



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.



Prov med värmepump och sjöförlagd värmeväxlare vid Kungliga slottet

Hans Jelbring

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	81-0661
Plac	<i>ser</i>

K
allt

R43:1981

PROV MED VÄRMEPUMP OCH SJÖFÖRLAGD
VÄRMEVÄXLARE VID KUNGLIGA SLOTTET

Hans Jelbring

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
790438-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till Ståthållarämbetet, Stockholms slott.

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

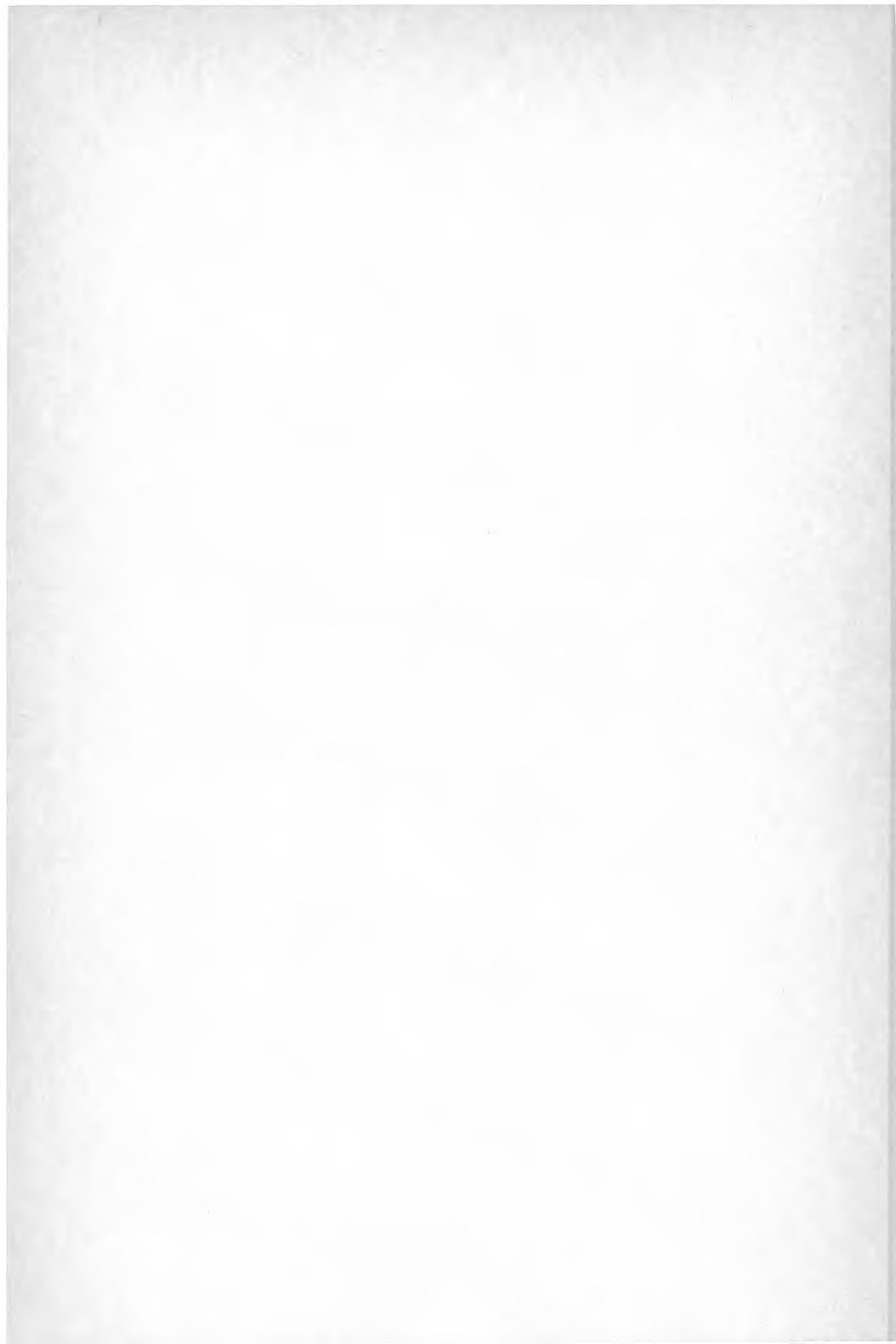
R43:1981

ISBN 91-540-3498-1
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1981 152306

INNEHÅLL

0	SAMMANFATTNING	5
1	BAKGRUND	7
2	MÅLSÄTTNING	9
3	PROBLEMIDENTIFIERING	11
3.1	Allmänt	11
3.2	Tillgänglighet	11
3.2.1	Flödet	11
3.2.2	Temperaturen	11
3.2.3	Värmeväxlingsteknik	12
3.3	Mekanisk funktion	12
3.3.1	Inre tryckhållfasthet	12
3.3.2	Korrosion	13
3.3.3	Yttre tryckhållfasthet	13
3.3.4	Mekanisk påverkan	13
3.3.5	Isbildning	13
3.4	Värmeväxlarfunktion	14
3.4.1	Fysikaliska storheter	14
3.4.2	Teoretisk behandling	15
3.4.3	Värmeegenomgångskoefficientens material- beroende	15
3.4.4	Inverkan av isbildning	16
3.4.5	Inverkan av smutsskikt	17
3.4.6	Inverkan av rillning	17
4	GENOMFÖRANDE	19
4.1	Tillgängliga resurser	19
4.2	Provanläggningen	19
4.3	Utförda aktiviteter	20
5	RESULTAT	23
5.1	Mekanisk konstruktion	23
5.2	Värmeväxlarprestanda	24
5.3	Ispåfrysningens risk	24
6	UTVÄRDERING	27
6.1	Värmeväxlare baserad på rillade PEH-rör	27
6.2	Föredraget utförande på en värmeväxlare placerad i Stallkanalen	27
6.3	Temperaturen i Stallkanalen	28
	Bilagor 1-10.	31



0. SAMMANFATTNING

Ståthållarämbetet har givit Sedico Energi AB och Kungliga Slottets maskincentral i uppdrag att undersöka huruvida det är möjligt att hämta energi ur Stallkanalen med hjälp av värmepumpar. Projektet är utfört med stöd från Statens Råd för Byggnadsforskning.

En serie utprovningar av olika värmeväxlartyper har skett i liten skala vid Kungliga Slottet under perioden mars 1979 till maj 1980. De genom kontakter, utprovning och utvärdering erhållna resultaten sammanfattas nedan:

- o Det finns betydligt mer än 1 MW termisk energi tillgänglig i Stallkanalen vid ett minimalt flöde av $4,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ då dess dammluckor är stängda.
- o Det går tekniskt att värmeväxla mot Stallkanalens vatten under hela vintersäsongen.
- o En lämplig värmeväxlare baserad på rillade mäsings- eller aluminiumrör kan göras mekaniskt hållfast och kompakt i utförandet.
- o Den ovan nämnda värmeväxlaren baseras på rillade rör med en diameter av 50 mm. Effektöverföringen per meter blir cirka 600 Watt. Dess volym vid en effektöverföring av 1 MW blir cirka 15 m^3 .
- o För att klara märkeffekten vid mycket låga vattentemperaturer föreslås någon av följande åtgärder eller kombinationer av flera.
 - Öppna dammluckorna,
 - Förse värmeväxlaren i Stallkanalen med en strömbildare,
 - Utforma Stallkanalens botten för att öka vattnets hastighet förbi värmeväxlarelementen,
 - Bygg en värmeväxlare med större yta,
 - Använd existerande oljepannor.
- o Rillningen ökar kapaciteten för en värmeväxlare med en viss rörlängd med en faktor 2,0-2,5 vid ekvivalenta strömningsförhållanden jämfört med en värmeväxlare baserad på släta rör. Ovanstående gäller för de i Stallkanalen aktuella strömningsförhållandena.



1. BAKGRUND

Ståthållarämbetet överväger för närvarande hur slottets uppvärmning skall ske i framtiden. Maskinchefen vid slottet, Kent Thilander, har fått i uppdrag att granska olika realistiska alternativ. De aktuella alternativen utgörs främst av fortsatt oljeförbränning i existerande pannor, anslutning av fjärrvärme eller införande av en värmepumpanläggning, vilken hämtar energi från Stallkanalens vatten.

Olika kombinationer av ovanstående uppvärmningssystem är även aktuella att utvärdera. Vid användning av en värmepumpanläggning kan kompressorn antingen drivas av en elmotor eller en dieselmotor. Det senare utförandet möjliggör en konstruktion där slottets uppvärmning inte blir beroende av avbrott på elnätet.

En preliminär ekonomisk analys gjordes för mer än ett år sedan, vilket ledde till ett fördjupat intresse för värmepumpalternativet från Ståthållareämbetets sida.

Sedico Energi AB har tidigare utfört uppdrag för Nämnden för energiproduktionsforskning och Statens råd för byggnadsforskning angående ett decentraliserat energiproduktionssystem benämnt Eniaq (Energy in aqua). Riktlinjen för uppdragen har varit att påvisa den tekniska möjligheten och ekonomiska lämpligheten att utvinna energi ur våra sjöar och vattendrag i Sverige. Basprincipen är att använda värmepumpsteknik i kombination med värmeväxling mot naturvatten eller värmepumpsteknik i kombination med kontinuerlig isproduktion. Eniaqsystemet finns dokumenterat i rapporterna NE 2060 320, BFR 780553-3 och BFR 780553-3 II.

Genom dessa grundläggande uppdrag har Sedico Energi AB kommit till klarhet i den reella möjligheten till en nästan generell användning av värmepumpstekniken för större anläggningar om några smärre utvecklingsprojekt genomföres.

Således kan projektet på slottet ses som en utvecklings-
etapp avsedd att nå fram till en värmeväxlare av sådan kvalitet att dess funktion i en uppvärmningsanläggning inte kan ifrågasättas. Lyckas detta kan införandet av en uppvärmningsanläggning på slottet, vilken är baserad på värmepumpsteknik, helt byggas med i dag beprövad teknik.

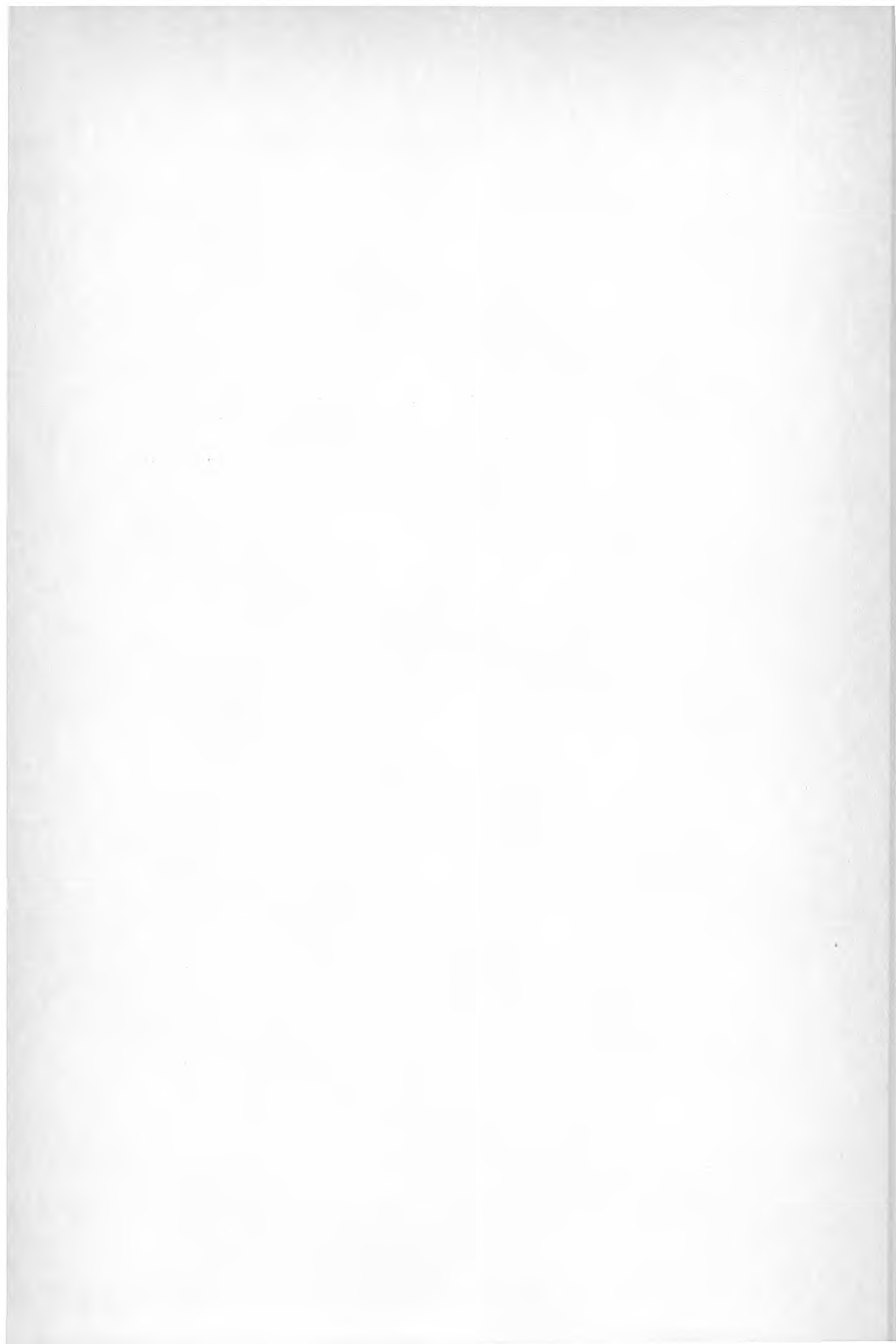
Det senaste årets prisutveckling på olja har ytterligare accenturerat Slottsförvaltningens intresse för ett alternativt uppvärmningssystem och det är Sedicos förhoppning att de på slottet utförda försöken samt denna rapport kan utgöra en hjälp till Slottsförvaltningen i dess beslut angående slottets framtida uppvärmningssystem.

2. MÅLSÄTTNING

Målsättningen har varit att konstruera en lämplig typ av värmepump och att utprova denna värmepump i dess rätta miljö - det vill säga i Stallkanalen bredvid slottet.

Avsikten med detta har varit att ge Ståthållarämbetet ett realistiskt tekniskt underlag för att bedöma möjligheten att värma upp kungliga slottet med en värmepump. Målsättningen har inte begränsats till att finna en lämplig värmepumpstyp, utan en generell granskning av förutsättningarna för användning av värmepump mot Stallkanalens vatten har utförts.

Projektet har därmed inkluderat undersökningar beträffande vattenflöde och vattentemperatur i Stallkanalen liksom andra typer av hinder för förläggning av en värmepump i kanalen. Tyngdpunkten i projektarbetet har dock legat på den rent tekniska sidan beträffande värmepump från kanalen.



3. PROBLEMINDENTIFIERING

3.1 Allmänt

För att ge en komplett bild av de krav som en värmepump förlagd i Stallkanalen måste möta kan man lämpligen härleda dessa från krav på tillgänglighet, krav på mekanisk funktion och krav på värmepumpfunktion.

3.2 Tillgänglighet

En av huvudidéerna med en Eniaqanläggning, det vill säga en värmepump anläggning som hämtar energi från i naturen förekommande vatten, är att energin finns tillgänglig när behovet existerar oberoende av utomhustemperaturen. Detta är ett systemkrav för en Eniaqanläggning. Dess ekonomi bygger på att inget behov av energilagring i varmvatten förekommer, liksom att en eventuell spetsning med andra energikällor sker av ekonomiska orsaker och inte på grund av bristande tillgänglighet på en naturlig energikälla.

Vid slottet är inte en systemlösning baserad på kontinuerlig isproduktion aktuell utan tillgängligheten till energi från Stallkanalens vatten baseras på tillgängligt vattenflöde, tillgänglig temperatur och tillgänglig värmepumpsteknik vid låga temperaturer på vattnet.

3.2.1 Flödet

Stallkanalens flöde är reglerat med en damm. När dammen är stängd, erhålls ett läckflöde under dammluckorna på cirka $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ och när dammen är öppen kan flödet nå ända upp till $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, vilket innebär att medelvärdet på flöde hastigheten i kanalen blir $0,25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ då dammluckorna är stängda.

3.2.2 Temperaturen

Stallkanalens temperaturvariationer var inte kända med tillräcklig noggrannhet före detta projekt. Nu kan vi påstå att temperaturen undantagsvis (några dygn) kan underskrida $0,5^\circ\text{C}$. Detta baseras på observationer under vintern 79/80, vilken var extremt ogynnsam ur vattentemperatursynpunkt.

Antag att värmeväxlaren skall fungera vid $0,5^{\circ}\text{C}$ och effektbehovet för slottet är 1 MW. Om hela vattenmängden i kanalen passerar värmeväxlaren blir temperatursänkningen $0,053^{\circ}\text{C}$. Om en tiondel av kanalens vatten passerar värmeväxlaren blir temperatursänkningen $0,53^{\circ}\text{C}$. Ett rimligt krav för att klara tillgängligheten är således att kräva att minst 2/10 eller 900 liter vatten skall passera värmeväxlaren per sekund oberoende av läget på kanalens dammluckor.

3.2.3 Värmeväxlingsteknik

Ovanstående resonemang bygger på värmeväxling mot en vattentemperatur av endast $+0,5^{\circ}\text{C}$. Vid denna temperatur kommer isbildning att ske på värmeväxlarytorna. Isbildningen är bland annat beroende av hastigheten på vattenflödet. Det står dock klart att en värmeväxlare som skall klara en förläggning i Stallkanalen måste konstrueras så att den tål ispåfrysning på de värmeväxlare ytorna. En av utprovningens viktigaste uppgifter är att ge besked om värmeväxlarens prestanda vid ispåfrysning.

3.3 Mekanisk funktion

Värmeväxlaren måste tåla de mekaniska påfrestningar som den kan utsättas för i en driftsituation. Dessa består i mekanisk påverkan orsakad av vätska inuti och utanpå värmeväxlarelementen, liksom av mekanisk påverkan på värmeväxlaren orsakad av isbildning, människor eller flytande föremål.

3.3.1 Inre tryckhållfasthet

Genom värmeväxlaren cirkulerar en värmebärare, vilken pumpas av en cirkulationspump. Cirkulationspumpens placering påverkar det statiska trycket i värmeväxlaren. Om cirkulationspumpen placeras på en lämplig plats torde det vara helt tillräckligt att konstruera värmeväxlaren för ett övertryck av 4 bar. En låg tryckklass på värmeväxlaren tillåter billigare konstruktion och möjlighet att använda billiga plastkomponenter.

3.3.2 Korrosion

Korrosion kan undvikas om värmväxlaren tillverkas helt i plast. Om värmväxlaren tillverkas i metall är riskerna små för korrosion på insidan av värmväxlar-elementen ty det finns möjlighet att välja och tillsätta antikorrosionsmedel.

Vid användning av metallvärmväxlare är problemen med korrosion på utsidan betydligt större beroende på att vattenmiljön ej kan kontrolleras. Störst är problemen vid förläggning i bräckt vatten eller smutsigt sötvatten. Problemen kan lösas genom val av lämpliga (dyra) metaller eller genom ytbehandling företrädesvis plastbehandling.

3.3.3 Yttre tryckhållfasthet

Vid förläggning i Stallkanalen kommer värmväxlaren att utsättas för vattenflöden vilkas hastighet varierar mellan cirka 0,2 ms⁻¹ upp till 4 ms⁻¹. Den högre flödes hastigheten ger upphov till en väsentlig tryckkraft och kan även inducera vibrationer i värmväxlar-konstruktionen. Detta problem måste lösas på ett tillfredsställande sätt.

3.3.4 Mekanisk påverkan

Denna kan ske genom att föremål flyter med strömmen när dammluckorna är öppna eller genom att ankare eller metkrokar fastnar i värmväxlaren. Värmväxlaren måste konstrueras med mekaniska avbärare för vattenburna föremål, liksom för ankare. Metkrokar blir en fara om värmväxlarelementen utförs av plast och i så fall bör hela värmväxlaren skyddas mekaniskt.

Ett sådant skydd är lämpligt även för eventualiteten att stenar och andra tunga föremål kan kastas ned mot värmväxlaren uppifrån gatuplanet av mindre nogräknade människor.

3.3.5 Isbildning

Värmväxlaren måste tåla upprepad isbildning, utan att detta påverkar den mekaniska konstruktionen eller hållfastheten.

3.4 Värmeväxlarfunktionen

Värmeväxlaren måste kunna leverera märkeffekt (cirka 800 kW) under sämsta tänkbara driftförhållanden, vilka definieras av låg flödes hastighet på Stallkanalens vatten, låg vattentemperatur, isbildning och nedsmutsning på värmeväxlarytorna. Det är också av intresse att betrakta värmeväxlarytor av plast respektive metall. Nedan följer ett försök att teoretiskt påvisa hur dessa faktorer påverkar värmeväxlarfunktionen. För att förenkla beräkningarna antages värmeväxlarytorna vara släta rör med en diameter av 50 mm.

3.4.1 Fysikaliska storheter

Nedanstående fysikaliska storheter kommer att användas i rapporten:

K	$Wm^{-2}K^{-1}$	Värmegenomgångskoefficient
\mathcal{L}	$Wm^{-2}K^{-1}$	Värmeövergångskoefficient
λ	$Wm^{-1}K^{-1}$	Värmeledningsförmåga
ΔT	K	Temperaturdifferens
ΔT_{log}	K	Logaritmisk medeltemperaturdifferens
d	m	Diameter
δ	m	Vägg tjocklek
v	ms^{-1}	Hastighet

3.4.2 Teoretisk behandling

För att kunna bedöma hur värmeväxlarens prestanda varierar med materialval, väggtjocklek, väggens utformning, flödessituationen, isbildning och nedsmutsning krävs en del räknearbete. Som tidigare nämnts betraktar vi i den teoretiska behandlingen en värmeväxlare som består av ett långt rakt slätt rör med en diameter av 50 mm och där medierna på bägge sidor om röret består av vatten.

Värmeegenomgångskoefficienten, det så kallade K-värdet, beror på värmeövergångskoefficienterna på material och mellan vätska och material enligt formeln:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\mathcal{L}_i} + \frac{1}{\mathcal{L}_{\text{vägg}}} + \frac{1}{\mathcal{L}_y} + \frac{1}{\mathcal{L}_{\text{smuts}}} + \frac{1}{\mathcal{L}_{\text{is}}} \quad (1)$$

\mathcal{L}_i och \mathcal{L}_y är värmeövergångskoefficienterna mellan vatten inuti respektive utanför röret och rörväggen. Dessa koefficienter är bland annat flödes- och temperaturberoende. Exempel på storleken av detta beroende ges i bilaga 2 för flöden och temperaturer som varit aktuella i projektet.

$\mathcal{L}_{\text{vägg}}$, $\mathcal{L}_{\text{smuts}}$, och \mathcal{L}_{is} beräknas med hjälp av sambandet

$$\mathcal{L} = \frac{\lambda}{\delta} \quad (2)$$

för värmeväxlareväggen, smutsskiktet respektive isskiktet.

3.4.3 Värmeegenomgångskoefficientens materialberoende

En värmeväxlare som förläggs i Stallkanalen måste fungera vid en flödeshastighet omkring $0,2 - 0,5 \text{ m s}^{-1}$. Detsamma gäller värmeväxlare som förläggs i sjöar där värmeegenomgångskoefficienten förbättras genom att påtvingad strömning framkallas med strömbildare. Antag att aktuella värmeväxlarmaterial är polyetenplast (PEH-typ) respektive aluminium med en tjocklek av 1 mm.

Formeln (2) ger att värmeövergångskoefficienten för materialen blir 440 respektive 170.000 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Aluminium leder således värme ungefär 400 gånger bättre än PEH-plast.

k-värdet enligt formel (1) för de aktuella flödena framgår av bilaga 3. I dessa värden har inverkan av smuts och is försumrats. k-värdet har beräknats för vattentemperaturen 0°C emedan värmeväxlarens prestanda måste dimensioneras för vinterfallet då värmeväxlarförhållandena är som sämst. Bilaga 3 visar att skillnaden mellan att använda aluminium eller polyeten som värmeväxlar material i den aktuella tillämpningen är ringa. Värmeegenomgångskoefficientens storlek beror i första hand på flödessituationen inuti och utanför röret, inte på materialet i röret. Detta gäller under den viktiga förutsättningen att ett PEH-rör inte behöver vara tjockare än cirka 1 mm.

3.4.4 Inverkan av isbildning

Om vattentemperaturen är låg och värmebäraren har en temperatur av flera minusgrader, riskeras ispåfrysning på värmeväxlarytorna. Isens tjocklek kommer till stor del att bestämmas av flödessituationen utanför röret. En teoretisk modell för beräkning av hur isen bildas utförs inte här. Däremot är det relativt enkelt att beräkna hur mycket en viss istjocklek påverkar värmeväxlarens prestanda i en given flödessituation.

Dessa beräkningar är överslagsmässiga emedan ingen hänsyn tas till att värmeväxlarytan ökar då ispåfrysning sker, liksom att ingen hänsyn tas till inblandning av fryspunktsnedsättande medel i värmebäraren.

Under dessa antaganden kan formel (1) och värdena i bilaga 3 användas för att beräkna en ungefärlig kapacitetsnedsättning vid olika tjocklekar på isskikten.

Den förväntade kapacitetsnedsättningen anges i procent och framgår av bilaga 4.

En ispåfrysning av cirka 1 mm kan således förväntas minska värmeväxlarens kapacitet mellan 10 - 20% medan ett isskikt på 10 mm förväntas minska dess kapacitet med 50 - 75%. Hur stor den verkliga isbildningen blir måste dock mätas vid utprovning emedan existerande teorier inte är verifierade.

3.4.5 Inverkan av smutsskikt

Smutsskikt används här som ett begrepp för smuts och påväxt. Smutsavlagring och påväxt på värmeväxlarelementen borde rimligen hindras eller åtminstone minska på grund av det isskikt som kan förväntas på värmeväxlar-ytorna vintertid.

Därmed antages ett förväntat smutsskikt eller ett lager av påväxt inte kunna bli tjockare än 0,5 mm och troligen inte tjockare än 0,1 mm.

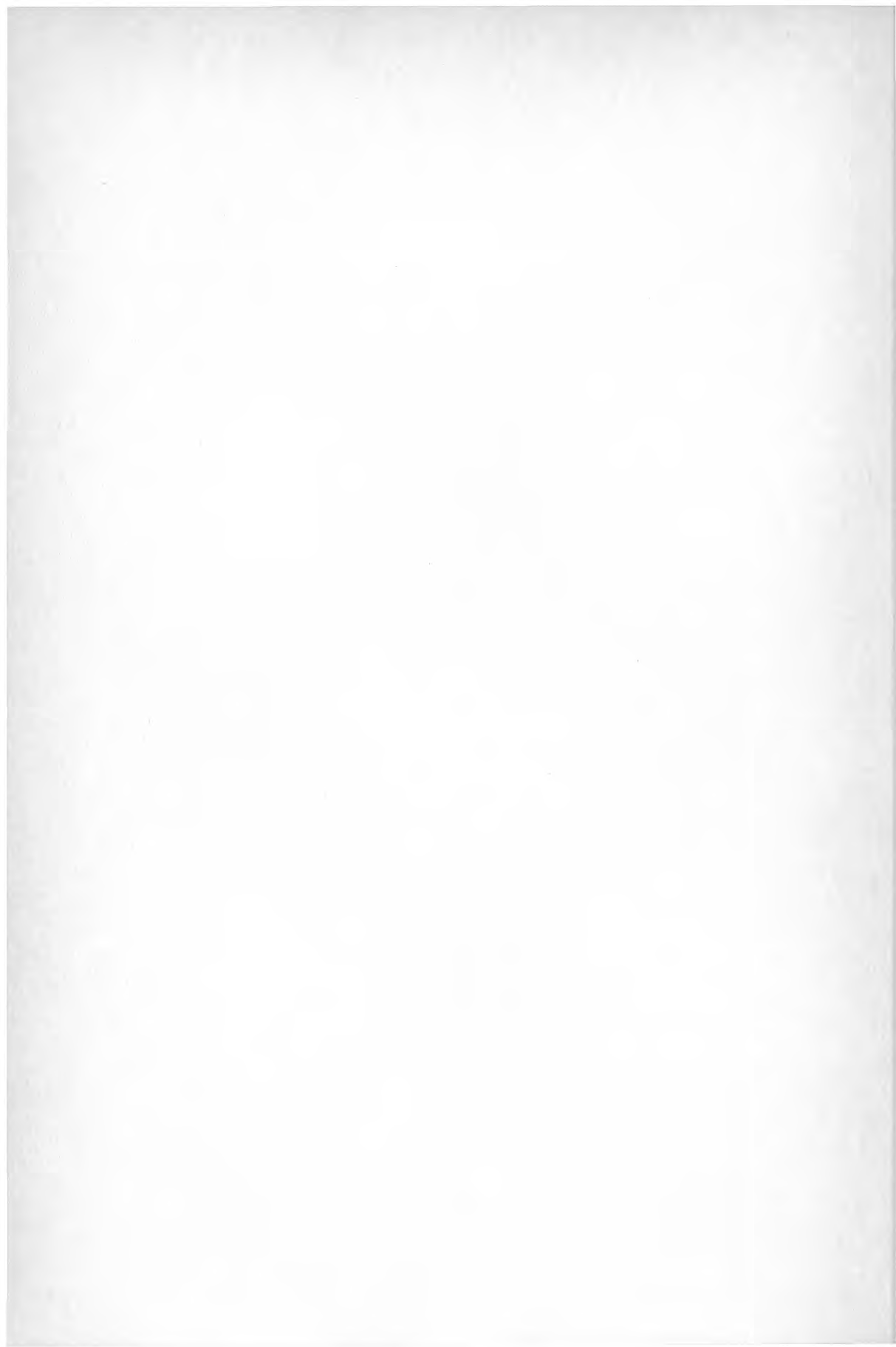
Om vi vidare antar att smutsskiktet leder värme lika dåligt som vatten på sommaren och som is på vintern kommer vi inte att underskatta dess inverkan.

I bilaga 5 redovisas hur stor maximal procentuell kapacitetssänkning som kan förväntas vid 0,1 respektive 0,5 mm:s smutsskikt under sommartid.

Det finns gott hopp om att en kapacitetsnedsättning på grund av smuts eller påväxt knappast kommer att överstiga 10%. Om verkligheten så småningom skulle peka i en annan riktning måste värmeväxlarna rengöras periodvis.

3.4.6 Inverkan av rillning

Hela det tidigare resonemanget i kapitel 3.4 är baserat på att värmeväxlaren utgörs av släta rör. Sedico har i sin rapport BFR 780553-3 utprovat rillade PEH-rör avseende dess lämplighet som värmeväxlarelement. Det är mycket som tyder på att rillningen väsentligt bidrar till ökade värden på värmeövergångskoefficienterna mellan vätska och rörvägg. Dessutom bidrar rillningen till en ytförstoring. Kombinationen av dessa effekter bör bli att värmeväxlaren kan konstrueras med en väsentligt mindre mängd meter rör än om rören vore släta. Storleken av rillningens effekt bör visa sig vid utprovningen i Stallkanalen.



4. GENOMFÖRANDE

4.1 Tillgängliga resurser

Projektet har utförts under ledning av Hans Jelbring, Sedico Energi AB. Anders Sjöblom, Sedico har medarbetat. Slottets maskinchef, Kent Thilander, har personligen tagit en mycket aktiv del i arbetet liksom flera av hans medarbetare, när speciella behov förelegat. Stal Refrigeration har varit generösa och lånat ut ett vätskekylaggregat av typ VEH4 med en kyleffekt av cirka 4 - 10 kW.

Resterande utrustning har inköpts eller hyrts för det anslag Ståthållarämbetet erhållit från BFR för projektets genomförande.

En hög ambitionsnivå beträffande ett konkret värmewäxlarutförande har lett till att extra medel tillskjutits främst från Sedico Energi AB och Ståthållarämbetet i form av personella resurser.

4.2 Provanläggningen

För att kunna klara målsättningen anskaffades ett vätskekylaggregat, vilket kopplades ihop med en värmewäxlare enligt principskisserna i bilaga 1. Vätskekylaggregatet placerades inklusive mätutrustningen i en kulvert som mynnar ut under Norrbro cirka 2,5 m ovanför Stallkanalens vattenyta. De olika värmewäxlarna förldades i Stallkanalen och kopplades samman med vätskekylaggregatet via en 40 mm PEL-slang. Avståndet mellan vätskekylaggregat och värmewäxlare varierade mellan 10 och 20 meter. (Se bil. 10.)

Den från värmepumpen avgivna energin fick värma upp ett vattenflöde taget från Stallkanalen. Det sålunda uppvärmda vattnet spolades tillbaka i kanalen. I en senare version kopplades det till några radiatorer placerade i kulverten för att hålla den värsta kylan borta vid provningarna i januari och februari 1980, innan det spolades tillbaka till kanalen.

De huvudsakliga mätningarna bestod i att mäta ingående och utgående temperatur på värmebäraren, liksom dess flöde. Dessa storheter tillsammans med Stallkanalens vattentemperatur, dess vattenflödeshastighet och värmewäxlarens area är tillräckliga för att bestämma vär-

meväxlarens värmegenomgångskoefficient. Korrigeringar måste dock dessförinnan göras avseende slangarnas och ledningarnas energiutbyte med omgivningen, liksom för det faktum att värmebäraren innehöll 15% glykol, när Stallkanalens vatten var kallt ($< 5^{\circ}\text{C}$). Kondenserings-effekten, motoreffekten med flera mätstorheter registrerades regelbundet och har utgjort en kontroll av tillförlitligheten på mätningarna av upptagen effekt ur Stallkanalen.

4.3 Utförda aktiviteter

Projektet har utförts under tiden mars 1979 - april 1980. Inga utprovningar hann utföras för temperaturer under $+2^{\circ}\text{C}$ på Stallkanalens vatten 1979. Detta visade sig vara en fördel emedan värmeväxlarelementen i början var konstruerade av rillade PEH-rör, vilka i sitt nuvarande utförande inte kan accepteras som värmeelement på grund av mekaniska svagheter. Däremot erhöles data om de rillade plaströrens värmeväxlingsförmåga. Ovanstående insikt gav upphov till utveckling av rillade aluminiumrör respektive rillade mässingrör.

I augusti 1979 provades således värmeväxlare utförda med släta och rillade aluminiumrör, liksom några andra utföranden, vilka inte visade sig lämpliga. Dessa prov medförde en möjlighet att direkt utvärdera rillningens effekt på värmeväxlarens kapacitet.

De rillade aluminiumrören provades under sämsta tänkbara betingelser under januari och februari månader i Stallkanalen, varefter värmeväxlaren varit i drift i stort sett kontinuerligt fram till och med april 1980 vilket medfört en rimlig chans att bedöma dess mekaniska hållfasthet.

Utöver de direkta proven har ett betydande utvecklingsarbete genomförts avseende konstruktion och kopplingar hos värmeväxlaren. En grundlig undersökning har utförts beträffande Mälarens och Saltsjöns årliga nivåvariationer, liksom beträffande variationer i Mälarens utflöde.

Mälarens temperatur på olika geografiska punkter och djup har samlats från olika källor för att möjliggöra en säker bedömning av temperaturen på Mälarens utflöde vid Stallkanalen, liksom dess normala säsong- och årsberoenden. Ståthållarämbetet och Sedico har tagit pre-

liminära kontakter med myndigheter som kan tänkas ha ett intresse eller bli berörda av ett eventuellt värmepumpprojekt på slottet, såsom Stockholms hamnförvaltning, Byggnadsstyrelsen med flera.

I denna rapport redovisas dock endast resultaten av arbeten som har med värmväxlarens funktion att göra.



5. RESULTAT

5.1 Mekanisk konstruktion

I försöken att finna en lämplig typ av värmeväxlarkonstruktion avsedd för förläggning i Stallkanalen har flera olika utföranden prövats.

Konstruktionen har dock förutsatts vara baserad på värmeväxlarelement av rör och speciellt på rillade rör. Tidigare erfarenheter och resultat från utprovningar har gjort att rör med en diameter av 50 mm har valts.

Vid utprovningarna i Stallkanalen har således värmeväxlare gjorda med rillade PEH-rör, släta aluminiumrör och rillade aluminiumrör utprovats. Beträffande de rillade PEH-rören så har dessa dels förlagts i en slinga med sänken och dels hängt upp i en stålram. Erfarenheterna från utprovningarna är att den mekaniska hållfastheten är svår att klara med PEH-plast som värmeväxlarelement. Speciellt om värmeväxlaren kommer att utsättas för hastigheter på det yttre vattenflödet varierande mellan 0,2 till 3 m s⁻¹.

Exempelvis höll plaströren cirka 1 vecka under 3 bars inre övertryck i ett vattenflöde med en hastighet av 3 m s⁻¹. Slutsatsen av de samlade erfarenheterna är att rillade PEH-rör måste göras mer mekaniskt hållfasta. Om detta uppnås genom att öka PEH-rörens tjocklek sker detta på bekostnad av värmeväxlingsförmågan. Ovanstående insikter och kravet att snabbt få fram en acceptabel lösning ledde till utveckling och konstruktion av värmeväxlare baserade på rillade aluminiumrör.

Först konstruerades och provades en värmeväxlare med släta aluminiumrör. Då kopplingar och konstruktion i övrigt verkade acceptabla konstruerades en liknande värmeväxlare baserad på rillade aluminiumrör. Båda dessa värmeväxlare har utsatts för mycket hårda mekaniska påfrestningar av olika slag, utan att brytas sönder eller springa läck. Den senare har dessutom legat förlagd i Stallkanalen i varierande strömförhållanden i cirka 5 månader, varav cirka 2 månader i drift. Den mekaniska funktionen kan således garanteras. Vidare har rillade rör tillverkats i mässing med mycket gott resultat. Detta ger stor säkerhet mot långtidskorrosion vid förläggning i Stallkanalen, utan krav på extra ytbehandling, vilket torde vara nödvändigt vid användning av aluminiumrör.

5.2 Värmeväxlarprestanda

Värmeväxlarnas prestanda framgår av bilagorna 6-9. Bilaga 6 visar plastvärmeväxlarnas prestanda och bilaga 7 prestanda hos släta aluminiumrör. Bilaga 8 anger data för värmeväxlare baserade på rillade aluminiumrör medan bilaga 9 belyser förhållandena vid låga temperaturer på kanalvattnet då ispåfrysning skett på värmeväxlarelementen. Ovanstående data är ett urval, vilka ger svar på de väsentliga frågorna avseende prestanda hos värmeväxlarelementen vid en driftsituation som är helt realistisk för energiupptagning ur Stallkanalens vatten.

I bilagorna anges endast data som berör värmeväxlarens funktion. Således ingår inga data beträffande värmepumpens prestanda, trots att sådana har registrerats. Den ur Stallkanalen upptagna effekten är korrigerad till att gälla den effekt som upptagits genom värmeväxlarytorna. Således har energiöverföring från till- och frånledningar i vatten och luft kompenserats. För att erhålla ett enkelt jämförbart mått har värmeväxlarelementens prestanda angivits i Watt per meter värmeväxlarelement och per grad logaritmisk temperaturdifferens. Denna sort har nackdelen att inte ta hänsyn till att de rillade rören har större yta än de släta rören. Läsaren kan själv beräkna denna inverkan om intresse finns. Ytförstoringen på grund av rillningen uppgår till cirka 30%.

5.3 Ispåfrysningsrisk

Ispåfrysning av värmeväxlarelementen sker troligen alltid då värmebärarens temperatur sjunker under -1°C och då värmeväxlarelementen består av metall. Dess inverkan är mestadels liten om vattentemperaturen är större än $+1,0^{\circ}\text{C}$ i de aktuella driftsituationerna. Ispåfrysningen är kraftigt beroende av det yttre vattenflödets hastighet. För att illustrera ovanstående beroende och erhålla ett kvantitativt mått på dess storlek utfördes utprovningarna som redovisas i bilaga 9. Alla dessa är gjorda när det varit speciellt kallt i vattnet.

Prov 31-34 utfördes 25 januari när Mälarens is lade sig och det var extremt kallt i luften. Prov 35-37 utfördes vid ett kraftigt snöfall den 7 februari, vilket gav vinterns kallaste ytvatten i Stallkanalen. Värmeväxlaren förlades i anslutning till kanalväggen för att ge en minimal flödehastighet hos vattnet.

Den 18 februari kördes värmepumpen kontinuerligt. På kvällen infann sig en balans i ispåfrysningen. Prov 43-46 visar data från fyra tillfällen då istjockleken varit i balans. De tre första är från den 20:e februari medan det sista är från den 27:e februari.

Ispåfrysningsrisken beror mycket på vattnets temperatur. Mälaren hade extremt kallt vatten vintern 79/80 beroende på att den hade två isläggningar. Vattnet är kallast vid isläggnigen. Därefter fungerar isen som en isolator och vattnet uppvärms normalt litet grand efter isläggnigen.

Exempelvis var temperaturen endast någon enstaka dag under $+1,0^{\circ}\text{C}$ vintern 78/79 som ju var en mycket kall vinter, men dock innebar relativt varmt vatten i Mälaren under vintermånaderna.



6. UTVÄRDERING

6.1 Värmeväxlare baserad på rillade PEH-rör

De utprovade, rillade PEH-rören kan ge en effektöverföring av cirka $45 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ eller cirka 160 Watt per meter värmeväxlarelement vid en logaritmisk medeltemperaturdifferens av $3,5^{\circ}\text{C}$. Detta innebär att det krävs omkring 6000 meter rillade PEH-rör för att värmeväxla 1 MW från Stallkanalens vatten och eventuellt 10000 meter för att kompensera för kapacitetsnedsättning vid ispåfrysning. Jämfört med släta aluminiumrör behövs omkring 50% större längd av rillade PEH-rör. Därmed finns utan tvekan en mycket bra ekonomi i användandet av rillade PEH-rör, men problemet med dessa är den mekaniska hållfastheten hos existerande typer av rillade PEH-rör. Därför är de inte lämpliga för en anläggning vid Kungliga Slottet.

6.2 Föredraget utförande på en värmeväxlare placerad i Stallkanalen

De utförda proven tillsammans med övriga arbeten har resulterat i följande prioriteringar för utförandet av en värmeväxlare förlagd i Stallkanalen.

- o Värmeväxlarytorna utföres av mässingrör, för att minimera korrosionsangrepp.
- o Värmeväxlarytorna utföres av rillade rör för att maximera effektöverföringen per ytenhet och grad vid låga flödes hastigheter på kanalens vatten. Detta framgår av bilagorna 7 och 8.
- o Värmeväxlarelementen utgörs av 5 - 10 meter långa rör, vilka lämpligen hopkopplas med kopplingar av PEH-plast på samma sätt som de utprovade värmeväxlartyperna.
- o En värmeväxlare på 1 MW delas lämpligen upp i 2 eller 3 delar med oberoende funktion. Varje del skall kunna stängas automatiskt vid eventuellt läckage i delen. Ovanstående arrangemang innebär ökad driftsäkerhet för hela anläggningen.
- o Värmeväxlarenheterna förläggs i betongkasuner, som förankras i Stallkanalens botten.

- o Värmeväxlarenheterna täcks ovanpå för att ge mekaniskt skydd för tunga föremål, ankare och metkrokar, liksom för att skydda mot solljus, vilket dämpar påväxt på värmeväxlarytorna.
- o Betongkasunerna förses med galler, som har den dubbla funktionen att separera bort flytande föremål av större storlek än någon cm och dessutom utgör de en hastighetsminskare då Stallkanalens dammluckor är öppna.
- o Stallkanalens vattentvärnsnitt är ungefär 18 m^2 . Totala arean för värmeväxlarenheternas vattenintag bör vara $3,5 - 4 \text{ m}^2$.
- o Det är tillräckligt om värmeväxlaren dimensioneras för att nå märkeffekt vid en vattentemperatur i Stallkanalen på $+0,5^\circ\text{C}$.
- o Värmeväxlarna kan bibehålla märkeffekt även om vattentemperaturen i Stallkanalen understiger $0,5^\circ\text{C}$. Dessa åtgärder kan bestå i:
 - Öppning av dammluckor,
 - Användning av speciella strömbildare,
 - Riktning av Stallkanalens flöde genom omflyttning av dess bottenmassor.
- o Värmeväxlarytorna måste vara lätt åtkomliga för service och rengöring med till exempel högtryckstvättrengöring.
- o Längden rillade mässingsrör som behövs för att värmeväxla 1 MW vid temperaturen $0,5^\circ\text{C}$ och $3,5^\circ\text{C}$ logaritmisk medeltemperaturdifferens har beräknats till 1600 meter.

6.3 Temperaturen i Stallkanalen

De lägsta temperaturerna i Stallkanalen uppstår vid isläggningsen i Mälaren eller vid kraftiga snöfall före isläggningsen.

Snöavsmältningen på våren ger inte de lägsta temperaturerna emedan solen redan hunnit värma upp ytvattnet en del vid denna tidpunkt. De lägsta temperaturerna varierar år från år, men är mindre kopplade till lufttemperaturen än till isförhållandena på Mälaren. En tidig och genom vintern varaktig isläggning medför således relativt hög vintertemperatur i Mälaren.

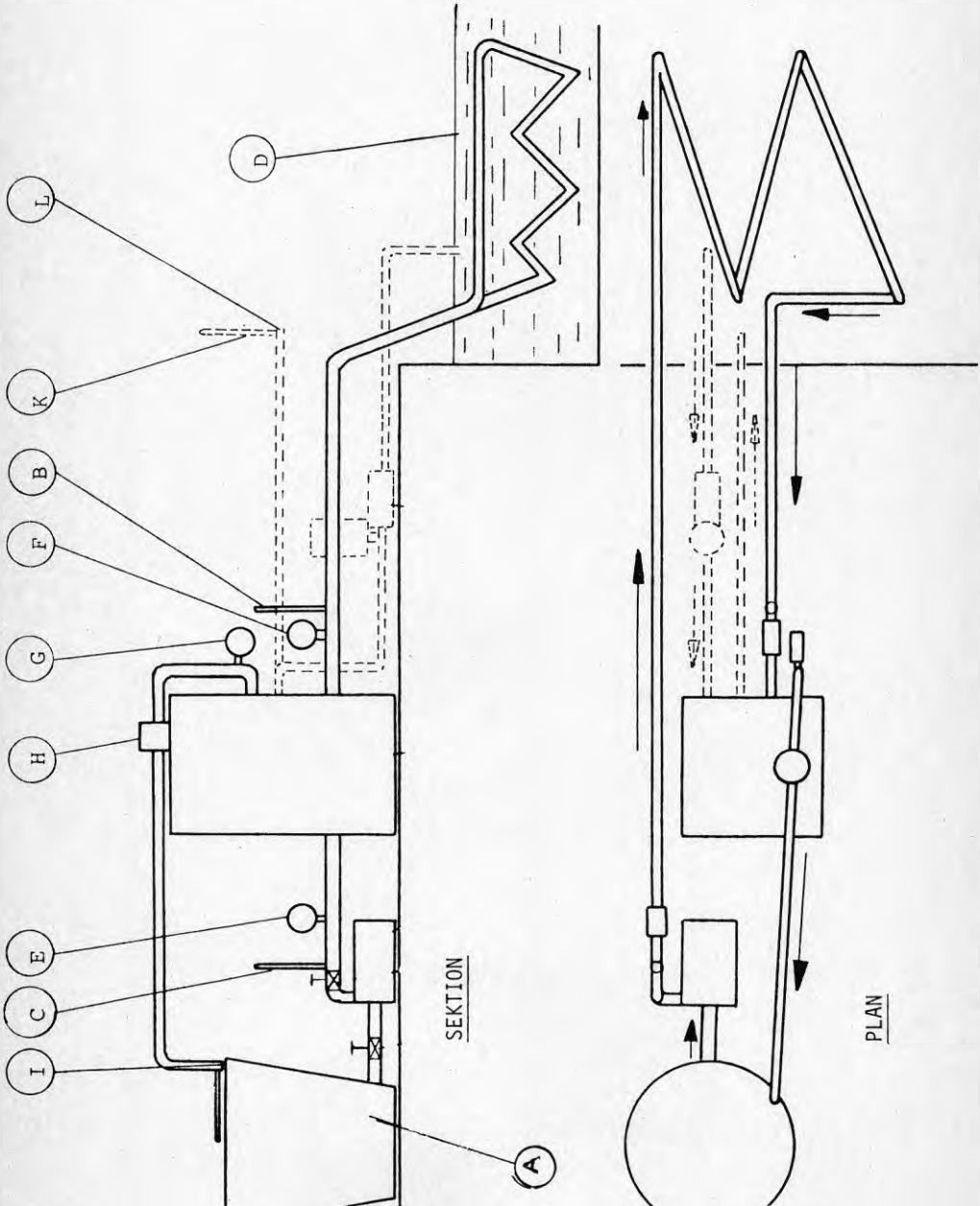
Stallkanalens vatten uppskattas att ha legat $0,3^{\circ}\text{C}$ - $0,4^{\circ}\text{C}$ lägre vintern 79/80 än vintern 78/79. Detta beroende på att Mälaren hade två isläggningar med en period av öppet vatten dessemellan, vilket medförde en extra avkylning av Mälarens bulkvatten. Vintern 79/80 torde ha uppvisat en mycket kall temperatur på Stallkanalens vatten och det är bra att denna temperatur dagligen har registrerats vid Kungliga Slottets maskincentral.



- A Temperatur från kylaggregat
 B Temperatur från värmväxlare
 C Temperatur före värmväxlare
 D Temperatur i kanal
 E Tryck efter cirkulationspump
 F Tryck efter värmväxlare
 G Tryck efter kylaggregat
 H Flöde köldbärare
 I Flöde köldbärare
 K Temperatur från kondensor
 L Flöde från kondensor

PRINCIPKOPPLING AV
PROVUTRUSTNINGEN

MÄTPUNKTER



Teoretisk värmeöverföringskoefficient för vatten vid
 påtvingad konvektion

L_y Värmeövergångskoefficient ($Wm^{-2}K^{-1}$).
 Vid strömning mot enskilt rör med diametern 50 mm.

Flödes- hastighet (ms^{-1})	Temperatur ($^{\circ}C$)		
	$0^{\circ}C$	$10^{\circ}C$	$20^{\circ}C$
0,1	630	720	800
0,2	985	1120	1250
0,5	1695	1930	2150
1,0	2750	3130	3500

L_i Värmeövergångskoefficient ($Wm^{-2}K^{-1}$).
 Vid strömning i rör med diametern 50 mm.

Flödes- hastighet (ms^{-1})	Temperatur ($^{\circ}C$)		
	$0^{\circ}C$	$10^{\circ}C$	$20^{\circ}C$
0,2	635	760	875
0,4	1110	1320	1520
0,8	1925	2300	2650

Teoretisk värmegenomgångskoefficient för rör med 1 mm väggtjocklek vid 0°C ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)

Aluminiumrör

Flödeshastighet inre flöde (m s^{-1})		Yttre flöde (m s^{-1})			
		0,1	0,2	0,5	1,0
0,2	316	385	461	514	
0,4	401	520	668	787	
0,8	473	649	896	1125	

PEH-rör

Flödeshastighet inre flöde (m s^{-1})		Yttre flöde (m s^{-1})			
		0,1	0,2	0,5	1,0
0,2	184	206	225	237	
0,4	210	239	266	283	
0,8	228	263	296	317	

Förväntad kapacitetsnedsättning vid isbildning (%).
 Inre flödes hastigheten är $0,4 \text{ m s}^{-1}$ och rörväggens
 tjocklek är 1 mm

Aluminiumrör

Istjocklek (mm)		Yttre flöde (m s^{-1})		
		0,1	0,2	0,5
1,0	14,8	18,4	22,5	25,5
5,0	46,6	53,1	59,2	63,1
10,0	61,8	69,3	74,4	77,4

PEH-rör

Istjocklek (mm)		Yttre flöde (m s^{-1})		
		0,1	0,2	0,5
1,0	8,4	9,4	10,4	11,0
5,0	31,3	34,2	36,6	38,1
10,0	47,7	51,0	53,6	55,2

Maximal förväntad kapacitetsnedsättning vid smuttbildning (%). Den inre flödes hastigheten är $0,4 \text{ m s}^{-1}$ och rörväggens tjocklek 1 mm

Aluminiumrör

Smutsskikt (mm)		Yttre flöde (m s^{-1})			
		0,2	0,5	1,0	
0,1	0,1	6,3	8,0	10,0	11,6
0,5	25,0	30,2	35,8	39,6	

PEH-rör

Smutsskikt (mm)		Yttre flöde (m s^{-1})		
		0,2	0,5	1,0
0,1	3,4	3,8	4,2	4,5
0,5	14,9	16,6	18,1	19,1

Rillade PEH-rör

Nr	Längd (m)	Flödes- hastighet (ms^{-1})	Temp.ut ($^{\circ}\text{C}$)	Temp.in ($^{\circ}\text{C}$)	Värme- bärrar- flöde (gs^{-1})	Temp. vatten ($^{\circ}\text{C}$)	Upptagen effekt Korr (W)	Log.m.t ($^{\circ}\text{C}$)	Effekt ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Anmärkning
1	22	3,0	-1,90	-0,30	855	2,20	4970	3,23	70,0	
2	22	3,0	-2,50	-0,40	645	2,20	4875	3,55	62,4	
3	22	3,0	-2,75	0,00	457	2,20	4510	3,39	60,5	
4	22	3,0	-3,20	+0,20	360	2,20	4400	3,42	58,5	
5	22	3,0	-3,90	+0,55	225	2,20	3475	3,40	46,5	
6	22	0,2	-3,00	-1,45	855	2,70	5145	4,88	47,9	
7	22	0,2	-3,00	-1,40	813	2,70	5045	4,86	47,2	
8	22	0,2	-3,15	-1,40	685	2,70	4650	4,92	43,0	
9	22	0,2	-3,65	-1,50	585	2,70	4895	5,20	42,8	
10	22	0,2	-3,60	-1,10	450	2,70	4380	4,95	40,2	
11	22	0,2	-4,15	-0,80	318	2,70	4140	4,99	37,7	
12	40	3,0	-1,15	+1,00	667	2,00	5440	1,87	72,7	
13	40	3,0	-1,70	+1,10	526	2,00	5600	1,98	70,7	

Släta aluminiumrör

Nr	Längd (m)	Flödes- hastighet (ms^{-1})	Temp. ut ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. in ($^{\circ}\text{C}$)	Värme- bärrar- flöde (gs^{-1})	Temp. vatten ($^{\circ}\text{C}$)	Upptagen effekt Korr (W)	T_{log}	Effekt ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Anmärkning
14	9,5	0,2	6,00	8,20	893	17,85	7720	10,71	75,9	Förläggning tvärs ström- ningsrikt- ning
15	9,5	0,2	5,70	8,15	820	17,85	7910	10,88	76,5	
16	9,5	0,2	5,50	8,25	704	17,85	7590	10,92	73,2	Förläggning tvärs ström- ningsriktning försedda med yttre turbu- lensgivare.
17	9,5	0,2	5,35	8,50	542	17,85	6640	10,85	64,4	
18	9,5	0,2	5,80	9,20	333	17,85	4230	10,26	43,4	
19	9,5	0,2	9,65	11,65	893	17,90	7130	7,20	104	Förläggning tvärs ström- ningsriktning försedda med yttre turbu- lensgivare.
20	9,5	0,2	9,20	11,05	806	17,90	5885	7,74	80,0	
21	9,5	0,2	9,10	11,10	699	17,90	5490	7,76	74,5	
22	9,5	0,2	7,20	9,65	575	17,90	5460	9,42	61,0	
23	9,5	0,2	9,20	12,25	350	17,90	4140	7,06	61,7	

Rillade aluminiumrör

Nr	Längd (m)	Flödes- hastighet (ms^{-1})	Temp. ut ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. in ($^{\circ}\text{C}$)	Värme- bärrar- flöde (gs^{-1})	Temp. vatten ($^{\circ}\text{C}$)	Upptagen effekt Korr (W)	ΔT_{log}	Effekt ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Anmärkning
24	9,5	0,2	11,30	14,55	926	18,8	12310	5,72	226	Förläggning tvärs ström- ningsriktning
25	9,5	0,2	10,95	14,45	826	18,8	11810	5,93	210	
26	9,5	0,2	10,50	14,55	676	18,8	11160	6,05	194	
27	9,5	0,2	9,55	14,55	521	18,8	10590	6,43	173	
28	9,5	0,2	10,80	14,20	893	18,9	12400	6,24	209	Förläggning längs ström- ningsriktningen
29	9,5	0,2	9,40	14,50	532	18,9	11030	6,63	175	
30	9,5	0,2	5,50	15,25	220	18,9	8580	7,50	120	

Ispåfrysning

Nr	Längd (m)	Flödes- hastighet (ms ⁻¹)	U _b (°C)	I _b (°C)	Flöde (gs ⁻¹)	Vatten- temp. (°C)	Upptagen effekt (W)	ΔT _{log} (°C)	Effekt (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Klockan
32	9,2	3,0	-2,90	-0,70	719	0,4	6450	2,00	339	22.20
33	9,2	3,0	-2,60	-0,70	699	0,4	5420	1,89	302	22.55
34	9,2	3,0	-2,10	-0,70	820	0,4	4680	1,71	297	23.30
35	9,2	0,1	-3,70	-2,60	625	0,25	2805	3,37	90,5	21.30
36	9,2	0,1	-4,00	-2,80	633	0,25	3100	3,62	93,1	21.45
37	9,2	0,1	-4,85	-3,70	633	0,25	2970	4,50	71,7	22.00
38	9,2	0,2	-2,80	-1,10	505	0,55	3500	2,40	158	16.10
39	9,2	0,2	-3,50	-1,75	455	0,55	3250	3,09	114	18.10
40	9,2	0,2	-6,10	-3,75	510	0,55	4890	5,39	98,6	19.10
41	9,2	0,2	-5,60	-4,35	485	0,55	2475	5,50	48,9	20.20
42	9,2	0,2	-5,85	-4,45	526	0,55	3000	5,67	57,5	21.50
43	9,2	0,2	-7,10	-5,50	417	0,50	2720	6,77	43,7	10.30
44	9,2	0,2	-6,30	-4,95	455	0,50	2510	6,10	44,7	15.15
45	9,2	0,2	-6,20	-4,90	455	0,50	2410	6,00	43,7	21.00
46	9,2	0,20	-4,90	-2,30	327	0,83	3550	4,30	89,7	

32 - 34 25/1 Utomhustemperaturen -16°C.

35 - 37 7/2 Utomhustemperaturen -12°C och snöfall.

40 18/2 Sänkning av kondenseringsstemperaturen till 20°C från 40°C.

43 - 45 20/2 Utomhustemperatur -3°C.

46 27/2

42 - 46 Isbildningen är i balans.

SITUATIONSPLAN

Förläggingsplatsen för
värmväxlaren var under Norrbro



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
790438-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till Ståthållarämbetet, Stockholms slott.**

R43: 1981

ISBN 91-540-3498-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700343

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirka pris: 25 kr exkl moms