffsvetsades till slangarna. Kollektorenheterna bogserades sedan ut till den avsedda platsen och sänktes varefter segmenten skruvades ihop med flänsförband i grenrören.

Täthetsprovning utfördes för varje slang individuellt samt, efter montering, för varje kollektorsegment och för hela kollektorenheten inklusive transportledningar. Ledningssystemet spolades också igenom med vatten för att bli av med partiklar och luft.

Kollektorsystemet byggdes under sommaren, hösten och vintern 1984-85, under delvis mycket besvärliga väderförhållanden. Perioder med kraftiga vindar förorsade utbogsering och sänkning av enheterna. Singelbelastningen gjordes först från prämar med stora problem vid blåsigt väder. Omkring den 8 januari frös viken och vädret var sedan extremt kallt under januari och februari, då det fortsatta arbetet med singelbelastning gjordes med dumpers från isen, se figur 3.8. Istäcket på viken nådde en tjocklek av 50-70 cm.



Figur 3.8 Singelbelastning med dumpers genom uppsågade spalter i isen.

Kontrollbesiktning av kollektorn utfördes genom dykinnspektion av VIAK AB den första och 11-13 mars 1985. I samband med besiktningen markerades 10 st referenspunkter för återkommande kontroll. Två av referenspunkterna placerades inom spiralkollektorn och 4 inom vardera av de plana kollektorenheterna, se bilaga 6. Fotografier togs vid några av referenspunkterna.

Besiktningresultatet kan sammanfattas enligt följande:

- Spiralkollektorns utförande såg bra ut. Singelbelastningen var utlagd i 4 strängar om 4-5 m bredd tvärs spiralerna.
- Inom spiralkollektorn observerades fem svetskopplingar och en skruvkoppling. Samtliga verkade vara väl utförda.
- Inom plankollektorerna observerades ett antal ställen där slangarna ej var sträckta mellan reglarna. Slangarna bildade där en bukt mellan reglarna av varierande höjd upp i vattnet. (57 slangavsnitt i enhet I och 23 i enhet II).
- Singelbelastningen på reglarna inom de plana kollektorerna var genomgående väl utförd och

heltäckande. Ett representativt värde på singelmängden uppskattades till 1-2 m³ per löpmeter inom en djupare del av enhet I.

- De konstaterade avvikelserna bedömdes inte påverka kollektorns värmeupptagande funktion.
- Singelbelastningen bedömdes ge en tillfredsställande säkerhet mot uppflytning vid en maximal isdiameter av 30 cm¹.
- De uppbyggda slangarna bedömdes vara utsatta för större risk för mekaniska skador än de som ligger plant på botten. Speciellt gäller detta inom grunda partier, där båttrafik och i viss mån vågor kan påverka slangarna.
- Risk för vågerosion av singelbelastningen inom de grunda partierna på plankollektorenheterna bedömdes inte kunna uteslutas.

Som en följd av besiktningen åtgärdades de uppbyggda slangarna genom att de belastades mellan reglarna med säckar med singel.

Kollektorn har senare markerats med bojar i hörnen som skydd för oavsiktlig åverkan av fiske och båttrafik. Länstyrelsen och Sjöfartsverket har dessutom utfärdat ankringsförbud inom området.

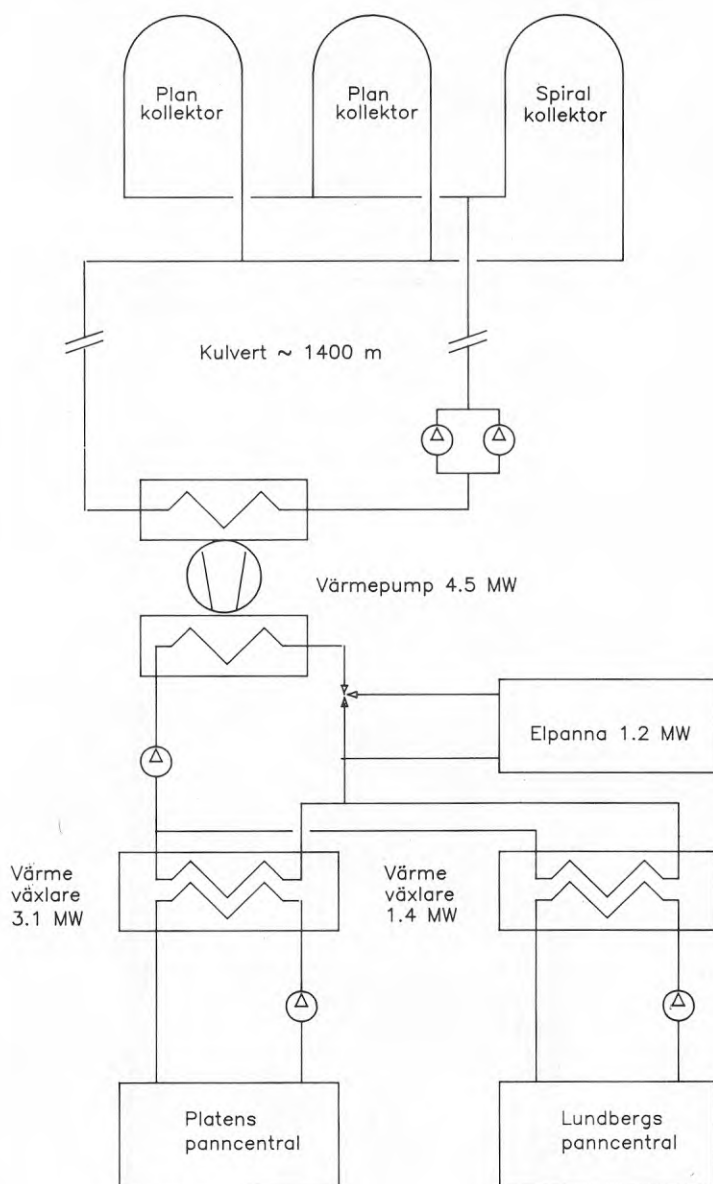
3.4 Inkoppling

Värmepumpsystemets uppbyggnad framgår av figur 3.9. Kondensorkretsen har en egen cirkulationspump, som driver det uppvärmda vattnet till två värmeväxlare, en för Platens värmecentral och en för Lundbergs värmecentral. Cirkulationspumpen har märkeffekten 22 kW.

De områden, som normalt förses med värme från dessa båda värmecentraler, har ett maximalt effektbehov av 6,8 MW respektive 3,2 MW. Värmeväxlarna, som förbinder värmepumpen med de två värmecentralerna, är dimensionerade för maximalt 3,1 resp 1,4 MW överförd effekt. Vid större effektbehov användes därför även värmecentralernas ordinarie pannor.

Från dessa värmeväxlare leder kulvertar till respektive värmecentral. Det uppvärmda vattnet drivs runt i dessa kretsar med hjälp av två cirkulationspumpar, vardera med märkeffekten 22 kW, placerade intill värmeväxlarna i värmepumpbyggnadens maskinhall.

¹ Detta motsäges dock av senare utförda kontrolldykningar med bl a videofilmning av förankringen.



Figur 3.9 Systemuppbyggnad

Anslutningarna till respektive värmecentrals värmesystem var gjorda som enkla inkopplingar med cirka 1 m mellan på och avstick.

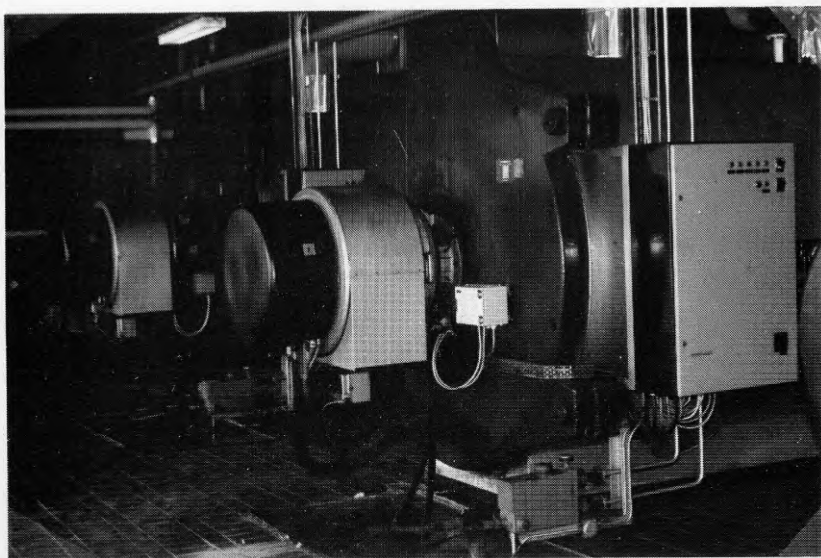
Köldbäraren cirkulerar mellan värmepumpens förångare och sjökollektorn med hjälp av två brinepumpar, vardera med märkeffekten 132 kW, varav endast en användes åt gången. Sjøkolektorn är, som tidigare nämnts, uppdelad i tre enheter med en nominell värmeupptagningsförmåga av vardera 950 kW och beskrivs närmare i avsnitt 3.3.

Brinesystemet är förberett för en framtida utbyggnad av sjökollektorn med ytterligare två enheter. Med ett annat kompressorhjul i värmepumpen och med R500 som köldmedium skall då värmepumpen kunna avge 8 MW värmeeffekt.

3.5 Ombyggnader

I bilaga 5 finns en fullständig redogörelse över de ombyggnader och reparationer, som gjorts i systemet efter idrifttagningen. Här nedan följer en kort sammanfattning.

3.5.1 Elpanna och nytt styrsystem



Figur 3.10 Platens panncentral med de gamla brännarna.

I juni 1986 installerades en 1200 kW elpanna med tillhörande högspänningsutrustning i värmepumpbyggnaden. Detta gjordes eftersom det ej gick att reglera ned effekten från värmepumpen i önskad grad.

Värmepumpens inkoppling till värmecentralerna modifierades samtidigt med bl a en backventil. Ett nytt samordnande styrsystem mellan värmepump, elpanna och panncentralerna installerades med tillhörande givare, shuntar m m. En av brännarna i Platens värmecentral byttes ut mot en med 1.8 MW effekt, vilket är mindre än den ursprungliga brännarens effekt. På detta sätt förväntade man sig att temperaturstegringen i returvattnet till värmepumpen skulle bli långsammare vilket skulle påverka effektregleringen av värmepumpen positivt.

3.5.2 Förångaren, rekonstruktion

Under tiden maj 1986 till februari 1988 stod värmepumpen stilla p g a rostskador i förångaren. I avsnitt 6.4 och i bilaga 3 och 4 finns en redogörelse för hur rostskadorna uppstod och vilka åtgärder som vidtagits.

Rekonstruktionen gick i korthet ut på att förångartuberna av kolstål utbyttes mot nya av titan. De plattor i förångaren, som håller tuberna på plats sprängfogades med titan och förångarens gavlar gummipläterades på de ytor, som är i kontakt med brine.

Eftersom vissa delar av anläggningen fortfarande innehåller kolstål och syrekontrollen av brine inte har gått att genomföra tillfredsställande har man valt att installera ett katodiskt rotskydd både i ventilbrunnen och värmepumpens maskinhall.

3.5.3 Rekonstruktion och modifiering av kompressorn

I samband med reparation av förångaren läckte brine in i turbokompressorn med rostskador som följd. Detta krävde utbyte av diverse komponenter kring kompressorn. I samband med detta modifierades kompressorn. I beställningen framgår att MSK vill ha option på en utbyggnad från 4,5 MW till 8 MW. Leverantören hade dock redan från början försett värmepumpen med en kompressor för 8 MW. Kompressorhjulet byttes nu ut mot ett avsett för 4,5 MW.

4 UPPFÖLJNINGSPROGRAMMETS SYFTE

Sjövärmeprojektet Motala Väster stöds av Statens Råd för Byggnadsforskning med experimentbyggnadslån på totalt 7 903 kkr. BFR har beviljat fyra lån varav de tre första på totalt 6 403 kkr har avsett uppförande av sjökollektorn, extra kostnader för kulvert, brine m m samt kostnader för extra påviktning av sjökollektorn.

Det fjärde lånet på 1 500 kkr avsåg rekonstruktion av värmepumpens förångare genom att kolstältuberna utbyttes mot titantuber.

Det specifika med projektet är den stora sjökollektorn och det var i första hand dess funktion, som mätningarna och utvärderingen skulle omfatta. Ett stort arbete har därför lagts ned på noggranna mätningar av sjötemperaturer och energier från kollektorns tre delar.

I övrigt skulle anläggningens funktion följas upp. Uppföljningen skulle vara mera av kvantitativ än kvalitativ karaktär.

Efter det att anläggningen startades har det ena problemet efter det andra uppstått. Utvärderingsarbetet har därför till stor del fokuserats på orsakerna till de uppkomna problemen och vad man har kunnat göra åt dem.

4.1 Teknisk utvärdering av kollektorn

Mätningarna på kollektorsystemet syftade till att ge underlag för att utvärdera kollektorenheternas funktion och värmeupptagningsförmåga, speciellt vid låga vattentemperaturer. En direkt jämförelse skulle kunna göras mellan den plana och den spiralformade enheten.

Syftet var också att jämföra med laboratorieresultat och teoretiska beräkningsmodeller för att kontrollera och vidareutveckla dimensioneringsmetoder för sjökollektorer. För detta ändamål skulle brinetemperatur, upptagen effekt och ispåfrysning kunna relateras till vattentemperatur och strömning i området.

Det planerade mätprogrammet för kollektorn har kunnat genomföras i sin helhet, se kapitel 5, men på grund av försening och driftstörningar för värmepumpen, har kollektordata för vinterförhållanden endast erhållits från två säsonger.

4.2 Tekniska aspekter på värmepumpssystemet

Uppföljningen av värmepumpsanläggningen i övrigt syftade bl a till att fastställa den energi, som värmepum-

pen levererade under olika driftsbetingelser. Dessutom skulle man studera värmepumpens uteffekt och dess samband med sjötemperaturerna och ispåfrysning på kollektorslangarna d v s hur fungerar en värmepumpsanläggning tillsammans med en sjökollektor av detta slag.

På tidigt stadium erhöles indikationer på att värmefaktorn inte var så hög, som utlovats. Vidare uppstod problem då effektbehovet var lågt eftersom uteffekten inte kunde regleras på det sätt, som var tänkt. Vidare uppstod problem vid samkörning med värmecentralerna och dessutom inträffade flera haverier.

P g a detta kom uppföljningen av själva värmepumpsanläggningen att fokuseras mer på de problem, som uppstod och hur de kunde avhjälpas och hur dessa problem påverkade effektuttag och levererad energi än på det faktum att värmekällan var en sjökollektor av unikt slag.

Mätningarna visade snart att sjökollektorn i sig inte gav upphov till några problem för värmepumpsanläggningen. Visserligen fick man stänga av värmepumpen under ett par veckor i februari 1985 p g a för stor ispåfrysning, men detta var inte något onormalt utan fanns med bland de driftsfall, som skulle kunna inträffa.

Den del av rapporten, som omfattar värmepumpen handlar av denna orsak till stor del om de problem, som uppstod och hur de löstes.

4.3 Ekonomisk utvärdering

I en rapport av det här slaget ingår normalt en ekonomisk utvärdering av den rapporterade anläggningen. Redovisningen brukar mynna ut i ett uttalande huruvida anläggningen varit ekonomiskt lönsam eller vad som bör göras för att göra den lönsam eller öka lönsamheten.

Under den 44 månader långa utvärderingsperioden har värmepumpen i Motala Väster haft en total drifttid på 7 000 timmar. Anläggningen har stått stilla vid ett flertal tillfällen p g a haverier m m. Det längsta stilleståndet varade i 22 månader.

Ingen uppvärmningssäsong har varit så komplett att en ekonomisk utvärdering av projektet kan anses vara meningsfull. I denna rapport redovisas därför endast hittills gjorda investeringar och de kostnader, som orsakats av problem, som uppstått. Vidare redovisas den energi, som värmepumpen levererat till värmecentralerna under utvärderingsperioden. Läsaren får därefter själv bilda sig en uppfattning om projektets ekonomi.

En komplett uppställning över investeringar och kostnader för detta projekt finns i bilaga 5. Fram t o m

oktober 1988 har MSK investerat 23,3 Mkr i anläggningen varav 9,5 Mkr utgörs av lån från BFR respektive bidrag från Statens Vattenfallsverk och Statens Energiverk.

I avsnitt 6.2.3 redovisas den energi, som anläggningen levererat till förbrukarna fördelat på energi från elpanna respektive värmepump.

5 MÄTNINGAR OCH BEARBETNING AV MÄTDATA

Ett omfattande mätprogram har genomförts för att tillåta en utvärdering av anläggningen. Mätningarna har i huvudsak varit inriktade på sjökollektorn och dess funktion men ett stort antal mätningar har även genomförts på värmepumpen och i de två panncentralerna.

Experimentbyggnadsdelen av detta projekt omfattar i första hand sjökollektorn och målsättningen har därför varit att mätningarna i denna skall hålla hög kvalitet för att möjliggöra en mer vetenskapligt inriktad utvärdering.

Mätningarna kring värmepumpen var avsedda att mera vara av uppföljande natur varför mätningarna där inte blev lika ambitiösa. Bl a har till viss del använts i systemet befintliga givare med lägre upplösning och större onoggrannhet.

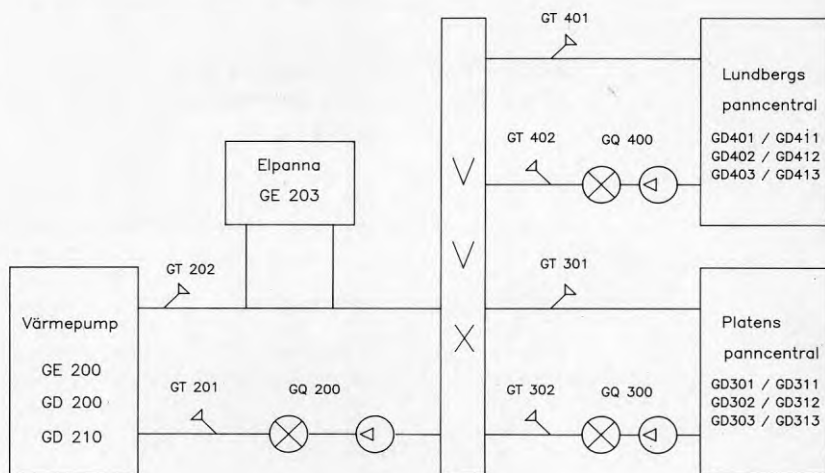
Mätningarna startades 85-03-21 och har pågått till 88-10-03. Under denna period har värmepumpen varit avstängd under sammanlagt 24 månader av olika anledningar. Mätningarna har dock pågått även under dessa stillstånd.

Mätprogrammet har omfattat 89 givare och timvärden för 92 storheter har lagrats kontinuerligt.

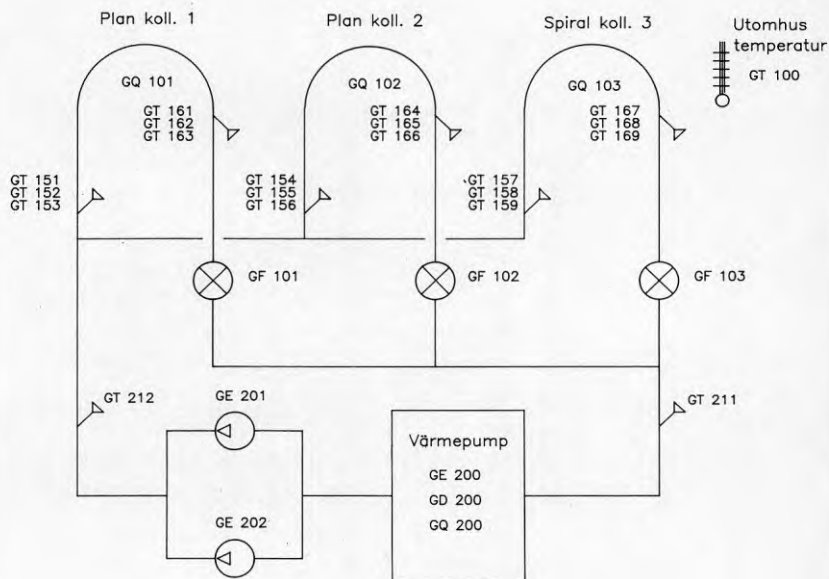
Mätningarna har omfattat

- Vatten- och sedimenttemperaturer i 32 punkter fördelade på 4 temperaturkedjor.
- Brinetemperaturer före och efter samt flöden och energier från vardera delen av sjökollektorn (i ventilbyggnaden).
- Temperaturer i brineledningen före och efter värmepumpens förångare (i vp-byggnaden).
- Vattentemperaturer i värmebärarkretsen före och efter värmepumpens kondensator samt energi levererad från värmepumpen. Temperaturer före och efter de två panncentralerna samt energier levererade till dessa.
- Elenergi till brinepumparna, till kompressormotorn samt till elpannan.
- Antal starter samt drifttider för värmepumpen och samtliga pannor.
- Utomhustemperatur.

Bilaga 1 innehåller en förteckning över givarna.



Figur 5.1 Givarnas placering i värmepumpssystemet.



Figur 5.2 Givarnas placering i ventilbyggnaden. Beteckningarna förklaras i bilaga 1.

5.1 Mätdatainsamling

Mätsystemet är uppbyggt kring en bordsdator, en systemvoltmeter, en analog kanalväljare samt en mångkanalig digital räknare. Samtliga givare avses varannan minut och varje timma beräknas timvärden för alla relevanta storheter varefter dessa sparas på en skiva. En gång i veckan överföres dessa data till Mätcentralens minidator för vidare bearbetning.

Mätsystemets dator är av fabrikat Hewlett Packard, modell 86B, utrustad med skivminne samt ett HPIB-interface för kommunikation med systemvoltmetern, den analoga kanalväljaren samt den digitala räknaren. Datainsamlingen styrs av Mätcentralens standardprogram, som modifierats för detta projekt.

Mät datorn är försedd med en 12" bildskärm på vilken alla uppmätta och beräknade data kan studeras. Man kan välja på ett antal systembilder och tabeller innehållande de data som är intressanta. Data, som visas på skärmen, uppdateras varannan minut.



Figur 5.3 Mätstationen på plats i mätboden.

Analog signaler från temperaturgivare och integreringsverk överförs till systemvoltmetern, fabrikat Hewlett Packard, modell 3478A, via den analoga mät-

punktsväljaren. Denna, som är av fabrikat Schlumberger, serie 3, har 100 st 4-poliga ingångar, varav ett åttio-tal användes. En del av ingångarna är ombyggda till tvåpolsingångar med samtidig utmatning av en mätström till de halvledargivare, AD590, som användes för uppmätning av sjötemperaturer.

Varje mätcykel datorn gör börjar med spänningsmätning över en kortslutning samt resistansmätning av ett 100 ohms precisionsmotstånd (0,01%). De uppmätta värdena användes för offsetkorrektur i de påföljande mätningarna. Erfarenheter från tidigare projekt visar att den totala onoggrannheten för en temperaturmätning blir mindre än $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

Pulser från elmätare, flödesmätare, drifttids- och statusreläer registreras med en mångkanalig mikro-datorbaserad räknare. Denna har en inbyggd tidbasgenerator och kan vid sidan av antal pulser, status (öppen/sluten) också registrera den tid då en krets är sluten, exempelvis drifttid.

Mätcentralen har ansvarat för inkoppling av de givare, som finns i ventilbyggnaden, i vp-byggnaden samt i panncentralerna. Tillverkning och installation av temperaturmätkedjorna i sjön har utförts av Institutionen för Vattenbyggnad.

5.2 Mätningar vid mätboden och i ventilbyggnaden

5.2.1 Utomhustemperatur

Utomhustemperaturen mätes med en Pt-100 givare, 1/10 DIN, monterad i en speciell hållare. Hållaren är monterad 2,5 m upp på mätbodens norrfasad och består av en arm, som håller ut givaren ca 0,6 m från väggen. Längst ut på armen sitter givaren monterad i mitten av två vertikala, koncentriskt monterade cylindrar. Dessa, som har diametern 2,5 cm resp 5 cm, skyddar givaren mot strålning. Onoggrannheten uppskattas till totalt $0,05^{\circ}\text{C}$.

5.2.2 Brinetemperaturer före och efter sjökollektorns tre enheter

I ventilbyggnaden fördelas flödet från brinekulverten till de tre enheterna av sjökollektorn. Rördragningen är komplicerad och det fanns en uppenbar risk för temperaturskiktningar. På- och avsticken för de tre delarna av kollektorn består av rör med diametern 150 mm. För att kunna kontrollera eventuella skiktningar installerades därför 3 temperaturgivare i samma rörtvårsnitt i varje avstick respektive påstick. Totalt rör

det sig här om 18 temperaturgivare.

Temperaturgivarna är av typ Pt-100, 1/10 DIN, dvs resistansgivare med en garanterad onoggrannhet mindre än $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$ vid 0°C . Givarna är av fabrikat Pentronic, kapslade i syrafasta skyddsror och installerade i syrafasta dykrör. Mätningarna baserades på s k fyrtrådsteknik vilket gör mätningarna oberoende av kabelresistanserna.

Mätresultaten visar att några temperaturskiktningar inte förekommer i dessa rör. De tre temperaturerna i samma tvärsnitt ligger typiskt inom $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ från varandra. Vid energiberäkningarna användes medelvärdet av de tre givarna.

Eftersom temperaturmätningarna har en onoggrannhet av $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ enligt avsnitt 5.1, gäller att vid mätning av differens temperaturer kan mätfelet enligt maxfelsuppskattning bli $\pm 0,10^{\circ}\text{C}$. Eftersom de systematiska felen oftast verkar åt samma håll blir det verkliga felet i en temperaturdifferensmätning erfarenhetsmässigt bara hälften av detta, dvs $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

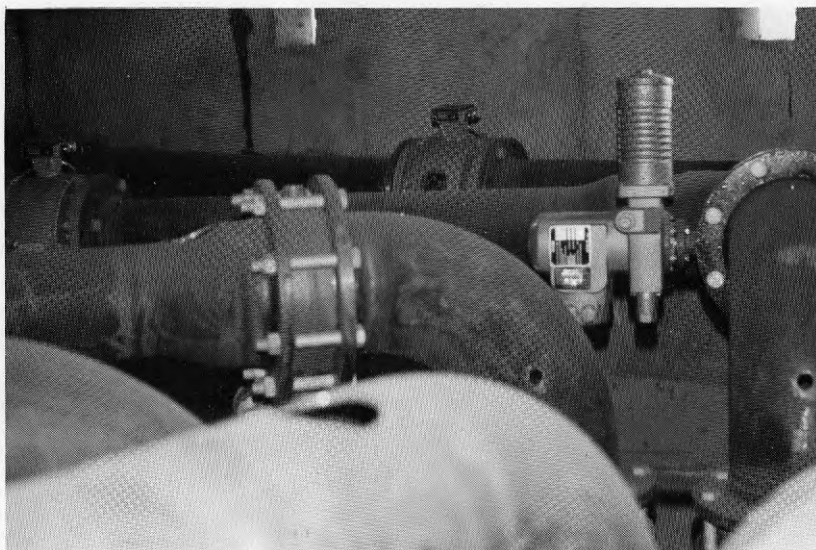


Figur 5.4 Mätboden intill ventilbyggnaden vid Vätterns strand. På mätbodens gavel sitter utomhustemperaturgivaren.

5.2.3 Flöden i sjökollektorn

I var och en av sjökollektorns tre delar mätes vätskeflödet med hjälp av induktiva flödesmätare av fabrikat Krohne, typ X-2000 HC, dim 150 mm. Mätroren, vars inre del består av sinterkorund, är anslutna till var sin förstärkare T900F försedd med pulsutgång. Enligt fabrikantens datablad är onoggrannheten max $\pm 0,5\%$ av avläst flöde under förutsättning att montage uppfyller vissa krav, nämligen 5 rördiametrar ostörd raksträcka före och 3 rördiametrar efter mätroret, vilket uppfylls med god marginal i detta fall. Flödesmätarnas pulsutgång ger 1 puls per 100 liter och typiskt flöde har varit 65 l/s i vardera delen av sjökollektorn.

Tack vare närvaron av CaCl_2 i brinelösningen är ledningsförmågan mycket hög och mätningarna bör därför vara mycket pålitliga.

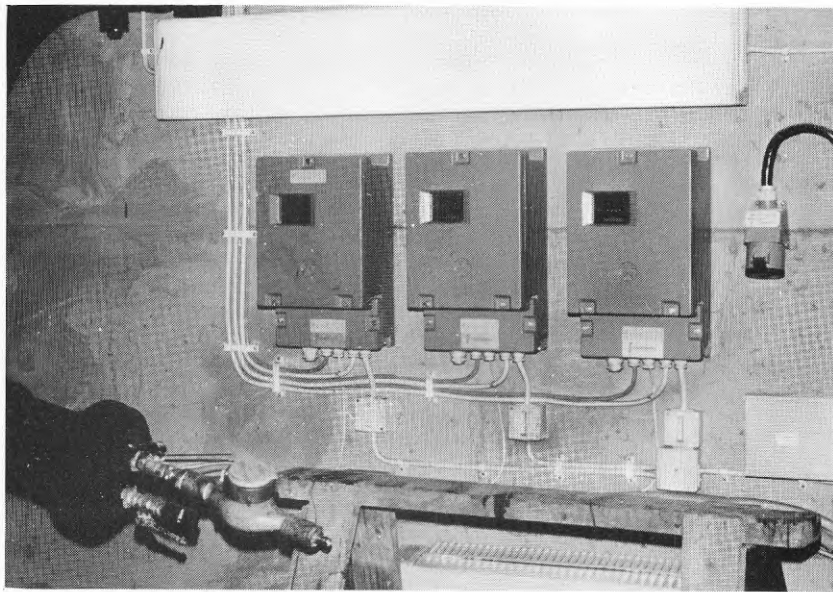


Figur 5.5 Bild från ventilbyggnaden med två av flödesmätarna samt hål för temperaturgivarna.

5.2.4 Energi från sjökollektorn

De vattenburna energierna från sjökollektorenheterna har bestämts i mät datorn på grundval av mätdata för temperaturer och flöde. Varannan minut beräknas produkten av en momentan temperaturskillnad och den volym vätska, som passerat sedan föregående beräkning. Denna

produkt multipliceras med vätskans värmekapacitivet och densitet vid aktuell temperatur och resultatet ackumuleras till timvärden.



Figur 5.6 Flödesmätarnas förstärkare på väggen i ventilbyggnaden.

I en felanalys får man ta hänsyn till fel i temperaturmätning, fel i flödesmätning samt det fel som orsakas av att inblandningen av kalciumklorid har varierat något. I huvudsak är det osäkerheten i temperatringarna, som ger utslag i det uppskattade felet. Vid en temperaturdifferens av 3°C över sjökollektorn kan felet i energiberäkningarna uppskattas till 3 % medan felet kan uppskattas till 6 % då temperaturdifferensen endast är 1°C vilket är vanligt på sommaren.

5.3 Mätningar i värmepumpsbyggnaden

För att spara kostnader vid uppföljningen av energileveranser på värmepumpens "varma sida" kopplades Mätcentralens mäutrustning till befintliga integreringsverk, ett i värmepumpsbyggnaden och ett i vardera panncentralen. Integreringsverken är av fabrikat Endress & Hauser ZLA 6140. Dessa är kopplade till var sin induktiv flödesmätare av typ Endress & Hauser Flowtech Autozero 2000/DI 680. För temperaturmätningar användes på vardera mätplatsen två Pt-500 givare som är parvis samkalibrerade och monterade i dykrör. De temperaturer och effekter, som beräknas i integreringsverket, omvandlas

av digital/analogomvandlare till strömsignaler (4-20 mA), som överföres till mät datorn.

5.3.1 Temperaturer i brine vid värmepumpen

Brinekulverten, som är av glasfiberarmerad plast, är strax utanför värmepumpsbyggnaden skarvad till kolstålsrör med diametern 400 mm. Inne i vp-byggnaden, omedelbart före och efter värmepumpens förångare, finns temperaturgivare monterade i denna brineledning. På grund av den stora diametern monterades först 4 givare i samma tvärsnitt fördelade runt röret på både ingående och utgående brineledning. Eftersom antalet lediga parter i samlingskabeln ned till mätboden var begränsat, kopplades de fyra givarna i en serie och parallellkoppling på sådant sätt att de simulerade en enskilda givare.

När värmepumpen är i drift uppstår vibrationer i brineledningen där den är ansluten till förångaren. Detta orsakade att samtliga åtta givare vibrerade sönder. De byttes därför ut mot två nya givare, en på vardera stället, vilka var speciellt utformade för att tåla vibrationer. På grund av den stora rördiametern uppskattas onoggrannheten i dessa temperaturmätningar till $\pm 0.10^{\circ}\text{C}$.

5.3.2 Flöde genom värmepumpens kondensor

Flödesmätarna, som är av typ Endress & Hauser Autozero 2000, tillhör projektet och användes via ett integreringsverk för mätningar. Enligt fabrikantens uppgifter är onoggrannheten ca $\pm 0,5\%$ av avläst värde. Flödesmätarna är samtliga monterade med betryggande raksträckor ostört flöde före och efter mätröret.

Denna typ av flödesmätare kan vara känslig för magnetit (Fe_2O_3) i vattnet. Enligt undersökningar gjorda av Krohne är detta dock inte något problem om ledningsförmågan i vätskan är god, dvs bättre än $100\ \mu\text{S}$. Prov har tagits i de tre systemen och ledningsförmågan befanns vara $100 - 150\ \mu\text{S}$, varför eventuell magnetit borde sakna betydelse.

5.3.3 Temperaturer före och efter kondensor

De till integreringsverket hörande temperaturgivarna är av typ Pt-500. De är monterade i dykrör och mätningarna sker från integreringsverket med tvåtrådsteknik. De båda givare, som är anslutna till ett och samma integreringsverk, har samma kabellängd. Detta medför att givarnas absolutvärden blir ca $0,5^{\circ}\text{C}$ för höga, beroende på kabellängd, men att temperturdifferensen, som användes vid energiberäkningarna, ej påverkas av kabelresi-

stanserna.

Onoggrannheten i dessa temperaturmätningar uppskattas efter korrektion för kabelresistansen till $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Vid kontroll av differensmätningarna erhöles däremot en onoggrannhet av $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

5.3.4 Energi från värmepumpen

Dessa energier beräknades i integreringsverket och signalen omvandlades till en strömsignal. Tillverkaren är mycket förtegen vad beträffar fel i integreringsverkets mätningar och beräkningsrutiner. En analys av värmebalansen för de olika delsystemen visar dock att felet kan uppskattas till ca $\pm 5\%$.

5.3.5 Elenergi

Den elenergi, som värmepumpens kompressor förbrukade, uppmättes med en elmätare försedd med pulsutgång. På samma sätt registrerades elenergi till de två brinepumparna. Då man efter en tid installerade en elpanna påbörjades även mätningar av dennas elförbrukning. Alla mätarna är av fabrikat Landis & Gyr och är av klass 2.

5.3.6 Status

Med hjälp av statusreläer har antal starter och drifttid för värmepumpen registrerats. Även drifttider för de två brinepumparna har registrerats. Drifttiderna har mätts med en upplösning av 0,02 sekunder.

5.4 Mätningar i undercentralerna

5.4.1 Energimätningar

I både Platens och Lundbergs panncentraler har gjorts mätningar på den av värmepumpen tillförda energin. Samma mätteknik har använts, som för värmepumpen och följdaktligen gäller samma uppskattningar av onoggrannhet.

5.4.2 Temperaturmätningar

Temperaturen hos det av värmepumpen levererade hetvatten samt hos returvattnet har uppmätts vid båda panncentralerna. Temperaturmätningarna har varit av samma slag, som vid värmepumpen, med Pt-500 givare och omvandlare till strömsignal. En viss korrektion har

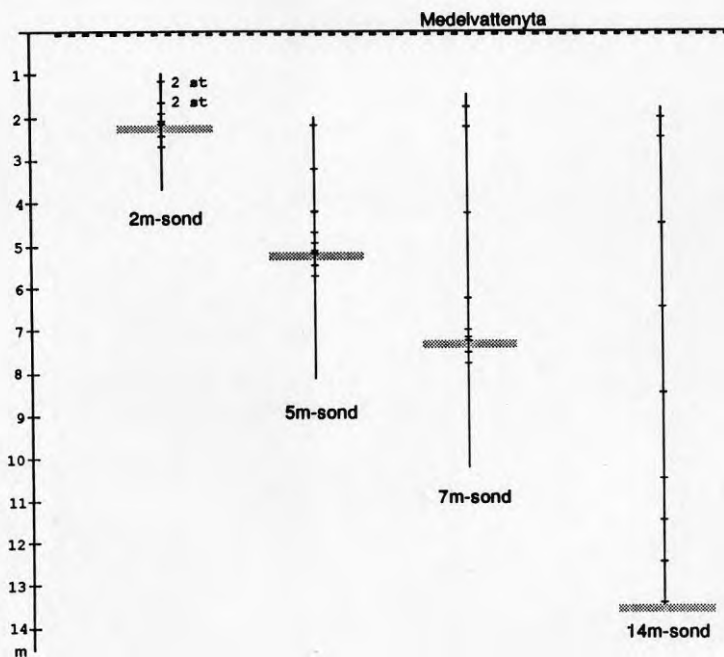
gjorts för kabelresistanserna men onoggrannheten är ändå betydande, ca $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

5.4.3 Status

Antal starter samt drifttider för samtliga pannor har registrerats på samma sätt, som för värmepumpen.

5.5 Temperaturmätningar i sjön

Temperaturen i sjön och i botten mättes kontinuerligt i 36 mätpunkter. Dessa var fördelade på fyra sk temperaturkedjor med vardera 9 mätpunkter på olika nivåer. En av temperaturkedjorna var placerad inom spiralkollektorn, två inom plankollektor 1, och den fjärde utanför kollektorn på 14 m djup (se bilaga 6.1). I figur 5.7 framgår på vilka nivåer givarna var placerade, från 0.5 m under botten till 1-2 m under vattenytan. Givarnas placering syftade dels till att fastställa temperaturen i anslutning till kollektorsystemets olika delar och dels att kunna utvärdera vilken ev inverkan värmeuttaget har på temperaturfördelningen inom den aktuella delen av Motalaviken.



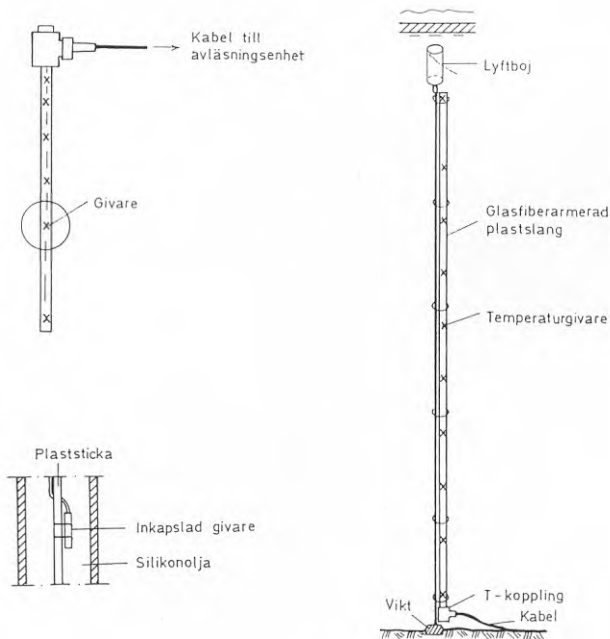
Figur 5.7 Sjötemperaturgivarnas placering.

Som temperaturgivare användes halvledarelement av typ AD590, vilka har den egenskapen att ge en ström, som är proportionell mot absoluttemperaturen vid en matnings-spänning, som får variera mellan 5 och 15 V. Givarna kapslades in med krympslang och monterades på en plaststicka, vilken stacks in i en glasfiberarmerad plastslang, som sedan fylldes med silikonolja. Arrangemanget framgår av figur 5.8, som också visar hur temperaturkedjan lyfts och sträcks i vattnet med en lyftboj samt anslutning av mätkabel, som drogs till mät datorn invid ventilbyggnaden på land.

Temperaturmätningen bör ha en onoggrannhet mindre än $0,05^{\circ}\text{C}$, speciellt inom intervallet $0-1^{\circ}\text{C}$, för att funktionen hos kollektorn skall kunna utvärderas tillfredsställande. Temperaturmätssystemet kalibrerades före utplaceringen med ett uppskattat maximalt fel mindre än $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$.

Sedimentsond

Vattensond



Figur 5.8 Sjötemperaturgivarnas konstruktion. 2, 5 och 7 m:s sonda är kombinerade sediment- och vattensonder.

5.6 Erfarenheter av mätsystemet

Den datorbaserade mätstationen är konstruerad på så sätt, att om något fel uppstår, som äventyrar mätningarna, så avbryts insamlingsprogrammet och alla tidigare under dygnet insamlade data skrivs ut till skivan. Därefter blir mätstationen strömlös under 30 sek varefter den återstartar. Mätprogrammet hämtas nu från en skiva och mätningarna återupptas. På detta sätt kan databortfallet reduceras.

5.6.1 Temperaturmätningar i brineledningen

Temperaturgivarna i ventilbyggnaden har fungerat med mycket hög noggrannhet under hela mätperioden.

De temperaturgivare, som installerades i brineledningen nära värmepumpen kom att utsättas för kraftiga vibrationer. Detta medförde att tilledningarna inuti skydds-röret också började vibrera vilket i sin tur medförde att anslutningstrådarna gick av omedelbart intill det keramiska givarelementet. Nya givare installerades. Dessa var försedda med skyddsrör, som till en del var fyllda med silicongummi, vilket motverkade vibrationer i tilledningstrådarna.

5.6.2 Temperaturmätningar vid värmepumpen och undercentraler

Temperaturer kring värmepumpens kondensor och vid undercentralerna registrerades, som ovan nämnts, med hjälp av befintliga Pt-500 givare kopplade till integreringsverk via tvåpolskoppling. Den extra kabelresistansen orsakade en felvisning av ca + 0,5°C för samtliga givare. För att kompensera för detta hade leverantören parallellkopplat givarna med motstånd. På detta sätt fick man uppfattningen att givarna visade "rätt". I själva verket gäller en sådan kompensation endast vid en specifik temperatur och orsakar därmed att differens-temperaturmätningen, som användes för energiberäkningen, blir osäker. Dessa parallellkopplade motstånd monterades bort efter en tid och en kontroll gjordes, som visade att temperaturdifferenser mättes inom +/- 0,1 °C.

De digitala temperatursignalerna i integreringsverket omvandlades via speciella kort till strömsignaler. På dessa kort skulle nollpunkt och förstärkning justeras. Detta gjordes regelbundet varvid givarna simulerades till kända värden. Justeringen var inte helt problemfri och dessa digital-analogomvandlare gick vid ett flertal tillfällen sönder.

5.6.3 Flödesmätningar

De flödesmätare, av fabrikat Krohne, som användes i ventilbyggnaden har fungerat mycket tillfredsställande.

De befintliga flödesmätarna, av fabrikat Endress & Hauser, som finns vid värmepumpen och i undercentralerna har också fungerat tillfredsställande. Signalen från dessa har använts för effektberäkningar i de tidigare nämnda integreringsverken. De uppmätta effekterna har därefter överförts till mät datorn via digital-analogomvandlare. Även dessa omvandlare har regelbundet kontrollerats men justeringarna har inte kunnat göras lika noggrant som för temperaturgivarna, eftersom flödes signalen var svårare att simulera än temperatursignalerna.

5.6.4 Temperaturgivare i sjön

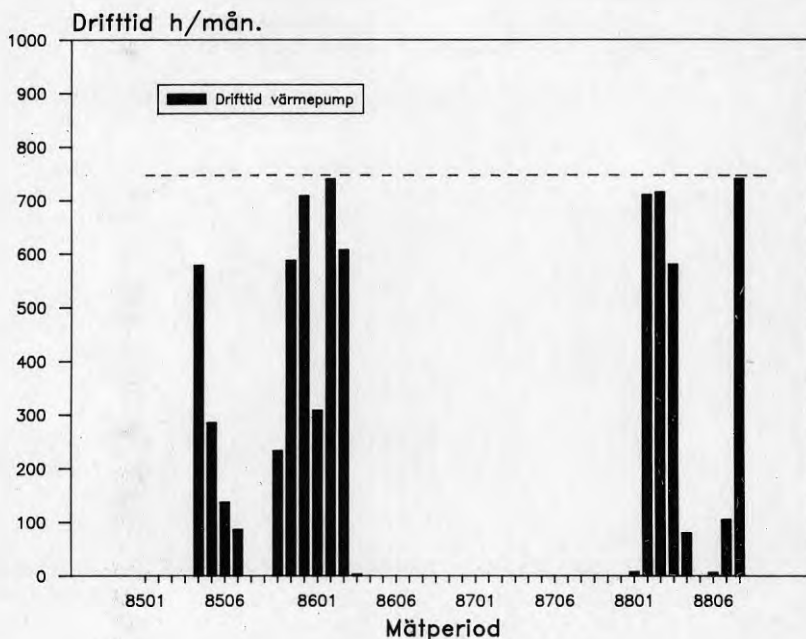
De temperaturgivare, av typ AD590, som användes för temperaturmätningar i sjön visade till en början 1-3°C för låga värden och denna felvisning varierade hela tiden. Kontrollmätningar med oscilloskop visade att det fanns en amplitudmodulerad signal överlagrad temperatursignalen. Stör signalen visade sig ha frekvensen 191 kHz och försvann mellan kl 24 och kl 5 varje natt. Störningarna visade sig vara radiosignaler från Motala långvågssändare och signalen kunde relativt lätt filteras bort. De höghmiga temperaturgivarna tillsammans med långa kablar fungerade med andra ord som radiomot tagare.

Under det första och andra året fungerade därefter sjötemperaturgivarna tillfredsställande. Därefter började enstaka givare successivt att visa avvikande värden och har utslutits ur utvärderingen. Man har goda möjligheter till kontroll, genom att jämföra resultaten från de olika givarna med varandra under blåsiga perioder på hösten, då vattnet genom intensiv omblandning måste vara temperaturhomogent.

Temperaturkedjan på 14 m djup blev skadad under våren 1987 genom åverkan på mät kabeln. Detta medförde felaktiga mätresultat på samtliga givare under en kortare tid genom att alla sonder hade gemensam strömmatning. Den skadade sonden togs upp för reparation och mätsystemet ändrades så, att varje sond individuell strömmatning och fungerar oberoende av de andra. Kontroll av temperaturgivarna i den skadade sonden visade att de fungerade normalt, men efter montering på plats visade ändå flertalet av givarna felaktiga värden, sannolikt beroende på skador i kabeln. Mätvärden från denna temperaturkedja har utslutits ur utvärderingen för den sista säsongen.

6 MÄTRESULTAT OCH ERFARENHETER - VÄRMEPUMPEN

Sedan anläggningen igångkördes i mars 1985 har värmepumpen varit avstängd under ett flertal kortare och längre perioder. Detta har orsakats dels av effektregleringsproblem och dels av ispåfrysning av kollektorn. De längsta stillestånden har emellertid orsakats av kompressorhaverier och rostskador.



Figur 6.1 Värmepumpens drifftid i antal timmar per månad under mätperioden. Kontinuerlig drift svarar mot 672-744 timmar beroende på månad.

De ständiga driftavbrotten har gjort det svårt att få en sammanhängande mätperiod och trots förlängning av mätperioden har det inte gått att erhålla kompletta mätningar över två eldningssäsonger.

6.1 Drifttillgänglighet

Tiden från första start av värmepumpen 85-03-07 tills dess att mätningarna avslutades 88-10-03 kan indelas i flera perioder med avseende på hur anläggningen har fungerat. Under vissa perioder har värmepumpen levererat värme, under andra har den stått stilla medan el-

pannan har levererat värme och under en del perioder har ingen värme levererats alls.

Beroende på tillgänglighet har drifttiden under tiden 85-03-07 - 88-10-03 därför delats upp i följande perioder:

Per Tid	Mätarställn efter per Prod MWh	Kommentar
1 85-03-07 - ..	17	Första start.
2 85-03-14 - 85-03-28	1814	Provdrift utan avbrott. Övertagande av anläggningen.
3 85-03-28 - 85-08-12	7570	Värmeproduktion med avbrott. ON-OFF drift sommartid mm. Div justeringar.
4 85-08-12 - 85-11-20	7570 ¹	Stillestånd pga lagerhaveri i kompressorn.
5 85-11-20 - 86-02-04	14357	Värmeproduktion med kortare avbrott för justeringar.
6 86-02-04 - 86-02-16	14357	Stillestånd pga för stor ispåfrysning på sjökollektorn.
7 86-02-16 - 86-02-20	14557	Reducerad värmeproduktion pga för låg sjöväntemperatur och stor isbildning på sjökollektorn.

¹ Registreringsutrustningen felaktig under kort tid varför ca 650 MWh skall läggas till för att erhålla verkligt levererad energimängd (dvs ca 45 700 MWh 88-09-10).

8	86-02-20 - 86-04-30	20489 ²	Värmeproduktion med vissa avbrott pga brinekrångel mm. Nedreglering av vp lägre än 2,7 MW ej möjlig. Elpanna installeraras.
9	86-04-30 - 88-03-01	34768	Vp stillestånd pga läckage mellan brine- och freonkretsen. Förångartuberna genomrostade. Rekonstruktion av anläggningen. Elpannan i drift.
10	88-03-01 - 88-06-10	42029	Värmeproduktion med korta avbrott för justeringar och intermitterent vp-drift.
11	88-06-10 - 88-09-10	44252	Vp står stilla pga för lågt värmebehov. Nedreglering till önskad nivå ej möjlig. Elpannan går.
12	88-09-10 - 88-10-03	45047	Intermittent vp-drift pga lågt värmeuttag. Även elpannan producerar värme.
13	88-10-03 - t v		Kontinuerlig drift av värmepumpen.

De energier, som redovisas i ovanstående sammanställning är avläsningar av räkneverket på det integreringsverk, som sitter i värmepumpsbyggnaden och som registrerar energi producerad av värmepump och/eller elpanna. Det redovisade värdet är avläst efter periodens slut.

² Period 1-8 ren vp-produktion, period 9-12 vp och elpanneproduktion.

Perioderna 3 - 12, dvs tiden efter övertagande och intrimning omfattar ca 30 780 timmar totalt. Enligt värmepumpens drifttidsmätare har den totala drifttiden för värmepumpen under denna period varit 7 200 timmar.

6.2 Driftresultat

I detta avsnitt redovisas hur anläggningen har fungerat sett som ett system. Resultaten från mätningarna i värmekälla och kollektor redovisas i detalj i kapitel 7 och 8.

6.2.1 Driftresultat på månadsbasis

I tabell 6.1 redovisas driftresultaten för de månader då värmepumpen varit i drift.

Dem värmefaktor (COP), som här redovisats, har beräknats enligt

$$\text{COP} = \frac{\text{producerad värme}}{\text{förbrukad elenergi}}$$

där förbrukad elenergi = el till värmepumpens kompressor och till brinepumpar, inklusive transformatorförluster.

När anläggningen har gått som bäst, vilket inträffade i november 1985 efter reparationen av kompressorn, var dygnsmedeleffekten 4,8 MW och värmefaktorn 2,35 vid en förångningstemperatur av ca 1,9°C och avgiven temperatur på ca 75,3°C.

Enligt leverantörens dokumentation, ingår i förbrukad elenergi "drivenergi för kompressor samt drivenergi för hjälpmaskineri". Vad som menas med hjälpmaskineri finns ej närmare definierat.

Om vi vid beräkningen av värmefaktorn endast tar hänsyn till elenergin för drift av kompressormotorn blir värmefaktorn ca 0,11 högre, dvs årsvärmefaktorn för perioden maj-85 till apr-86 blir då 2,07 och för hela mätperioden 1,95.

Om vi å andra sidan i förbrukad energi inberäknar även el för drift av cirkulationspumpar i värmebärarkretsen samt i de två värmeväxlar-kretsarna, så blir värmefaktorn ca 0,06 lägre, dvs för året maj-85 till apr-86 blir då värmefaktorn 1,90 och för hela mätperioden 1,78.

Tabell 6.1 Värmepumpens driftresultat på månadsbasis.

månad	kb in °C	kb ut °C	vb ut °C	värme GWh	elförb GWh	drift tim	m eff MW	COP
maj-85	6,5	5,3	73,5	1,500	0,934	558	2,6	1,61
jun	9,3	8,6	70,5	0,691	0,463	288	2,4	1,49
jul *	16,5	16,5	74,7	0,398	0,283	161	2,4	1,40
aug *	15,4	15,2	75,6	0,217	0,144	86	2,5	1,50
sep **						0		
okt						0		
nov	1,9	-1,6	75,3	1,066	0,463	232	4,6	2,30
dec	-0,3	-3,6	76,0	2,476	1,077	581	4,3	2,30
jan-86	-2,5	-5,5	76,0	2,868	1,419	709	4,1	2,04
feb	-1,8	-3,5	75,2	1,187	0,606	308	3,9	1,96
mar	-0,8	-3,6	76,8	2,969	1,480	744	4,0	2,01
apr	0,1	-2,7	76,0	2,386	1,152	607	3,9	2,07
... ***								
mar-88	-1,3	-4,3	77,0	2,992	1,542	710	4,2	1,94
apr	1,5	-0,9	78,2	2,598	1,420	715	3,6	1,83
maj	7,7	7,0	77,2	1,132	0,989	580	2,0	1,14
juni	12,1	12,1	82,2	0,151	0,139	80	1,9	1,09
juli						0		
aug	16,2	15,7	80,6	0,011	0,011	6	1,8	1,00
sep	14,2	13,4	75,7	0,235	0,191	105	2,2	1,23
okt	8,4	6,5	78,1	2,298	1,381	740	3,1	1,66

Period maj-85 - apr-86	15,758	8,021	4295	3,7	1,96
Totalt för mätperioden	25,175	13,694	7210	3,5	1,84

- *) Värmepumpen gick i on/off drift med 2-3 starter per registrerad drifttimma.
- ***) Värmepumpen avstängd under 100 dagar för reparation efter kompressorhaveri.
- ***) Värmepumpen avstängd för reparation av rostskador.

I tabellen är kb = köldbärare, vb = värmebärare och m eff = avgiven medeleffekt under månaden.

6.2.2 Jämförelse med dimensioneringsdata

Följande tabell sammanfattar de resultat, som förväntades enligt leverantörens offert.

Tabell 6.2 Förväntade driftresultat på månadsbasis baserade på klimatdata för ett normalår. Uppgifterna lämnade av leverantören.

månad	kb in °C	kb ut °C	vb ut °C	värme GWh	elförbr GWh	COP
maj	4,8	2,9	71,9	1,75	0,62	2,82
jun *	10,4	9,9	66,0	0,51	0,19	2,68
jul *	14,6	14,0	66,0	0,51	0,18	2,83
aug *	15,0	14,4	66,0	0,51	0,18	2,83
sep	13,3	11,6	70,5	1,39	0,53	2,63
okt	7,5	4,9	74,2	2,34	0,87	2,69
nov	3,0	-0,5	77,1	3,07	1,16	2,65
dec	-1,2	-5,0	79,2	3,58	1,38	2,59
jan	-2,0	-5,8	78,2	3,36	1,27	2,64
feb	-2,0	-6,0	78,0	3,29	1,27	2,59
mar	-2,0	-6,0	78,0	3,29	1,27	2,59
apr	0,1	-2,9	75,5	2,71	1,03	2,63
Totalt för perioden				26,30	9,95	2,64

*) Värmepumpen förutsättes gå i on/off drift.

Flera orsaker kan ha samverkat till att värmepumpen inte haft den värmefaktor, som förväntats. Så till exempel har returtemperaturen från värmecentralerna i allmänhet varit högre än den som leverantören har använt vid sina beräkningar.

En orsak till detta är att den värmeväxlare, som finns mellan värmepumpen och Platens panncentral, är underdimensionerad. Detta ger upphov till flera graders temperaturfall för framledningvattnet.

Vid Platens panncentral har man inte velat acceptera de framledningstemperaturer, som värmepumpen har presterat utan vid flera tillfällen eftervärt vattnet med hjälp av en oljepanna. Returtemperaturen från Platens panncentral har därvid kommit att ligga på en önskat hög nivå.

I nedanstående tabell redovisas vissa dimensioneringsdata tillsammans med uppmätta data. Som synes har man vid beräkning av förväntad effekt och verkningsgrad förutsatt att returtemperaturen från fjärrvärmenätet är 65°C.

Tabell 6.3 Förväntade och erhållna temperaturer på köldbärare och fjärrvärmereturvatten samt värmefaktor, COP. De förväntade värdena gäller ett normalår.

månad	kb in förv °C	kb in uppm °C	fv ret förv °C	fv ret uppm °C	COP förv	COP uppm
maj-85	4,8	6,5	65,0	67,9	2,82	1,61
jun *	10,4	9,3	65,0	66,6	2,68	1,49
jul *	14,6	16,5	65,0	69,4	2,83	1,40
aug *	15,0	15,4	65,0	70,3	2,83	1,50
sep	13,3		65,0		2,63	
okt	7,5		65,0		2,69	
nov	3,0	1,9	65,0	65,7	2,65	2,30
dec	-1,2	-0,3	65,0	66,5	2,59	2,30
jan-86	-2,0	-2,5	65,0	66,4	2,64	2,04
feb	-2,0	-1,8	65,0	66,7	2,59	1,96
mar	-2,0	-0,8	65,0	68,3	2,59	2,01
apr	0,1	0,1	65,0	67,5	2,63	2,07
...						
mar-88	-2,0	-1,3	65,0	67,4	2,59	1,94
apr	0,1	1,5	65,0	70,0	2,63	1,83
maj	4,8	7,7	65,0	72,2	2,82	1,14
jun *	10,4	12,1	65,0	75,7	2,68	1,09
jul *	14,6		65,0		2,83	
aug *	15,0	16,2	65,0	73,0	2,83	1,00
sep	13,3	14,2	65,0	68,7	2,63	1,23
okt	7,5	8,4	65,0	71,2	2,69	1,66

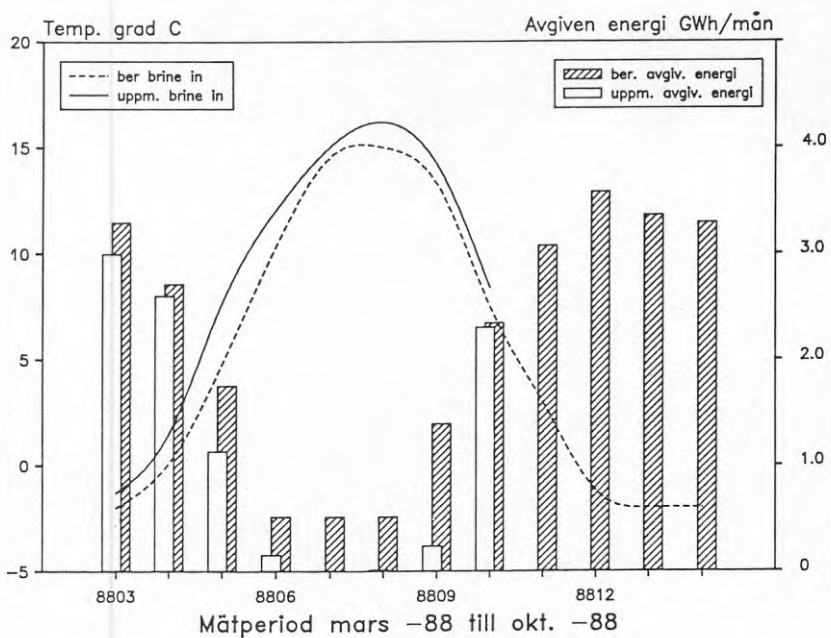
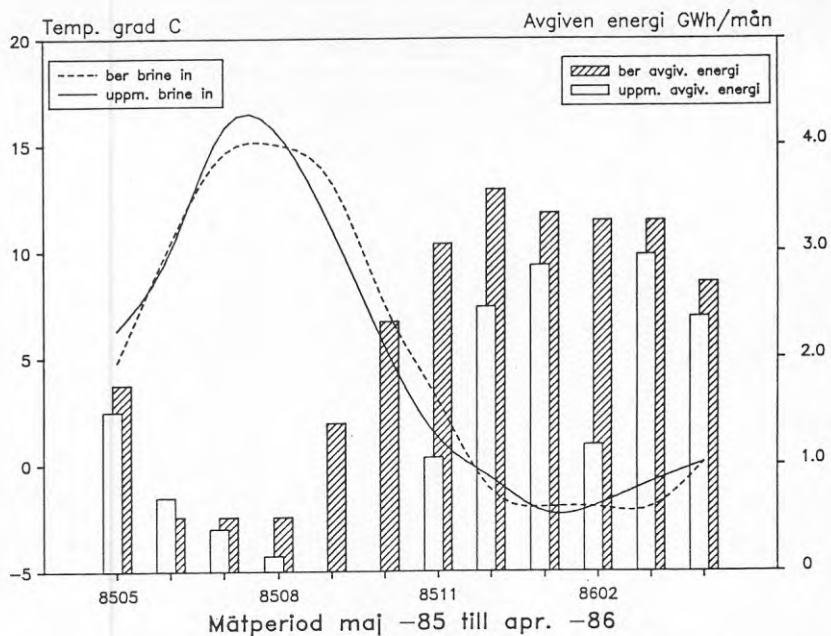
*) Värmepumpen förväntas gå i on/off drift.

I tabellen är kb = köldbärare, fv ret = fjärrvärmeretur, COP = värmefaktor, förv = förväntat och uppm = uppmätt värde.

En annan orsak till den låga värmefaktorn är att det vid låga effektbehov har varit svårt att reglera värmepumpen för ett effektivt utnyttjande. Då effekten reglerades ned sjönk värmefaktorn.

En ytterligare orsak till ett alltför lågt COP under sommaren kan vara att en effektiv on/off-drift inte varit möjlig eftersom fjärrvärmenätet inte på ett effektivt sätt kunnat ackumulera den värme, som värmepumpen producerat. Systemet för on/off-drift har dessutom aldrig blivit ordentligt injusterat och utprovat. Vid de första proven med on/off-drift uppstod ett kompressorhaveri varvid försöken naturligt nog fick avbrytas. Injusteringen av on/off-driften genomfördes därefter aldrig.

De uppmätta temperaturerna hos köldbäraren före förångaren har i stort sett överensstämmt med de förväntade under mätperioden. I figur 6.2 redovisas hur levererad energi förhållit sig till köldbärartemperaturen.



Figur 6.2 Uppmätt och förväntad avgiven energi per månad samt tillhörande köldbärartemperaturer under mätperioden.

6.2.3 Energiredovisning

Den energimängd, som levererats från de båda panncentralerna till resp. bostadsområde redovisas årsvis i nedanstående tabell.

Redovisningen gäller för perioden 85-03-28 - 88-10-03, dvs period 3 - 12 enligt sammanställningen i avsnitt 6.1.

För tabellen gäller: År 1 = 85-03-28 - 85-12-31
 År 2 = 86-01-01 - 86-12-31
 År 3 = 87-01-01 - 87-12-31
 År 4 = 88-01-01 - 88-10-03

Tabell 6.4 Sammanställning av de energier, som förbrukats av de båda bostadsområdena samt hur dessa har tillgodosetts.

Platens pc tid	Olja m ³	Motsv MWh	MSK lev MWh	Totalt MWh
År 1	1 500	= 12 720	+ 7 158	= 19 878
År 2	1 371	= 11 626	+ 7 767	= 19 393
År 3	2 261	= 19 172	+ 1 454	= 20 626
År 4	511	= 4 332	+ 8 005	= 12 337
År 1-4	5 643	= 47 850	+ 24 384	= 72 234

Lundbergs pc tid	Olja m ³	Motsv MWh	MSK lev MWh	Totalt MWh
År 1	690	= 4 782	+ 3 346	= 8 128
År 2	219	= 1 518	+ 5 967	= 7 485
År 3	171	= 1 185	+ 7 286	= 8 471
År 4	25	= 173	+ 4 721	= 4 894
År 1-4	1 105	= 7 658	+ 21 320	= 28 978

Hela anläggning tid	Olja m ³	Motsv MWh	MSK lev MWh	Totalt MWh
Summa År 1-4	6 748	= 55 508	+ 45 704	= 101 212

Av det totala värmebehovet har MSK's anläggning med värmepump och elpanna producerat totalt 45 704 MWh, dvs ca 45 %. Denna energimängd fördelar sig på 28 100 MWh från värmepumpen och 17 600 MWh från elpannan. Värme-

pumpen har alltså svarat för ca 28 % av värmebehovet mot beräknade 80 %.

Försörjningsgraden till Lundbergs panncentral har varit högre än till Platens panncentral genom att leverans från elpannan prioriterats till Lundbergs panncentral.

Av den totala oljeförbrukningen på 6 748 m³ har Platens panncentral förbrukat 5 643 m³ olja, kvalitet Eo4, med energiinnehållet 10,6 MWh/m³ och en beräknad pannverkningsgrad = 0,8. Lundbergs panncentral har förbrukat ca 1 105 m³ olja kvalitet Eo1 med energiinnehåll 9,9 MWh/m³ och beräknad pannverkningsgrad = 0,7.

6.3 Reglerproblem

6.3.1 Samkörning med värmecentralerna

Temperaturen på värmebäraren efter värmepumpen har varierat mellan 70 och 82°C beroende på årstid och driftsituation. Efter värmeväxlarna har framledningstemperaturen till värmecentralerna varit ca 4-5°C lägre.

I de undercentraler, som är anslutna till Lundbergs värmecentral, har gjorts justeringar så att den relativt låga framledningstemperaturen inte varit något större problem. Samkörning mellan värmepumpen och Lundbergs värmecentral har därför gått bra. Under den varmare årstiden har pannorna varit förbishuntade med enbart kortare registrerad drifttid för varmhållning. Under vinterhalvåret då effektbehovet varit stort har pannorna använts för eftervärmning av vattnet från värmepumpen.

De undercentraler, som är anslutna till Platens värmecentral, har lägre kapacitet för produktion av tappvarmvatten, vilket har gjort systemet känsligt. Tappvarmvatten produceras via en värmväxlare och en mindre ackumulator och för att klara behovet vid störttappning krävs att framledningstemperaturen inte är lägre än 72-75°C. Om temperaturen efter värmväxlaren är lägre än 72°C, vilket har inträffat ganska ofta, speciellt under första delen av mätperioden, startar en av pannorna i Platens värmecentral. Denna panna har haft en brännare med 3,6 MW effekt vilket orsakat en snabb temperaturhöjning av framledningstvattnet. Detta har i sin tur orsakat en snabb temperaturhöjning på returvattnet varvid dels brännaren stannat och dels värmepumpen fått sin uteffekt nedreglerad med lägre verkningsgrad som följd.

På detta sätt kunde brännaren starta 100-150 gånger per dygn under mätperiodens första del. Vid vissa tillfäl-

len registrerades 250 starter per dygn. Detta har självklart kraftigt stört värmepumpens funktion.

För att åtgärda detta problem byttes brännaren ut mot en ny med 1,8 MW effekt vilket bättre motsvarar det aktuella behovet. Utöver detta planeras ett byte till en större värmeväxlare mellan värmepumpen och Platens värmecentral varvid temperatursänkningen minskas, vilket ger en högre framledningstemperatur till värmecentralen.

6.3.2 Effekterglering

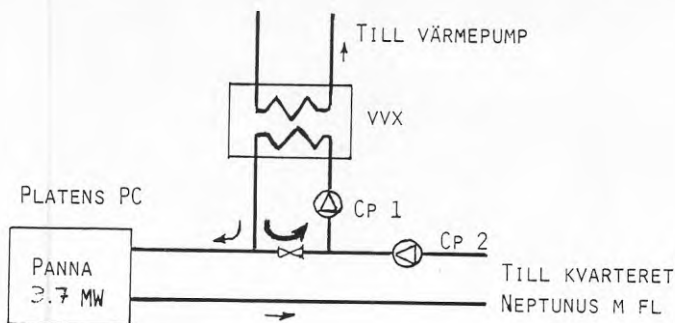
Enligt avtalet med leverantören skall värmepumpens uteffekt kunna regleras mellan 10 och 100 % av max uteffekt vilken, som tidigare nämnts, är 4,5 MW. Detta skall kunna göras "med bibehållen god verkningsgrad". Anläggningen skall dessutom kunna köras i s.k. on/off-drift för att möjliggöra en högre medelvärmefaktor.

I början av mätperioden kunde uteffekten nedregleras till ca 0,8 MW, dvs 18 % av maxeffekt, varvid oljud och vibrationer uppstod. Lägre har inte gått att komma vilket kan bero på att fabrikanten redan från början installerat ett turbinhjul avsett för 8 MW avgiven effekt.

I slutet av augusti 1985 uppstod ett lagerhaveri i kompressorn, som fick lyftas ut med hjälp av speciella ställningar för leverans till fabriken i Schweiz. Efter tre månader var kompressorn åter på plats och anläggningen startades på nytt. Efter en veckas drift erhöles indikationer på att ett nytt kompressorhaveri var förestående varvid anläggningen stängdes av och stod stilla i 14 dagar för undersökning. När anläggningen så åter startades hade leverantören justerat effektergleringen så att lägsta uttagbara effekt var 2,7 MW. Om effektbehovet understeg detta stannade värmepumpen och manuell återstart var nödvändig. Varför det uppstod ett lagerhaveri i kompressorn har ej gått att få reda på.

Under sommaren 1985 använde man i Platens värmecentral en liten cirkulationspump för cirkulation till undercentralerna medan den pump, som anslöt returflödet till värmeväxlaren mot värmepumpen hade högre kapacitet.

En del av vattnet från värmeväxlaren kunde därvid återcirkulera. Värmepumpen kände därvid av en alltför hög returtemperatur varvid uteffekten reglerades ned alternativt att värmepumpen stannade om on/off-drift var aktiverad. Den felaktiga cirkulationen har naturligtvis kraftigt stört värmepumpens funktion.



Figur 6.3 När cirkulationspump Cp2 har lägre kapacitet än Cp1 går en del av flödet i vvx-kretsen åt fel håll.

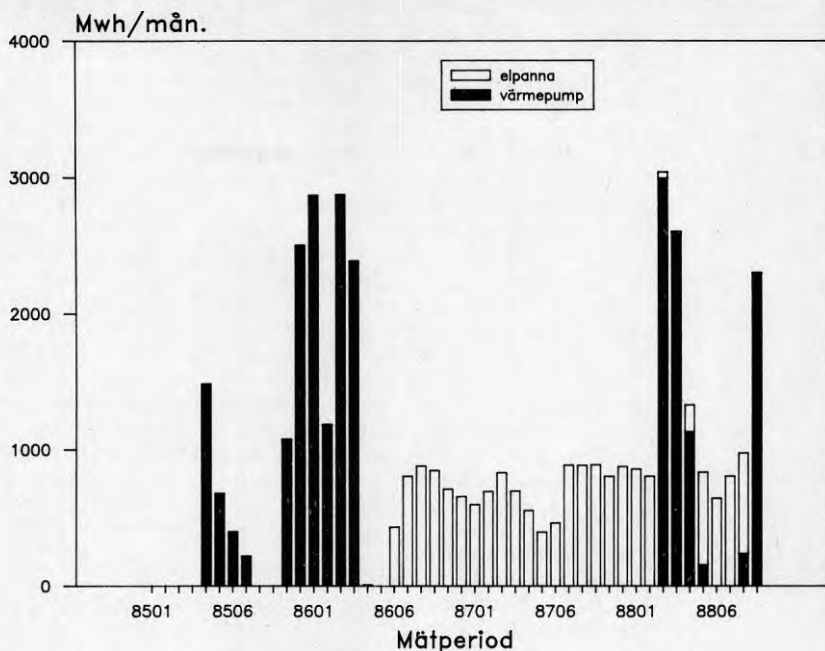
I juni -86 installerades backventiler mellan på- och avstick i båda värmecentralerna (se fig 6.3), varvid allt vatten från värmeväxlarna tvingas ut till undercentralerna. Senare har man övergått till att enbart använda värmeväxlarens cirkulationspump (Cp 1 i figuren) för cirkulation till undercentralerna.

Utöver byte av värmeväxlare från den nuvarande med 3,1 MW överförd effekt till en med 5 MW överförd effekt (vid $T_{diff} = 10^{\circ}\text{C}$) för att höja framledningstemperaturen samt installation av backventiler, planeras nu en ackumulator för att man bättre skall kunna utnyttja värmepumpen. Denna planeras bestå av två cylindrar på tillsammans max 200 m^3 placerade intill värmepumpsbyggnaden och inkopplade mellan värmepumpens kondensator och värmeväxlarna.

Akkumulatorn skulle under sommaren tillåta att värmepumpen gick kontinuerligt under 3-4 timmar varefter den skulle stå avstängd i 3-6 timmar enligt de beräkningar man gjort vid MSK.

6.3.3 Elpanna

Eftersom värmepumpens uteffekt ej kunde regleras ned i önskvärd grad följde att effektbehovet ofta understeg lägsta uttagbara effekt för värmepumpen. Därför installerades under våren 1986 en elpanna med en uteffekt av 1,2 Mw. Elpannan har varit flitigt i användning under de perioder då värmepumpen av olika anledningar har stått stilla och den har även samkörts med värmepumpen vid några tillfällen.



Figur 6.4 Energi levererad från värmepump respektive elpanna under mätperioden.

6.4 Korrosionsskador

Brinevätskan, som är vatten med tillsats av 16 % CaCl_2 , innehåller även en rostinhibitor. Ett självklart krav på denna inhibitor var att den skulle vara giftfri, eftersom den skulle passera genom en 90 km lång plastslang på botten av en sjö. Leverantören valde en rostinhibitor av fabrikat Mitco, typ R23L, som är nitritfri och användbar i temperaturer mellan -40 och $+200^\circ\text{C}$, samt ett syreborttagningsmedel R10 för syrereduktion i brine.

Värmepumpens förångare och dess anslutningar till brineledningen av glasfiberarmerad plast har tillverkats av vanligt kolstål. Detta gäller även övergången mellan brinekulverten och kollektorslangarna. Detta materialval skulle vara tillfyllest eftersom systemet skulle vara slutet och syrefritt.

I april -86 erhöles problem med "luft" i brinesystemet vid flera tillfällen. Man luftade då systemet men snart fanns indikationer på ny "luft". Då man vid ett tillfälle luftade systemet erhöles freonlarm. Det blev då uppenbart att köldmedia läckte ut från förångaren till brinesystemet. Förångaren monterades ned och det visade sig då att flera förångartuber var genomrostade.

Det som orsakat rostangreppen har varit ett allför högt syreinhåll i brinevätskan. Rostinhibitorn har under rådande omständigheter inte förmått ta upp detta syre. Den höga syrenivån kan ha flera orsaker. Så t ex gäller att plast inte är diffusionstätt för syre vilket alltså har kunnat diffundera in i systemet genom kollektor-slangarna. En annan orsak kan vara att systemet aldrig har luftats ordentligt. Ytterligare en orsak kan vara att rostinhibitorn inte fungerat som man tänkt sig.

Vid en analys av brinevätskan i Sulzers laboratorium (se bilaga 3) fann man att dess pH-värde var ca 10,7. Den syrebindande delen av rostinhibitorn, Mitco-10, som i huvudsak består av Na_2SO_3 , visade sig ha mycket dålig syreupptagningsförmåga vid detta pH-värde och vid den låga temperatur, som råder i brinevätskan. Man kunde påvisa att tillsats av en katalysator i form av ett koboltsalt skulle påskynda syreupptagningen. Ett förslag till åtgärd blev därför att detta koboltsalt skulle tillsättas. Emellertid har man valt att gå en annan väg (se nedan).

En fullständig analys av korrosionsproblemet har utförts av Korrosionsinstitutet. Undersökningsprotokollet redovisas i sin helhet i bilaga 4.

Rostskadorna orsakade ett stillestånd mellan 30 april 1986 och 1 mars 1988. Vid rekonstruktionen av värmepumpen byttes alla tuber i förångaren ut mot nya av titan. Samtidigt gummipläterades de ytor i förångarens gavlur, som är i kontakt med brinevätskan.

Tanken på rostskydd via inhibitorer övergavs och ett katodiskt rostskydd installerades både i värmepumpsbyggnaden och i ventilbyggnaden.

Vid reparationen av förångaren, trycksattes kompressorn med kvävgas för att förhindra att denna skulle skadas. Emellertid tycks ändå en del saltlösning ha kommit in i kompressorn och skadat denna samt omgivande rörsystem. Vid samma tillfälle som ovan passade man därför på att byta ut kompressorhjulet, som levererats för 8 MW avgiven effekt, mot ett nytt avsett för 4,5 MW.

7 RESULTAT - VÄRMEKÄLLA

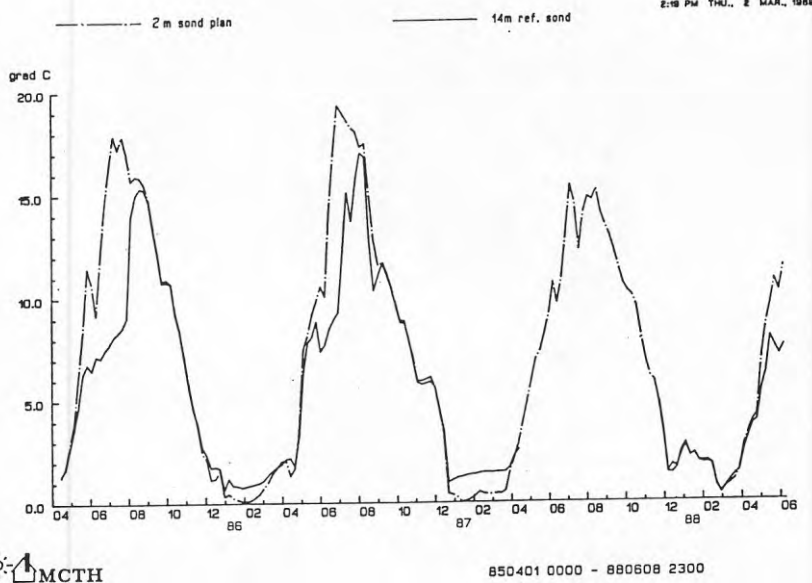
7.1 Vattentemperatur

För utvärdering av kollektorns funktion är det i första hand vattentemperaturen under vintern som, är av intresse. Den är avgörande för ispåfrysning på slangarna och för brinetemperaturen. Temperaturförhållandena under resten av året har ej betydelse för kollektorns dimensionering, men inverkar däremot på värmepumpens effekt och värmefaktor. Även strömhastigheten är betydelsefull, men denna uppskattas vara så låg att den är av underordnad betydelse i Motalaviken. I detta avsnitt redovisas mätdata för vattentemperaturen på olika djup i form av veckomedelvärden.

Mätperioden sträcker sig, med smärre avbrott, från 21 mars 1985 fram till 3 oktober 1988. De tre första vinternarna var extremt kalla, medan den sista vintern var varmare än normalt. Som medelvärde för månaderna januari-mars fick vätternområdet ett temperaturunderskott av 4°C åren 1985 och 1987, och 2°C 1986. För 1988 var motsvarande temperaturöverskott nära 2°C. Speciellt extrema månader var februari 1985 och januari 1987 med medeltemperaturer av -10°C respektive -11°C, vilket är 7 respektive 8°C kallare än normalt. Kylan medförde isläggning över hela Vättern de tre första vintrarna, men inte under den milda vintern 1988. En närmare beskrivning av väderlek och isförhållanden ges i bilaga 7.

En översiktlig bild av temperaturvariationerna under hela mätperioden ges i figur 7.1. Här visas veckomedelvärden av temperaturen på 13,5 m djup vid referensmätkedjan utanför kollektorn och på 1,5 m djup vid den grundaste mätkedjan i plankollektor 1. Temperaturen på mellanliggande djup, där kollektorn är belägen, måste ligga inom intervallet mellan de båda temperaturkurvorna.

Våruppvärmningen började i april och fortgick sedan mycket snabbt under maj månad. Under sommaren de aktuella åren steg temperaturen vid ytan till mellan 15 och 20°C som högst. På större djup släpade uppvärmningen efter och nådde maximum först i augusti. Denna utveckling, som hänger samman med att det bildas ett temperatursprängsikt, är normal för sjöar med detta djup, och förstärks i Motalaviken av att de djupare partierna är avgränsade med en tröskel från de öppna vattenområdena utanför. Under höstavkylningen, ned till en temperatur av ca 2°C, var temperaturen nära nog konstant från ytan till botten, som en följd av omblandningen.

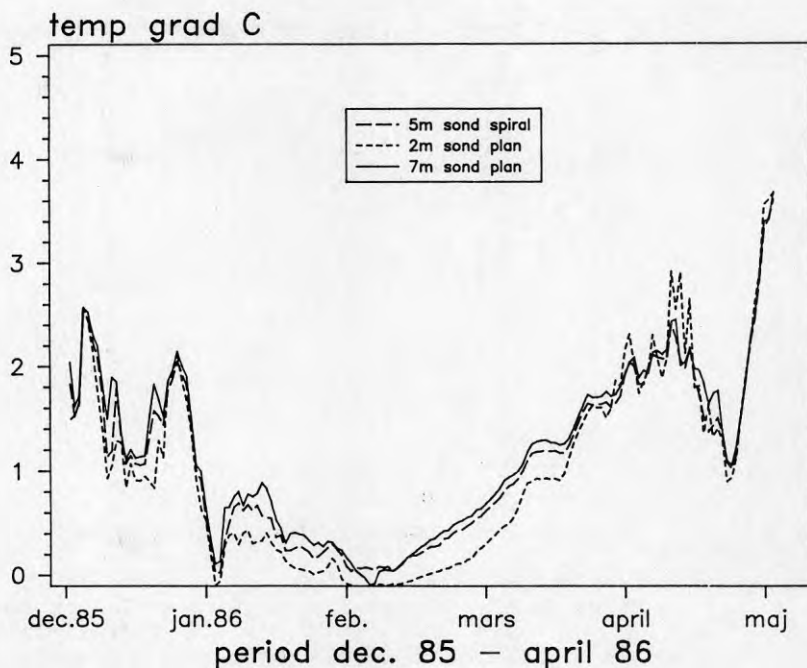


Figur 7.1 Månadsmedelvärden av vattentemperaturen på 1,5 resp. 13,5 m djup under hela mätperioden, april 1985 - maj 1988.

En detaljerad bild av vattentemperaturen under vardera av vintrarna ges i figur 7.2 a-c. Här har temperaturmätpunkterna på 10 cm höjd över botten vid 2-, 5- resp. 7-meterssonden valts ut som representativa för olika delar av kollektorn. Ytterligare temperaturdata redovisas i bilaga 8.

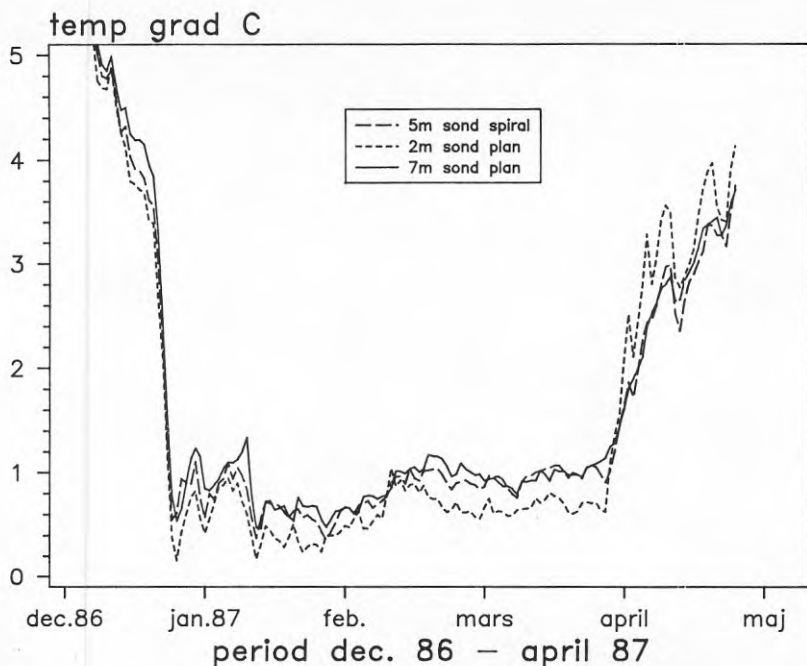
Vintern 1985/86 avkyldes vattnet till nära $\pm 0^{\circ}\text{C}$ vid årsskiftet i samband med kallt och blåsigt väder. Därefter återhämtade sig temperaturen några tiondels grader för att sedan sjunka mot noll i slutet av januari och någon vecka in i februari, då hela Vättern hade islagts. Avkylningen under januari kan troligen kopplas till tillströmning av allt kallare vatten från de öppna delarna av Vättern. Till viss del bidrog även kollektorns egen kyleffekt till den låga temperaturen, speciellt vid 2-meterssonden, där kollektorn nästan var sammanfrusen i början av februari. Under senare delen av februari och under mars steg temperaturen med ca $0,05^{\circ}\text{C}$ per dygn. Detta motsvarar en tillförd effekt av 22 W/m^2 , om man räknar på att ett 10 m tjockt skikt värms. Endast solinstrålningen genom is- och snötäcket kan tillföra så stor värmeeffekt, och det krävs att i

storleksordningen 10-20% av instrålningen trängt igenom isen. Snötäcket på isen var endast någon cm eller helt bortblåst vilket innebär att det är rimligt med denna transmission.



Figur 7.2 a Temperaturen 10 cm över botten vid mätsonderna på 2 och 7 m djup i plankollektorn och på 5 m djup i spiralkollektorn under vintern 1985/86. Dygnsmedelvärden.

Vintern 1986/87 uppvisar ett temperaturförlopp som är typiskt för många sjöar. I slutet av december skedde en snabb avkylning till ca 0,6°C och isläggning i hela Motalaviken. Därefter var temperaturen likartad under tre månader fram till slutet av mars, då våruppvärmingen satte in på allvar. Den genomsnittliga temperaturökningen under den lugna perioden motsvarade 0,005 °C per dygn, således väsentligt mindre än föregående år. Snötäcket var också betydligt tjockare, så att endast några få procent av instrålningen kan förväntas ha trängt igenom isen. Värmepumpen var ej i drift denna vinter, så kollektorn utövade ej någon extra kylning av det bottennära vattnet. I stället bidrog värme från botten att öka temperaturen närmast botten något, speciellt på 2 och 5 m djup (se bilaga 8).

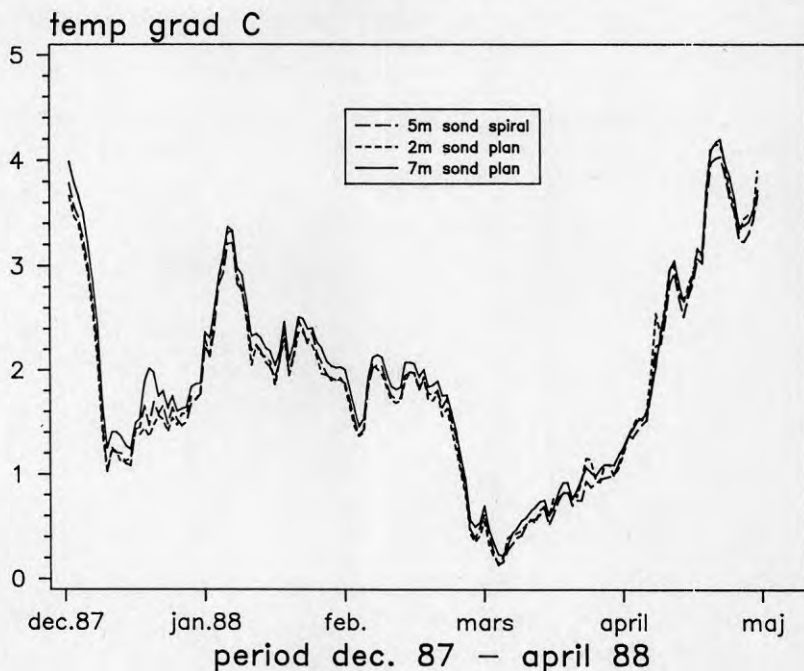


Figur 7.2 b Temperaturen 10 cm över botten vid mätsonderna på 2 och 7 m djup i plankollektorn och på 5 m djup i spiralkollektorn under vintern 1986/87. Dygnsmedelvärdet.

Den sista mätsäsongen, 1987/88, var så mild att Motalabukten inte istäcktes. Vattentemperaturen bestämdes därför helt av värmeutbytet med atmosfären och var, under större delen av vintern, högre än 1°C . Endast under ett fåtal dagar i slutet av mars var temperaturen nära noll. Avsaknaden av istäcke medförde också att vattnet kunde blandas vertikalt av vinden så att temperaturen på olika djup följde varandra väl.

Den dimensionerande temperaturen för kollektorn, $0,6^{\circ}\text{C}$, underskreds under vintern 1985/86 betydligt på alla djup under närmare två månader. Som följd härav stoppades driften av värmepumpen under perioden 4-16 februari på grund av alltför stor påfrysning på kollektorn, och den kördes sedan på ungefär halv effekt under ytterligare fem dygn innan den togs i full drift. Vintern 1986/87 var mera gynnsam. På 5 och 7 m djup översteg vattentemperaturen $0,6^{\circ}\text{C}$ praktiskt taget hela tiden. På mindre djup var temperaturen lägre under en period i mitten av januari, speciellt om man tar hänsyn till den extra uppvärmningen vid botten (jfr bilaga 8).

Om värmepumpen varit i drift är det troligt att påfrysning på kollektorn skulle ha medfört en viss driftinskränkning även detta år, dock i mindre omfattning än föregående säsong.



Figur 7.2 c Temperaturen 10 cm över botten vid mätsonderna på 2 och 7 m djup i plankollektorn och på 5 m djup i spiralkollektorn under vintern 1987/88. Dygnsmedelvärden.

Den sista mätsäsongen var mycket gynnsam för värmepumpdrift. Endast under ett fåtal dagar vid månadsskiftet februari-mars underskreds den dimensionerande temperaturen. Under så kort tid hinner inte is tillväxa på slangarna i nämnvärd omfattning. Den relativt höga temperaturen under större delen av vintern medför också att förångningstemperaturen blir 3-4°C högre än i det dimensionerande driftfallet.

7.2 Temperaturstatistik

Statistiskt sett var vattentemperaturen lägre än normalt under vintermånaderna 1985, 86 och 87 och högre än normalt 1988. Detta framgår om man jämför månadsmedelvärden från Motala kraftverk under de aktuella åren (tabell 7.1) med den statistik som redovisas i tabell

2.1. Under flera av månaderna var temperaturen i nivå med de lägsta som uppmätts. Detta gäller t ex i februari 1985 och 86 och januari 1987 med månadsmedelvärdet 0,2°C, och i mars 1985 med 0,3°C. Dessa värden överensstämmer väl med mätresultaten i Motalaviken på 2-3 m djup och kan sägas vara representativa för kollektor-systemets grundaste delar. På större djup var temperaturen något högre.

Tabell 7.1 Månadsmedeltemperatur vid Motala kraftverk under vintermånaderna 1986-88.

	Dec	Jan	Febr	Mars	April
1986	3,1	0,3	0,2	1,2	2,1
1987	1,5	0,2	0,3	0,4	2,7
1988		2,0	1,3	0,7	3,4

8 RESULTAT - KOLLEKTOR

8.1 Effekt och brinetemperatur

Mätningar på kollektorn har omfattat utgående brinetemperatur (köldbärartemperatur) samt, för var och en av enheterna, inkommande brinetemperatur och upptagen effekt. Värmemängdsmätningen har korrigerats med hänsyn till salthalten i brinevätskan enligt kapitel 5.2.4.

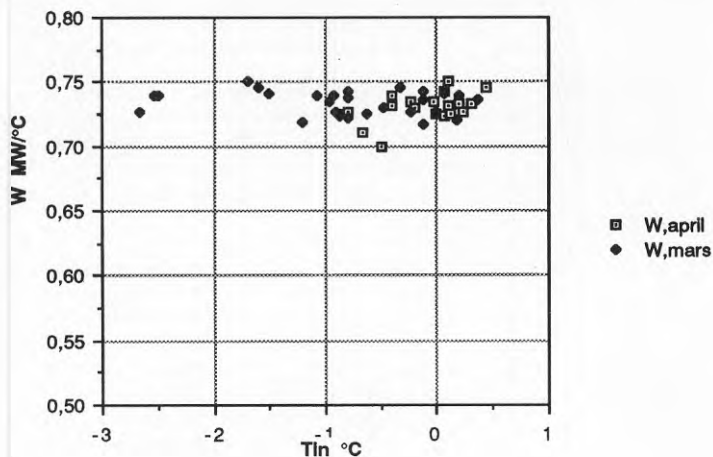
Kollektorn har i princip fungerat bra under mätperioden. Erfarenheter och mätdata under en hel vinter har dock, på grund av stillestånden hos värmepumpen, endast kunnat erhållas från vintern 1985/86. Såväl 1985 som 1988 togs anläggningen i drift så sent på säsongen att väruppvärmningen av sjövattnet redan börjat. Säsongen 1986/87 var anläggningen inte alls i drift. Den följande redovisningen koncentreras till månaderna januari - april 1986, då Motalaviken var istäckt och vattentemperaturen genomgående lägre än 2,5°C. Under denna tid fanns både perioder då vattentemperaturen var så hög att kollektorn bör ha varit isfri och perioder med lägre temperatur än den dimensionerande, då driften fick inskränkas på grund av ispåfrysningen på slangarna.

Den upptagna effekten hos hela kollektorn varierade i allmänhet mellan 2,0 och 2,4 MW som dygnsmedelvärde de dygn då anläggningen varit i kontinuerlig drift. Temperaturskillnaden över kollektorn mellan inkommande och utgående köldbärarvätska var då mellan 2,6 och 3,4°C. Förhållandet mellan upptagen effekt och temperaturskillnad mellan kollektorns början och slut visas i figur 8.1. Denna kvot är lika med produkten av köldbärarflödet och värmekapaciteten per volymenhet enligt följande formel:

$$P = \rho C Q (T_{in} - T_{ut}) \quad \Rightarrow \quad P / (T_{in} - T_{ut}) = \rho C Q = W$$

Använda beteckningar framgår av listan på sidan 88.

Eftersom ρC är relativt konstant, avspeglar variationerna i värmekapacitetsflödet W variationer i vätskeflödet genom kollektorn. Flödesvariationerna är, som framgår av figuren, ganska små och påverkas inte nämnvärt av brinetemperaturen inom det aktuella intervallet. Medelvärdet av värmekapacitetsflödet W är 0,73 MW/°C. Detta motsvarar ett vätskeflöde av 192 l/s om värmekapaciteten sätts till 3,8 MJ/m³°C.

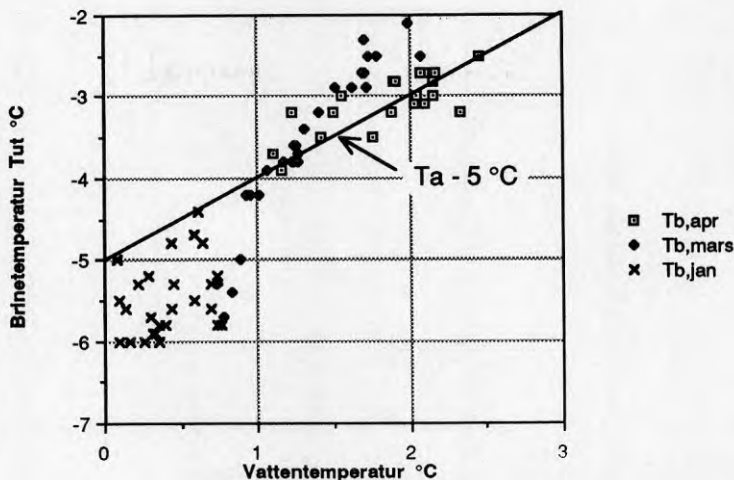


Figur 8.1 Värmekapacitetsflöde W , bestämt som kvoten mellan upptagen effekt hos kollektorn och temperaturskillnaden mellan slutet och början av kollektorn.

Brinetemperaturen följer några grader under vattentemperaturen, men beror även av ispåfrysning på slangarna, effektuttaget och strömhastigheten i vattnet. Härtill kommer egenskaper hos kollektorn såsom värmemotståndet hos slangväggen, brineflödet och slangarnas läge i förhållande till botten. I figur 8.2 har den utgående brinetemperaturen avsatts som funktion av vattentemperaturen. För att representera vattentemperaturen för hela kollektorn har valts en mätpunkt på 50 cm höjd över botten inom spiralkollektorn. Mätpunktens djup är ca 4,7 m.

Temperaturvärdena i figuren är dygnsmedelvärden. Endast sådana dygn då värmepumpen gått kontinuerligt har tagits med. Dygnsmedeleffekten hos kollektorn varierade mellan 1,8 och 2,4 MW. Vid vattentemperaturer över ca 1,2°C var utgående brinetemperatur i genomsnitt ca 4,8°C lägre än vattentemperaturen. Kollektorn bör i dessa fall ha varit i stort sett isfri. Spridningen kring medellinjen kan hänföras till variationer i upptagen effekt.

Vid en vattentemperatur under 1°C medförde isbildning på slangarna att brinetemperaturen blev lägre än den inlagda medellinjen trots att samma effekt togs ut. Mätpunkterna är därför spridda beroende på variationer i istjocklek. En undre begränsning vid -6°C ligger i värmepumpens reglering.

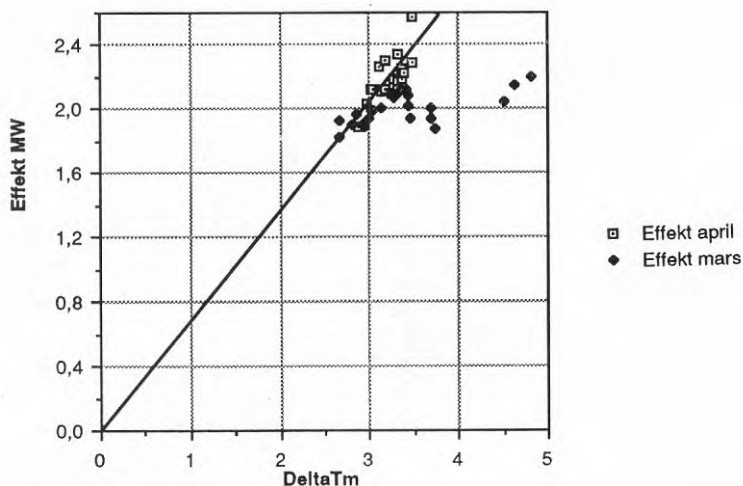


Figur 8.2 Utgående brinetemperatur som funktion av vattentemperaturen under dygn med kontinuerlig drift i januari, mars och april 1986.

Kollektorns värmeupptagande förmåga belyses i figur 8.3, där den upptagna dygnsmedeleffekten är avsatt som funktion av den logaritmiska medeltemperaturdifferensen mellan brine och vatten. Den senare definieras enligt följande:

$$\Delta T_m = \frac{T_L - T_0}{\ln \frac{T_0 - T_a}{T_L - T_a}}$$

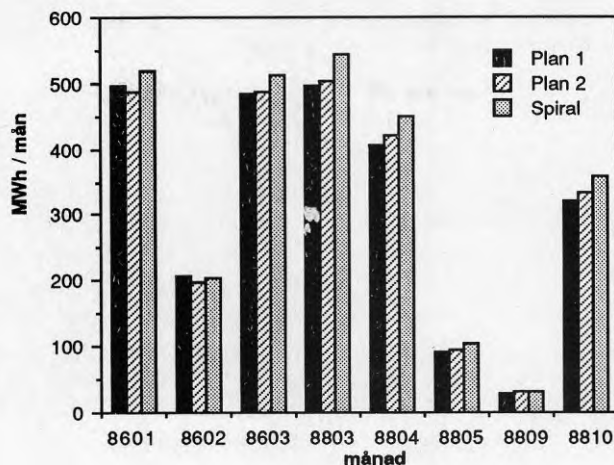
De mätpunkter som representerar isfria förhållanden ansluter till den inlagda linjen i diagrammet. Så till exempel gav en medeltemperaturdifferens av 3,2°C en upptagen värmeeffekt av 2,2 MW för kollektorsystemet som helhet. Detta svarar mot en medeleffekt för slangarna av ca 25 W/m om inte värmeupptagningen hos samlingsledningarna räknas med. Påfrysning på slangarna medför större värmemotstånd och därmed lägre effekt vid en viss medeltemperaturdifferens, vilket mätpunkterna längst till höger i diagrammet ger exempel på.



Figur 8.3 Upptagen effekt som funktion av den logaritmska medeltemperaturdifferensen mellan vatten och brine.

8.2 Jämförelse mellan kollektorenheterna

Värmeupptagningen för var och en av kollektorenheterna visas i figur 8.4 för några olika månader. I redovisningen ingår såväl månader med i det närmaste maximal drift, med nedreglerad drift (8805, 8810) samt med intermitterad drift (8602, 8809). Spiralkollektorn har genomgående givit något större effekt än de båda plana. Skillnaden är, vid fulldriftfallen, 4-9 %. En del av skillnaden kan tillskrivas en större slanglängd (3 %) och längre samlingsledningar. Den naturliga strömningen i vattnet bör också ha större inverkan på spiralkollektorn än på de bottenförlagda plana. Mot detta talar det att spiralslangarna genomsnittligt ligger på mindre djup, och därmed omges av vatten med lägre temperatur än de bottenförlagda slangarna.



Figur 8.4 Månadsvärden av värmeupptagningen hos de tre kollektorenheterna.

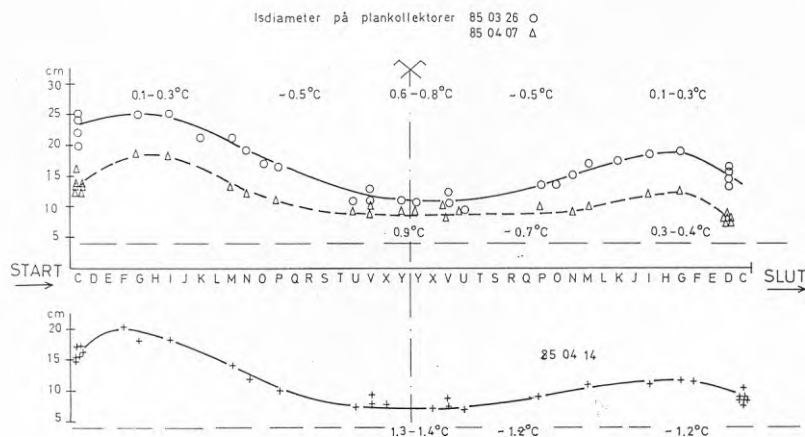
8.3 Ispåväxt på kollektorslangar

Ispåväxten på slangarna uppmättes tre gånger i mars-april 1985 och fem gånger i februari 1986 med hjälp av dykare.

Isens fördelning längs slangarna vid de tre mättillfällena 1985 framgår av figur 8.5. Uppmätningarna är fördelade på olika slangar i de båda plana enheterna. Värmepumpen togs i drift den 7 mars 1985 och kördes därefter med nästan full effekt (80-90 %) under den aktuella perioden. Den låga vattentemperatur som rådde under den första tiden (se figur 7.1) medförde en snabb ispåväxt på slangarna med maximum ungefär vid det första mättillfället den 28 mars. Därefter ökade vattentemperaturen så att isen successivt avsmälte.

Karakteristiskt är att den största isdiametern uppträdde en bit in från början av slangarna, för att sedan avta till ett minimum i den yttersta delen av kollektorn, där slangarna vänder. Därefter steg istjockleken åter mot det grundare området, men minskade åter närmast änden av slangerna. Kurvornas form avspeglar två processer som är typiska för motalakollektorn. Dels ligger slangarna inom ett stort djupintervall, vilket medför att vattentemperaturen är högre (under vintern) i den yttre delen där slangarna vänder än i den grundare inre delen. Kollektorns stora utbredning och värmeuttag

per ytenhet leder vidare till att temperaturen blir något högre vid kollektorns kanter än längre in. Eventuellt bidrar även den egenkonvektion, som kollektorns kylning ger upphov till, till högre strömhastighet, och därmed effektivare värmeöverföring vid kanterna av kollektorområdet.



Figur 8.5 Isdiameter längs slangarna i de plana kollektorenheterna vid tre tillfällen i mars-april 1985. Mätningarna är gjorda av dykare och fördelade över olika slangar.

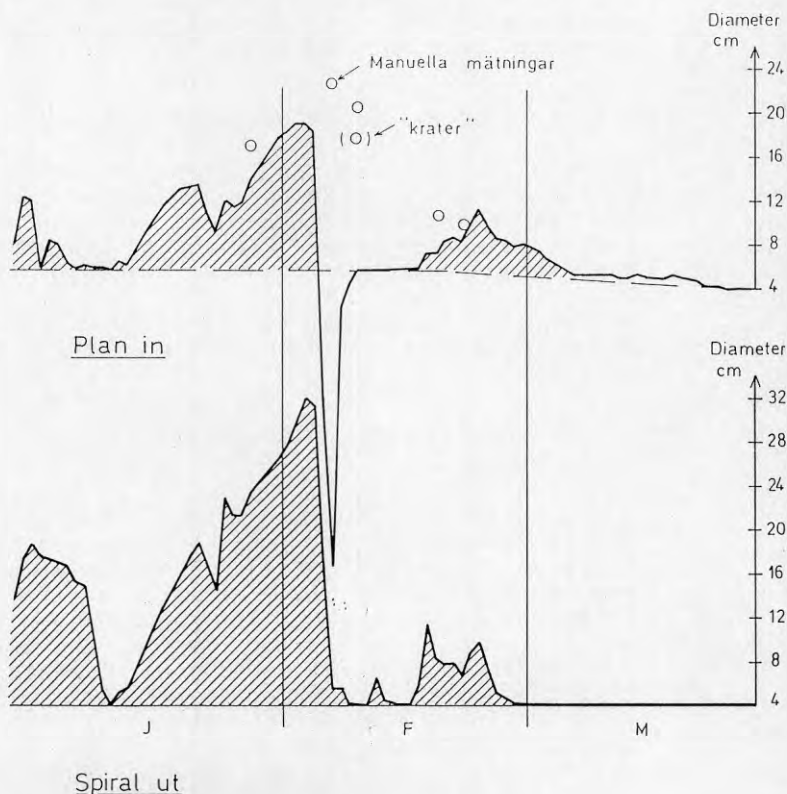
Under vintern 1985/86 monterades på prov två prototyp-instrument för att mäta istjockleken på kollektor-slangarna. Mätarnas placering, en på spiralkollektorn och en på plankollektor 1, framgår av bilaga 6. På spiralkollektorn monterades mätaren på en utgående slang på ca 0,5 m höjd över botten, medan mätaren på plankollektorn av misstag kom att placeras på en inkommande slang.

Ismätaren består i princip av ett vattenfyllt plexi-glasrör vilket monteras vinkelrätt mot kollektor-slangen. När vattnet i röret fryser medför volymökningen att vatten pressas ut ur röret. Det är denna volymökning som mätes och omsättes till istjocklek. Instrumentet är utvecklat vid Institutionen för vattenbyggnad, CTH. En närmare beskrivning av dess funktion ges av Svensson (1988).

Resultaten av ismätningar under jan-mars 1986 framgår av figur 8.6. Där har avsatts dels dygnsmedelvärden av registreringarna med det nya instrumentet och dels av dykare uppmätta värden från sex mättillfällen. De sena-

re värdena är i regel uppmätta i höjd med det fast monterade instrumentet, men ett fåtal värden finns även från den yttre delen av plankollektorn. De senare bekräftar tendensen från föregående år att ispåfrysningen längs de plant utlagda slangarna får ett "sadelformat" förlopp på den högre temperaturen på större djup. Skillnaden mellan slangens ändar och mitt bör dock ha varit mindre än 1985 eftersom temperaturskillnaden mellan 7 och 2 m djup var mindre.

Mätningarna visade en snabb istillväxt de första dagarna i januari, då vattentemperaturen tillfälligt var mycket låg. Därefter steg vattentemperaturen och isen avsmälte successivt.



Figur 8.6 Isdiameter på kollektorslangar januarimars 1986 uppmätt dels manuellt av dykare och dels registrerat med fast monterad ismätare.

Från mitten av januari hade vattentemperaturen åter sjunkit under det dimensionerande värdet, vilket medförde en längre period med kraftig istillväxt fram till den 4 februari då värmepumpsystemet stängdes av. Isdiametern hade då stigit till något mer än 30 cm på utgående slangar och man vågade inte driva anläggningen vidare med hänsyn till risken för uppflytning och skador på kollektorn. Under istillväxtperioden svarade isbildningsvärmets mot ett värmefflöde av mellan 5 och 14 W/m, vilket var upp till cirka hälften av kollektorns totala värmeupptagning.

Avsmältningsförloppet då värmepumpen var avstängd återges inte korrekt av ismätaren, speciellt inte när värmepumpen stängdes av. Mätaren har senare modifierats för att klara detta. Enligt dykinspektionen avtog isdiametern i mitten av februari successivt, med en hastighet av omkring 1 cm/dygn.

8.4 Utvärdering av värmeupptagningsförmåga

Mätningarna ger vissa möjligheter att utvärdera kollektorslangarnas värmeupptagningsförmåga och jämföra med laboratoriemätta värden (se Svensson och Sörman, 1983). De senare ligger till grund för dimensioneringsberäkningar redovisade av Svensson, 1988.

För en icke ispåfrusen kollektor ger diagrammet i figur 8.3 att värmeupptagningen hos en enskild slang kan skrivas:

$$Q = 7,9 (T_a - T_b) \quad W/m$$

Detta gäller när sjön är istäckt och vattnets strömshastighet är obetydlig och kan jämföras med laboratorieresultaten för en slang liggande direkt på botten i stillastående vatten. I det senare fallet erhöles ett värde på konstanten i formeln till mellan 6,5 och 7,5 W/m°C vid motsvarande vattentemperaturer. En väsentlig skillnad mellan de båda fallen är dock slangmaterialet, som i Motala är PEH med värmeledningstalet 0,43 W/m°C och vägg tjockleken 3 mm, medan laboratoriemätningarna utfördes på PEL-slang med värmeledningstalet 0,36 W/m°C och vägg tjockleken 3,7 mm. Om man i stället beräknar det yttre värmeöverföringstalet, α_y , blir detta ca 130 W/m²°C för motalakollektorn och 180-320 W/m²°C för laboratorieförsöket.

Under icke ispåfrusna förhållanden har alltså motalakollektorn som helhet en något sämre värmeupptagningsförmåga är vad som bestämts under kontrollerade förhållande för slang liggande på botten eller fritt i vatt-

net. Detta kan bl a bero på försmutsning av slangarna, övertäckning med singel på delar av slanglängden samt bristande mätnoggrannhet. Vid dykning har man kunnat konstatera att slangarna täcks av ett slamlager, vilket även kan skönjas på fotografiet i figur 3.7. Om ett sådant slamlager antas ha en tjocklek av 1 mm ökar värmemotståndet hos väggen med 44%. Det yttre värmeöverföringstalet kan då beräknas till ca $230 \text{ W/m}^2\text{°C}$, d v s ungefär detsamma som de laboratoriemätta värdena. De övriga felkällorna kan bedömas ha betydligt mindre inverkan.

För ispåfrusen kollektor kan man förutsätta att inverkan av försmutsning blir försumbar. Mätningarna i samband med påfrysnings- och avsmältningsförloppen i jan-febr 1986 kan användas för utvärdera det yttre värmeöverföringstalet från vattnet till iscyllindern runt slangarna. Ett teoretiskt uttryck för detta värmeöverföringstal i stillastående vatten (egenkonvektion) har följande form:

$$\alpha_y = G \left(\frac{(68,1 - 8,55 T_a) T_a}{d_y} \right)^{1/4}$$

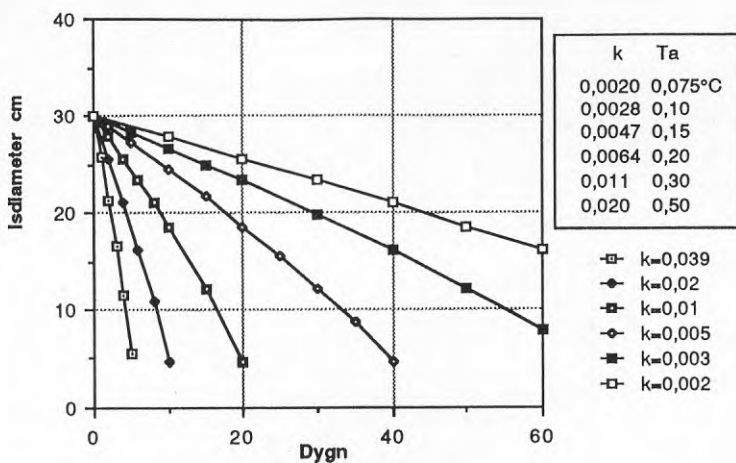
Konstanten G är för en fri, horisontell slang lika med 23,7 och, baserat på laboratorieförsök, rekommenderas värdet 25 vid dimensionering av slang liggande på botten (Svensson, 1988). För nedsjunkna eller täckta slangar är värdet lägre.

För avsmältningsfasen kan följande uttryck härledas som beskriver hur isdiametern minskar med tiden vid en konstant vattentemperatur (och inget värmeuttag):

$$d_y = (d_{y0}^{5/4} - kt)^{4/5} \quad \text{där } k = 2,5 \frac{G}{1 \rho_{is}} (68,1 - 8,55 T_a)^{1/4} T_a^{5/4}$$

Förloppet ger en i det närmaste linjärt avtagande is-diameter som styrs av konstanten k, se figur 8.7. I figuren är också inlagt en tabell över k-värdet vid olika vattentemperaturer med $G=25$. Angivna k-värden gäller med tiden t räknad i dygn.

Genom att jämföra de manuellt uppmätta avsmältningsförloppen i figur 8.6 med de beräknade kurvorna kan praktiska k-värden utvärderas.



Figur 8.7 Beräknad avsmältning av en iscyllinder i stillastående vatten vid olika vattentemperaturer.

Enligt tabellen i figur 8.7 svarar dessa k-värden mot vattentemperaturen 0,15 respektive 0,10°C. Den uppmätta medeltemperaturen under perioden 5-15 februari var 0,20°C på 0,5 m höjd över botten i spiralkollektorn, 0,17°C på 1 m höjd och 0,11°C på 3 m höjd, d v s 0,5 m över toppen på spiralen. Härav kan man dra slutsatsen att det uppmätta avsmältningsförloppet mycket väl svarar mot det som kan beräknas. Bäst överensstämmelse uppnås för ett något lägre G-värde än 25, men avvikelserna ligger inom temperaturmätningens felmarginal.

På plankollektorn tyder de manuellt uppmätta isdiametrarna under avsmältningen på att k-värdet var ca 0,005 eller till och med ännu högre på utgående slang. Detta borde svara mot en vattentemperatur av minst 0,15°C, men mätningarna visade en medeltemperatur av endast 0,08°C på 25 cm höjd över botten vid den grunda mätsonden. Detta kan tolkas så att plankollektorns värmeupptagningsförmåga inom det grunda området är betydligt effektivare än vad som svarar mot stillastående vatten och ett G-värde av 25. Orsaken till detta kan vara inverkan av naturlig och/eller påtvingad (p g a värmeuttaget) strömning över kollektorn. En strömhastighet av 2-4 cm/s skulle vara tillräcklig för att medföra den observerade effekten, och en sådan strömhastighet kan bedömas vara fullt realistisk. Att man inte fått samma effekt på spiralkollektorn kan sammanhånga med att det täta nätverket av slangar ger ett så stort strömnings-

motstånd, speciellt när kollektorn är påfrusen, att strömhastigheten blir för låg för att ha någon betydelse.

Istillväxtfasen ger sämre möjligheter att utvärdera kollektorns funktion, dels därför att vi inte känner hur värmeupptagningen varierar längs slangens och dels därför att isdiametern endast vid ett tillfälle mätts manuellt under denna period.

Den maximala isdiametern i toppen på spiralen resp. i början av den plana kollektorn blev ungefär lika stor. Detta skulle kunna indikera att slangarnas värmeupptagning är ungefär lika stor i båda fallen, eller att isbildningsvärmets är den helt dominerande energikällan. Om vi utgår från att ismätaren på spiralkollektorn ger en relativt riktig bild av påfrysingsförloppen i början slangarna kan man urskilja två perioder med relativt enhetliga förhållanden, nämligen 13-20 januari och 27 januari - 3 februari.

Under den första av perioderna tillväxte isdiametern från 5 cm (0,5 cm isskikt på slangens) till 19 cm. Isbildningen motsvarar ett värmefflöde av 5 W/m. Samtidigt togs ett medelvärmefflöde av 25 W/m ut från kollektorn, men i början av slangens, där mätaren var belägen, måste värmeupptagningen ha varit ännu större. Den aktuella värmeupptagningen kan beräknas utgående från isdiametern och brinetemperaturen (\approx utgående brinetemperatur) enligt följande formel:

$$q_v = \frac{\pi(-T_b)}{\frac{1}{\alpha_i d_i} + \frac{1}{2\lambda_v} \ln \frac{d_s}{d_i} + \frac{1}{2\lambda_{is}} \ln \frac{d_y}{d_s}}$$

Den beräknade värmeupptagningen blir 43 W/m i början av perioden, sjunkande till 36 W/m vid slutet. Dessa värden förefaller vara höga relativt medelvärmeuttaget, men med hänsyn till att värmeupptagningen måste vara mindre vid toppen på spiralen, där isdiametern är större, samt vid botten och vid slangarnas kontaktpunkter, är de troligen realistiska. Detta innebär att värmeöverföringen från vattnet till iscyllindern bör ha varit omkring 35 W/m som genomsnitt. Det yttre värmeöverföringstalet blir då 260 W/m²°C vid isdiametern 12 cm och vattentemperaturen 0,35°C. Detta är betydligt högre än det teoretiska värdet vid stillastående vatten, som är 93 W/m²°C vid motsvarande vattentemperatur och isdiameter. Det skulle krävas en strömhastighet av knappt 3 cm/s för att uppnå det utvärderade värmeöverföringstalet. Denna strömhastighet kan bedömas vara fullt realistisk eftersom sjön inte var istäckt, och vinden normalt ger strömmar i denna storleksordning. Vid den

plana kollektorn måste strömhastigheten inom de grunda delarna ha varit ytterligare något högre eftersom ispåfrysning och värmeuttag var likvärdiga, men vattentemperaturen lägre.

Under den andra istillväxtperioden, 27 jan - 3 febr, svarade istillväxten för ett värmefflöde av i genomsnitt ca 11 W/m. Värmeuttaget för hela kollektorenheten var 22 W/m, medan värmeupptagningen vid ismätaren kan beräknas till ca 28 W/m. Värmeöverföringen från vattnet till iscylindern skulle således ha uppgått till 17 W/m vid den låga vattentemperaturen, ca 0,17°C. Detta ger ett yttre värmeöverföringstal av 112 W/m²°C, vilket är 80% större än det beräknade vid stillastående vatten och ett G-värde av 25. Även i detta fall frestas man dra slutsatsen att naturlig strömning inverkar på värmeöverföringen, trots att viken var istäckt. Det relativa mätfelet blir emellertid relativt stort i detta fall, varför slutsatserna blir osäkra.

Sammanfattningsvis kan man säga att kollektorns värmeupptagning fungerar något sämre än beräknat när den är isfri, p g a försmutsning, medan den fungerar som beräknat eller något bättre när den är ispåfrosen. Strömningen i området har stor betydelse för värmeöverföringen, speciellt när sjön inte är istäckt.

8.5 Praktiska erfarenheter av kollektorsystemet

Kollektorsystemet har i stort sett fungerat bra under mätperioden och inte varit utsatt för yttre åverkan.

En viss osäkerhet har dock framförts från beställaren rörande förankringen mot islyftkrafter, speciellt för de plana kollektorenheterna. Man har befarat att singelbelastningen inom de grundaste delarna skulle kunna rubbas av våg- och strömkrafter och därmed minska i belastningseffektivitet. Inom de djupaste delarna av kollektorn skulle singelmaterialet kunna sjunka ned successivt i den lösa botten. Slutligen var man, tack vare dykbesiktningen, osäker om belastningen gav tillräcklig säkerhet mot uppflytning inom varje del av kollektorn.

För att kunna konstatera eventuella förändringar av kollektorn markerades i samband med slutbesiktningen 10 st referenspunkter, fördelade över hela kollektorsystemet. Senare har ännu en referenspunkt placerats inom den grunda delen av plankollektorenhet 2. Referenspunkterna är placerade i anslutning till en regel (singelbelastad) och markerade med plaströr, som slagits ned i botten och sticker upp några tiotal cm.

Referenspunkterna inspekterades med hjälp av dykare i augusti 1985 och i juni 1986, varvid även höjden och

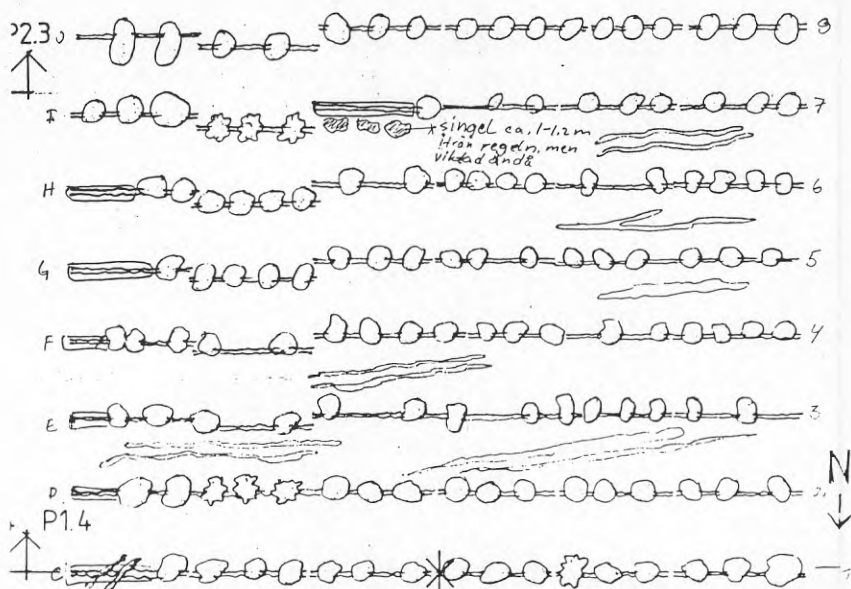
bredden på den angränsande singelhögen uppmättes. Resultatet från inspektionerna redovisas i bilaga 9. Referenspunkternas lägen framgår av bilaga 6.

Vid den senaste inspektionen konstaterades att några av reglarna inom den grunda delen av plankollektorenhet 1 saknade singelbelastning vid ytterkanten mot öster. Detta hade medfört att islyftkraften knäckt de fyra-fem första reglarna ca 3 m in från änden, så att de lutade uppåt och befann sig ca 1 m över botten vid ytterändan. I övrigt fanns inga tecken på skador p g a ispåfrysningen under vintern. Det kan noteras att dykinspektionen vid slutbesiktningen inte avslöjade bristen på singel vid kanten av kollektorenhet 1, trots att dykaren då simmade längs alla reglarna. Detta säger något om svårigheten att orientera sig och bedöma storlek och avstånd vid arbete under vatten.

Inom de grunda delarna av plankollektorenheterna fanns det, åtminstone vid någon av referenspunkterna, tecken på smärre rörelser hos singellasten, så att denna blivit flackare och mera utbredd. Inom den djupa delen bildade singellasten mycket flacka högar eller strängar, och man kunde sluta sig till att en avsevärd del av singeln befann sig nedsjunken i dyn under reglarna. Den effektiva belastningen av singel måste därmed bedömas vara betydligt mindre i de djupa delarna än i de grundare, men samtidigt är ispåfrysningen här betydligt mindre p g a högre vattentemperatur, vilket medfört mindre lyftkrafter.

Trots de avvikelser som konstaterats vid inspektionerna måste man bedöma att säkerheten mot uppflytning torde vara acceptabel, utom på sådana platser där man eventuellt missat att belasta jämnt. För att förbättra bedömningsunderlaget lät beställaren utföra en kartering av kollektorn med hjälp av s k "Side-scan Sonar". Undersökningen utfördes under sommaren 1986 av Marine Survey AB och kunde visa mycket tydligt, i kartform, reglarnas och singelhögarnas lägen och form. Som exempel visas i figur 8.8 en plan över den inre delen av plankollektorenhet 1.

I figuren framgår tydligt hur singellasten är placerad i högar. Dessa blir mera diffusa (och lägre) ju längre ut man kommer, vilket är naturligt med hänsyn till att singlet tippats från vattenytan. Mellan reglarna finns på flera ställen avlånga spår. Dessa utgörs av extra belastning i form av "korvar" med singel hophållna av fiberduk, som lagts ut för att pressa ned slangarna mot botten. På grundval av karteringen kompletterades under hösten 1986 belastningen på reglarna på sådana ställen där brister kunde konstateras, t ex vid ändarna på regel 1 - 6 och i mitten av regel 7.



Figur 8.8 Översikt över regler och singelbelastning inom den inre delen av plankollektorenhet 1 uppmätt med "Side-scan Sonar".

Efter utförda inspektioner och komplettering av singelbelastningen på svaga ställen ansåg beställaren att det ändå kvarstod osäkerheter om långtidsstabiliteten hos singelbelastningen på kollektorn. Speciellt gäller det inom de vågpåverkade, grunda delarna av plankollektorenheterna, men även inom de djupa delarna där singelasten spritts ut över större yta och delvis sjunkit ned i dyn, och därmed inte i sin helhet kunde antas bidra till att belasta kollektorslangarna. Även för spiralenheten ansågs föreligga en viss risk, i och med att varje slangspiral endast var viktad längs en del ($\approx 40\%$) av sträckningen. Överföring av lyftkrafterna från resten av spiralen förutsätter samverkan mellan olika spiralvarv genom sammanfrysning i kontaktpunkterna.

Osäkerheten i förankringen av kollektorn kan till stor del hänföras till den arbetsmetod som använts, vilken inte ger fullständig kontroll över singelastens placering och dess samverkan med kollektorn. För att uppnå 100-procentig säkerhet lät därför beställaren (med

BFR-stöd) utföra en komplettering av belastningen på kollektorn under sommaren och hösten 1987. För belastning av de plana enheterna utvecklades därvid en metod med singelfyllda strumpor, eller "korvar", av polyesterduk, vilka placerades tvärs över kollektorslangarna. Polyesterduken var hopsydd till rörstrumpor med 35 cm diameter, vilka fylldes med otvättad natursingel 16/32 från en ponton med tippflak, genom ett störtrör, på vilken strumpan var uppträdd. "Korvarna" var dimensionerade för att ge en belastning av 75 kg/m.

Inom den grunda, inre tredjedelen av planenheterna placerades två sådana "korvar" mellan varje regel, på den mittre tredjedelen en "korv" mellan varje regel och på den djupa, yttre tredjedelen en "korv" på varje regel. Sammanlagt kompletterades belastningen på plankollektorenheterna med 232 m^3 singel.

På spiralkollektorn kompletterades belastningen genom att lägga en duk med ca 1 m bredd på botten av varannan spiral längs hela dess längd. Duken täcktes med ett 20 cm tjockt singellager genom tippning från ytan. Totalt belastades spiralenheten på detta sätt med 212 m^3 singel. De praktiska erfarenheterna av dessa belastningsmetoder var goda, men "korvmetoden" krävde ca 4 gånger så stor arbetsinsats som metoden med direkt tippning.

8.6 Driftövervakning av ispåfrysning

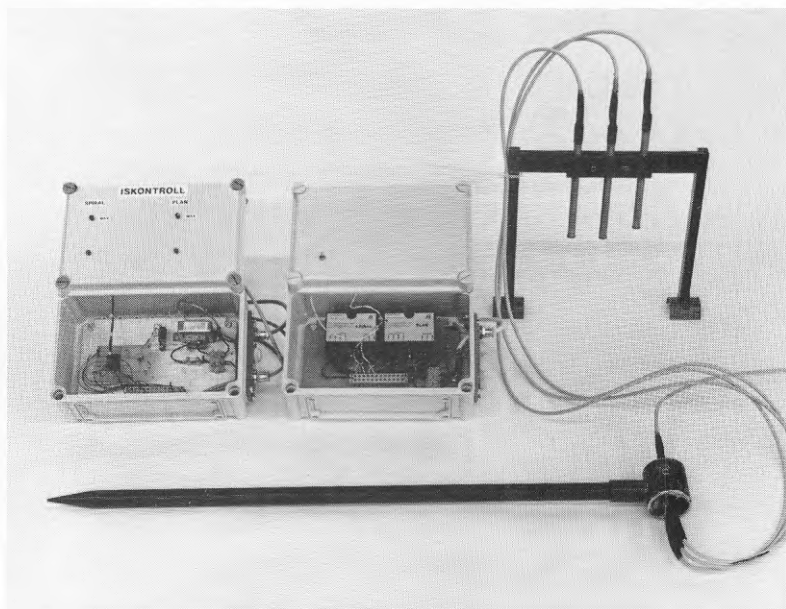
För den fortsatta driften av kollektorn är det väsentligt att kunna kontrollera ispåfrysningen så att inte den dimensionerande islyftkraften överskrids (kollektorn fryser ihop). De metoder som står till buds är i princip följande:

- Direkt mätning av istjocklek på slangarna på utsatta ställen.
- Mätning av vattentemperatur och brinetemperatur samt beräkning av påfrysningsförloppet.
- Mätning av brinetemperatur och upptagen effekt samt beräkning av istjockleken.

Mätutrustning, som möjliggör kontroll av ispåfrysning enligt alla tre metoderna har installerats efter det att uppföljningsprogrammet avslutats.

För direkt ismätning har två stycken isvakter tillverkats och placerats på en utgående slang i planenhets 1 respektive i spiralenheten. Isvakten bygger på egenskapen att is har väsentligt högre elektriskt motstånd för växelström än vatten.

Utrustningen består av tre elektroder som monteras på två olika avstånd från slangen, se figur 8.9. Elektroderna är, via en mätkabel, anslutna till en sensorenhet, som innehåller strömmatning och reläer, som slår till då spänningen mellan elektroderna ändras. Avläsning kan direkt göras på en indikatorenhet, där grön lampa indikerar att istjockleken är mindre än den maximalt tillåtna och röd lampa indikerar att avtining rekommenderas. Omslagsintervallet har valts så att röd lampa tänds när ispåfrysningen svarar mot en diameter av 34 cm och släcks åter (grön tänds) vid 30 cm isdiameter. Mätssystemet kan enkelt anslutas till värmepumpens styrdator, så att driften kan styras automatiskt med hänsyn till istjockleken.



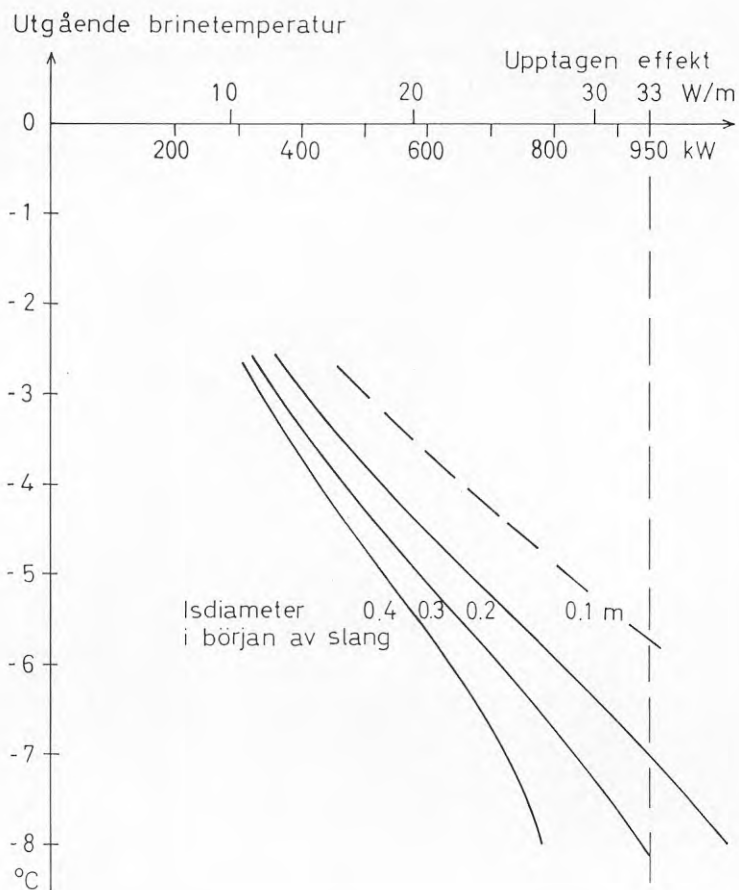
Figur 8.9 Isvakt för kontroll av ispåfrysning på sjökollektorslang med, från vänster, indikatorenhet, sensorenhet och givare i form av elektroder som monteras på olika avstånd från slangen. "Spjutet" nederst är avsett att stickas ned i botten för att undvika skador på givarna om mätkabeln åverkas.

Mätutrustningen baseras på en kommersiellt tillgänglig iskontrollmätare för kylmaskiner m m av fabrikat Ranco, vilken modifierats och anpassats för fältbruk vid Institutionen för vattenbyggnad, CTH.

För övervakning av vattentemperaturen har två temperaturgivare av typ Pt-100 installerats på 2,5 respektive 6 m djup mellan plan- och spiralkollektorenheterna. Gi-varna är monterade på 12-15 cm höjd över botten i toppen av plaströr som stuckits ned i foderrör i botten och är anslutna till värmepumpsystemets mät- och styrdator.

Vattentemperaturmätningen tjänar i första hand till att indikera när den dimensionerande temperaturen under-skrids, så att det finns risk för att istjockleken blir för stor. En approximativ utvärdering av istillväxtförloppet kan göras med de metoder som finns beskrivna i Svensson (1988). En sådan beräkning blir dock relativt osäker, men kan t ex användas som underlag för att bedöma när det är dags att kontrollera istjockleken manuellt med dykare.

Den tredje metoden, med brinetemperatur- och effektmätning, är enklast att utföra, eftersom befintlig mätutrustning kan användas och inga nya fältinstallationer krävs. Metoden bygger på det förhållande att temperaturen vid iscylinderns yta är $\pm 0^{\circ}\text{C}$ och att det finns ett entydigt samband mellan brinetemperatur, effektuptagning och isdiameter. För en lång kollektorslang varierar emellertid dessa tre parametrar längs slangen. Man måste därför göra något antagande om denna variation för att kunna utvärdera den maximala isdiametern i början av slangen. Det enklaste antagandet är att de yttre förhållandena längs slangen är konstanta och att isdiameterns förändring är likartad som vid stationära förhållanden. Med dessa förutsättningar har diagrammet i figur 8.10 konstruerats. Ur diagrammet kan t ex utläsas att, om värmepumpen regleras så att utgående brinetemperatur är -6°C , så bör isdiametern ha vuxit till ca 30 cm när den upptagna effekten för en kollektorenhet har sjunkit till 720 kW (kontinuerlig drift). För motalkollektorn uppfylls inte antagandet om konstanta förhållanden längs slangarna, eftersom dessa täcker ett stort djupintervall med olika vattentemperatur. Metoden bör därför endast användas som komplement till direkt ismätning, men den ger en realistisk uppfattning om istillväxtförloppet.



Figur 8.10 Beräknade samband mellan upptagen effekt (för en kollektorenhet), brinetemperatur och isdiameter i början av slangarna. Beräkningen förutsätter konstanta yttre förhållanden längs slangarna.

Referenser

Svensson, T. och Sörman, L-O. (1983): Värmeupptagning med bottenförlagda kylslangar i stillastående vatten. Laboratorieförsök. BFR-rapport nr R41:1983.

Svensson, T. och Broman, B. (1983): Vättern som värmekälla för värmepumpar. En regional studie. BFR-rapport nr R115:1983.

VIK AB (Torbjörn Svensson), (1984): Bottenundersökning för sjövärmearläggning i Motalaviken.

Svensson, T. (1987): Ispåväxtmätare för sjövärmekollektor. Inst. för vattenbyggnad, Report series C:28.

Svensson, T. och Schroeder, K. (1987): Sjövärmepump i Motala Väster. 3:e Nordiske Värmepumpedage, Reykjavik 22-25 juni 1987. Proceedings.

Svensson, T. och Sörman, L-O. (1988): Dimensionering av sjövärmekollektorer. BFR-rapport nr R65:1988.

Beteckningar

d_i	slangens innerdiameter	m
d_s	slangens ytterdiameter	m
d_y	yttre diameter, iscylinderns diameter	m
G	konstant för yttre värmeöverföringstal	
k	konstant för avsmältning av iscylinder	
l	isens smältvärme	$= 333 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$
T_a	vattentemperatur (omgivningstemperatur)	$^{\circ}\text{C}$
T_b	brinetemperatur	$^{\circ}\text{C}$
q_v	värmeflöde per m slang	W/m
α_i	inre värmeöverföringstal	$\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
α_y	yttre värmeöverföringstal	$\text{W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
l_{is}	isens värmeledningstal	$= 2,24 \text{ W/m }^{\circ}\text{C}$
l_v	slangmaterialets värmeledningstal	$= 0,43 \text{ W/m }^{\circ}\text{C}$
ρ	densitet	kg/m^3
ρ_{is}	isens densitet	$\approx 917 \text{ kg/m}^3$
P	effekt	W
C	värmekapacitivitet	$\text{J/kg }^{\circ}\text{C}$
Q	vätskeflöde	m^3/s
T_{in}	brinetemperatur efter kollektor	$^{\circ}\text{C}$
T_{ut}	brinetemperatur före kollektor	$^{\circ}\text{C}$
T_0	brinetemperatur i början av slang	$^{\circ}\text{C}$
T_L	brinetemperatur i slutet av slang	$^{\circ}\text{C}$

BILAGOR

- Bilaga 1** Beskrivningsfil för projekt Motala Väster. Mätpunktsförteckning.
- Bilaga 2** Uppskattning av elkostnaderna för värmepumpen.
- Bilaga 3** Sulzers rapport angående rostinhibitorn i brinelösningen, "Heat Pump in Motala, Sweden, Corrosion of evaporator tubes". Publiceras med tillstånd av ELAJO AB.
- Bilaga 4** Korrosionsinstitutets rapport, "Korrosions-skador i värmepump - Motala Ströms Kraft AB". Publiceras med tillstånd av Tomas Hallén, Energiprojekt AB.
- Bilaga 5** Ekonomisk sammanställning.
- Bilaga 6** Schematiska slangkartor med referenspunkter och mätpunkter inlagda.
- Bilaga 7** Väderlek och isförhållanden under vinter-månaderna 1985/86 -1987/88.
- Bilaga 8** Vattentemperaturkurvor under vintermånaderna 1985/86 -1987/88 baserat på uppmätta dygns-medelvärden.
- a) Temperatur på ca 2 m djup vid 14-m sond, 2-m sond (10 cm över botten) och 5-m sond.
 - b) Temperatur på ca 6 m djup vid 14-m sond och 7-m sond.
 - c) Temperatur vid 5-m sond (spiral) på 2 m, 4 m och 5 m:s djup.
 - d) Temperatur vid 7-m sond (plan) på 0 resp. 10 resp. 25 cm höjd över botten.
 - e) Temperatur vid 2-m sond (plan) på 0 resp. 10 resp. 50 cm höjd över botten.
- Bilaga 9** Inspektion och uppmätning av singelbelastningen vid referenspunkter på kollektorsystemet.
- a) Kontroll av referenspunkter 1985-08-25.
 - b) Kontroll av referenspunkter 1986-06-11.

Bilaga 1: Beskrivningsfil för projekt Motala Väster.

Projektnamn: Motala Väster, SMO1
 Projektid: 850321 till 881003
 Antal mätvärden per mätcykel: 92
 Antal mätcykler per fil: 24

Indx	Betkn	Kanalbeskrivning	Enhet	Upplösn
1	GT101	Temp 1, 14 m ref sond	gr C	0,01
2	GT102	Temp 2, 14 m ref sond	gr C	0,01
3	GT103	Temp 3, 14 m ref sond	gr C	0,01
4	GT104	Temp 4, 14 m ref sond	gr C	0,01
5	GT105	Temp 5, 14 m ref sond	gr C	0,01
6	GT106	Temp 6, 14 m ref sond	gr C	0,01
7	GT107	Temp 7, 14 m ref sond	gr C	0,01
8	GT108	Temp 8, 14 m ref sond	gr C	0,01
9	GT109	Temp 9, 14 m ref sond	gr C	0,01
10	GT111	Temp 1, 8 m plan sond	gr C	0,01
11	GT112	Temp 2, 8 m plan sond	gr C	0,01
12	GT113	Temp 3, 8 m plan sond	gr C	0,01
13	GT114	Temp 4, 8 m plan sond	gr C	0,01
14	GT115	Temp 5, 8 m plan sond	gr C	0,01
15	GT116	Temp 6, 8 m plan sond	gr C	0,01
16	GT117	Temp 7, 8 m plan sond	gr C	0,01
17	GT118	Temp 8, 8 m plan sond	gr C	0,01
18	GT119	Temp 9, 8 m plan sond	gr C	0,01
19	GT121	Temp 1, 3 m plan sond	gr C	0,01
20	GT122	Temp 2, 3 m plan sond	gr C	0,01
21	GT123	Temp 3, 3 m plan sond	gr C	0,01
22	GT124	Temp 4, 3 m plan sond	gr C	0,01
23	GT125	Temp 5, 3 m plan sond	gr C	0,01
24	GT126	Temp 6, 3 m plan sond	gr C	0,01
25	GT127	Temp 7, 3 m plan sond	gr C	0,01
26	GT128	Temp 8, 3 m plan sond	gr C	0,01
27	GT129	Temp 9, 3 m plan sond	gr C	0,01
28	GT131	Temp 1, 4 m spiral sond	gr C	0,01
29	GT132	Temp 2, 4 m spiral sond	gr C	0,01
30	GT133	Temp 3, 4 m spirial sond	gr C	0,01
31	GT134	Temp 4, 4 m spiral sond	gr C	0,01
32	GT135	Temp 5, 4 m spiral sond	gr C	0,01
33	GT136	Temp 6, 4 m spiral sond	gr C	0,01
34	GT137	Temp 7, 4 m spiral sond	gr C	0,01
35	GT138	Temp 8, 4 m spiral sond	gr C	0,01
36	GT139	Temp 9, 4 m spiral sond	gr C	0,01
37	GT151	Temp 1 till kollektor 1	gr C	0,01
38	GT152	Temp 2 till kollektor 1	gr C	0,01
39	GT153	Temp 3 till kollektor 1	gr C	0,01
40	GT154	Temp 1 till kollektor 2	gr C	0,01
41	GT155	Temp 2 till kollektor 2	gr C	0,01
42	GT156	Temp 3 till kollektor 2	gr C	0,01
43	GT157	Temp 1 till kollektor 3	gr C	0,01
44	GT158	Temp 2 till kollektor 3	gr C	0,01
45	GT159	Temp 3 till kollektor 3	gr C	0,01

46	GT161	Temp 1 från kollektor 1	gr C	0,01
47	GT162	Temp 2 från kollektor 1	gr C	0,01
48	GT163	Temp 3 från kollektor 1	gr C	0,01
49	GT164	Temp 1 från kollektor 2	gr C	0,01
50	GT165	Temp 2 från kollektor 2	gr C	0,01
51	GT166	Temp 3 från kollektor 2	gr C	0,01
52	GT167	Temp 1 från kollektor 3	gr C	0,01
53	GT168	Temp 2 från kollektor 3	gr C	0,01
54	GT169	Temp 3 från kollektor 3	gr C	0,01
55	GT100	Temp ute vid boden	gr C	0,1
56	GT211	Brine vid vp varma sidan	gr C	0,1
57	GT212	Brine vid vp kalla sidan	gr C	0,1
58	GQ200	Energi från värmepump	kWh	0,1
59	GT201	Temp före värmepump	gr C	0,1
60	GT202	Temp efter värmepump	gr C	0,1
61	GQ300	Energi till Platen pc	kWh	0,1
62	GT301	Temp före Platen pc	gr C	0,1
63	GT302	Temp efter Platen pc	gr C	0,1
64	GQ400	Energi till Lundberg pc	kWh	0,1
65	GT401	Temp före Lundberg pc	gr C	0,1
66	GT402	Temp efter Lundberg pc	gr C	0,1
67	GF101	Flöde till koll 1	l/s	0,1
68	GF102	Flöde till koll 2	l/s	0,1
69	GF103	Flöde till koll 3	l/s	0,1
70	GE200	El till vp kompr motor	kWh	0,1
71	GE201	El till cp1	kWh	0,1
72	GE202	El till cp2	kWh	0,1
73	GD200	Antal starter, vp	ggr	1
74	GD301	Antal starter Platen #1	ggr	1
75	GD302	Antal starter Platen #2	ggr	1
76	GD303	Antal starter Platen #3	ggr	1
77	GD401	Antal starter Lundb. #1	ggr	1
78	GD402	Antal starter Lundb. #2	ggr	1
79	GD403	Antal starter Lundb. #3	ggr	1
80	GD311	Drifftid Platen #1	tim	0,01
81	GD312	Drifftid Platen #2	tim	0,01
82	GD313	Drifftid Platen #3	tim	0,01
83	GD411	Drifftid Lundberg #1	tim	0,01
84	GD412	Drifftid Lundberg #2	tim	0,01
85	GD413	Drifftid Lundberg #3	tim	0,01
86	GD210	Drifftid vp	tim	0,01
87	GQ101	Energi från koll 1	kWh	0,1
88	GQ102	Energi från koll 2	kWh	0,1
89	GQ103	Energi från koll 3	kWh	0,1
90	GL100	Ispåfrysning plan koll	cm	0,25
91	GL101	Ispåfrysning cirk koll	cm	0,25
92	GE203	Elförbrukning elpanna	kWh	0,1

Bilaga 2: Uppskattning av värmepumpens elkostnader

I följande sammanställning från 83-11-09 redovisas den förväntade elkostnaden för en 4,5 MW värmepump i Motala

Värmepumpens elbehov

	%	MWh
januari	11	781
februari	11	781
mars	11	781
april	10	710
maj	7	497
juni	4	284
juli	3	213
augusti	4	284
september	7	497
oktober	10	710
november	11	781
december	11	781
Totalt	7	100

Energikostnad

	Energiförbrukning i		Kostnad
	%	MWh	kkr
okt-april 13,5 öre/kWh	75	5 325	718,88
maj, juni, aug, sept 10,2 öre/kWh	22	1 562	159,32
juli 7,6 öre/kWh	3	213	<u>16,19</u>
Summa			894,39
Genomsnittskostnad (öre/kWh)			12,6
Förluster 4 %			<u>0,5</u>
Summa (öre/kWh)			13,1
Elskatt (5,2 öre/kWh)			<u>5,2</u>
			18,3
Effektkostnad (öre/kWh)			<u>1,7</u>
Kostnad i öre/kWh totalt			20,0

BETRIFFT: Heat pump in Motala, Sweden
Corrosion of evaporator tubes

ZUSAMMENFASSUNG

The corrosion control concept is not correct. No inhibitor of "passivator" type is used, such as chromate or molybdate.

The pH-value of the brine is too high (about 10.8, optimum range is 8.5-9.5). Surface layers formed at higher pH are not stable, i.e. the protection of the underlying metal is not sufficient. Moreover, at elevated pH-values the activity of catalyst accelerating the oxygen/sulfite reaction is reduced.

AUFTRAG VON Herrn Joos 0652
DIESER BERICHT UMFASST 8 SEITEN

BESTELL-NR. 3-649.3168

VERTEILER:

HH. Joos 0652/2 Ex.
Zanol 0648
Dr. Weber 1508
Reserve

GEBRUEDER SULZER
Aktiengesellschaft
CHEMIE UND KORROSION 1508

K. Knopf
K. Knopf

SULZER

- 2 -

1. System description

The evaporator is a heat exchanger of "tube and shell" type, integrated in a closed recirculating system.

Heat transfer medium: Brine (15% CaCl_2), flow on the tube side

Tube material: mild steel

Concept of corrosion control:

- commercial inhibitor MITCO 23, dosage 1,5 l/m³ (organic compounds)
- commercial inhibitor MITCO 10, dosage 20-30 ppm (Oxygen scavenger based on sodium sulfite Na_2SO_3)
- Borax (pH-Buffer).

2. Objects to be examined

- a) 2 samples of brine
- b) 18 samples of evaporator tubing

3. Investigation, Results3.1 Brine

	<u>Sample 1</u>	<u>Sample 2</u>
Density (g/cm ³)	1,10	1,12
pH-value.	10,8	10,6
Cr	n.d.	n.d.
Mo	n.d.	n.d.

n.d. = not detected

Both samples contain undissolved solids (white precipitate, obviously hydroxide and salts of calcium).

3.2 Tube samples

8 samples of tube material were cut longitudinally for visual inspection of the inner wall surface (2 were perforated, 6 not). The surface shows irregular red-brown deposits, adhering to the tube wall. They can be removed mechanically, or by cleaning with inhibited hydrochloric acid. The tube surface under the deposits is corroded; however, the corrosion attack is of uniform type and the depth of attack is only about 0,1-0,2 mm. This is true only for nonperforated tube samples.

A different situation can be observed in the case of the two perforated tubes. The perforation is located close to a deposit clump,

SULZER

- 3 -

see Fig. 1, 2. The accumulation of compact solids is blocking approximately 50% of the cross section area, disturbing the flow pattern of the medium. This localized turbulence, combined with electrochemical action of the medium is the cause of destruction of the tube material, see Fig. 3 and 4. A sample of the deposit was analysed with the following results:

Dry residue	(110 °C)	90,4%
Ignition residue	(560 °C)	91,0% of dry substance
Iron		ca.52 % of dry substance

The pulverized sample (no metal particles present) is ferromagnetic; it obviously contains magnetite Fe_3O_4 , a corrosion product of iron in waters with low oxygen concentration.

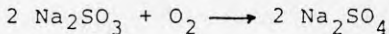
4. Discussion of results

The corrosion control concept is not correct. No inhibitor of "passivator" type is used, such as chromate or molybdate. The pH-value of the brine is too high. The optimum pH-range is 8.5-9.5. The layer of corrosion products formed at higher levels of pH-value is not stable, i.e. the protection of the underlying metal surface is not sufficient.

Comments on inhibitors used:

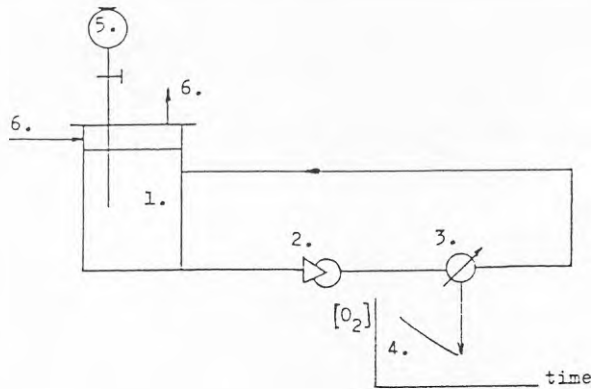
According to our experience the product MITCO 23 (Phosphonate HEDP and Toluene-pyrazole, see TLX from Elajo to Sulzer, 9.6.1986) is only efficient if used in open evaporative cooling systems (cooling towers).

MITCO 10 is based on sodium sulfite. This is an oxygen scavenger, normally used in steam generating systems, in completely demineralized water.



The rate of the reaction is affected by pH-value, excess sulfite and - most important - the water temperature. At low temperatures the reaction is very slow. To assure complete oxygen removal, the major portion of dissolved oxygen should be removed mechanically, e.g. by deaerating water heater. Usually a catalyst is added to the sodium sulfite to increase its reaction rate. Cobalt salts are the most commonly used materials to catalyze the reaction.

We have no experience with oxygen scavengers in brine systems. Following experiment was performed in our laboratory to obtain some information on the aspect. 2 liters of brine was circulated in a closed glass loop according to the scheme below:



1. Brine container
2. Pump
3. Electrochemical measurement of dissolved oxygen (Orbisphere, range down to ppb)
4. Recorder
5. Closed container with solution of sodium sulfite
6. Nitrogen gas stream to prevent air from entering to the brine container

Experiments performed

- A: Deionized water + sulfite (200 mg Na_2SO_3/l)
- B: Deionized water + sulfite (dosage as in experiment A) + solution of cobalt chloride (5 mg Co/l)
- C: 15 wt.% $CaCl_2$ solution, alkalized with NaOH to pH-value 10.8 + sulfite (dosage as in experiment A) + cobalt chloride (dosage as in experiment B)
- D: Brine from the evaporator circuit of the heat pump in Motala + sulfite + cobalt chloride, dosage as in the previous experiments

The results are represented graphically in the Appendix.

At ambient temperature the oxygen scavenging efficiency of sodium sulfite without cobalt catalyst is very low.

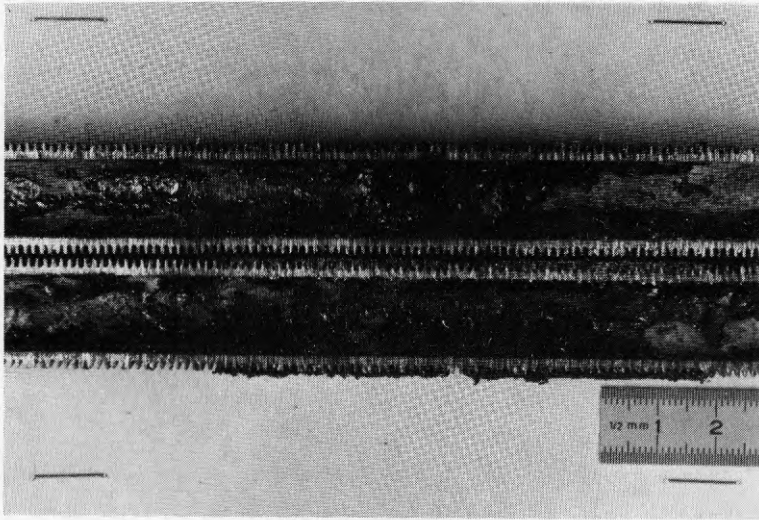


Fig. 1 Surface condition of the perforated tube.

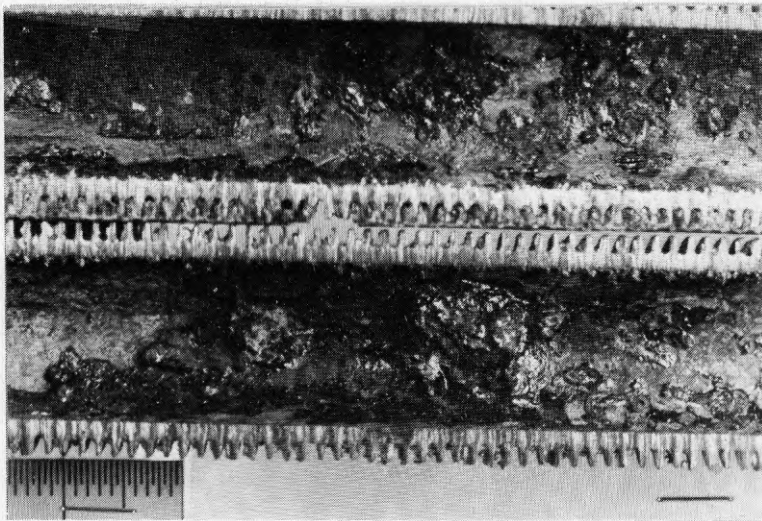
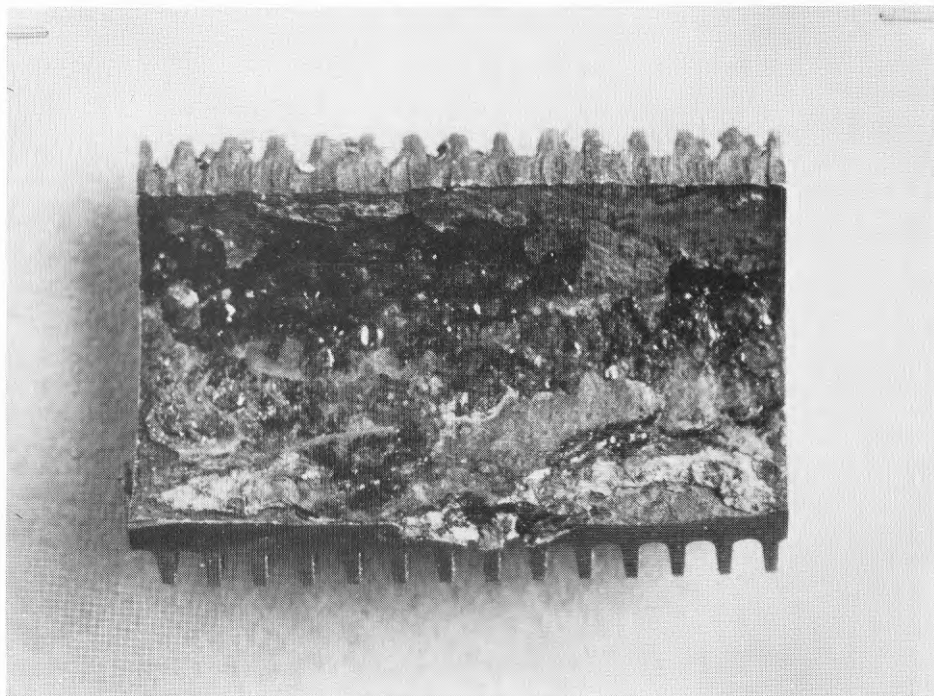


Fig. 2 Clump of corrosion products blocking the flow. Arrow indicates the perforation.

SULZER



5:1

M 1586 0415

Fig. 3 Perforated tube wall in detail

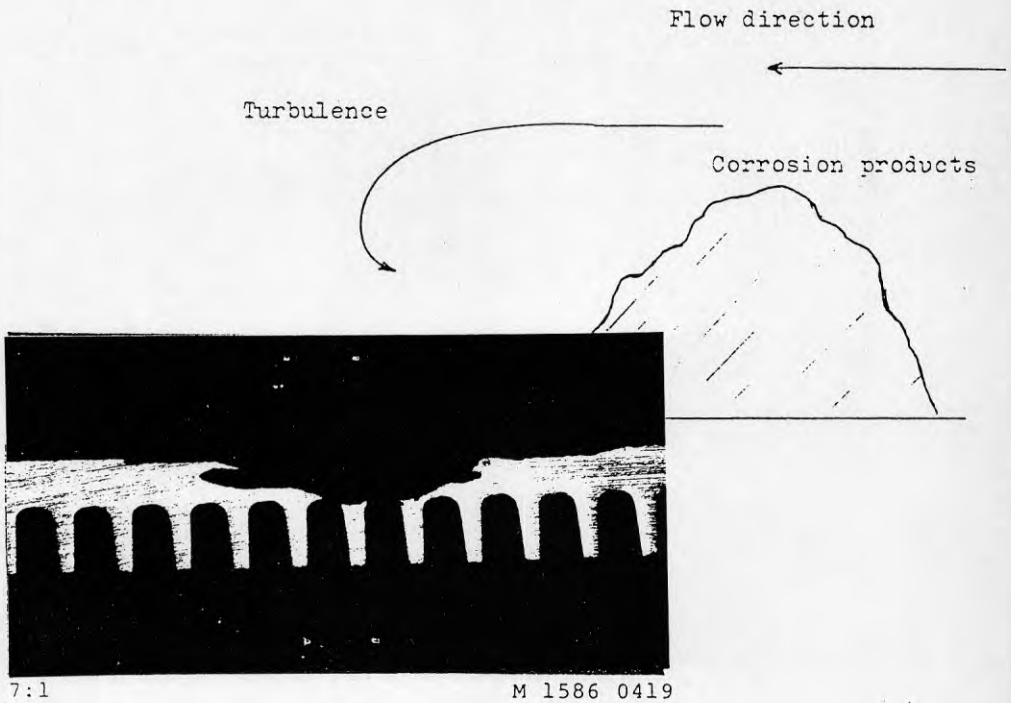
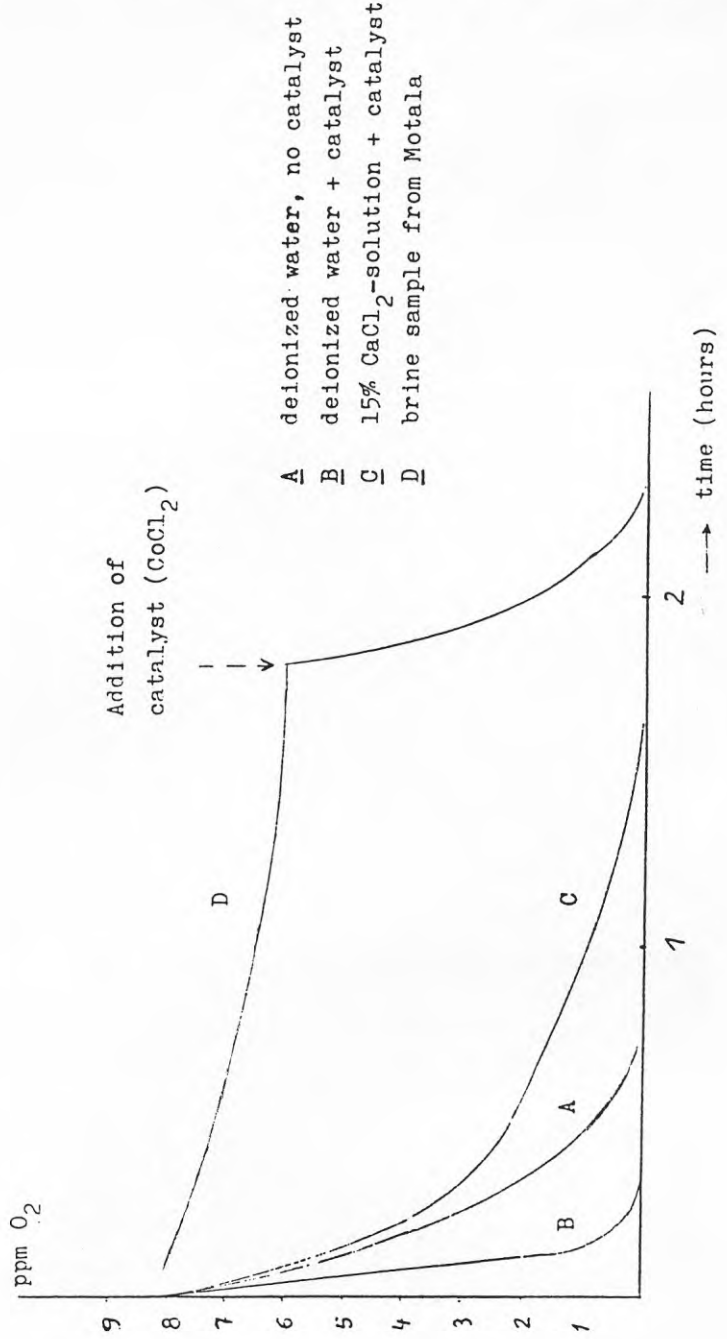


Fig. 4

Cross section examination of the perforated tube wall.

Oxygen removal by sulfite at ambient temperature



Undersökningsprotokoll



Korrosionsinstitutet
Swedish Corrosion Institute

Postadress: Box 5607
114 86 Stockholm
Telefon: 08 - 22 25 40
Besök: Kontoret
Drottning Kristinas väg 47 D
Laboratoriet
Drottning Kristinas väg 48

Preliminärt
protokoll

Ärende

Korrosionsskador i värmepump -
Motala Ströms Kraft AB

Uppdragsgivare: Energiprojekt AB
Tomas Hallén
Skånegatan 37
412 51 GÖTEBORG

Utskrivet av: eå

Handläggare:

Lennart Dahl

Godkänt

Wax

Reg nr:

53 300

Datum

1987-06-23

1 BAKGRUND

Värmepumpanläggningen Motala V förser två bostadsområden, med sammanlagt 1 600 lägenheter, med värme (1).

Värmepumpen har en dimensionerande värmeeffekt av 4,5 MW och samkörs med två befintliga oljeeldade panncentraler.

Det unika med anläggningen är det stora kollektorsystemet, som består av plaströr där brine cirkulerar.

En principskiss enligt (1) av systemet framgår av Fig 1.

1.1 Systemets konstruktion

Värmepumpen av fabrikat Sulzer, har som drivkälla en vattenkyld elmotor med 3,25 MW märkeffekt, som driver en tvåstegs turbokompressor. Som köldmedium används R 12 (freon). Köldbäraren cirkulerar mellan värmepumpens förångare och sjökollektorn.

Köldbäraren utgörs av 650 m³ vatten försett med 16 % CaCl₂, oxygenreducerande medel Mitco-10 (Na₂SO₃) och korrosionsinhibitor Mitco-23 L (fosfonat, HEDP, tolyltriazol, NaOH samt ytaktiva ämnen, enl Ref 2).

Sjökollektorn, som är nedsänkt i Vättern, består av ett antal PEH-slangar, sammanlagt 90 km och med en ytterdiameter av 40 mm och 3 mm väggstjocklek. Kollektorn är ansluten till värmepumpen via fram- och återledning, placerade i en 1 400 m, 500 diam oisolerad glasfiberarmerad plastkulvert förlagd i mark.

Värmepumpens förångare innehåller 1857 kolstålstuber med en total längd av 10,8 km. Tubernas innerdiameter är ca 13 mm och godstjockleken ca 1 mm.

1.2 Historik (1,3)

Korrosionsskyddet av värmepumpens förångartuber skulle åstadkommas genom ett lämpligt inhibitorval. Pumpleverantören, Sulzer (och dess representant i Sverige, Elajo AB) rekommenderade kromat som inhibitor. Av miljö- och hälsoskäl kunde inte kromat komma ifråga varför Elajo AB begärde ett förslag på lämpligt korrosionsskydd från Mitco AB, som rekommenderade en blandning av en korrosionsinhibitor och ett oxygenreducerande medel, vilka inte kunde betecknas som hälsofarliga varor. Fosfonat förstärkt med sulfid hade tidigare använts i små, slutna system utan några olägenheter.

Man insåg tidigt nödvändigheten av att kontrollera korrosions- och kemiförhållandena i brinekretsen. Det bildades en "brinegrupp" med detta syfte, vilken skulle svara för kontrollen, med representanter från Mitco AB, Vattenfall och KTH.

Man inriktade sig på följande:

- att mäta syrehalten
- att minska syrehalten

- att uppskatta korrosionens storlek
- att inspektera tubernas innerytor

Syrehaltsmätningen var svår att genomföra då förekommande kolorimetriska analysmetoder stördes av ett rött färgämne, som tillsattes för detektering av läckage. På våren 1986 gjordes dock mätningar med en amperometrisk metod, som visade 150-300 ppb O_2 (4). Resultatet bekräftas från Mitco (2), där man anför att värdet var som lägst något under 200 ppb O_2 . Även om dessa siffror anses vara behäftade med visst fel, kan dock storleksordningen vara rimlig.

För att erhålla lägre syrehalt i kretsen ökades överskottet av sulfid. Vidare avsåg man att tillföra koboltklorid, som katalyserar reaktionen mellan sulfid och syra då reaktionen går långsamt vid låg temperatur. Detta kom ej till utförande, då kobolten bedömdes falla ut till kobolthydroxid vid det höga pH-värdet, vilket avsevärt skulle minska effekten. I stället föreslogs att en palladiummassa skulle användas för katalys och laboratorieundersökningar i detta stycke har planerats hos Mitco AB.

På initiativ av Berendson sattes kupongprover in i systemet den 20 mars 1985. Dessa besiktigades en gång i kvartalet. Man konstaterade att allmänkorrosionen förblev relativt liten. På vårvintern 1986 upptäcktes dock rost eller avlagringar på proverna och under dessa produkter förekom frätgropar.

En inspektion av tubernas insida med hjälp av fiberoptik genomfördes under det första driftstoppet under medverkan av personal från Ringhals kärnkraftverk. Det var svårt att bedöma ytornas tillstånd då optiska effekter störde i viss mån. Enligt Berendson var ytorna emellertid relativt blanka.

Alltsedan ingångkörningen har värmepumpen varit avstängd under flera perioder, enligt följande:

- 14 dagar, juni 1985 - problem med effekttregleringen
- 100 dagar, aug 1985 - lagerhaveri i kompressorn
- 11 dagar, feb 1986 - ispåväxt på kollektorerna

Den 28 april 1986 konstaterades att det fanns hål på förångartuberna, då man fick freonlarm i brinekretsen. Värmepumpen står nu och man avser att byta ut ståltuberna i förångaren mot titantuber. Anläggningen beräknas vara i drift under hösten 1987.

2 MÅL

Syftet med föreliggande utredning är att klargöra orsakerna till den lokala korrosionen på förångartuberna.

3 UNDERSÖKNING AV STÅLKOMPONENTER I BRINEKRETSEN

Tubmaterialet har undersökts vid Vattenfalls materiallaboratorium i Västerås, se avsnitt 3.3 nedan. Därjämte fick undertecknad inspektera två stycken ca 1 m långa tuber vid in- och utloppsstutsar till förångaren i samband med besöket i Motala den 1 juni.

3.1 Studie av förångartuber

En tub av de två enligt ovan studerades närmare i mikroskop. Tuben var delad i två halvor i längsriktningen. På stora delar av insidan förekom beläggning eller oxid, påminnande om magnetit, ehuru de var starkt lilafärgad, sannolikt av det tillsatta färgämnet, som nämnts tidigare. På några centimeter av tubens längd fanns ett lokalt frät, där enbart rödrost förekom i en flack frätgrop med stor utbredning.

3.2 Inspektion av ut- och inloppsstutsar

I utloppsstutsen skrapades rödrost från en yta av ca 1 dm², varvid upptäcktes en enda frätgrop med ett djup av ca 1 mm. Som jämförelse kan nämnas, att rörets godstjocklek var ca 12 mm. Det kan inte utslutas, att en viss del av "rosten" uppkommit under stillestånd, enligt uppgift. Inloppsstutsen hade mer rödrost än utloppsstutsen.

3.3 Studier av tuber vid Vattenfalls materiallaboratorium i Västerås (5)

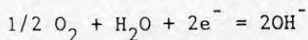
Provbitar från två tuber har i slutet av april översänts från Motala för undersökning, 4 bitar från den ena tuben och en från den andra. Okulär granskning visade ett fåtal hål, men efter halvering av tubbitarna, betning och borstning framkom åtskilliga frätgropar och även hål.

Angreppen låg i linje under en ås av starkt vidhäftande korrosionsprodukter med tjocklek upp till ca 2 mm. På vissa delar fanns 5-10 hål på en sträcka av ca 5 cm. På andra delar fanns inga angrepp. Ett mera utbrett, lokalt angrepp noterades även. Färgen på tubernas insida varierade från brunorange till svart (en tub som var rosafärgad sorterades bort).

Med energidispersiv röntgen har endast järn kunnat påvisats i korrosionsprodukterna.

4 DISKUSSION

Tillförsel av syre i brinekretsen är en förutsättning för att observerade lokala angrepp sker, då den sannolikt förekommande katodreaktionen vid korrosionen är:



Vidare är syret en förutsättning för att avlagringar i form av rost skall bildas, vilket dock inte utesluter att avlagringar av annat slag förekommit.

Den primära frågan är då på vilket sätt syre kan ha tillförts. Följande möjligheter är tänkbara:

- Åtskilligt med syre fanns i brinen eller anslutande utrymmen vid start då för svag pump använts vid systemets avluftning (6), se Bil 1.

- Syre från sjövattnet har diffunderat in via PEH-rören.
- Luftinläckage har inträffat via pumpens sug sida eller på annat sätt, eventuellt vid stillestånd.

Vid 0 °C och atmosfärstryck löser vatten ca 9 g syre per m³. Vad som löses i brine är definitivt mindre och siffran bör sålunda betraktas som ett maximalvärde. Man kan visa, att om hela syremängden åstadkom likformig korrosion i förångaren innebär detta 1,5 µm, vilket motsvarar ca 5 kg järn.

Om brinen antas ge en korrosionshastighet av 0,5 mm/år eller 0,06 µm/h betyder detta, att syret totalt förbrukats efter ca ett dygn. Tillsats av sulfit minskar angreppet i den mån sulfiten reagerar.

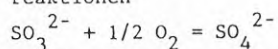
Teoretiska överväganden om syretillförseln via plaströren kan även göras. Genom diffusion av syre sker en kontinuerlig bildning av korrosionsprodukter, vilket motsvarar ett korrosionsangrepp av ca 1,1 µm/år (vid 5 °C), vilket motsvarar 3,7 kg järn per år, räknat som Fe. Beräkningen baseras på sambandet

$$\ln M = 1,85 t - 7,8142$$

som gäller hårda polyetenrör med 20 mm diameter och vattenledningsvatten. M är bildad Fe₃O₄ i gram per 100 m rörlängd och dygn och t temperaturen i °C (7).

Formeln visar, att mängden järn, som oxideras i systemet, stiger med ökande temperatur. Slam från sjövattnet kan dock minska indiffusionen av syre genom att slammets fälls ut på plaströrsytorna. Vidare är syrelösligheten lägre i brine än i vanligt vatten.

På grund av det höga pH-värdet och särskilt den låga temperaturen har reaktionen



förlöpt långsamt. Vid jämvikt har en viss mängd syre (ca 0,2 ppm) i brinen påvisats. Denna koncentration har sannolikt varit tillräcklig för att kunna framkalla lokal korrosion på tubmaterialet. Koncentrationen har dessutom periodvis varit högre speciellt vid påfyllningen av systemet, innan jämvikten hunnit inställa sig.

P g a stillestånd - i synnerhet efter kompressorhaveriet - har troligen inte inhibitor-koncentrationen kunnat hållas på effektiv nivå i alla delar av brinesystemet. Då det gäller genomfrätningarna kan man normalt inte förvänta sig att inhibitorn skall ha någon skyddsverken under avlagringar eller korrosionsprodukter, som bildats på plats.

5 SLUTSATSER

Utredningen medger följande slutsatser.

- Korrosionsangreppen på förångartuberna har uppkommit genom en serie omständigheter.
- Yttersta orsaken till angrepp är förekomst av syre i brinelösningen.
- Försök till utvärdering varifrån detta syre kommit, visar att från början löst syre i brinevattenet, men även indiffunderat syre haft betydelse.
- Det kan inte uteslutas, att syre lokalt inkommit på andra sätt, till exempel under stillestånd eller i form av atmosfärsluft, som inte pumpades ut tillräckligt under startperioden.
- Det har inte framkommit något som tyder på att otillräckliga koncentrationer av sulfid eller inhibitor skulle ha förelegat.
- På grund av sulfidens reaktionströghet med syre vid de förekommande låga temperaturerna har syret inte eliminerats i tillräcklig utsträckning i systemet. Uppmätta syrehalter är av sådan storleksordning att de kan åstadkomma gropfrätning på kolstål.
- att påskynda reaktionen mellan sulfid och syre medelst koboltklorid har bedömts utsiktslöst, då kobolten ej håller sig i lösning vid det höga pH-värdet.

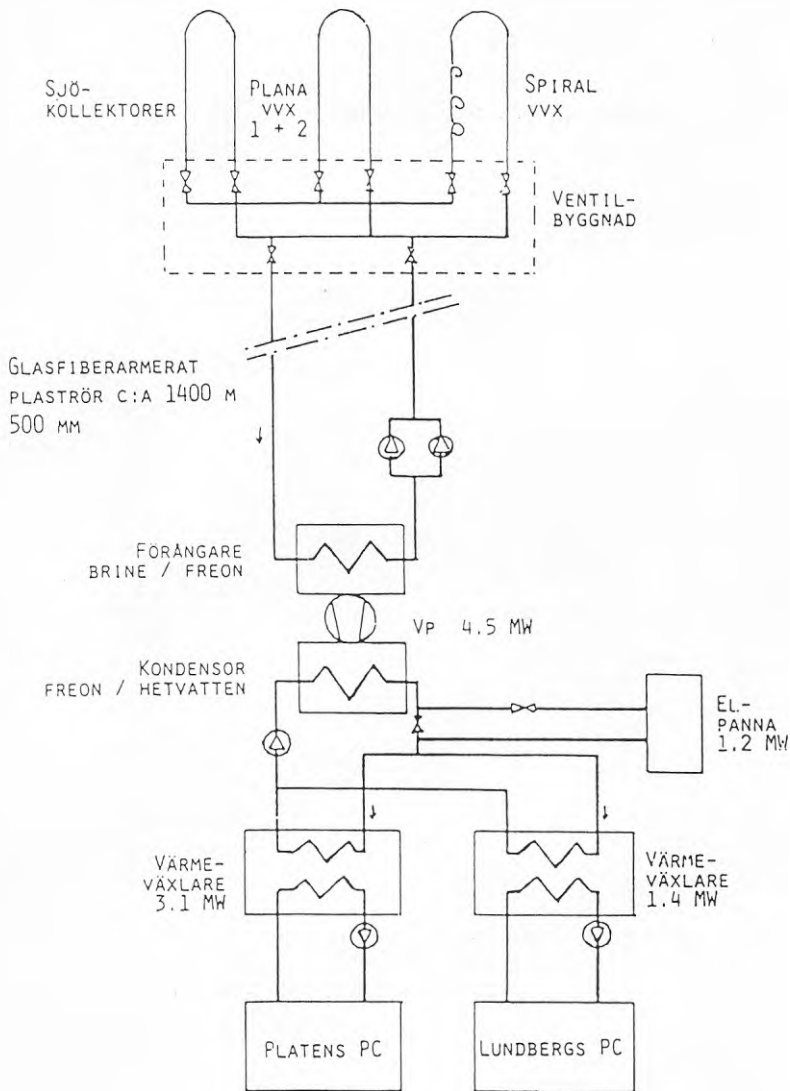
- Försök med provkupper visar, att frätgropar uppkommer under rostavlagringar på ytan.
- Materialundersökningarna tyder på att såväl oxider som bildats på plats som avlagringar uppkomna genom utfällning av magnetitslam förekommer på insidan av förångartuberna.
- Avlagringarna bedöms ha bildats under stilleståndsperioderna, då ingen cirkulation förekom i systemet.
- Det är möjligt att även korrosionsinhibitorns effektivitet påverkats under stilleståndsperioderna. Under alla omständigheter har inhibitorn ej haft någon effekt under rostavlagringarna varje sig de bildats på plats eller inte.
- Hålen och frätgroparna i tuberna har uppkommit genom s k avlagringskorrosion.
- Att upprätthålla korrosionsskyddet på alla kolstålstuber i ett så stort system som det aktuella förefaller vara en svår uppgift.

6 REFERENSER

1. Svenson, T och Schroeder, K: Sjövärmepump i Motala väster.
2. Telefonsamtal med Leif Bjurmalm, Mitco AB, 1987-06-05.
3. Diskussion vid besök i Platons värmecentral, Motala, 1987-06-01, med Sven Andersson MSK, Kjell Schroeder, CTH, Arne Lögdberg, BFR och Tomas Hallén, EPRO.
4. Besök hos Jaak Berendson, KTH, 1987-06-03.
5. Telefonsamtal med Alf Jonsson, Vattenfalls materiallaboratorium i Västerås, 1987-06-09.

6. Brev från Arne Lögdberg, BFR, till Tomas Hallén, EPRO, Göteborg och Lennart Dahl, KI, Stockholm. 1987-06-03, se Bil 1.

7. Dahl, L: Intern rapport 51 820, 1984-08-01.a1



Figur 1: Principskiss av systemet

Bilaga 5: Ekonomisk sammanställning.

88-02-02

Kostnader och lån för MSK:s del i VP11 projektet.

<u>Investeringar</u>	kkkr
A1 Grundinvestering	16 000
A2 Tillägg till bygg och grundinvestering	2 400
B Komplettering för samkörning, elpanna mm. Exkl ackumulator men <u>inkl styrutrustning.</u>	1 600
Summa investeringar	kkkr 20 000

<u>Kostnader av investeringskaraktär för rekonstruktion efter skador (rost mm)</u>	kkkr
C1 Utbyte av tuber i förångaren från Fe till titan	1 600
D1 Rekonstruktion av kompressor och övrig utrustning pga rostangrepp efter brine-läckage	900
D3 Modifiering av Platens panncentral för bättre reglermöjlighet	100
E Tilläggsförankring på sjökollektorerna	600
F Montering av katodiskt skydd för kvarvarande kolstål	120
Summa kostnader	kkkr 3 320

Summa investeringar och kostnader för MSK: 23 320 kkr.

<u>Lån och bidrag</u>	kkkr	kkkr
Stat. Vattenfallsverk	bidrag	350
Stat. Energiverk	bidrag	1 233
BFR-lån # 831445-4	lån	4 045
BFR-lån # 850250-4	lån	2 055
BFR-lån # 860581-5	lån	303
BFR-lån # 870335-2	lån	1 500
Summa	kkkr 1 583	7 903

Summa lån och bidrag till MSK: 9 486 kkr.

Redovisning av de ingående kostnaderna i kostnadssammanställningen (alla kostnader i kkr).

Juni 1984 - mars 1985

A Investeringar

A1 Grundleverans av komplett anläggning enligt kontrakt med ELAJO Värmepumpar AB 16 000

A2 Extra kostnader enligt överenskommelse med leverantören.

GAP-rör för brine i stället för PVC, som leverantören tänkt sig. Dimension $\phi 500$ mm i stället för 400 mm. Grundförstärkning av ledningsbädd och pålning för värmepumpsbyggnaden.

Extra avstängningsventiler i brineledningen. Läckagekontrollutrustning pga de många skarvarna i GAP-rören.

Flyttning av befintlig värmekulvert vid Platens PC. Extra påviktning av sjökollektorerna, konsultkostnader, inhibitor-kostnader mm mm.

2 400

Juni 1986

B Kompletterande åtgärder efter start.

Inköp och installation av 1 200 kW elpanna med hsp-utrustning, transformator och samordnande styrsystem mellan värmepump, elpanna och värmecentralerna. Installationen orsakades av att värmepumpen ej kan regleras ned till lämplig effektnivå.

Komplettering av rördragning, bypass i hetvattenkretsen, shunt i Platens pc, backventiler i påsticket från värmepumpen i resp värmecentraler mm.

1 600

Maj 1986 - februari 1988

- C Rekonstruktion av förångaren.
- C1 Pga rostskador i förångarens tuber av kolstål, utbyttes dessa mot dito av titan. Rostskadorna uppstod genom att syrehalten i brine av CaCl_2 inte gick att nedbringa tillräckligt.
- C2 Befintliga tubplattor ersattes med nya, som försågs med sprängfogad titan mot brinesidan.
- C3 Förångarens gavlar, samt in- och utlopp gummipläterades på de ytor, som är i kontakt med brine. 1 600
- D Rekonstruktion av kompressorn m m.
- D1 Reparation av turbokompressorn pga rostskador från läckage av brine till CFC-sidan.
- D2 Utbyte och reparation av diverse komponenter, som kompensator, magnet- säkerhets- och reglerventiler samt instrument, olja, CFC R12 mm. 900
- D3 Modifiering av Platens panncentral för bättre reglermöjligheter 100

Sommaren 1987

- E Sjökollektorn.
- Pga konstaterade brister i den ursprungliga förankringen av kollektorerna, beroende på förankringsmetoden, utfördes tilläggsförankring med dukomsluten singel, "korvar". 600

November 1987

- F Katodiskt rostskydd.
- Eftersom vissa delar av anläggningen fortfarande innehåller kolstål och syrekontrollen av brine inte går att genomföra till-

fredsställande, skyddas kvarvarande kolstål med katodiskt skydd. Detta installerades både i ventilbrunnen och i värmepumpsbyggnaden.

120

Summa kostnader av investeringskaraktär, kkr 23 320.

Planerade kompletteringar.

1 Undercentralerna.

För att i möjligaste mån anpassa befintliga undercentraler (ca 36 st) till vp-systemet planeras en ombyggnad av dessa.

Kostnad kkr 800-1 000

2 Ackumulatortankar.

Vid låglast, dvs under april - september, har värmepumpen för stor kapacitet, varför nedreglering måste ske med låg värmefaktor och stort slitage som följd. Ackumulering och on/off drift har bedömts vara bättre och mer lönsamt. Därtill ges utrymme för ytterligare last sommartid med bl a ett tempererat utomhusbad i närheten.

Alternativt komplettering med mindre (1,5 MW) värmepump för sommar drift i stället för elpannan för utnyttjande av sjökollektorn även vid låglast.

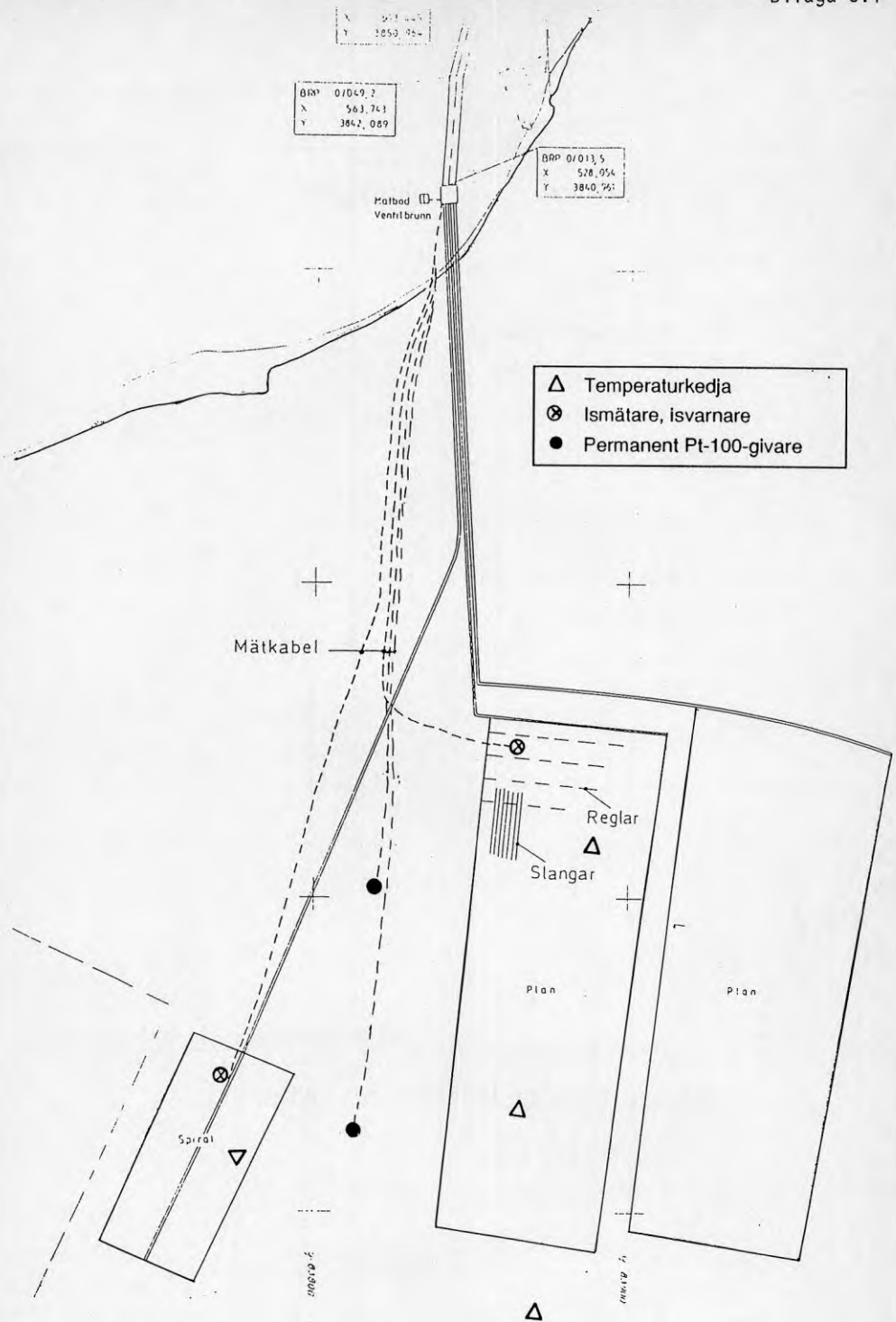
Kostnad ca kkr 1 000

3 Freonhanteringsutrustning.

Beroende på myndighetskrav kommer utrustning för detta att behövas i framtiden.

Kostnad ca kkr 500

Summa planerade investeringskostnader, kkr 2 500.

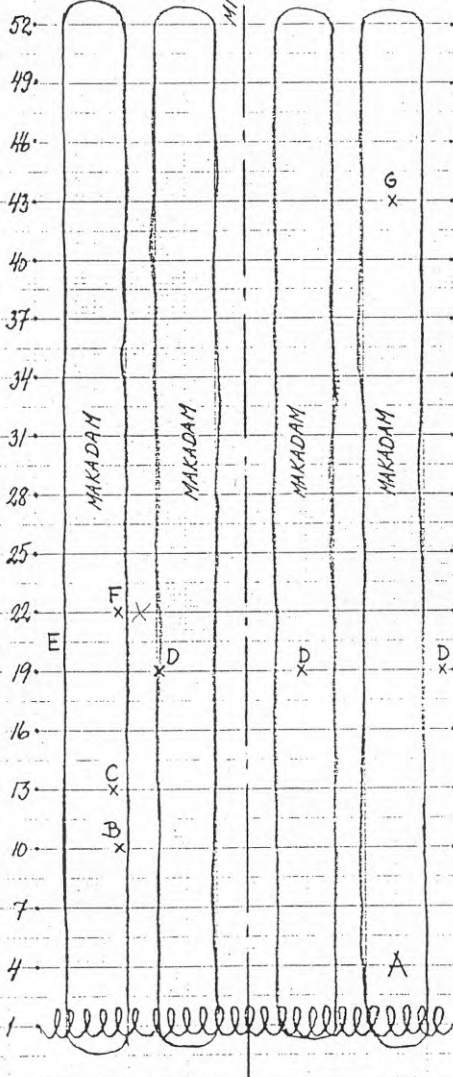


Spiralvärmväxlare

Bilaga 6:2

DISTANSHÄLLARE

MITTLINJE

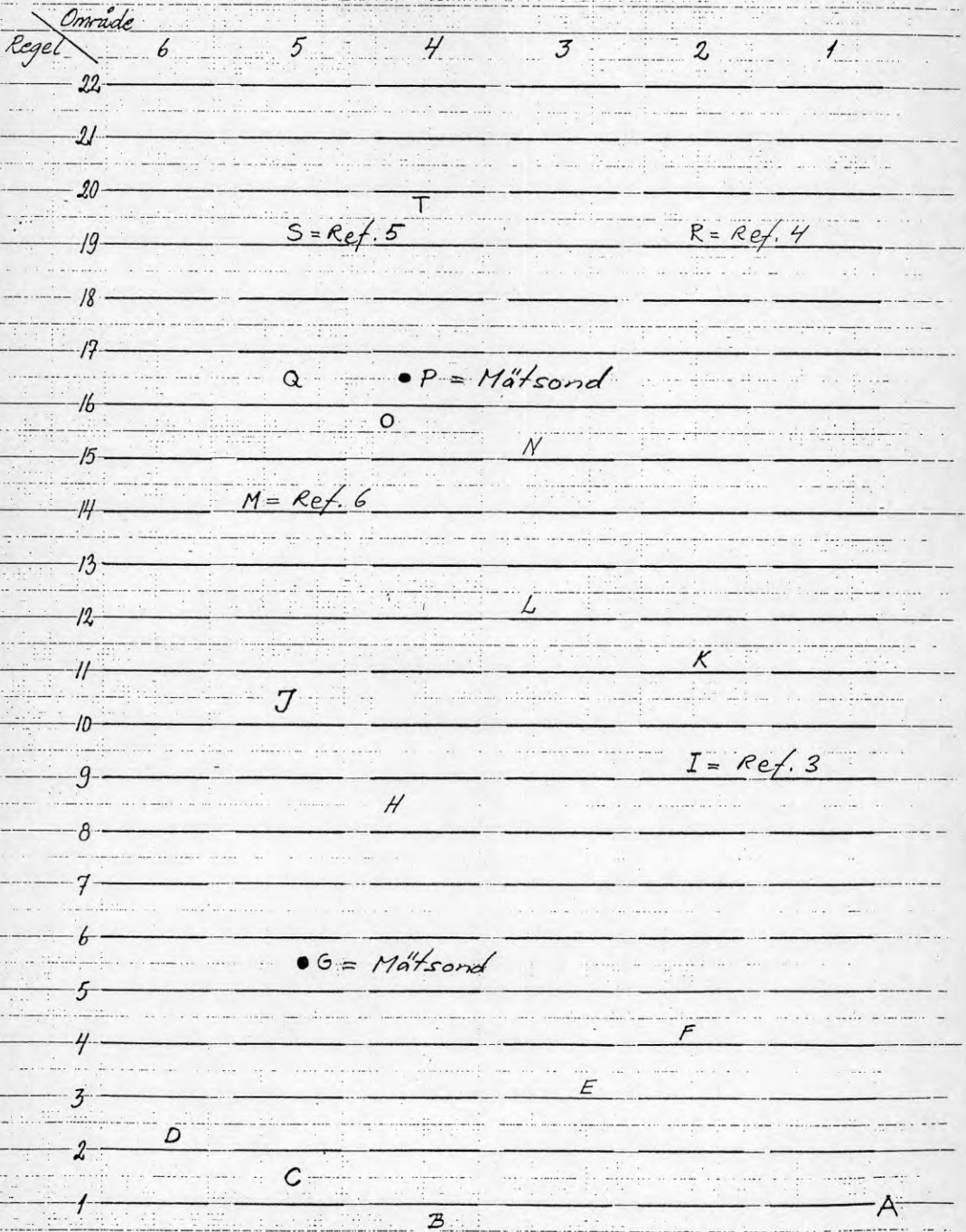


G = Ref 2

F = mätsond =
Ref 1

Plankallevör I

Bilaga 6:3



Plankollektor II

Bilaga 6:4

Regel \ Område	6	5	4	3	2	1
22						
21						
20					I = Ref. 8	
19		H = Ref. 9				
18						
17						
16						
15						G
14					F	E = Ref. 7
13						
12					D	
11						
10						
9		C = Ref. 10				
8						
7						
6						
5						
4						
3				B Ref. 11		
2						
1						A

VÄDERLEK OCH ISFÖRHÅLLANDEN FÖR VÄTTERNOMRÅDET UNDER MÄTVINTRARNA I MOTALAVIKEN ÅREN 1985–1988.

Januari 1985.

Månaden var mycket kall. Månadsmedeltemperaturen för området kring Vättern låg vid -8 C vilket är ca 5 C kallare än normalt. Nederbörden var nära det normala för området kring Vättern. Antalet soltimmar var också nära det normala (Norrköping). Isläggning av Motalaviken skedde den 8 januari medan yttre Vättern islades mellan den 5 och 9 februari. Istjockleken på Motalaviken var då 50–70 centimeter.

Februari 1985.

Månaden var mycket kall med rekordkyla över större delen av landet. Månadsmedeltemperaturen för området kring Vättern låg vid -10 C vilket är ca 7 C kallare än det normala. En följd av det kalla vädret var att månaden blev mycket nederbördsfattig. Detta medförde att antalet soltimmar blev cirka 30% större än normalt.

Mars 1985.

Mars månad var disig och dimmig. Temperaturen blev mycket nära det normala i hela landet. I Götaland låg dessutom temperaturen nära den normala medeltemperaturen varje dag i månaden vilket är ovanligt. För vätternområdet innebar detta en temperatur kring -1 C. Nederbörden var större än normalt i hela landet och var för vätternområdet det dubbla mot normalt. Antalet soltimmar var litet. I Norrköping ca 30% av det normala.

April 1985

Våren 1985 kom på avvägar, så att månadens medeltemperatur blev 2–3 C lägre än normalt. Karlsborg hade t ex 1.6 C mot normalt 3.7 C. Nederbörden var mycket riklig och var för vätternområdet ca 3 gånger så stor som det normala. Antalet soltimmar var litet, i Norrköping ca 65% av det normala. Islossningen i yttre Vättern skedde den 24 april medan isen låg kvar till första veckan i maj i Motalaviken.

December 1985.

Decembervädret var i södra Sverige växlingsrikt med stora temperaturvariationer. Månadsmedeltemperaturen för området kring Vättern låg kring –2 C vilket är ca 2 C under det normala. Nederbörden var 2–3 gånger större än normalt för månaden. Antalet soltimmar blev därigenom litet och var mindre än halva det normala för månaden.

Januari 1986.

Januari blev en kall månad. För vätternområdet var månadsmedeltemperaturen ca –5 C vilket är ca 2 C under det normala. Nederbörden var under månaden något över det normala medan antalet soltimmar var ca 30% mindre än normalt. Isläggning av Motalaviken skedde kring den 20 januari.

Februari 1986.

Februari blev en mycket kall månad med en månadsmedeltemperaturen av –8 C vilket är ca 5 C kallare än normalt. Nederbörden var endast 25–50% av det normala. Antalet soltimmar var stort i hela landet. I Norrköping var antalet soltimmar 102 mot normalt 66. (Medelvärde för perioden 1961–1975.) Isläggning av yttre Vättern skedde mellan den 7 och 9 februari.

Mars 1986.

Mars månad var som helhet mildare än normalt. Månadsmedeltemperaturen var för vätternområdet 0 C vilket är ca 1–2 C varmare än normalt. Nederbörden var nära det normala. Antalet soltimmar var dock ca 20% lägre än normalt. (Norrköping) Islossningen av yttre Vättern började den 23 mars och var avslutad den 1:a april.

April 1986.

Månaden var våt och kall. Medeltemperaturen var ca 1.5 C för vätternområdet vilket är ca 2 C kallare än normalt. Nederbörden var 50–100% större än normalt. Molnigheten var större än normalt och i slutet av månaden förekom mycket dimmor i södra Sverige. Antalet soltimmar var ca 30% lägre än normalt. (Norrköping) Islossningen på Motalaviken skedde kring den 25 april.

December 1986.

December månads väder i södra och mellersta Sverige präglades av livlig lågtrycksaktivitet. Den milda inledningen av månaden medförde att månadsmedeltemperaturen blev nära den normala. För vätternområdet blev den -1 C vilket är ca 0.5 C kallare än normalt. Vid slutet av månaden blev vädret kallt och hela landet snötäcktes. Nederbörden under månaden var för vätternområdet något större än normalt. Antalet soltimmar var ca 35% lägre än normalt (Norrköping). Isläggningen av Motalaviken skedde redan den 22:a

Januari 1987

Denna januarimånad kommer att bli ihågkommen som en av århundradets kallaste i stora delar av Sverige. Kölden var som allra strängast i början av månaden med dygnsvärden under -20 C flera dagar i sträck i södra Sverige. Även i slutet av månaden var kylan sträng med 20–30 minusgrader i hela landet. Månadens medeltemperatur för vätternområdet blev ca -11 C vilket är ca 8 C kallare än normalt. Det kalla och soliga vädret gjorde att nederbörden blev halva den normala medan solskenstiden blev ca 60% över det normala. Isläggningen av Vättern blev rekordtidig så att hela sjön var tillfrusen redan den 18 januari.

Februari 1987

Februari månads väder blev ur temperatursynpunkt nästan normal. Månadens medeltemperatur för vätternområdet blev ca -3 C vilket är normalt för månaden. Nederbörden var ca 75% av den normala. Antalet soltimmar var mycket stort, för Norrköping 116 timmar, vilket är ca 85% över medelvärdet för perioden 1961–1975.

Mars 1987.

Marsvädret karaktäriseras av två olika vädertyper. Fram till månadens mitt bestämdes vädret av ett högtryck över Skandinavien, vilket gav klart och kallt väder. Detta avlöstes av lågtryck med nederbörd och mildare väder. Månadens medeltemperatur för vätternområdet blev ca -5 C vilket är 4 C kallare än normalt. Nederbörden för vätternområdet var nära normal, medan antalet soltimmar var ca 15% större än normalt.

April 1987.

April månad var torr med en varm avslutning. Månadsmedeltemperaturen för vätternområdet blev ca 4.5 C vilket är ca 1 C varmare än normalt. Nederbörden var liten ca 25% av det normala. Antalet soltimmar var ca 15% större än normalt. (Norrköping) Islossningen i Vättern startade den 23 och var avslutad den 29 då isarna i vikarna gick upp.

December 1987.

Månaden hade omväxlande varma och kalla perioder så att månadens medeltemperatur blev nära det normala i södra Sverige. För vätternområdet var medeltemperaturen ca 0.5 C kallare än normalt. Nederbörden var normal för vätternområdet. Det kalla vädret i början av månaden medförde att många mindre sjöar i södra Sverige islades. Många av dessa gick dock åter upp i slutet av månaden då vädret åter blev mildt.

Januari 1988.

Januari blev mild i större delen av landet. I vätternområdet var medeltemperaturen mellan 3 och 4 C varmare än normalt. Karlsborg hade t ex 1.2 C mot normalt -2.6 C. Hela landet fick mycket nederbörd. I vätternområdet föll ca dubbla normalnederbörden. Sjöarna i södra Sverige var öppna under hela månaden. Månaden blev mycket solfattig och rekord slogs på många platser i landet. Norrköping hade t ex 11 timmar vilket är 25% av det normala.

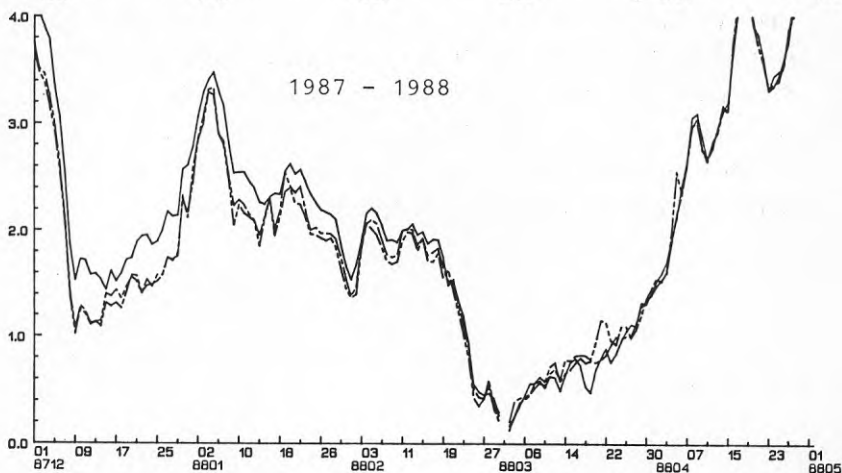
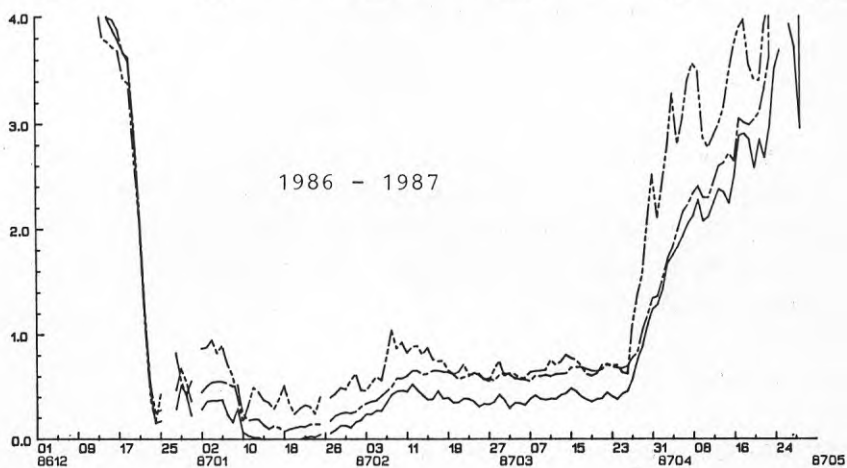
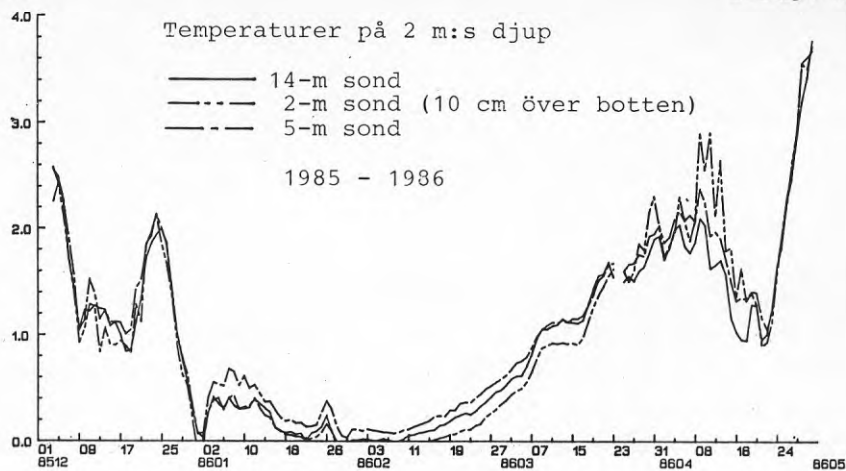
Februari 1988.

Månadens medeltemperatur blev 2-3 C högre än normalt i Götaland. För vätternområdet innebär detta en medeltemperatur nära 0 C. Nederbörden föll riklig och var för Vätternområdet ca dubbla det normala. Antalet soltimmar var få. Karlsborg hade t ex ingen dag som var klar och antalet dagar som var mulna var 25 stycken.

Mars 1988.

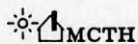
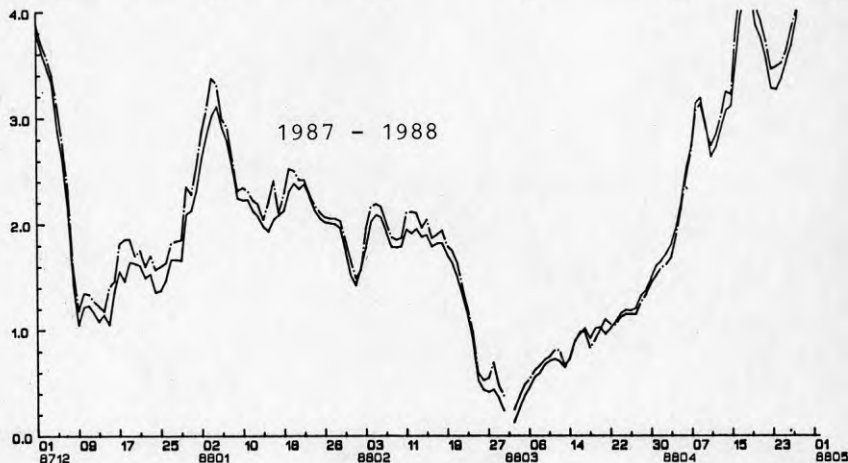
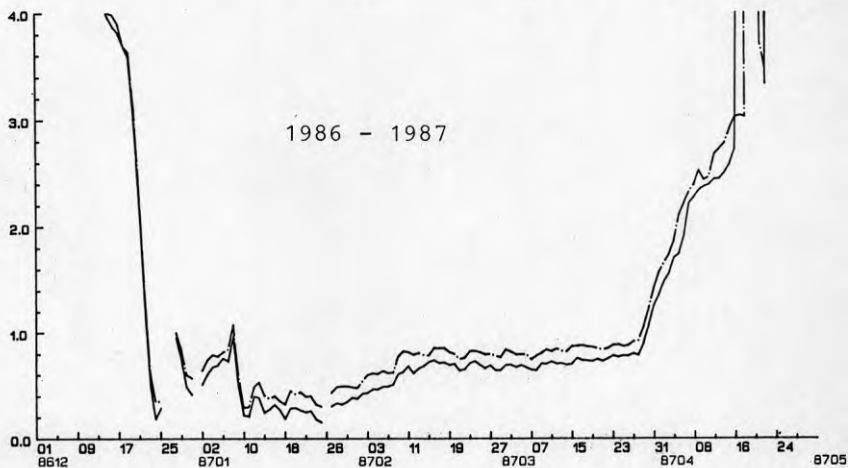
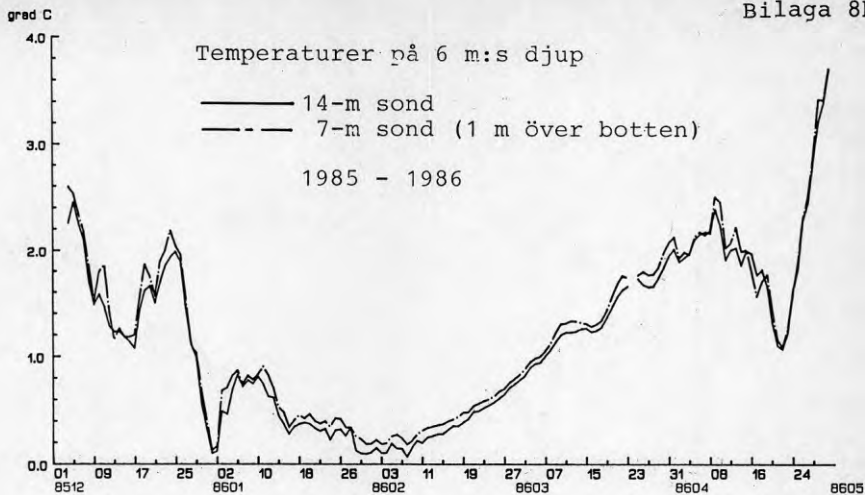
Månadens medeltemperatur var kallare än normalt i nästan hela landet. I vätternområdet var temperaturen ca 1 C kallare än normalt vilket innebär en temperatur kring -2 C. Nederbörden var för vätternområdet nära det normala. Solskenstiden var även denna månad mindre än normalt och var t ex för Norrköping ca 75% av medelsoltiden för mars. Kylan under mars månad medförde att många sjöar i södra Sverige blev islagda. Kylan var dock inte tillräcklig för att islagga Vättern som detta år förblev öppen.

grad C



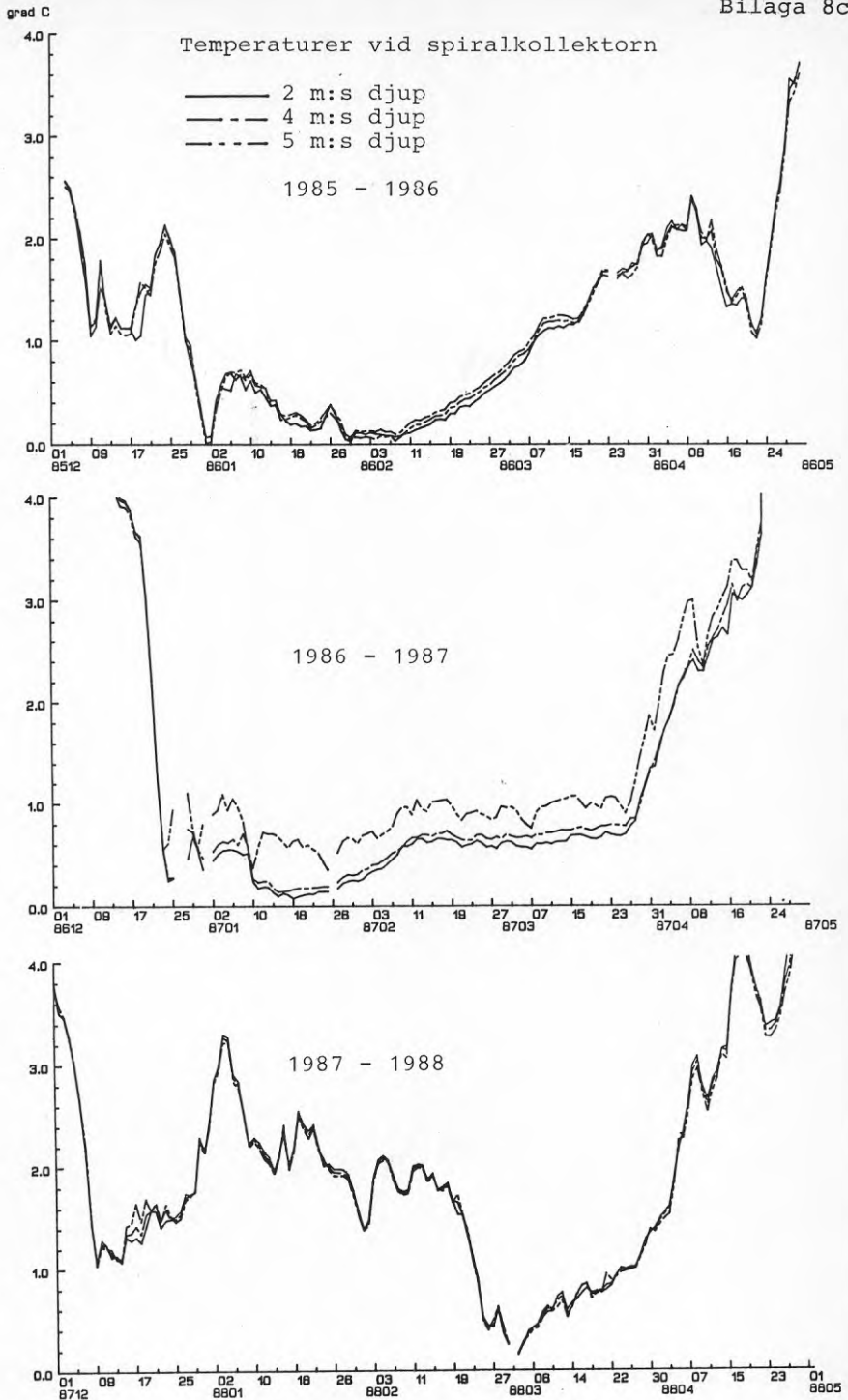
Motala

Jämförelse mellan givare på nästan samma djup men på olika platser, vintrarna 1985/86 till 1987/88.

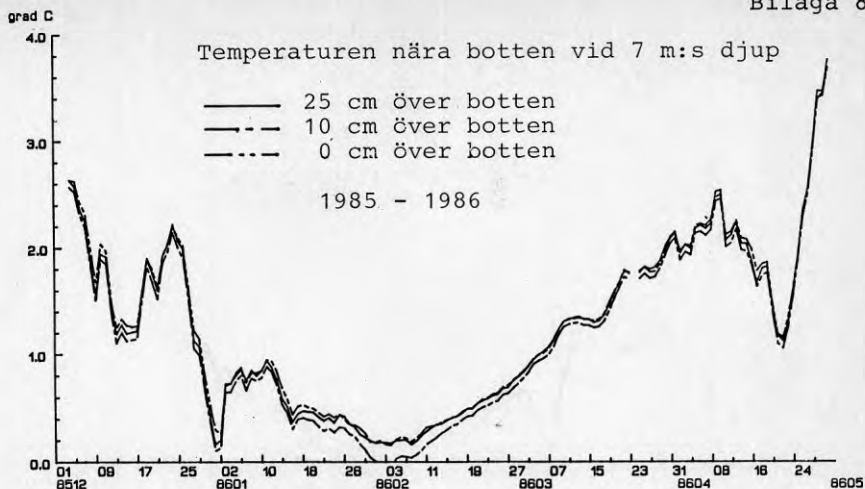


Motala

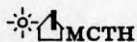
Jämförelse mellan olika givare på samma djup men på olika platser, vintrarna 1985/86 till 1987/88.



Jämförelse av temperaturvariationerna hos tre givare i spiralkollektorsonden under vintrarna 1985/86 till 1987/88.



Motala



Jämförelse mellan temperaturerna hos givarna närmast botten för 7 m sonden, vintrarna 1985/86 till 1987/88.

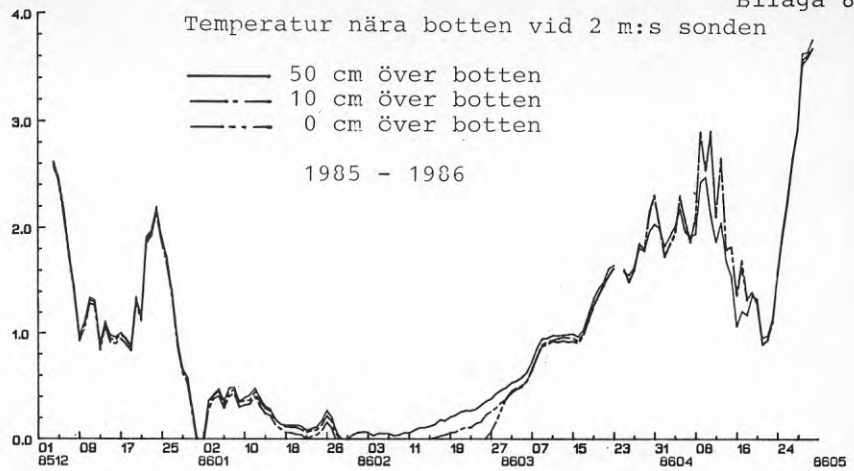
grad C

Bilaga 8e

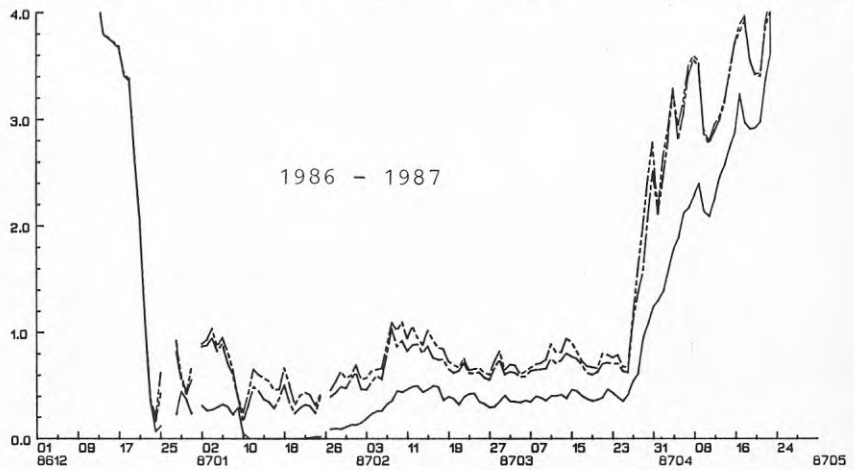
Temperatur nära botten vid 2 m:s sonden

- 50 cm över botten
- - - 10 cm över botten
- · - · 0 cm över botten

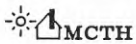
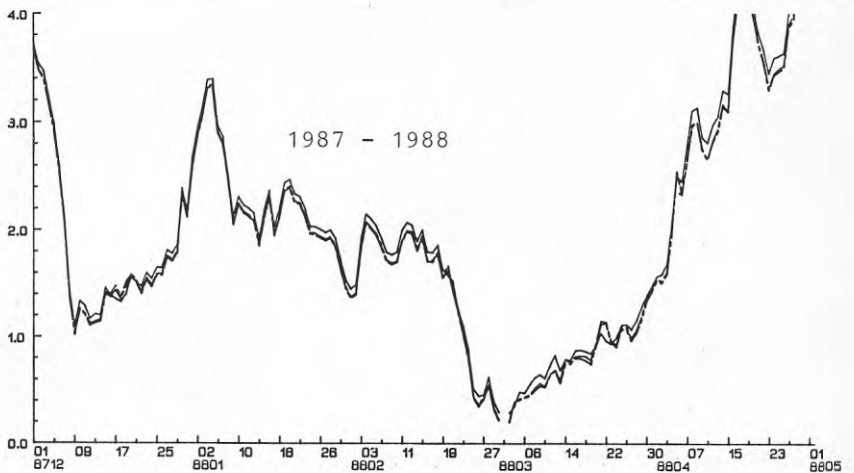
1985 - 1986



1986 - 1987



1987 - 1988



Motala

Jämförelse av temperaturerna hos givarna närmast botten vid grunda sonden under vintrarna 1985/86 till 1987/88.

Kontroll av referenspunkter på
sjökollektor i Motala V
1985 08 25

Kontrollen syftade till att mäta singellastens höjd och utbredning i anslutning till tidigare utsatta referenspunkter. Referenspunkterna finns markerade på bilaga 2-4 på besiktningens utlåtande (Besiktning 1/3 och 11-13/3 1985). * I samband med kontrollmätningen fotograferades referensområdena.

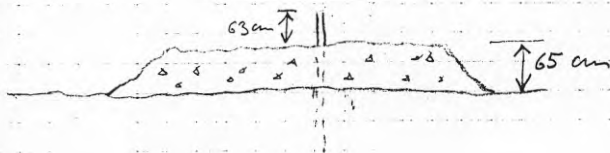
Referenspunkterna är markerade av vertikalt neddrivna plaströr vilka sticker upp några dm över botten. Uppmätningen utfördes med hjälp av en måttvinkel bestående av två röd-vita stakkäppar sammanfogade i 90° vinkel. Det ena vinkelbenet stacks ned i referensröret och det andra horisonterades med vattenpass över en representativ del av singelhögen. Genom att mäta höjden från plan botten resp. singelhögen till den horisontella stakkäppen kan således högens höjd bestämmas. Likaså mättes avståndet från referensröret till singelhögen (eller strängen), och dess bredd uppskattades. Uppmätningen kan ligga till grund för framtida jämförelser.

* Referenspunkterna 4, 5 och 9, i den djupaste delen av plankollektorn besöktes ej av tidsskäl. Referenspunkt 7 i plankollektor II återfanns ej. En ny referenspunkt, nr 11, utsattes invid regel 2 i den grundaste delen av plankollektor II.

Resultaten sammanfattas i det följande:

Spiralkollektor

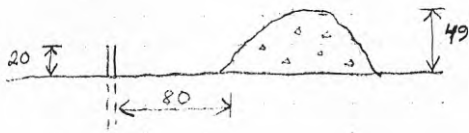
- Ref.1 Referenspunkten utgöres av vår mätkedja och är belägen mitt emellan singelsträngarna vid regel 22. Ett tunnt sedimentlager fanns på botten. Mätkabeln går ut ur sin anslutning 10 cm över botten. Singelbeläggningsen kunde ej inmätas från denna punkt.
- Ref.2 Referensröret nedslaget mitt i den breda, längsgående singelsträngen. Röret sticker upp 63 cm över singelytan. Singelsträngens tjocklek är 65 cm. Bredden uppmättes ej.



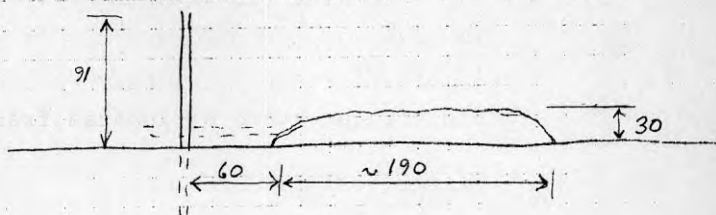
I anslutning till kollektorn noterades en stor mängd abborre av olika storlek.

Plankollektor I

- Ref.3 i den grundare delen av kollektorn. Referensrörets höjd är 20 cm och röret står 80 cm från singelhögen, vilken är 49 cm hög



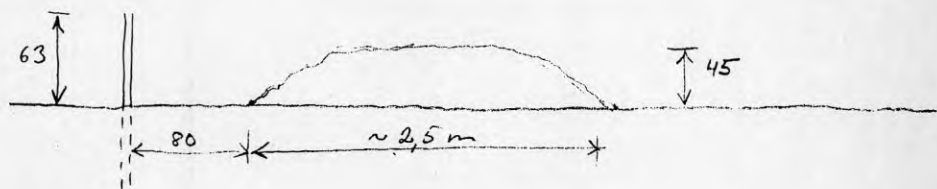
- Ref.6 Här ligger kollektorslangarna ca 10 cm över dyskiktet på botten. Referensrörets höjd är 91 cm och dess avstånd 60 cm från singelhögen. Singelhögen är 30 cm hög och ca 190 cm bred



Plankollektor II

- Ref.10 Belastningen ligger här som en låg, flack singelhög. Referensrörets höjd är 56 cm och dess avstånd till singelhögen 150 cm. Detta avstånd är för stort för att tillförlitlig höjdbestämmning av högen skall kunna göras.

- Ref. Ny referenspunkt utsattes vid regel nr 3, ungefär vid mitten av kollektorns bredd, och på sjösidan av regeln. Singelbelastningen ligger inom detta område i avgränsade högar över reglarna. Referenspunkten placerades mitt för en sådan hög av representativa dimensioner. Rörets höjd är 63 cm och det står 80 cm från singelhögen vilken är 40 cm hög och ca 2,5 m bred.



- Ref.7 sökt men ej återfunnen.

Ref.8 i den djupaste delen av kollektorn vid regel 21.
Botten är här mycket lös med minst 0,5 m löst
dyskikt. Slangarna ligger direkt på dyskiktet.
Singellasten ligger i avgränsade högar med en
maximihöjd över regeln av ca 1 dm.Referensröret är
satt 1 dm från regeln inom ett område utan singel.
Närmaste singelhög börjar 2 m (6 slangar åt öster)
från referensröret.

PM 86 06 16

Torbjörn Svensson

Kontroll av referenspunkter på sjövärmekollektor i Motala V
1986-06-11

Kontrollen syftade till att mäta singellastens höjd och utbredning i anslutning till tidigare utsatta referenspunkter. En tidigare inmätning gjordes 1985-08-25. Inspektionen bör därför ge upplysningar om några förändringar inträffat under den gångna säsongen.

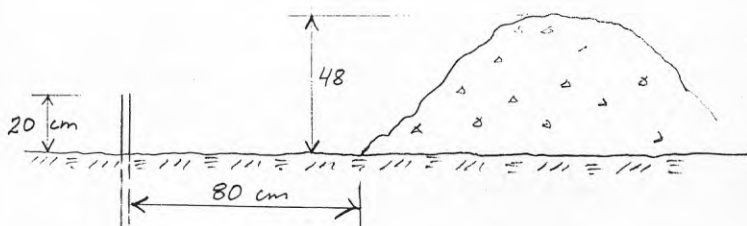
Inmätningen gjordes manuellt med hjälp av dykare på samma sätt som tidigare. Vid utvärderingen av den tidigare inmätningen användes emellertid en felaktig måttangivelse, vilket innebär att angivna höjder hos singelhögarna skall ökas med 5 cm utom för Ref. 2, där höjden skall minskas med 5 cm. En korrigerad beskrivning bifogas som bilaga.

Spiralkollektor

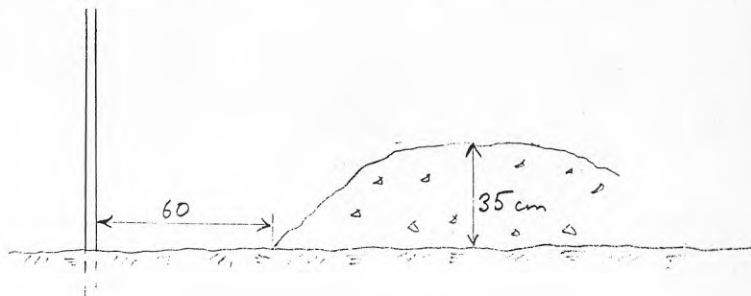
- Ref. 1 Belägen vid temperaturmätkedja.
Inspektion visade inga tecken på förändringar eller skador.
- Ref. 2 Besöktes ej (av tidsskäl).

Plankollektor 1

- Ref. 3 Ligger i den grunda delen av kollektorn. Avstånd till singelhögen är oförändrat 80 cm. Högens höjd är i stort oförändrad, 48 cm jämfört med 49.



- Ref. 6 Här finns dels en singelhög med höjden 10 cm på 120 cm avstånd från referensröret, och dels den singelsträng som inmättes förra gången. Strängen ligger på 60 cm avstånd och uppmättes till 35 cm höjd. Situationen är därmed oförändrad jämfört med tidigare.



- Ref. 4 Ej återfunnen. Besöktes ej 1985.

- Ref. 5 I den djupa delen av kollektorn. Denna referenspunkt besöktes ej 1985. Singelbelastningen ligger i en mycket låg, utbredd sträng som börjar 160 cm från röret. Strängen är ca 2 m bred. Pga avståndet kunde inte någon noggrann höjdbestämmning göras. En avsevärd del av den pålagda singellasten befinner sig nedsjunken i dyn under regeln. Slangarna ligger här på 5-15 cm höjd över dybotten.



Plankollektor II

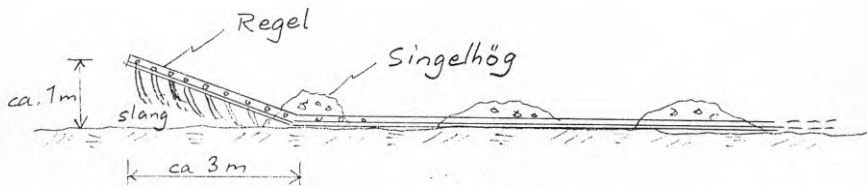
- Ref. 11 I den grunda delen av kollektorn. Singelhögen börjar nu på 30 cm avstånd och uppmättes till 38 cm höjd. Detta innebär en viss utflackning och höjdminskning jämfört med tidigare (45 cm höjd).



- Ref. 10 Vattendjup 2,5 m. Avståndet till singelhögen oförändrat 150 cm. Singelhögens höjd är mätt till 34 cm, men detta mått är osäkert pga det stora avståndet.
- Ref. 9 I den djupa delen av kollektorn. Denna punkt besöktes ej 1985. Rörets höjd är 35 cm och det sitter på 205 cm avstånd från regeln. Singellasten ligger här vid sidan om regeln. Det finns en säck med singel invid referenspunkten. Genomgående gäller att singellasten ligger i mycket flacka högar inom detta område.
- Ref. 8 Ingen singel på regeln närmast referensröret. Rörets höjd över botten 54 cm och avstånd till regeln 20 cm.

Övriga iakttagelser och slutsatser

Inom den grunda delen av plankollektor 1 (västra kollektorn) saknas singelbelastning på reglarna vid ytterkanten mot öster, se fig. 1. Detta har lett till att islyftkraften knäckt de fyra-fem första reglarna ca 3 m in från änden. Dessa skadade regler står upp ca 1 m över botten vid änden enligt skissen.



Dykarens intryck var att singelbelastningen på grunt vatten var bättre utförd inom plankollektor II än inom I.

De säckar och hopknutna "korvar" med singel som lagts ut var till stor del öppna eller skadade så att höljet inte fullgjorde avsedd funktion.

Vid änden på fördelningsrören till plankollektor 1 har en flera meter stor grop utbildats i botten pga våg- eller strömerosion.

Inom grunda områden finns, åtminstone vid ett par referenspunkter tecken på smärre rörelser hos singellasten så att denna blivit flackare och mera utbredd.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 850226-4
från Statens råd för byggnadsforskning till Energiteknisk
Mätcentral vid Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg**

R58: 1989

ISBN 91-540-5019-7

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6709058

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst
171 88 Solna**

Cirka pris: 56 kr exkl moms