



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**

**R178:1984**

**Sjöar och hav som värmekälla  
för värmepumpar**

**Bertil L Davin  
Jan Nordling  
Kaj Sandart**

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| INSTITUTET FÖR<br>BYGGDOKUMENTATION |     |
| Accnr                               |     |
| Plac                                | 5er |

R  
AWA

**Byggeforskningsrådet**

R178:1984

SJÖAR OCH HAV SOM VÄRMEKÄLLA FÖR VÄRMEPUMPAR

Bertil L Davin  
Jan Nordling  
Kaj Sandart

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 770979-0  
från Statens råd för byggnadsforskning till Scandiaconsult  
AB, Stockholm

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

R178:1984

ISBN 91-540-4288-7  
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm  
Liber Tryck Stockholm 1984

## INNEHÅLL

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | SAMMANFATTNING   | 4  |
| 2   | PROJEKTBESKRIVNING   | 6  |
| 2.1 | Bakgrund   | 6  |
| 2.2 | Problembeskrivning   | 7  |
| 2.3 | Förstudie  | 8  |
| 2.4 | Huvudstudie  | 10 |
| 2.5 | Referensgrupp och övriga kontaktpersoner                           | 15 |
| 3   | SJÖARS TEMPERATUR OCH VÄRMEINNEHÅLL                                | 16 |
| 3.1 | Sjöars utbredning  | 16 |
| 3.2 | Temperaturens årstidsvariation                                     | 17 |
| 3.3 | Värmeomsättning  | 21 |
| 3.4 | Värmeinhåll  | 28 |
| 3.5 | Speciella förhållanden   | 30 |
| 3.6 | Sammanställning av statistiskt material                            | 32 |
| 3.7 | Olika modeller med linjär regression                               | 40 |
| 3.8 | Användningsområden och noggrannhet                                 | 48 |
| 3.9 | Exempel på värmebehovsberäkning                                    | 50 |
| 4   | HAVETS TEMPERATUR OCH VÄRMEINNEHÅLL                                | 52 |
| 4.1 | Temperaturens årstidsvariation                                     | 52 |
| 4.2 | Värmeinhåll och möjlighet till värmeuttag under olika förhållanden | 59 |
| 4.3 | Salthalt och fryspunktsnedsättning                                 | 65 |
| 4.4 | Speciella förhållanden   | 67 |
| 5   | KORROSION I SJÖ- OCH HAVSVATTEN                                    | 68 |
| 5.1 | Allmän korrosionsteori   | 68 |
| 5.2 | Korrosion i vatten   | 71 |
| 5.3 | Vattenanalys   | 73 |
| 5.4 | Erfarenheter från idrifttagna anläggningar                         | 73 |
| 6   | PÅVÄXT OCH AVLAGRINGAR   | 77 |
| 6.1 | Allmänt om påväxt  | 77 |
| 6.2 | Påväxtens beroende av miljön                                       | 78 |
| 6.3 | Korrosion i samband med påväxt                                     | 79 |
| 6.4 | Åtgärder mot påväxt  |    |
| 7   | VÄRMEUPPTAGARE   | 80 |
| 7.1 | Upptagningssystemets delar   | 80 |
| 7.2 | Olika använda system   | 84 |
| 7.3 | Alternativens förutsättningar                                      | 89 |
| 7.4 | Formler för förångardimensionering                                 | 90 |
| 7.5 | Förångarsystem vid sensibel värmeutvinning, exempel                | 95 |
| 7.6 | Förångarsystem vid latent värmeutvinning, exempel                  | 96 |
| 8   | REFERENSLISTA  | 98 |
| 9   | BILAGOR  | 99 |

## 1 SAMMANFATTNING

Föreliggande rapport beskriver hur man, med vetskap om vissa parametrar för en sjö, kan bestämma värmeinnehållet för denna.

Värmeinnehållet kan beräknas med användande av formler framtagna med multipel regressionsanalys. De härvid nyttjade variablerna har för behandlad sjö varit: area, volym och djup. Aktuell sjö skall, för att öka beräkningens noggrannhet, även klassas med hänsyn till sjöns storlek.

En liten sjö definieras som en sjö mindre än  $10 \text{ km}^2$ , medelstora sjöar har en yta mellan  $10$  och  $50 \text{ km}^2$  och stora sjöar större än  $50 \text{ km}^2$ .

Följande regressionsformler har tagits fram för de olika storlekarna på sjöar. Beteckningar:  $A = \text{area (km}^2\text{)}$ ,  $V = \text{volym (10}^6 \text{ m}^3\text{)}$ ,  $Z_d = \text{medeldjup (m)}$ ,  $Z_m = \text{maxdjup (m)}$ .

Små sjöar

$$Q = - 6,261 - 0,114 \cdot V + 2,217 \cdot Z_d \quad (\text{kWh/m}^2)$$

Medelstora sjöar

$$Q = - 0,915 - 0,531 \cdot A + 0,036 \cdot V + 0,286 \cdot Z_m \quad (\text{kWh/m}^2)$$

Stora sjöar

$$W = 4585 - 48,5 \cdot A + 3,4 \cdot V - 67,9 \cdot Z_m \quad (\text{GWh})$$

För kontroll av framtagna formler har beräkningar gjorts för sjöar, där värmeinnehållet tagits fram med hjälp av mätningar av temperaturer m m.

Vid beräkningar utförda med användande av framtagna formler har det visat sig att det ofta nyttjade riktvärdet på värmeinnehållet,  $15 \text{ kWh/m}^2$ , inte alltid motsvarar verkligt värmeinnehåll med tillfredsställande noggrannhet.

De grunddata som använts vid beräkningarna har erhållits från SMHI som på detta sätt deltagit i projektet som underkonsulter. Härifrån har erhållits mätdata från 85 sjöar i Sverige.

SMHI:s totala delredovising återfinns i rapportens bilaga 12. Det som främst använts ur detta material är de tabellsammanställningar som redovisats för de olika sjöarna.

Förutom ovan beskriven beräkningsdel behandlande sjöar har även havets temperatur och temperaturvariation samt dess värmeinnehåll redovisats.

Ävenså har separata kapitel redovisande korrosions- och påväxtproblem tagits med.

Rapportens sista kapitel behandlar tekniska synpunkter på värmeupptagare som används i värmepumpsystem med sjövattnen som värmekälla.

## 2 PROJEKTBEKRIVNING

### 2.1 Bakgrund

Värmepumpar för uppvärmningsändamål har under senare år fått en alltmer framträdande roll i energidebatten. Möjligheterna att ta tillvara lågvärdigt värme i luft, jord och vatten ger ett alternativ till importerade bränslen. Med en värmepump kan också elenergin utnyttjas på ett effektivare sätt än vid direktvärme. Elenergin utnyttjas endast som drivenergi i en process där den övriga energin hämtas från omgivningen. Även andra drivsätt är tänkbara i samband med begynnande elknapphet vid planerad kärnkraftsavveckling.

Enligt riksdagens beslut våren 1981 skall värmepumpar utnyttjas för byggnadsuppvärmning under 1980-talet, i relativt stor utsträckning. Den elenergi som beräknas åtgå för drift av värmepumpar år 1990 är 3-5 TWh. Med en värmefaktor av 3 motsvarar denna elenergi mängd ca 10-15 TWh värmeenergi, dvs 10-15 % av det totala uppvärmningsbehovet år 1990.

Olika värmekällor för värmepumpar lämpar sig för olika ändamål. För mindre system, typ småhus, är kraven främst låg investeringskostnad och säker funktion. System med avluft, uteluft, grundvatten och yttjord, är där särskilt lämpliga.

Större system för gruppcentraler och fjärrvärmesystem innebär att förhållandevis stora energiuttag måste göras lokalt. Vattnets goda egenskaper som värmebärare, högt specifikt värme och hög densitet, innebär att vatten som värmekälla har en särställning när det gäller större system. Detta projekt söker beskriva den mest lättillgängliga vattenvärmekällan - ytvattnet i sjöar och hav.



## 2.2 Problembeskrivning

Värme kan tas ur vatten på två sätt. Ovan fryspunkten uttas värme vid en temperatursänkning av vattnet (förnimbart värme) medan latent värme erhålls vid vattnets frysning. De värmepumpanläggningar som har byggts under senare år har med några få undantag utnyttjat värmeavgivning vid temperatursänkning. Se figur 7.7

De faktorer som är intressanta vid vatten som värmekälla är följande:

Temperatur. Vattnets lägsta temperatur under året bör vara så hög som möjligt för att möjliggöra värmeupptagning utan alltför höga vattenflöden. Genomsnittstemperaturen skall också vara så hög som möjligt för att medge en god värmefaktor.

Mängd. Tillräcklig vattenmängd måste finnas vid lägsta erforderliga temperaturnivå.

Salthalt. Vattnets salthalt påverkar i hög grad dess egenskaper. Till nackdelarna med hög salthalt hör den ökade korrosionsrisken. Samtidigt får man en extra säkerhet mot frysning genom den fryspunktsnedsättning som blir följden av saltinnehållet. Salthalten påverkar också vattnets skiktning i havet.

Påväxt. Havs- och sjövattnet innehåller i varierande grad larver och sporer som om de får fäste på en yta kan föröka sig och bilda ett värmeisolerande skikt.

Avstånd. Behovet av långa kulvertledningar för transport av vatten medför dryga kostnader. Av detta skäl är avståndet mellan värmekällan och uppvärmningsobjektet av största intresse.

Miljöhänsyn. En sänkning av vattentemperaturen innebär vissa förändringar av de kemiska och biologiska förhållandena i värmekällan. Uttagets storlek måste dimensioneras utifrån denna förutsättning.

### 2.3 Förstudie

Projektet har bedrivits i två etapper. Etapp 1 omfattande en förstudie som påbörjades hösten 1977. Förstudien syftade till att ge preliminära slutsatser främst avseende faktorerna temperatur, mängd, salthalt, påväxt och avstånd enligt föregående avsnitt. Arbetsmetoden vid förstudien var litteraturstudier och kontakter med tillverkare, konsulter och avnämare. Särskilda fördjupade studier genomfördes inom området limnologi och oceanografi. En sammanfattning av de slutsatser som framkom vid förstudien redovisas nedan.

#### Limnologi (läran om insjövattnen)

- \* Sommartid, speciellt i juli, kan temperaturer på över + 20°C uppstå i ytskiktet.
- \* Sjöar har sitt lägsta värmeinnehåll någon eller några veckor efter isläggningen vilken i Mellansverige vanligtvis inträffar i slutet av december.
- \* Bottenvattentemperaturen, dvs den vid isläggningen högsta temperaturen i sjön, är ej alltid över 3°C.
- \* Bottensedimentet innehåller vintertid stora värmemängder vid 6-9°C temperatur.

### Oceanografi (läran om havet)

- \* Havsvattnets saltinnehåll påverkar i hög grad dess egenskaper. För Östersjöns centrala delar kan man räkna med en fryspunkt på ca  $-0,3^{\circ}\text{C}$  medan vattnet i Kattegatt-Skagerack fryser vid  $-1,3^{\circ}\text{C}$  till  $-1,9^{\circ}\text{C}$  beroende på saltinnehåll.
- \* Ytvattnets temperatur överstiger sällan  $17-18^{\circ}\text{C}$  sommartid i öppet vatten.
- \* Vintertid håller vattnet centralt i Östersjön  $4-5^{\circ}\text{C}$  på ett djup av 60-70 m. Temperaturen på dessa djup påverkas ytterst litet av årstiden. På 100 m djup varierar temperaturen endast  $0,2^{\circ}\text{C}$  under året.
- \* I Kattegatt-Skagerack ligger vattentemperaturen vintertid vid  $5-6^{\circ}\text{C}$  på 20-50 m djup. Salthalten är då  $30-35^{\circ}/\text{oo}$ .

### Korrosion och påväxt

- \* För sjövattnen går värmeväxlare av syrafast stål att använda medan havsvatten normalt kräver titan.
- \* Påväxten är ca 5 ggr större i havet på västkusten än på ostkusten.
- \* Problem förekommer också genom att löst material i vattnet fastnar på utrustningen.

### Förångare

- \* Största problemet med vatten som värmekälla är isbildningsrisken vintertid.
- \* Åtgärder måste vidtas mot påväxt och avlagringar på värmeväxlarytor vilka annars snabbt får försämrade värmegenomgångstal.

- \* Genom att utnyttja indirekt system, dvs med brinekrets och plattvärmeväxlare kan isproblem delvis bemästras.

#### Avstånd

- \* Vid en total produktionskostnad av 9 öre/kWh (1978 års prisnivå) kan avståndet mellan recipienten och uppvärmningsobjektet inte vara större än vad som framgår av nedanstående tabell.

| <u>Värmepumpeffekt</u> | <u>Avstånd, högst</u> |
|------------------------|-----------------------|
| 100 kW                 | -                     |
| 1 MW                   | 1 km                  |
| 10 MW                  | 7,6 km                |

#### 2.4 Huvudstudie

En slutsats av förstudien var att sjöar, med de vid denna tid aktuella värmeväxlarkonstruktioner, inte var generellt lämpade för värmepumpnyttjande vid året runt drift. Syftet med huvudstudien är därför i första hand att mer detaljerat kartlägga svenska sjöars lämplighet som värmekälla för en värmepumpanläggning. I denna undersökning skall särskild hänsyn läggas vid de biologiska och ekologiska effekterna av att påverka värmebalansen hos en sjö, speciellt när det gäller ett relativt långvarigt värmeuttag från sjön.

För att förbättra underlaget för bedömning av sjöarnas lämplighet skall huvudstudien enligt ansökan till statens råd för byggforskning inrikta sitt arbete på följande områden.

- \* Inventering av sjödata i tillgängliga register
- \* Framtagande av numerisk beräkningsmodell för preliminär bedömning av enstaka sjös lämplighet som värmekälla
- \* Specialstudier av värmeväxlarkonstruktioner för latent och förnimbar värmeutvinning ur sjövatten
- \* Studier av korrosionsproblem i sjövatten
- \* Studier av påväxten i sjövattnensystem

Slutsatserna i förstudien var baserade på ett förhållandevis litet antal sjöar där inte alla var belägna i Skandinavien. För att förbättra underlaget inleddes arbetet med en granskning av vilka källor som finns tillgängliga för sjötemperaturdata.

Inventeringen gav vid handen att materialet huvudsakligen finns samlat hos SMHI för större sjöar och Lantbruksnämnderna när det gäller mindre sjöar.

Material från Lantbruksnämnderna är uppdelat på tre institutioner, beroende på vilken tid de härrör från. Material före år 1920 finns i regel hos respektive lantmäterikontor och material för åren 1920-1954 finns hos Lantbruksstyrelsen. Från år 1955 finns handlingarna på Lantbruksnämnden. Vid universitetens geografiska och limnologiska institutioner finns en stor mängd opublicerade uppsatser för 2- och 3-betygsnivå samt licentiatavhandlingar. Vatteninspektionen som uppgått i Naturvårdsverket har utfört ett flertal utredningar om vattenkvalitet. Dessutom har undersökningar gjorts ur fysikalisk-teknisk synvinkel.

Redan tidigt under arbetet med att finna temperaturreferenser fann vi att antalet temperaturmätta sjöar i vårt land var relativt litet. Totala antalet sjöar i Sverige uppgår till nära 100 000 st. SMHI förfogar över mer eller mindre fullständiga temperaturmätningar från

ca 200 sjöar. varav 40 st söder om Ljusnan. Av dessa sjöar är ungefär 100 sjöar mätta fem vintrar eller mer. En grov uppskattning av andra källor ger vid handen att ytterligare ca 100 sjöar finns noggrant uppmätta. Totalt är alltså mindre än 0,2 % av landets sjöar kartlagda temperaturmässigt. Det material avseende temperaturmätningar i sjöar, som SMHI förfogar över, är inmatade i dataregister.

Utgångspunkten för huvudstudien var att med hjälp av data från ett stort antal sjöar jämnt fördelade över landet skapa ett rutnät med typsjöar. Mot bakgrund av det begränsade underlagsmaterialet, förkastades snart denna arbetsuppläggning. Istället prövades en annan metod.

Idén var att genom att studera klimatförhållandena för tiden mellan höstcirkulationen (se kap 3) och isläggningen, skulle en sjös temperaturförhållanden efter isläggningen kunna fastläggas. Följande faktorer bedömdes vara av betydelse.

- areal
- höjd över havet
- maximidjup
- tidpunkt för isläggning
- volym
- lufttemperatur
- vindexposition
- vindstyrka, vindriktning
- latitud
- molnighet
- vattenöverföring

Även denna idé fick överges eftersom det inte fanns tillräckligt stort underlagsmaterial. I en senare studie har dock SMHI utnyttjat denna idé och utvecklat en datormodell för teoretisk bestämning av temperaturförhållande i en sjö utgående från förhållandena mellan höstcirkulation och isläggning.

Den slutligen valda metoden går ut på att finna ett empiriskt samband mellan temperaturförhållandena i en sjö och påverkande faktorer. De faktorer som då prövas är; area, volym, djup och lufttemperatur.

Genom multipelregressionsanalys kan därefter ett empiriskt samband bestämmas, baserat på ovannämnda faktorer. Fördelarna med denna metod för bestämning av sjös temperaturförhållanden, är att man i princip blir oberoende av noggranna och tidsmässigt besvärliga temperaturmätningar "in situ". Med hjälp av ett sådant samband kan värmeutvinningsmöjligheten för en godtycklig sjö bestämmas enbart med hjälp av lättåtkomliga klimatdata samt vissa begränsade mätningar på platsen.

För att underlätta framtagandet av sjöspecifika faktorer har SMHI utnyttjats. Utöver sjötemperaturmätningar finns vid SMHI ett relativt omfattande djupdataarkiv med djupkartor, vattenföringsdata, genomströmningsbestämningar, isläggnings- och islossningsdata och långa serier av klimatdata av olika slag som lufttemperatur, vind, molnighet etc. Det bakgrundsmaterial som framtagits av SMHI omfattar dels en sammanställning av data för 85 sjöar, dels datalistor med sjöspecifika data. SMHI:s sammanställning redovisas i bilaga 12 och en sammanfattning av denna i kapitel 3.6.

Med hjälp av ett amerikanskt dataprogram, ursprungligen framtaget vid University of California, Los Angeles, (UCLA) har ett numeriskt samband framtagits. Det numeriska sambandet innebär att lägsta värmeinnehållet i en sjö kan bestämmas med tillfredsställande noggrannhet enbart med utgångspunkt från sjöns area, volym, maxdjup samt årsmedeltemperaturen för orten ifråga.

Temperaturvariationen för sjöar, sammanställning av mätdata samt den numeriska metoden med angivande av noggrannhet och användningsområden redovisas i kapitel 3. De speciella förhållanden som gäller för havet som värmekälla redovisas översiktligt i kapitel 4.

Vid tiden för förstudien åren 1977 och 1978 var den tekniskt sett begränsade faktorn de värmeväxlarkonstruktioner som då fanns kommersiellt tillgängliga för utvinning av lågvärdig värme ur vätskor nära

frysunkten. De system som var allmänt förhärskande i de fåtaliga applikationerna vid denna tid var av typen tubpannor med sjövattnet utanpå rören. Denna värmeväxlartyp är konventionell och fungerar väl i många sammanhang men har den nackdelen att den inte enkelt kan användas utan risk för påfrysning. Av detta skäl sattes som villkor i förstudien att lägsta ingående vattentemperatur skulle vara  $+3^{\circ}\text{C}$ . Då flertalet sjöar under vissa villkor har lägre bottenvattentemperatur än  $+3^{\circ}\text{C}$  innebär detta att sjöar inte generellt kunde sägas vara lämpliga för åretrunt-drift med värmepumpar.

Utvecklingen har under senare år varit mycket snabb på detta område. Flera konstruktioner av värmeväxlare som löser detta problem har framtagits och provats praktiskt. Arbetet inom huvudstudien har därefter inriktats på att redovisa tillgängliga värmeväxlare med funktion och erfarenheter. Detta göres i kapitel 7, Värmeupptagare, där även s.k. isvärmväxlare behandlas.

I förstudien konstaterades att med känd teknik var havsvatten lämpligare som värmekälla än sjövattnet.

Detta medförde att kapitlet om korrosion i förstudien till stor del kom att handla om korrosionsproblem vid havsvattenförande system. Korrosionsproblemen är avsevärt mindre med sötvattenssystem, men en fylligare studie av problemen har även ansetts nödvändig för att optimera materialval och lämpliga skyddsåtgärder. Även här redovisas vissa erfarenheter. Korrosion behandlas i kapitel 5.

Päväxt på värmeväxlarytor och i rörledningar för sjövattnet behandlas relativt litet i förstudien. För att närmare kunna bedöma sjöars lämplighet har litteraturstudier genomförts och kontakter tagits med personer



som forskar eller arbetar med dessa frågor. Påväxt och avlagringar som dimensioneringsproblem redovisas i kapitel 6.

## 2.5 Referensgrupp och övriga kontaktpersoner

Under arbetet har en referensgrupp tillkallats för att följa och vara rådgivande till projektet. Gruppen har förutom författarna bestått av följande personer:

|                  |   |
|------------------|---|
| Malin Falkenmark | Naturvetenskapliga forskningsrådet                  |
| Sven-Erik Lundin | BFR   |
| Palne Mogensen   | Palne Mogensen AB                                   |
| Jan-Erik Nowacki | Studsvik Energiteknik AB<br>Thermia Energiteknik AB |
| Bengt Vasseur    | SMHI<br>Statens Vattenfallsverk                     |

Gruppen har mötts tre gånger. En förhandskopia av manuset har varit utsänt till gruppen för kommentarer, som beaktats i den slutliga upplagan. Något avslutande sammanträde har inte ägt rum av tidsskäl. Författarna vill i detta sammanhang tacka referensgruppen för hjälp och stöd under arbetet.

Under arbetet har kontakter tagits med ett stort antal personer verksamma vid företag, myndigheter och forskningsinstitutioner. Vi vill även framföra vårt tack till dessa personer utan vars hjälp arbetet varit svårt att genomföra.

## 3 SJÖAR, TEMPERATUR OCH VÄRMEINNEHÅLL

## 3.1 Sjöars utbredning

Sverige är ett mycket sjörikt land. Av landets totala yta på 449 682 km<sup>2</sup> utgör sjöarealen ca 40 000 km<sup>2</sup>. När det gäller fördelningen av sjöar i landet framgår den av bilaga 1 som visar en topografisk karta över Sverige med de flesta sjöarna inlagda. De minsta sjöarna har överdimensionerats för att bli läsliga. I fjälltrakterna däremot ger kartan ett intryck av mindre sjöfrekvens än verkligheten.

I sammanställningen nedan har sjöarna grupperats efter sjöyta.

De största sjöarna

|           |   |
|-----------|---|
| Vänern    | } Antal: 4 st<br>Sjöareal: 9 074 km <sup>2</sup> = 24 % av total sjöyta |
| Vättern   |   |
| Mälaren   |   |
| Hjälmaren |   |

Övriga sjöar med yta >100 km<sup>2</sup>

Antal: 22 st  
Sjöareal: 4 034 km<sup>2</sup> = 11 % av total sjöyta

Sjöar med 1 km<sup>2</sup> < yta ≤ 100 km<sup>2</sup>

Antal: 3 900 st  
Sjöareal: 17 300 km<sup>2</sup> = 46 % av total sjöyta

Sjöar med en yta ≤ 1 km<sup>2</sup>

Antal: 80 000 st  
Sjöareal: 6 900 km<sup>2</sup> = 19 % av total sjöyta

### 3.2 Temperaturens årstidsvariation

Sjöarna i vårt land är alla s k tempererade sjöar. Med detta menas att yttemperaturen är över  $+4^{\circ}\text{C}$  på sommaren och under  $+4^{\circ}\text{C}$  på vintern.

I en tempererad sjö följer temperaturförloppet under ett år följande schema:

#### Uppvärmningsperioden

Vid islossning är vattentemperaturen under  $+4^{\circ}\text{C}$  och vattnet har invers temperaturskiktning, dvs kallt vatten vilar över varmt (bilaga 2). Eftersom densitetsskillnaderna mellan vattenskikten är mycket små vid dessa temperaturer kan vinden lätt åstadkomma temperaturutjämning genom konvektion. I bilaga 5 visas en densitetskurva över rent vatten.

Uppvärmningen av en sjö på våren sker huvudsakligen genom solinstrålning. Värmetillförseln är därför betydligt större under klara dagar än under molniga.

Det från solen instrålade värmnet absorberas i ett tämligen tunt ytskikt som på grund av uppvärmningen får ökad densitet (upp till  $4^{\circ}\text{C}$ ) och därmed ger upphov till en tredje konvektionsrörelse. En densitetsbetingad vertikal vattentransport uppkommer.

Allt eftersom temperaturen stiger i ytvattnet, och därmed densiteten, börjar vattnet cirkulera.

#### Värcirkulationen (inträffar normalt i april).

När ytvattnet nått en temperatur av ca  $4^{\circ}\text{C}$  har hela vattenmassan samma temperatur och därmed inträder värcirkulationen. (Se bilaga 3).

### Sommarstagnationen (maj-oktober)

Då temperaturen stiger över  $4^{\circ}\text{C}$  kommer ytvattnet alltförst eftersom det uppvärms att bli lättare än det underliggande kalla vattnet. På detta sätt uppstår en temperaturlagad skiktning med det varma vattnet över det kalla.

Allt eftersom temperaturen stiger ökar densitetsskillnaden mellan de olika skikten och det s k språngskiktet bildas. Härigenom hindras konvektionsrörelserna att tränga djupare ned. Eftersom värmeledningen när det gäller vatten är en för långsam process för att ha någon betydelse, avstannar uppvärmningen av djupvattnet, som härmed får en för sommaren konstant temperatur. Sjön kan då anses fullt uppdelad i tre skikt:

- det varma ytskiktet (epilimnion)
  - språngskiktet (metalimnion)
  - bottenskiktet (hypolimnion)
- (se bilaga 2 och 4)

Språngskiktet uppkommer under en period med stor instrålning då lufttemperaturen är i kraftig stigning. I språngskiktet är temperaturgradienten i djupled mycket kraftig, definitionsmässigt  $\geq 1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ .

Hypolimnion berörs efter det att språngskiktet utbildats, mycket lite av klimatförändringarna ovanför sjön. Temperaturen i detta skikt bestäms av förhållandet mellan islossning och tiden fram till att ett språngskikt bildats. Den faktor som förutom solinstrålningen har betydelse för detta är vinden. Ju kallare ytvattnet kan hållas desto mer värme kommer sjön att uppta. Vindomblandningen gör att en större vattenmassa tangerar ytan och därmed kan värmas upp.

### Avkylningsperioden

Allt eftersom ytvattnets temperatur sänks sjunker språngskiktet mot botten, varefter det till sist försvinner. Därefter avkyls vattnet till dess att samma temperatur råder i hela sjön, då höstcirkulationen inträder.

### Höstcirkulationen (september-oktober)

Samma temperatur råder i hela vattenmassan. Under en längre eller kortare tid pågår då fullständig cirkulation i hela vattenmassan.

När sedan avkylningen fortsätter och vattnet skiktas densitetsmässigt, kommer vattnet i sjön att passera det stadium när i stort sett hela sjön har en temperatur av ca 4°C, se bilaga 3 och 4. Ytterligare temperatur-sänkning medför en omvänd temperaturskiktning med kallare vatten ovanför varmare bottenvatten. Efter detta kan isläggning ske.

### Vinterstagnationen

Vattentemperaturen under vintern bestäms av vädret under tiden före isläggnings. Vinden har stor inverkan på vilken temperatur vattnet kommer att få under vintern. En stark omblandning av vattnet under denna tid kommer att medföra att vattnet hinner kylas kraftigt innan sjön isläggs. Perioden från höstcirkulationen fram till isläggningsen bestämmer således värmeinnehållet och temperaturen i sjön vid isläggningsen. De faktorer som då har betydelse är, som nämnts i kap 2, framförallt yta och vindförhållanden.

Isläggningsen sker vanligen när lufttemperaturen har sjunkit under 0°C en vindstilla natt med stor utstrålning. Tidig isläggning medför att vattentemperaturen blir hög. Anledningen till detta är att isen fungerar

som ett lock som hindrar vattnet från att avkylas genom att värmeavgivningen till luften begränsas.

Cirkulationsprocessen i en istäckt sjö skiljer sig väsentligt från den som äger rum under den icke isbelagda tiden. Andra strömningsmekanismer uppkommer.

Värmen som transporteras till sedimentet under den varma delen av året, återförs nu tillbaka till vattnet och höjer därmed temperaturen på vattnet.

På grund av att vattnets densitet är störst vid  $+4^{\circ}\text{C}$  kommer vatten med ungefär denna temperatur att befinna sig på det största djupet (bilaga 5). Under vintern uppstår därmed en termisk skiktning som hindrar vattenutbyte mellan botten och ytan. På våren och hösten då ytvattnet uppvärms respektive avkyls får som tidigare nämnts hela vattenmassan samma temperatur under en kortare tid.

Värmeflödet från sedimentet är som störst alldeles efter isläggningen och kan då ge en värmeförlust av  $1-4 \text{ W/m}^2$ . Några meter in i sedimentet är temperaturen i det närmaste konstant ca  $7^{\circ}\text{C}$  oavsett på vilket djup det ligger, se bilaga 6.

Det är inte vattnet på sjöns djupaste ställe som har den högsta temperaturen, utan detta återfinns i regel i grundare områden. En förklaring till detta kan vara att värmeinnehållet i sedimentet på mindre djup är relativt högt i jämförelse med sedimentet på djupare områden eftersom detta är i kontakt med varmare vatten under sommarperioden (bilaga 7).

Bilaga 3, 4, 6 och 7 visar temperaturfördelningen i två sjöar under olika tider på året. En intressant iakttagelse som tidigare påtalats är att bottentemperaturen i en grund fjärd eller sjö är högre än i en djup.

Solstrålningen är den meteorologiska faktor som har den största betydelsen för vattentemperaturen under isen. Som exempel kan nämnas att en 50 cm tjock kärnis tillåter en ljustransmission av 40 % av solinstrålningen. Luftblåsor nedsätter däremot transmissionen avsevärt. Av största betydelse är därför att det finns ett snötäcke på isen, eftersom snö reflekterar ca 70 % av instrålningen, medan is och vatten reflekterar 10 %.

Värmetillförseln genom tillrinning balanseras i regel genom avrinning.

Effektbehovet för uppvärmning är störst när temperaturen i sjöar är som lägst. Detta faktum gör att den användbara vattenmängden blir mycket begränsad.

Ur figurerna i bilaga 7 framgår också att vattnets temperatur kan variera mycket år från år.

### 3.3 Värmeomsättning

Värmeutbytet för en sjö sker i första hand med atmosfären och i viss mån med sedimentet. Speciellt gäller detta i grunda sjöar där temperaturväxlingarna ovanför sedimentet är stora.

I en noggrann studie över värmebudgeten för en sjö ingår följande termer:

Värmetillskott

|  |          |
|--|----------|
| + kortvägig strålning: direkt solstrålning,<br>indirekt diffus himmelstrålning                       | $R_{k+}$ |
| + långvägig strålning: från atmosfären,<br>från angränsande bergsområden                             | $R_{L+}$ |
| + kondensationsvärme (negativ avdunstning)   | $R_{E+}$ |
| + värme genom konvektion och ledning från atmosfären: under perioder då luften är varmare än vattnet | $R_{1+}$ |
| + värme genom ledning från botten: under perioder då vattnet är kallare än sedimenten                | $R_{G+}$ |
| + dessutom tillförs värme med tillflöden   | $R_{i+}$ |

Värmeförluster

|  |          |
|--|----------|
| - kortvägig strålning: reflexion från vattenytan,<br>spridd strålning                | $R_{k-}$ |
| - långvägig strålning: utstrålning från vattenytan                                   | $R_{L-}$ |
| - värmeförlust genom avdunstning   | $R_{E-}$ |
| - överföring av värme med avdunstad vattenånga                                       | $R_{e-}$ |
| - värmeförlust till atmosfären genom ledning och konvektion från vattnet till luften | $R_{1-}$ |
| - värmeförlust till botten genom ledning från vattnet till sedimenten                | $R_{G-}$ |
| - värmeförlust genom avrinnande vatten   | $R_{i-}$ |

Termerna i värmebudgeten grupperas vanligen så att strålningstermerna sammanförs till nettostrålningen sammansatt av en kortvägig och en långvägig del:

$$R_n = R_{k+} - R_{k-} + R_{L+} - R_{L-}$$

(Ur ref 12)



Skillnaden mellan värmetillskott och förluster utgörs av ändringen i värmemagasineringen i sjöns vattenmassa. Totala energibalansen kan då skrivas:

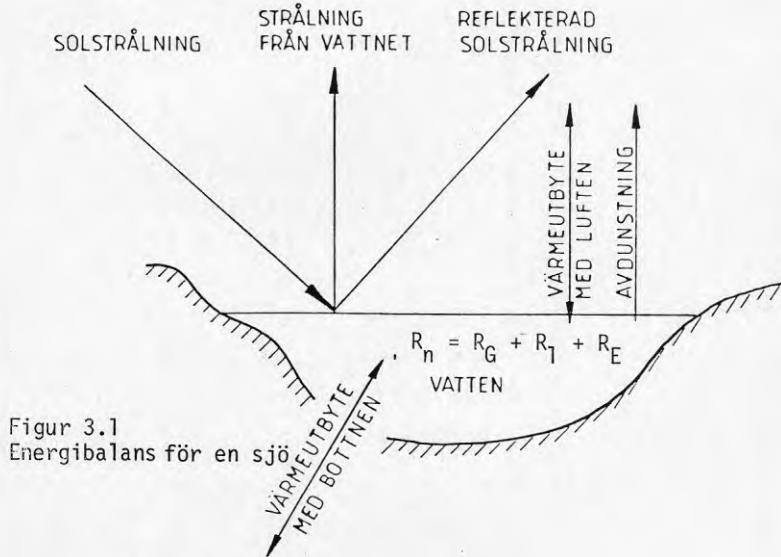
$$\theta = R_n + R_{l+} - R_{l-} + R_{i+} - R_{i-} + R_{E+} - R_{E-} - R_{e-} + R_{G+} - R_{G-}$$

Normalt kan detta uttryck förenklas till:

$$\theta = R_n - R_E - R_l - R_G$$

Över ett år kan värmelagringen i vattnet approximativt sättas lika med noll och uttrycket skrivas:

$$R_n = R_E + R_l + R_G$$



Figur 3.1  
Energibalans för en sjö

Solstrålning

Netto solinstrålning kan beräknas med följande uttryck:

$$R_n = 5,71 \cdot 10^{-8} \left[ T_1^4 \left[ (0,19 + 0,23 \cdot 10^{-5} \cdot 18 \cdot P) (1 - 0,083 \cdot C) - 1 \right] + T_v^4 \right] (\text{W/m}^2)$$

Ur ref 5

$T$  = luft resp vattentemperatur (K)

$C$  = molnighet i tiondelar

$p$  = vattenångans partialtryck (kPa)

index 1 = luft

$v$  = vatten

Sjöytans emissionsfaktor har uppskattats till 94 % av en svart kropp.

### Konvektion

Energiutbytet, genom konvektion kan nöjaktigt beräknas med följande empiriska uttryck (ref 6):

$$R_1 = 2,1 (t_v - t_{12}) \cdot v_6^{0,8} \quad (\text{W/m}^2)$$

$t_v$  = vattentemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_{12}$  = lufttemperatur 2 m ovanför vattenytan ( $^{\circ}\text{C}$ )

$v_6$  = lufthastigheten 6 m över vattenytan (m/s)

Eftersom stora temperaturskillnader förekommer mellan natt och dag varierar värdena mycket över dygnet, samtliga värden skall därför vara dygnsmedelvärden.

### Avdunstning

Det energiutbyte som sker med avdunstning kan beräknas med nedanstående empiriska uttryck (ref 6):

$$R_E = 390 (p_v - p_{12}) \cdot v_6^{0,8} \quad (\text{W/m}^2)$$

$p_v$  = vattenångans mättningsstryck vid vattenytan (kPa)

$p_{12}$  = vattenångans partialtryck i luften 2 m ovanför vattenytan (kPa)

Avdunstningen påverkas framförallt av solinstrålningen och luftens temperatur men även av vindförhållandena.

Luftens partialtryck och vattnets mättnadsstryck är en funktion av temperaturen.

När vinden uppnått en sådan hastighet att allt avdunstat vatten bortförs kommer ytterligare vindökning inte att öka avdunstningen nämnvärt.

Avdunstningen från en vattenyta är störst vid varmt och torrt väder och minst då vattentemperaturen och vindhastigheten är låg. Orsaken till detta är att när luften är varm är mättningsångtrycket hos vattnet högt och ångtrycket i luften lågt. Avdunstningen är därmed kraftigast under vintern.

Sjöns djup har stor betydelse för avdunstningsförhållandet eftersom förskjutningen mellan ytvattnets temperatur och temperaturen på djupare vatten ökar i en djup sjö. När sjön avkyls på hösten avges energin i de djupaste vattnet, delvis i form av avdunstning. Se figur 3.2.

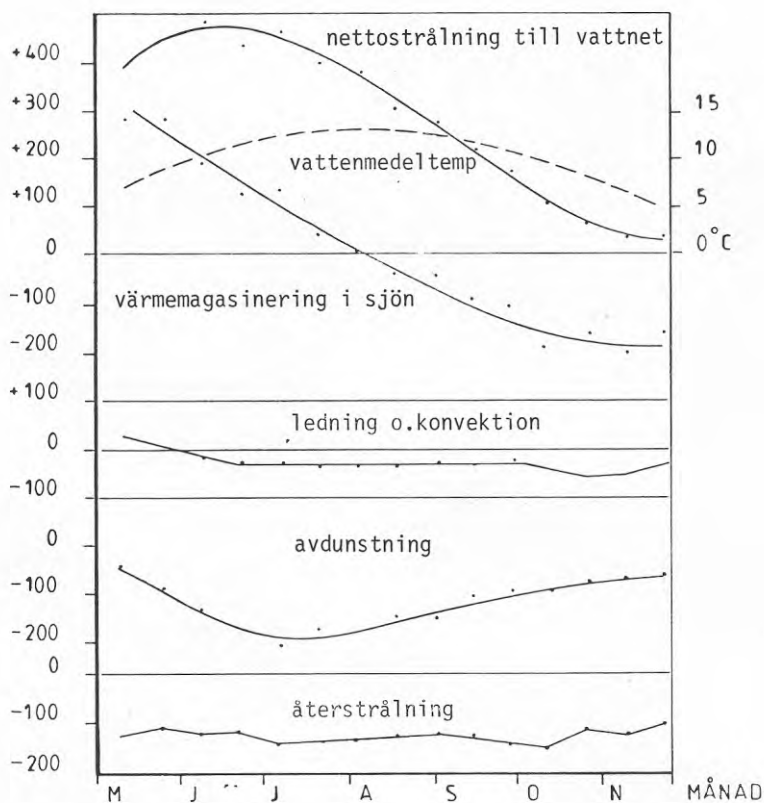
Även sjöns yta påverkar avdunstningen genom att avdunstningen per ytenhet minskar när ytan ökar. Detta beror på att luften successivt blir mättad när den transporteras över ytan.



Figur 3.2  
Avdunstning från en grund resp djup sjö  
Ur ref 12

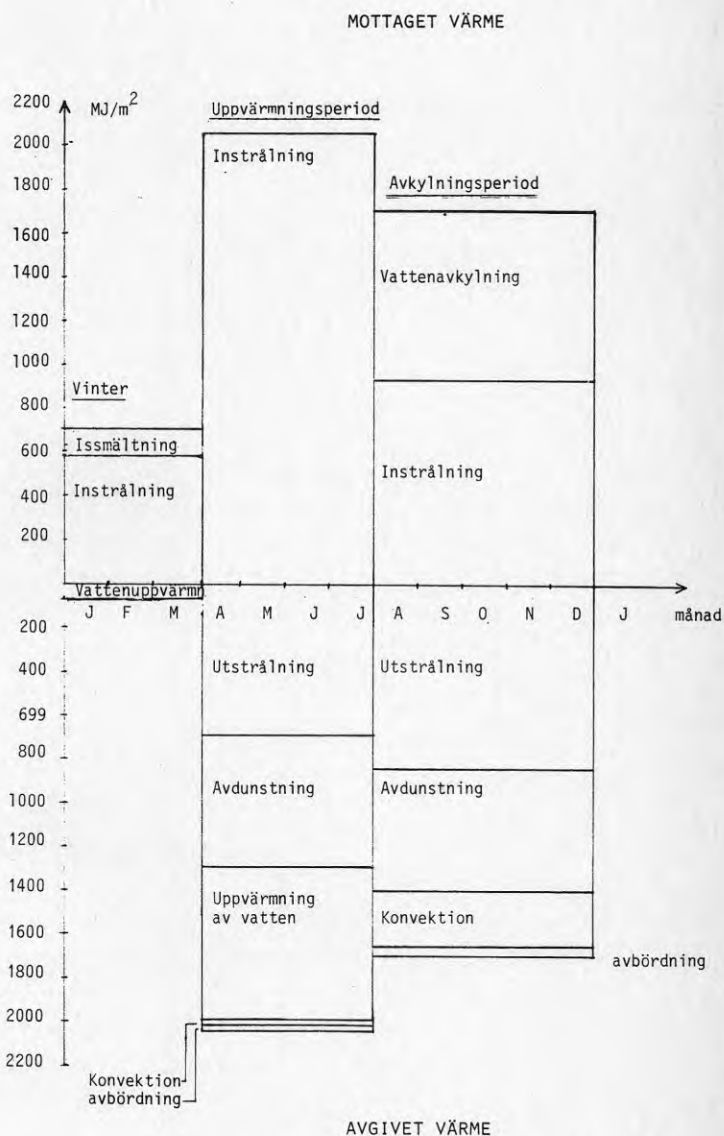
Variationer för de olika posterna över året i sjön Klämningen, som är en relativt grund sjö, framgår av figur 3.3 nedan.

cal/cm<sup>2</sup>, dygn



Figur 3.3 Värmebudget för en sjö (1 cal/cm<sup>2</sup>, dygn = 0,48 W/m<sup>2</sup>)  
Ur ref 5

I figuren 3.4 nedan visas värmebudgeten för sjön Klämmingen, uppdelat på olika poster. Som framgår är instrålning, utstrålning, avdunstning och värmeupptagning i vattenmassan de dominerande posterna.



Figur 3.4 Värmebudget för en sjö

### 3.4 Värmeinhåll

Vid uppvärmningen under våren och sommaren upptar sjön enorma mängder energi som sedan avges under hösten före isläggningen. Det största värmeinhållet uppnås i början av hösten och det lägsta strax efter isläggningen. Skillnaden mellan dessa två ytterlighetsvärden är sjöns värmeomsättning. I tempererade områden varierar denna mellan  $170 \text{ kWh/m}^2$  och  $600 \text{ kWh/m}^2$ .

Värmeinhållet under vintertid som ofta är den begränsade faktorn för värmepumptillämpningen varierar mycket kraftigt mellan olika år. I bilaga 8 visas värmeinhållet i en sjö under 2 år. Under sommaren är värmeinhållet däremot relativt lika år från år.

Värmeuttag på sommaren är ingen begränsande faktor eftersom en sänkning av ytvattnets temperatur gör att sjön tar upp mer värme från luften, eftersom temperaturskillnaden ökar, samtidigt som avdunstningen minskar. På detta vis ställer sjön in sig på en ny, endast något lägre, medeltemperatur.

Uttag av värme under islagd tid är den dimensionerande faktorn för sjön som värmekälla eftersom värmetillskottet under denna period endast utgör värme från sedimentet. Denna varierar, beroende på sjöns djup och typ av sediment, mellan 1 och  $4 \text{ W/m}^2$ .

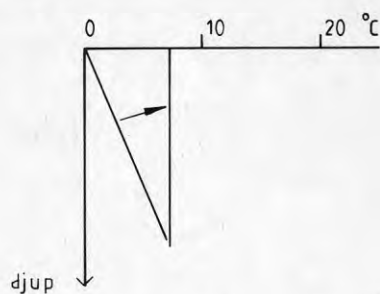
Ett värmeuttag i den storleksordningen torde därmed vara av mindre betydelse för sjön, och kan användas som ett riktmärke för minsta värmeuttag i brist på noggranna uppgifter om sjön. I kapitel 3.7 tas en empirisk formel fram för beräkning av värmeinhållet i en sjö.

Figur 3.5 nedan visar en schematisk uppläggning över en sjös olika perioder med värmeinhållet under respektive period och tillförd (+) och avgiven effekt från sjön (-).

## VÅRCIRKULATION



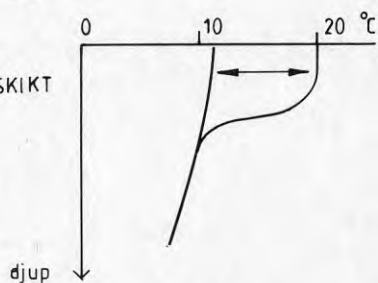
TOTALT : 25 kWh/m<sup>2</sup> — 65 kWh/m<sup>2</sup>  
 EFFEKT : + 2 kWh/m<sup>2</sup>, dygn  
 + 83 W/m<sup>2</sup>



## SOMMARSTAGNATION



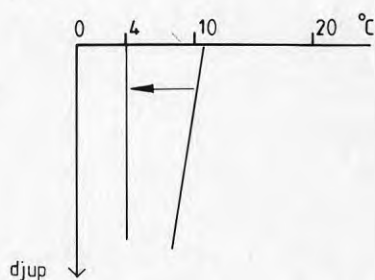
TOTALT : 65 kWh/m<sup>2</sup> — 120 kWh/m<sup>2</sup> — 80 kWh/m<sup>2</sup>  
 EFFEKT : ± 0,6 kWh/m<sup>2</sup>, dygn  
 ± 25 W/m<sup>2</sup>



## HÖSTCIRKULATION



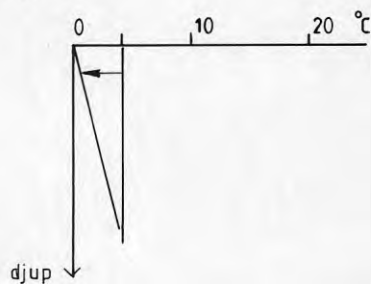
TOTALT : 80 kWh/m<sup>2</sup> — 30 kWh/m<sup>2</sup>  
 EFFEKT : -1,5 kWh/m<sup>2</sup>, dygn  
 -62,5 W/m<sup>2</sup>



## NEDKYLNINGSPERIOD



TOTALT : 30 kWh/m<sup>2</sup> — (9-21) kWh/m<sup>2</sup>  
 EFFEKT : -0,5 kWh/m<sup>2</sup>, dygn  
 -20,8 W/m<sup>2</sup>



## ISLAGD TID



TOTALT : 9-21 kWh/m<sup>2</sup> — 25 kWh/m<sup>2</sup>  
 EFFEKT : +0,1 kWh/m<sup>2</sup>, dygn  
 +4 W/m<sup>2</sup>

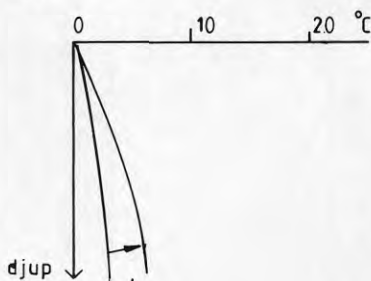


Fig. 3.5  
 EXEMPEL PÅ EN SJÖS VÄRMEINNEHÅLL ÖVER ÅRET

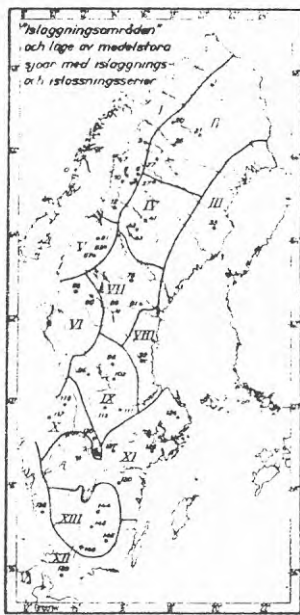
### 3.5 Speciella förhållanden

#### Isläggning och islossningstidpunkter

I princip kan landets sjöar indelas i 13 st s.k. isläggningsområden (ref.14). Kriteriet för detta är huvudsakligen höjdläge och klimat. Övriga faktorer som påverkar isläggning och islossningstidpunkter är: area, djup, form och karaktär av genomströmnings- eller källsjö. Detta har dock inte beaktats i det material som här beskrivs. Inom de olika områdena har sjöarna indelats i 3 st grupper efter storlek (yta):

|                  |  |
|------------------|--|
| små sjöar        | $yta \leq 10 \text{ km}^2$                   |
| medelstora sjöar | $10 \text{ km}^2 < yta \leq 50 \text{ km}^2$ |
| stora sjöar      | $yta > 50 \text{ km}^2$                      |

Figur 3.6 nedan visar indelningen i de 13 områdena och tabellen visar medelvärdet för de olika områdenas isläggnings- och islossningstidpunkter.



Figur 3.6  
Isläggnings- och islossningsområden  
Ur ref 14.



| <u>Område</u> | <u>Isläggnings-<br/>tidpunkt</u> | <u>Islossnings-<br/>tidpunkt</u> |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|
| I             | 14/12                            | 9/6                              |
| II            | 7/12                             | 6/6                              |
| <u>III</u>    | <u>27/11</u>                     | <u>17/5</u>                      |
| IV            | 18/12                            | 24/5                             |
| V             | 31/12                            | 24/5                             |
| <u>VI</u>     | <u>4/11</u>                      | <u>21/5</u>                      |
| VII           | 8/12                             | 16/5                             |
| VIII          | 17/12                            | 1/5                              |
| <u>IX</u>     | <u>6/12</u>                      | <u>4/5</u>                       |
| X             | 12/12                            | 19/4                             |
| XI            | 28/12                            | 12/4                             |
| XII           | 15/1                             | 1/4                              |
| XIII          | 30/12                            | 10/4                             |

Med isläggningstidpunkt avses här den tidpunkt då en sjö är helt islagd. Islossningstidpunkt räknas när sjön blir helt isfri.

Övriga förhållanden som kan nämnas när det gäller isläggning och islossning är att tidpunkten för isläggning uttryckt i dagar från det lufttemperaturen sjunkit under  $0^{\circ}\text{C}$  beror på medeldjupet. Detta kan förklaras med att värmeinnehållet i en sjö är en funktion av volymen medan värmeavgivningen är en funktion av ytan, eftersom det är där värmeavgivningen sker.

Variationen med medeldjupet motsvarar för grunda sjöar ca 1 dags försening av isläggning vid 1 meters ökning av medeldjupet.

För sjöar med stora medeldjup blir naturligtvis inverkan mindre. Är sjön mycket djup finns inget direkt samband beroende på att årstidsvariationerna inte går ner på så stora djup (>100 m).

En allmän regel är att islossning sker vid samma tid i såväl stora som små sjöar. Grundare sjöar isläggs däremot tidigare än djupa.

### 3.6 Sammanställning av statistiskt material

Här följer en sammanställning av olika delar från SMHI:s material som använts vid regressionsanalysen. I bilaga 12 redovisas rapporten i sin helhet.

Vintertemperaturmätningar finns från mer än 200 sjöar, varav ca 40 söder om Ljusnan. Bland dessa sjöar har 85 valts ut för denna studie på följande grunder:

- \* antal vintrar med temperaturdata skall vara fem eller mer
- \* den geografiska spridningen skall vara så stor som möjligt
- \* tillgång på djupkartor eller hypsografiska kurvor (area som funktion av djup)

Mätningarna har i regel utförts två gånger per år: en gång på högsommaren och en gång mitt i vintern. Temperaturen mäts på flera nivåer mellan yta och botten, där sjöns djup är stort, sannolikt det största djupet i sjön.

Sjöns läge representeras av dess utlopp och anges, med koordinater i rikets nät, vilket bl a återges med svarta koordinatvärden i ramen på vanliga svenska topografiska kartor.

Sjöarnas geografiska läge återges på kartan nedan.



## Datamaterial

För samtliga 85 sjöar har uppgifter om area, maxdjup, höjd över havet, älvnr, sjönamn, utloppskoordinater i rikets nät, samt temperaturdata sammanställts.

Tabellen nedan (figur 3.7) innehåller uppgifter om sjöarna. Rubrikerna står för följande: Löpnr kopplat till sjöns namn och är enbart ett internt nummer för denna studie: Älvnr anger till vilket flodsystem sjön hör. Arean anges i  $\text{km}^2$ , volymen i miljoner  $\text{m}^3$ .

Maxdjup ( $Z_{\text{max}}$ ) är sjöns största kända djup eller det största observationsdjupet. Medeldjup ( $Z_{\text{med}}$ ) är beräknat från beräknad volym och känd area. Höjd över havet ( $h \text{ ö } h$ ) anger grovt sjöytans läge i förhållande till havsytan. (Dämningsgränser innebär vissa avvikelser från detta). Två rubriker värme innebär värmeinnehållet per ytenhet baserad på två olika temperaturer dels standardtemperatur dels medeltemperatur.

## Djupuppgifter

En sjös volym, area och djupfördelning beskrivs av dess hypsografiska kurva. Den hypsografiska kurvan visar hur stor area sjön upptar på olika djup. Ytan mellan kurvan och djup- respektive area-axlarna bestämmer sjöns volym. För ungefär hälften av de utvalda sjöarna har SMHI färdiga hypsografiska kurvor, och för en stor del av de övriga finns djupkartor i någon form. Av dessa har hypsografiska kurvor bestämts för ca 20 st. För resterande 23 sjöar har en "standardhypsografisk kurva" använts. Denna har fått en mycket enkel matematisk form:

$$A(Z) = A(0) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{Z}{Z_{\text{max}}} \right) \right]^2$$

## Uppgifter om behandlade sjöar:

| Löpnr | Sjönamn         | Koordinater   | Xlvnr | Area            | Volym               | Zmax  | Zmed | h.ö.h | Värme              | Värme              | Hyps | Obs   |
|-------|-----------------|---------------|-------|-----------------|---------------------|-------|------|-------|--------------------|--------------------|------|-------|
|       |                 |               |       | km <sup>2</sup> | milj.m <sup>3</sup> | m     | m    | m     | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> |      | antal |
| 1     | NORPPA BULLAREN | 653621 125388 | 112   | 7.2             | 144.0               | 38.0  | 20.0 | 38.4  | 38.7               | 50.4               | JA   | 11    |
| 2     | LILLA LE        | 653868 127677 | 110   | .8              | 18.6                | 53.0  | 23.2 | 135.0 | 46.7               | 64.1               | JA   | 11    |
| 3     | STORA ROJDEN    | 570122 132468 | 108   | .5              | 3.7                 | 18.5  | 6.7  | 280.0 | 1.6                | 7.1                | JA   | 6     |
| 4     | KLAGGEN         | 668533 133549 | 108   | 3.7             | 26.7                | 22.0  | 7.3  | 87.8  | 3.1                | 10.3               | JA   | 9     |
| 5     | BVRE FRYKEN     | 664198 135102 | 108   | 41.5            | 2012.7              | 109.0 | 48.5 | 62.1  | 83.9               | 106.9              | JA   | 7     |
| 6     | NYSOCKENSJÖN    | 662458 131298 | 108   | 17.7            | 136.1               | 21.0  | 7.7  | 70.2  | 2.2                | 6.0                | JA   | 5     |
| 7     | GLAJSFJORDEN    | 658476 132962 | 108   | 85.7            | 1530.5              | 39.0  | 17.9 | 45.2  | 15.2               | 24.5               | JA   | 5     |
| 8     | RSUNDEN         | 639725 135212 | 103   | 31.5            | 283.3               | 40.5  | 9.0  | 164.0 | 4.6                | 11.3               | JA   | 10    |
| 9     | ODENSJÖN        | 621133 134220 | 96    | .0              | .1                  | 20.0  | 9.3  | 59.9  | 31.7               | 34.4               | JA   | 8     |
| 10    | IVOSJÖN         | 621669 141629 | 87    | 66.2            | 637.9               | 50.0  | 9.6  | 5.8   | 4.7                | 12.4               | JA   | 7     |
| 11    | IMMELN          | 624180 141251 | 87    | 23.9            | 178.5               | 28.0  | 7.5  | 81.0  | 8.5                | 12.2               | JA   | 7     |
| 12    | YXEPN           | 639176 152040 | 71    | 17.3            | 146.1               | 25.0  | 8.4  | 92.5  | 5.1                | 9.9                | NEJ  | 7     |
| 13    | UNDEN           | 651567 141795 | 67    | 95.1            | 2935.1              | 96.0  | 30.9 | 116.8 | 10.0               | 45.4               | JA   | 5     |
| 14    | VANSJÖN         | 580231 137127 | 53    | 2.5             | 7.8                 | 9.0   | 3.1  | 437.5 | 3.3                | 5.7                | JA   | 8     |
| 15    | MORRMUNDSJÖN    | 580267 135829 | 53    | 9.9             | 32.5                | 9.5   | 3.3  | 440.0 | 1.4                | 3.8                | JA   | 8     |
| 16    | VXXSJÖN         | 680926 153196 | 48    | 4.7             | 25.9                | 16.6  | 5.6  | 85.0  | .0                 | .3                 | JA   | 6     |
| 17    | VIKARSJÖN       | 691977 139412 | 48    | 6.1             | 157.5               | 55.3  | 25.9 | 403.0 | 21.1               | 37.8               | JA   | 17    |
| 18    | VAPPEN          | 679885 153715 | 48    | 7.6             | 29.7                | 14.2  | 3.9  | 50.6  | .0                 | .0                 | JA   | 6     |
| 19    | TEVSJÖN         | 683325 152835 | 48    | 7.8             | 68.3                | 29.7  | 8.7  | 112.1 | .6                 | 2.6                | JA   | 10    |
| 20    | BVRE RANSJÖN    | 690235 139845 | 48    | 1.3             | 4.9                 | 12.9  | 3.2  | 400.7 | .0                 | .0                 | JA   | 8     |
| 21    | NEDRE RANSJÖN   | 589873 139871 | 48    | 1.9             | 8.3                 | 18.4  | 4.4  | 400.7 | .0                 | .0                 | JA   | 9     |
| 22    | ORTEN           | 690646 139743 | 48    | 2.6             | 15.0                | 22.7  | 5.7  | 401.2 | .0                 | .0                 | JA   | 6     |
| 23    | ORSJÖN          | 682527 153073 | 48    | 25.0            | 511.0               | 60.0  | 20.4 | 112.1 | 14.1               | 23.8               | NEJ  | 10    |
| 24    | MARNAN          | 679231 156470 | 48    | 18.5            | 168.3               | 27.0  | 9.1  | 37.5  | .1                 | .4                 | NEJ  | 10    |
| 25    | KYRSJÖN         | 681950 153088 | 48    | 4.4             | 17.7                | 11.9  | 4.0  | 111.7 | .0                 | .0                 | NEJ  | 6     |
| 26    | FLASTASJÖN      | 681274 153278 | 48    | 2.0             | 8.0                 | 11.9  | 4.0  | 91.7  | .0                 | .0                 | NEJ  | 7     |
| 27    | BERGVIKEN       | 679413 155519 | 48    | 42.3            | 570.8               | 40.0  | 13.5 | 45.0  | 1.2                | 3.1                | NEJ  | 10    |
| 28    | STÖDESJÖN       | 691855 155480 | 42    | 15.9            | 403.4               | 87.0  | 25.4 | 50.4  | 27.1               | 39.7               | JA   | 13    |
| 29    | STORPSJÖN       | 696633 136939 | 42    | 24.2            | 236.2               | 29.0  | 9.8  | 565.0 | 11.4               | 17.8               | NEJ  | 8     |
| 30    | RATANSJÖN       | 593109 143914 | 42    | 5.2             | 45.6                | 26.0  | 8.8  | 351.0 | 6.1                | 9.1                | NEJ  | 13    |

| Löpnr | Sjönamn        | Koordinater              | Xlvnr         | Area             | Volym               | Zmax            | Zmed            | h.ö.h            | Värme              | Värme              | Hyps           | Obs           |
|-------|----------------|--------------------------|---------------|------------------|---------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------------|
|       |                |                          |               | km <sup>2</sup>  | milj.m <sup>3</sup> | m               | m               | m                | kWh/m <sup>2</sup> | kWh/m <sup>2</sup> |                | antal         |
| 31    | NÄSTELSJÖN     | 693816 143164            | 42            | 6.9              | 62.8                | 27.0            | 9.1             | 353.9            | 6.9                | 10.7               | NEJ            | 12            |
| 32    | LÄNNASSJÖN     | 694806 141776            | 42            | 8.5              | 58.6                | 26.7            | 6.9             | 437.0            | 2.3                | 5.1                | JA             | 13            |
| 33    | LOCKNESJÖN     | 697911 145602            | 42            | 27.2             | 525.8               | 57.0            | 19.3            | 327.6            | 16.3               | 30.0               | NEJ            | 11            |
| 34    | HOLMSJÖN       | 692346 148199            | 42            | 27.7             | 240.9               | 21.0            | 8.7             | 240.0            | 5.9                | 11.0               | JA             | 15            |
| 35    | BORGESJÖN      | 693534 150617            | 42            | 3.7              | 16.0                | 19.0            | 4.3             | 112.0            | .0                 | .5                 | JA             | 11            |
| 36    | STORSJÖN       | 702172 143255            | 40            | 464.0            | 8077.4              | 74.0            | 17.4            | 290.5            | 5.3                | 13.1               | JA             | 26            |
| 37    | NÄLDSJÖN       | 702728 142174            | 40            | 41.9             | 439.6               | 31.2            | 10.5            | 302.1            | 6.4                | 14.3               | NEJ            | 15            |
| 38    | LANDUSJÖN      | 704970 142446            | 40            | 45.5             | 1342.7              | 79.0            | 29.5            | 319.0            | 29.4               | 46.1               | JA             | 15            |
| 39    | KALLSJÖN       | 703362 137894            | 40            | 153.6            | 6214.6              | 137.0           | 40.5            | 380.0            | 24.8               | 45.5               | JA             | 16            |
| 40    | GESUNDEN       | <del>700406 151335</del> | <del>40</del> | <del>30.0</del>  | <del>579.9</del>    | <del>57.0</del> | <del>19.3</del> | <del>203.7</del> | <del>3.7</del>     | <del>7.4</del>     | <del>NEJ</del> | <del>13</del> |
| 41    | HOTAGEN        | 707621 144393            | 40            | 44.8             | 737.7               | 72.0            | 16.5            | 315.0            | 18.5               | 25.5               | JA             | 4             |
| 42    | HÄGGESJÖN      | 708760 142811            | 40            | 15.8             | 317.9               | 65.0            | 20.1            | 321.1            | 16.1               | 27.6               | JA             | 6             |
| 43    | OTTISJÖN       | 706688 145773            | 40            | 15.1             | 160.8               | 35.0            | 10.6            | 494.2            | 1.4                | 7.6                | JA             | 8             |
| 44    | RENGEN         | 710752 141742            | 40            | 19.7             | 444.8               | 55.0            | 22.5            | 344.4            | 9.0                | 21.7               | JA             | 5             |
| 45    | VALSJÖN        | <del>710242 142189</del> | <del>40</del> | <del>9.7</del>   | <del>204.5</del>    | <del>75.2</del> | <del>21.1</del> | <del>331.8</del> | <del>9.5</del>     | <del>22.2</del>    | <del>JA</del>  | <del>6</del>  |
| 46    | ÄCKLINGEN      | 707277 136214            | 40            | 7.7              | 74.9                | 51.0            | 9.7             | 400.9            | 15.4               | 18.6               | JA             | 5             |
| 47    | LILLA JORMSJÖN | 717590 141715            | 38            | 19.8             | 734.6               | 94.0            | 37.1            | 345.0            | 68.6               | 92.7               | JA             | 15            |
| 48    | GUSSVATTNET    | 714835 142824            | 38            | 9.9              | 250.6               | 74.8            | 25.3            | 312.9            | 10.7               | 32.0               | NEJ            | 16            |
| 49    | FÄGELSJÖN      | 713773 145170            | 38            | 12.1             | 496.7               | 94.0            | 40.9            | 293.0            | 22.6               | 44.9               | JA             | 15            |
| 50    | ANKARVATTNET   | 719338 142567            | 38            | 9.3              | 261.5               | 76.6            | 28.1            | 448.7            | 40.8               | 55.0               | JA             | 19            |
| 51    |                | 0 0                      | 0             | 2.6              | .0                  | .0              | .0              | .0               | .0                 | .0                 |                | 0             |
| 52    | HOTINGSJÖN     | 710849 152149            | 38            | 4.1              | 21.4                | 21.0            | 5.3             | 237.0            | .6                 | 1.1                | JA             | 20            |
| 53    | FLÄSJÖN        | <del>711881 150545</del> | <del>38</del> | <del>114.6</del> | <del>2931.8</del>   | <del>94.0</del> | <del>25.6</del> | <del>265.0</del> | <del>29.5</del>    | <del>43.7</del>    | <del>JA</del>  | <del>10</del> |
| 54    | BODUMSJÖN      | 702705 152350            | 38            | 11.7             | 45.0                | 23.0            | 3.8             | 212.0            | 1.0                | 2.5                | JA             | 20            |
| 55    | MALGOMAJ       | 717181 153354            | 38            | 77.3             | 3128.5              | 118.3           | 40.5            | 337.5            | 78.5               | 99.9               | JA             | 20            |
| 56    | BIELITE        | 719999 148727            | 38            | 5.0              | 31.0                | 20.0            | 6.2             | 487.0            | .0                 | .6                 | JA             | 9             |
| 57    | MELGUMSJÖN     | 700543 155787            | 38            | 8.6              | 88.6                | 34.0            | 10.4            | 112.0            | .0                 | .0                 | JA             | 10            |
| 58    | HETUGELN       | 714324 143370            | 38            | 24.9             | 498.2               | 61.7            | 20.0            | 293.0            | 10.4               | 19.9               | JA             | 15            |
| 59    | VXSTRA SILSJÖN | 707396 152907            | 38            | 2.2              | 9.2                 | 19.4            | 4.2             | 197.0            | 7.6                | 10.0               | JA             | 11            |
| 60    |                | 0 0                      | 0             | .0               | .0                  | .0              | .0              | .0               | .0                 | .0                 |                | 0             |

Figur 3.7 Uppgifter om behandlade sjöar

| Löpnr | Sjönamn           | Koordinater   | Xlvnr | Area<br>km <sup>2</sup> | Volym<br>milj.m <sup>3</sup> | Zmax<br>m | Zmed<br>m | h.ö.h<br>m | Värme<br>kWh/m <sup>2</sup> | Värme<br>kWh/m <sup>2</sup> | Hyps | Obs<br>antal |
|-------|-------------------|---------------|-------|-------------------------|------------------------------|-----------|-----------|------------|-----------------------------|-----------------------------|------|--------------|
| 61    | STROMS VATTUDAL   | 708032 149042 | 38    | 163.5                   | 2946.3                       | 74.0      | 18.0      | 285.0      | 15.9                        | 25.1                        | JA   | 16           |
| 62    | VOLGSJÖN          | 716086 154363 | 38    | 23.6                    | 109.4                        | 15.0      | 4.6       | 334.1      | .0                          | .0                          | JA   | 13           |
| 63    | VANGELSDJÖN       | 706648 152408 | 38    | 4.9                     | 18.3                         | 23.1      | 3.7       | 219.0      | .0                          | 1.7                         | JA   | 20           |
| 64    | BVERUMAN          | 731740 146435 | 28    | 75.0                    | 1568.1                       | 83.0      | 20.9      | 520.0      | 5.5                         | 14.6                        | JA   | 14           |
| 65    | VASTANSJÖN-LAISAM | 729320 147860 | 28    | 19.8                    | 187.6                        | 38.5      | 9.5       | 452.6      | 2.6                         | 6.4                         | JA   | 13           |
| 66    | TÄNIVATTNET       | 730366 145885 | 28    | 14.1                    | 350.4                        | 54.0      | 24.8      | 474.0      | 11.7                        | 36.0                        | JA   | 14           |
| 67    | STOPUMAN          | 722188 156091 | 28    | 163.0                   | 4345.5                       | 139.0     | 26.7      | 350.0      | 34.3                        | 47.3                        | JA   | 14           |
| 68    | NEDRE JOVATTNET   | 729356 146651 | 28    | 4.0                     | 28.6                         | 22.0      | 7.2       | 456.0      | 1.9                         | 5.7                         | JA   | 10           |
| 69    | GAUTAJAURE        | 727782 142680 | 28    | 30.7                    | 534.7                        | 63.3      | 17.4      | 439.0      | 11.3                        | 19.7                        | JA   | 13           |
| 70    | DVRE BJÖRKVATTNET | 727529 147653 | 20    | 29.1                    | 896.5                        | 74.0      | 30.8      | 390.0      | 40.7                        | 58.7                        | JA   | 11           |
| 71    | NEDRE BOKSJÖN     | 727176 151437 | 28    | 14.1                    | 419.7                        | 77.0      | 29.8      | .0         | 40.0                        | 57.0                        | JA   | 6            |
| 72    | DVRE BOKSJÖN      | 727825 150614 | 28    | 10.6                    | 259.3                        | 67.0      | 24.5      | 473.0      | 27.2                        | 32.9                        | JA   | 6            |
| 73    | FJOSOKKEN         | 727018 154718 | 28    | 13.5                    | 225.4                        | 64.0      | 16.8      | 409.0      | 22.2                        | 31.0                        | JA   | 7            |
| 74    | UDDJAURE          | 730691 160221 | 20    | 238.3                   | 2350.0                       | 29.3      | 9.9       | 419.2      | 8.3                         | 12.7                        | NEJ  | 16           |
| 75    | STORAVAN          | 728786 160751 | 20    | 171.7                   | 1505.4                       | 26.0      | 8.8       | 418.6      | 8.8                         | 13.0                        | NEJ  | 16           |
| 76    | HORNAVAN          | 733037 159366 | 20    | 251.1                   | 20037.6                      | 221.0     | 79.8      | 425.0      | 188.1                       | 225.3                       | NEJ  | 16           |
| 77    | VAIKIJAURE        | 739833 167769 | 9     | 23.1                    | 85.8                         | 11.0      | 3.7       | 257.7      | .0                          | .0                          | NEJ  | 20           |
| 78    | TJÄMOTISJAURE     | 742618 161833 | 9     | 12.0                    | 117.1                        | 29.0      | 9.8       | 294.0      | 11.6                        | 15.8                        | NEJ  | 26           |
| 79    | SAGGAT            | 742164 160561 | 9     | 35.2                    | 988.8                        | 83.0      | 28.1      | 302.0      | 59.9                        | 71.7                        | NEJ  | 27           |
| 80    | RANDIJAURE        | 740015 165895 | 9     | 48.7                    | 262.6                        | 31.0      | 5.4       | 282.3      | .8                          | 2.3                         | JA   | 18           |
| 81    | PURKIJAURE        | 739758 166711 | 9     | 20.2                    | 121.1                        | 17.7      | 6.0       | 272.0      | .6                          | 2.5                         | NEJ  | 26           |
| 82    | STORA LULFJAURE   | 744265 167316 | 9     | 141.0                   | 1294.2                       | 28.5      | 9.2       | 368.3      | 2.3                         | 4.6                         | JA   | 8            |
| 83    | LANGAS            | 747161 163565 | 9     | 55.0                    | 1468.6                       | 78.8      | 26.7      | 374.0      | 3.1                         | 11.0                        | NEJ  | 23           |
| 84    | KARATS            | 739796 163363 | 9     | 57.8                    | 425.4                        | 31.5      | 7.4       | 414.0      | 9.7                         | 13.3                        | JA   | 10           |
| 85    | HÖLJES D.OMR      | 676382 132326 | 108   | 10.0                    | 227.0                        | 67.0      | 22.7      | 292.0      | 7.3                         | 21.9                        | NEJ  | 13           |
| 86    | HÄSSELEY          | 658080 162871 | 61    | 26.6                    | 614.2                        | 62.5      | 25.1      | .3         | 28.4                        | 41.2                        | JA   | 5            |
| 87    | TRANGSLETS D.OMR  | 680914 138954 | 53    | 30.0                    | 1012.8                       | 100.0     | 33.8      | 415.0      | 54.3                        | 79.9                        | NEJ  | 11           |

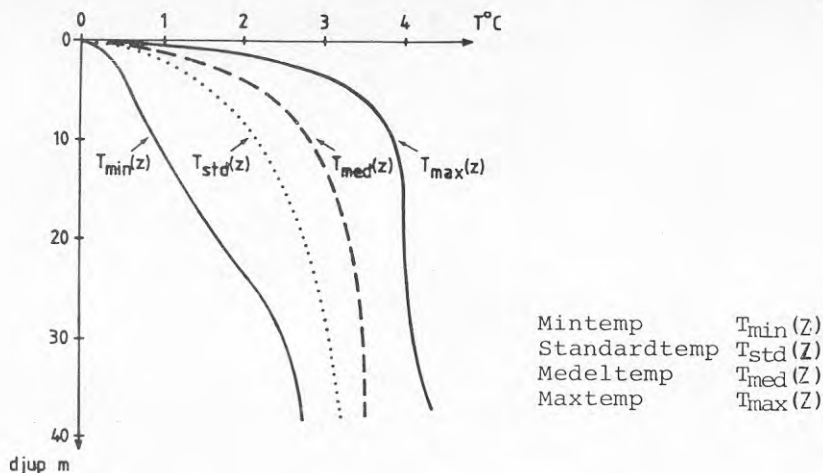
Figur 3.7 Uppgifter om behandlade sjöar

där  $A(Z)$  betyder arean på djupet  $Z$ ,  $A(0)$  arean vid vattenytan,  $Z$  djupet och  $Z_{\max}$  sjöns största djup. Genom att presentera areor och djup i förhållande till sjöns area vid ytan respektive djupet i förhållande till sjöns maxdjup kan alla sjöars hypsografiska kurvor presenteras med jämförbart omfång.

I studien ingår enbart vintertemperaturdata. Dessa data har sammanställts så att värden från 15 djupnivåer erhållits (1,2,4,6,8,10,15,20,25,30,40,60,80,100 samt största observationsdjup i m). I de översta tio metrarna är upplösningen finare därför att där är den vertikala temperaturgradienten störst.

För varje sjö och fastställd nivå beräknades den vertikala fördelningen och medeltemperatur, maxtemperatur, mintemperatur och standardavvikelse, vilka behövs för att kunna beräkna sjöns värmeinhåll under olika förhållanden. En "standardtemperatur" konstruerades genom att standardavvikelsen drogs från medeltemperaturen. I grova drag skulle standardtemperaturen sägas representera den temperatur som överskrides 6 år av 7 under förutsättning att temperaturmaterialet vore normalfördelat. Av fysikaliska skäl kan temperaturen emellertid inte vara normalfördelat ty vid  $0^{\circ}\text{C}$  fryser vatten. Dessutom krävs det tillgång på minst 30 värden för att bestämma vilken statistisk fördelning som gäller t ex normalfördelningen. Detta innebär att uppskattningen 6 år av 7 inte är helt korrekt, men den ger ändå en säkrare uppskattning än observerade mintemperaturer.

Figuren 3.8 nedan visar i princip hur de 4 olika temperaturerna varierar med djupet.



Figur 3.8 Principbild som visar den vertikala fördelningen hos de olika beräknade temperaturerna

#### Värmeinhåll

Med hjälp av uppgifter om area-fördelning, maxdjup och temperaturfördelningar kan man bestämma en sjös värmeinhåll. Sjövolymen bestäms av area-djupfördelningen - den hypsografiska kurvan. I princip bestäms sjöns volym och energiinhåll av ekvationerna:

$$V(Z) = \int_0^Z A(Z) dz \quad \rho = \text{densitet (kg/m}^3\text{)}$$

$$H(Z) = \int_0^Z C \cdot \rho \cdot A(Z) \cdot [T(Z) - T_{\text{ref}}] dz \quad C = \text{specifikt värme (kJ/h/kg K)}$$

där  $V(Z)$  står för volymen mellan ytan och djupet  $Z$ ,  $H(Z)$  värmemängden mellan ytan och djupet  $Z$ .  $A(Z)$  anger sjöarean på olika djupnivåer och  $T(Z)$  anger temperaturen på olika djupnivåer.  $T_{\text{ref}}$  är den temperatur vartill värmeinhållet refereras. I detta fall  $0,5^{\circ}\text{C}$ .



## Klassning av sjömaterialet

Sjöarna har indelats i 4 grupper med vardera 16 klasser, sammanlagt 64 klasser, beroende på i första hand värmeinhåll och därefter kopplad till storlek och läge. I tabellen nedan anges klasserna i de 4 grupperna, vilka gränser som använts samt antalet sjöar ingående i varje klass.

## Klassindelning av sjöar

Sammanställning av sjöar i 64 klasser  
 Presenterade klasser innehåller 5 sjöar eller mer  
 De 64 klasserna är indelade i 4 grupper

| Grupp 1: Värmeinhåll f(Area)    |      |       |       |        | Grupp 2: Värmeinhåll f(maxdjup)  |                    |      |      |      |       |
|---------------------------------|------|-------|-------|--------|----------------------------------|--------------------|------|------|------|-------|
| kWh/m <sup>2</sup>              | 1.0  | 10.0  | 50.0  | 500.0  | km <sup>2</sup>                  | kWh/m <sup>2</sup> | 10.0 | 30.0 | 50.0 | 300.0 |
| 3.0                             | 1    | 17    | 11    | 5      |                                  | 3.0                | 1    | 22   | 5    | 6     |
| 6.0                             | 0    | 3     | 4     | 1      |                                  | 6.0                | 1    | 3    | 2    | 3     |
| 9.0                             | 0    | 5     | 6     | 3      |                                  | 9.0                | 0    | 6    | 1    | 7     |
| 12.0                            | 0    | 0     | 5     | 2      |                                  | 12.0               | 0    | 2    | 1    | 4     |
| Grupp 3: Värmeinhåll f(Höjd öh) |      |       |       |        | Grupp 4: Värmeinhåll f(Nordläge) |                    |      |      |      |       |
| kWh/m <sup>2</sup>              | 50.0 | 150.0 | 300.0 | 1000.0 | m                                | kWh/m <sup>2</sup> | 65   | 68   | 71   | 80    |
| 3.0                             | 2    | 9     | 10    | 13     |                                  | 3.0                | 1    | 12   | 13   | 8     |
| 6.0                             | 1    | 2     | 3     | 2      |                                  | 6.0                | 3    | 2    | 3    | 0     |
| 9.0                             | 0    | 2     | 2     | 10     |                                  | 9.0                | 1    | 1    | 9    | 3     |
| 12.0                            | 0    | 1     | 2     | 4      |                                  | 12.0               | 0    | 0    | 4    | 3     |

I alla grupper utgör värmeinhåll per ytenhet den ena parametern. Detta värmeinhåll är värdet summerat från ytan ned till botten dock högst 30 m. Orsaken till denna begränsning är att vattenintag mycket sällan görs på djupare vatten. Grupperna skiljer sig sedan åt genom att den andra parametern är en av area, maxdjup, höjd över havet eller nordläge. (Nordläge innebär de två första siffrorna i den första koordinaten i rikets nät). Fyra gränsvärden anges för samtliga parametrar och kravet för att tillhöra en klass är att värdet ligger mellan gränserna och där det högre gränsvärdet tillhör klassen.

Av klassningen framgår att för en stor del av sjöarna är värmeinnehållet ned till 30 m-nivån mindre än eller lika med  $12 \text{ kWh/m}^2$ . Det finns ett antal sjöar där värmeinnehållet är större än  $12 \text{ kWh/m}^2$  som inte är med i klassningen. För att finna större värmemängder måste man för de flesta sjöar gå ned till större djup.

Några klara slutsatser kan man inte finna i denna klassning. För små värmemängder, vilket gäller de flesta sjöar, är fördelningen mellan klasserna jämn. Däremot kan man skönja att större värmemängder hittar man i större, djupare, högre och mer nordligt belägda sjöar.

### 3.7 Olika modeller med linjär regression

I avsikt att göra materialet mer användbart har vi tagit fram empiriska formler, med hjälp av multipelregression, som uttrycker värmeinnehållet i en sjö som funktion av några parametrar, som enkelt kan tas fram för en sjö.

För de 85 sjöarna från SMHI-materialet som presenteras i kapitel 3.6 är värmeinnehållet beräknat mellan temperaturerna  $t$ -standard och  $t$ -referens (referenstemperaturerna)  $0,5$  och  $1,5^\circ\text{C}$ . Värmeinnehållet anges som ett medelvärde för ett antal säsonger för resp. sjö. Vid våra beräkningar har vi endast använt oss av värden beräknat med  $t$ -referens  $0,5^\circ\text{C}$ .

Av de 85 sjöarna har 14 st ett beräknat värmeinnehåll som är mindre än  $0,0 \text{ kWh/m}^2$ . Dessa sjöar har tagits bort i de fortsatta beräkningarna.

Med hjälp av multipelregressionsprogram har vi analyserat de återstående 71 sjöarna. Regressionen har utförts med 2 modeller med olika beroendevariabel,  $Q$  ( $\text{kWh/m}^2$ ) och  $W$  (GWh). I bilaga 9 förklaras teorierna bakom multipelregression.

Följande uppgifter har använts för de olika sjöarna:

|    |                       |                                   |
|----|-----------------------|-----------------------------------|
| W  | värmeinhåll           | (GWh)                             |
| Q  | specifikt värmeinhåll | (kWh/m <sup>2</sup> )             |
| A  | Area                  | (km <sup>2</sup> )                |
| V  | volym                 | (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) |
| Zm | max djup              | (m)                               |
| Zd | medeldjup             | (m)                               |
| H  | höjd över havet       | (m)                               |
| DD | ortsvärningsbehov     |                                   |
| NT | normalårstemperatur   | (C <sup>0</sup> )                 |

För att i viss mån kunna studera klimatets påverkan på värmeinhållet i sjön kompletterades materialet från SMHI med graddagstal och normalårstemperatur för respektive sjö.

Graddagstalet har medtagits eftersom det går att beräkna en Ortsgraddagstal, med hjälp av multipelregression, med parametrarna, höjd över havet, latitud och avstånd till större vattendrag.

Tyvärr är den geografiska spridningen av materialet relativt liten. De flesta sjöarna ligger i den nordvästra delen av landet. I tabellen nedan presenteras några uppgifter om det återstående sjömaterialet. Bilaga 10 visar 2 diagram över värmeinhållet för gruppen uttryckt i kWh/m<sup>2</sup> och GWh.

| <u>Variabel</u> | <u>Medelvärde</u> | <u>Standard-</u><br><u>avvikelse</u> | <u>Minimum</u> | <u>Maximum</u> |
|-----------------|-------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|
|                 | $\bar{x}$         | SD                                   |                |                |
| 1 Area          | 47.711            | 73.588                               | 0.500          | 464.000        |
| 2 Volym         | 1131.006          | 2672.721                             | 3.700          | 20037.600      |
| 3 Zm            | 56.528            | 36.088                               | 9.000          | 221.000        |
| 4 Zd            | 18.511            | 12.925                               | 3.100          | 79.800         |
| 5 H             | 285.323           | 147.376                              | 0.000          | 565.000        |
| 6 Q             | 18.989            | 27.692                               | 0.100          | 188.100        |
| 7 DD            | 5472.605          | 910.854                              | 3512.000       | 6924.000       |
| 8 NT            | 1.859             | 2.301                                | -5.000         | 7.000          |
| 9 W             | 1383.001          | 5655.411                             | 0.800          | 47231.914      |

Som framgår av tabellen och diagrammen är spridningen mellan sjöarna mycket stor.

### Regressionsanalys

För att ta fram det uttryck som ger den bästa noggrannheten i de 2 modellerna studerades följande kombinationer av "oberoende variabler", dvs 24 beräkningar per modell.

Oberoende variabler

| A | V | Zm | Zd | H | DD | NT |
|---|---|----|----|---|----|----|
| X | X | X  |    |   |    |    |
| X |   | X  |    |   |    |    |
| X |   | X  |    |   | X  |    |
| X |   | X  |    |   |    | X  |
| X |   | X  |    | X |    |    |
| X | X | X  |    |   | X  |    |
| X | X | X  |    |   |    | X  |
| X | X |    |    |   |    |    |
| X | X |    |    |   | X  |    |
| X | X |    |    |   |    | X  |
|   | X | X  |    |   |    |    |
|   | X | X  |    |   | X  |    |
|   | X | X  |    |   |    | X  |
| X | X |    | X  |   |    |    |
| X |   |    | X  |   |    |    |
| X |   |    | X  |   | X  |    |
| X |   |    | X  | X |    |    |
| X | X |    | X  |   | X  |    |
| X | X |    | X  |   |    | X  |
|   | X |    | X  |   |    |    |
|   | X |    | X  |   | X  |    |
|   | X |    | X  |   |    | X  |
|   | X |    |    |   |    |    |

De kriterier som använts för att bedöma "godheten" hos uttrycken är följande.

- Multipelkorrelationskoefficienten ( $r$ ),  
som skall vara så hög som möjligt
- Determinationskoefficienten  $D (= r^2)$
- Standardavvikelsen för det uppskattade uttrycket ( $S$ )  
(standard error of estimate)
- Gruppens medelvärde ( $\bar{X}$ )
- Kvoten  $S/\bar{X}$
- Signifikansen hos de ingående "oberoende" variablerna,  
uttrycks i  $P_2$  (TAIL) som skall vara  $< 0,05$  för att  
variabeln skall anses ge ett signifikant bidrag.  $P_2$   
(TAIL) är ett mått på den oberoende variabelns påverkan  
på resultatet. Vid alltför högt värde på  $P_2$  (TAIL) är  
resultatet för osäkert för att kunna användas.

I övrigt hänvisas till bilaga 9, som beskriver metoden ytterligare.

Det är nödvändigt med dessa kriterier för att avgöra vilket uttryck som är bäst eftersom 2 modeller studeras uttryckt i olika enheter.

#### Bearbetning av hela sjömaterialet

I denna grupp ingår således 71 st sjöar, med data enligt den tidigare visade tabellen. Nedan redovisas de gynnsammaste resultaten från respektive modell.

#### Beroende variabel $Q$ ( $\text{kwh/m}^2$ )

|                            |                                |
|----------------------------|--------------------------------|
| $\bar{X} = 19,0$           | <u><math>P_2</math> (TAIL)</u> |
| $r = 0,898$                |                                |
| $D = 0,806$                | $A = 0,001$                    |
| $S = 12,5$                 | $V = 0,000$                    |
| $\frac{S}{\bar{X}} = 0,66$ | $Z_d = 0,000$                  |

$$Q = - 4,9 - 0,114 \cdot A + 0,006 \cdot V + 1,244 Z_d$$

Dvs värmeinnehållet per  $m^2$  är en funktion av area, volym och medeldjup. Determinationskoefficienten (D) säger att 80,6 % av variansen kan förklaras av de ingående parametrarna. Signifikansen hos de ingående parametrarna är mycket hög eftersom P2 (TAIL) är mycket låg för alla tre oberoende variablerna.

Standardavvikelsen är som framgår relativt hög i förhållande till gruppens medelvärde, vilket naturligtvis inte är önskvärt.

Beroende variabel W (GWh)

|                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| $\bar{X}$ = 1383           | <u>P 2 (TAIL)</u> |
| r = 0,977                  | A = 0,000         |
| D = 0,954                  | V = 0,000         |
| S = 1249                   | Zm = 0,001        |
| $\frac{S}{\bar{X}}$ = 0,90 | NT = 0,045        |

$$W = 1437,2 - 37,3 \cdot A + 2,8 \cdot V - 21,9 \cdot Zm - 141,8 \cdot NT.$$

Värmeinnehållet är en funktion av area, volym, maxdjup och normalårstemperatur. I detta fall kan 95,4 % av variansen förklaras av de ingående parametrarna. Detta är ett mycket högt värde. Värmeinnehållet kan mycket väl uttryckas som funktion av parametrarna i uttrycket ovan. Intressant är att normalårstemperaturen blev signifikant, dvs. den har betydelse för värmeinnehållet.

Dock är standardavvikelsen mycket hög i förhållande till medelvärdet för gruppen, dvs förhållandet  $S/\bar{X}$  blir högt, vilket gör att det är tveksamt om detta uttryck är användbart.

Av dessa båda uttryck är det första med Q som oberoende variabel att föredra även om D är lägre i detta fall.

För att förbättra noggrannheten delades sjöarna upp i 3 grupper, med hänsyn till storlek, i detta fall med area som mått. Detta gör naturligtvis att antalet sjöar i varje grupp blir relativt litet. En indelning av sjöar som används vid studier av isläggningstidpunkt är följande (se kap. 3.5).

- små sjöar  $A \leq 10 \text{ km}^2$
- medelstora sjöar  $10 \text{ km}^2 < A \leq 50 \text{ km}^2$
- stora sjöar  $A > 50 \text{ km}^2$

Vid de fortsatta beräkningarna har denna indelning använts. Samma kombinationer som tidigare har studerats för de båda modellerna. Nedan presenteras endast det bästa uttrycket av de båda modellerna för de 3 grupperna.

#### Små sjöar

I tabellen nedan presenteras data över gruppen.

| Variabel | $\bar{X}$ | SD      | Minimum  | Maximum  |
|----------|-----------|---------|----------|----------|
| 1 Area   | 6.330     | 3.262   | 0.500    | 10.600   |
| 2 Volym  | 98.155    | 94.006  | 3.700    | 261.500  |
| 3 Zm     | 39.435    | 23.175  | 9.000    | 76.600   |
| 4 Zd     | 13.555    | 8.940   | 3.100    | 28.100   |
| 5 H      | 311.250   | 135.653 | 38.400   | 473.000  |
| 6 Q      | 12.640    | 14.519  | 0.600    | 46.700   |
| 7 DD     | 5274.300  | 707.235 | 3646.000 | 6595.000 |
| 8 NT     | 2.175     | 1.711   | -1.000   | 5.500    |
| 9 W      | 83.342    | 109.376 | 0.800    | 379.440  |

Beroende variabel Q (kWh/m<sup>2</sup>)

Antal sjöar: 20 st

|                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| $\bar{X} = 12,6$           | <u>P 2 (TAIL)</u> |
| $r = 0,826$                | $V = 0,013$       |
| $D = 0,682$                | $Zd = 0,000$      |
| $S = 8,6$                  |                   |
| $\frac{S}{\bar{X}} = 0,68$ |                   |

Värmeinnehållet uttrycks bäst med volym och medeldjup med beroende variabeln i  $\text{kWh/m}^2$ .

$$Q = - 6,261 - 0,114 \cdot V + 2,217 \cdot Zd$$

#### Medelstora sjöar

Gruppens data framgår av tabellen nedan.

| Variabel | $\bar{X}$ | SD      | Minimum  | Maximum  |
|----------|-----------|---------|----------|----------|
| 1 Area   | 25.371    | 10.705  | 11.700   | 48.700   |
| 2 Volym  | 484.054   | 397.083 | 45.000   | 2012.700 |
| 3 Zm     | 54.440    | 25.792  | 17.700   | 109.000  |
| 4 Zd     | 18.668    | 11.058  | 3.800    | 48.500   |
| 5 H      | 257.660   | 154.199 | 0.000    | 565.000  |
| 6 Q      | 18.611    | 20.886  | 0.100    | 83.900   |
| 7 DD     | 5459.828  | 930.306 | 3736.000 | 6769.000 |
| 8 NT     | 1.971     | 2.301   | -1.000   | 6.500    |
| 9 W      | 510.427   | 727.247 | 1.850    | 3481.850 |

#### Beroende variabel Q ( $\text{kWh/m}^2$ )

Antal sjöar: 35 st

|                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| $\bar{X} = 18,6$           | <u>P 2 (TAIL)</u> |
| $r = 0,891$                | $A = 0,028$       |
| $D = 0,794$                | $V = 0,001$       |
| $S = 9,9$                  | $Zm = 0,026$      |
| $\frac{S}{\bar{X}} = 0,53$ |                   |



Värmeinhållet kan uttryckas i area, volym och maxdjup med beroendevariabeln i  $\text{kWh/m}^2$ .

$$Q = - 0,915 - 0,531 \cdot A + 0,036 \cdot V + 0,286 \cdot Z_m$$

### Stora sjöar

Tabellen nedan beskriver data över gruppen.

| Variabel | $\bar{X}$ | SD        | Minimum  | Maximum   |
|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 1 Area   | 148.306   | 103.712   | 55.000   | 464.000   |
| 2 Volym  | 3837.275  | 4770.358  | 425.400  | 20037.599 |
| 3 $Z_m$  | 82.462    | 52.654    | 26.000   | 221.000   |
| 4 $Z_d$  | 24.362    | 18.219    | 7.400    | 79.800    |
| 5 H      | 313.431   | 143.628   | 5.800    | 520.000   |
| 6 Q      | 27.750    | 46.764    | 2.300    | 188.100   |
| 7 DD     | 5748.438  | 1068.855  | 3512.000 | 6924.000  |
| 8 NT     | 1.219     | 2.898     | -5.000   | 7.000     |
| 9 W      | 4916.330  | 11432.309 | 170.500  | 47231.914 |

### Beroende variabel W (GWh)

Antal sjöar = 16 st

|                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| $\bar{X}$ = 4916           | <u>P 2 (TAIL)</u> |
| r = 0,980                  | A = 0,000         |
| D = 0,960                  | V = 0,000         |
| S = 2554                   | $Z_m$ = 0,024     |
| $\frac{S}{\bar{X}}$ = 0,52 |                   |

Värmeinhållet för stora sjöar kan uttryckas i area, volym och maxdjup med den beroende variabeln i GWh.

$$W = 4585 - 48,5 \cdot A + 3,4 \cdot V - 67,9 \cdot Z_m$$

### 3.8 Användningsområden och noggrannhet

Som framgår av materialet ovan kan arean, volymen och djupet beskriva värmeinnehållet i en sjö. Något entydigt svar på klimatets inverkan i form av normalårstemperatur eller graddagstal har inte kunnat erhållas. Den största orsaken till detta är sjöarnas dominerande lokalisering i den nordvästra delen av landet. När hela sjömaterialet studerades med en större spridning som följd blev normalårstemperaturen signifikant.

Med större spridning av sjömaterialet är det sannolikt att normalårstemperaturen bör ingå som parameter för klimatberoendet.

De framtagna regressionsuttrycken har i vissa grupper tagits fram på ett relativt litet antal sjöar, vilket gör att osäkerheten i resultatet naturligtvis ökar.

Av den anledningen vore det mycket intressant att testa metoden, att beskriva värmeinnehållet som funktion av parametrar med linjär regression, på ett större sjömateriäl.

Resultatet ovan ger dock en möjlighet att översiktligt uppskatta värmeinnehållet i en obekant sjö.

Det är dessutom viktigt att komma ihåg att värmeinnehållet beräknat med regression ger ett konservativt värde eftersom konstanterna tagits fram med t-standard, se kap 3.6.

I övrigt bör noteras att temperaturmätningarna har utförts någon gång under vintern och inte nödvändigtvis behöver spegla det lägsta värmeinnehållet. De långa mätserierna, flera år, gör naturligtvis att "felet" bör bli relativt litet.

Huruvida mätningarna utförts på djupaste stället i respektive sjö är inte klarlagt. Detta har dock varit avsikten.

De presenterade formlerna bör naturligtvis endast användas för överslagsmässiga beräkningar.

Vid en eventuell projektering av en värmepumpanläggning måste kompletterande temperaturmätningar utföras på den tilltänkta lokaliseringsplatsen.

### 3.9 Exempel på värmebehovsberäkning

För att exemplifiera användningen av de empiriska uttryck som tagits fram ovan beräknas värmeinnehållet i 2 sjöar som ligger i 2 olika storleksklasser.

#### Velen

Detta är en liten sjö belägen i Västergötland (bilaga 11).

$$\begin{aligned} A &= 2,8 \text{ (km}^2\text{)} \\ V &= 18,2 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)} \\ Z_m &= 17,6 \text{ (m)} \\ Z_d &= 6,5 \text{ (m)} \end{aligned}$$

I bilaga 8 framgår att värmeinnehållet är ca 35 GWh under vintern. Detta är beräknat i förhållande till 0°C, omräknat till 0,5 blir värmeinnehållet 24 GWh eller 8,6 kWh/m<sup>2</sup>.

Ytan 2,8 km<sup>2</sup> medför att Velen betraktas som en liten sjö.

Med uttrycket för småsjöar blir värmeinnehållet

$$Q = -0,261 - 0,114 \cdot 18,2 + 2,217 \cdot 6,5 = 6,1 \text{ kWh/m}^2$$

Ett någorlunda bra resultat jämfört med att antaga t ex 15 kWh/m<sup>2</sup> som är ett vanligt medelvärde.

#### Hässelby (Mälaren)

$$\begin{aligned} A &= 26,6 \text{ (km}^2\text{)} \\ V &= 614,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \\ Z_m &= 62,5 \text{ (m)} \\ Z_d &= 23,1 \text{ (m)} \end{aligned}$$

I materialet från SMHI anges värmeinnehållet till 28,4 kWh/m<sup>2</sup>. Eftersom detta är en medelstor sjö blir beräkningen följande.

$$Q = 0,915 - 0,531 \cdot 26,6 + 0,036 \cdot 614,2 + 0,286 \cdot 62,5$$

$$Q = 24,9 \text{ kWh/m}^2$$

Dvs. en relativt god överensstämmelse.

## 4 HAVETS TEMPERATUR OCH VÄRMEINNEHÅLL

### 4.1 Temperaturens årstidsvariation

Havets temperaturvariationer skiljer sig avsevärt från variationerna i sötvattensjöar. Orsaken står att finna i havsvattnets salthalt, som förändrar vattnets densitetsberoende egenskaper på ett betydelsefullt sätt. En närmare beskrivning av salt vattens egenskaper ges i avsnitt 4.3. Här skall dock genast konstateras att förhållandena i Östersjön inte helt överensstämmer med Atlantens egenskaper. Östersjön tillförs nämligen stora mängder sötvatten med vattendragen i omkringliggande landmassor. Sötvattentillförseln kan inte helt kompenseras med avdunstning varför ett utflöde ständigt äger rum via Skagerack-Kattegatt. Östersjön kan därför liknas vid en fjord med ett mycket litet tröskeldjup (ca 8 m), smal mynning och stort sötvattentillflöde. Skagerack-Kattegatt utgör "fjordens" förbindelse med Atlanten. Skagerack som står i öppen förbindelse med Nordsjön har en mer havsliknande karaktär än Kattegatt och Östersjön.

De temperaturvariationer som uppkommer i havet bestäms till största del av det värmeenergiutbyte som sker med rymd och atmosfär genom in- och utstrålning, avdunstning och konvektiv värmeledning. Då årstiderna ger en markerad variation av dessa parametrar erhålls en årscykel i vattentemperaturen. Dessutom överlagras på denna årscykel, dygnscykler orsakade av jordrotationen samt väder och vind. Även strömmar påverkar temperaturfördelningen i havet.

Temperaturskiktning uppstår i vattenmassan därför att vatten av olika temperatur respektive salthalt, har olika densitet. För rent vatten, när densiteten sitt

maximum vid  $+4^{\circ}\text{C}$ , medan ett salthaltigt vatten får sitt densitetsmaximum förskjutet mot lägre temperaturer. Normalt Östersjövatten har maximal densitet vid  $2,5^{\circ}\text{C}$  ( $7\text{ }^{\circ}/\text{oo}$  salthalt). Västkusten når sitt maximum vid  $-0,3^{\circ}\text{C}$  ( $20\text{ }^{\circ}/\text{oo}$  salthalt).

Skiktningen påverkar utbytet av vatten mellan olika vattenlager. Det språngskikt som uppstår i en vattenmassa kallas för haloklin när skiktningen orsakas av salthalten och termoklin vid temperaturskiktning.

### Östersjön

De övre delarna har på våren en homogen temperatur vid eller i närheten av temperaturen för maximal täthet vid den för platsen rådande salthalten. Temperaturen är sedan i princip konstant ned till ett sådant djup att en annan vattenmassa med större salthalt påträffas. I Östersjöns centrala delar innebär detta ned till 50-70 meters djup.

På grund av den höga nettoinstrålningen kommer det övre skiktet att snabbt uppvärmas och en stabil densitetsskiktning utbildas. Denna skiktning begränsar den vertikala värmetransporten som till största delen sker genom vindinducerad turbulens. Under det varma ytskiktet kan vattenmassorna behålla sin vintertemperatur hela sommaren.

På sensommaren och hösten minskar nettoinstrålningen medan konvektions- och indunstningsförlusterna ökar, orsakade av den instabila luftmassan ovan vattenytan.

När ytvattnet avkyls sjunker detta eftersom dess densitet ökar. Vattnet sjunker till en nivå som motsvarar dess egen densitetsnivå. Genom att densiteten till större delen beror av salthalten än av temperaturen kommer en liten ökning av salthalten mot djupet att verka som en broms för avkylningen av vattnet. I

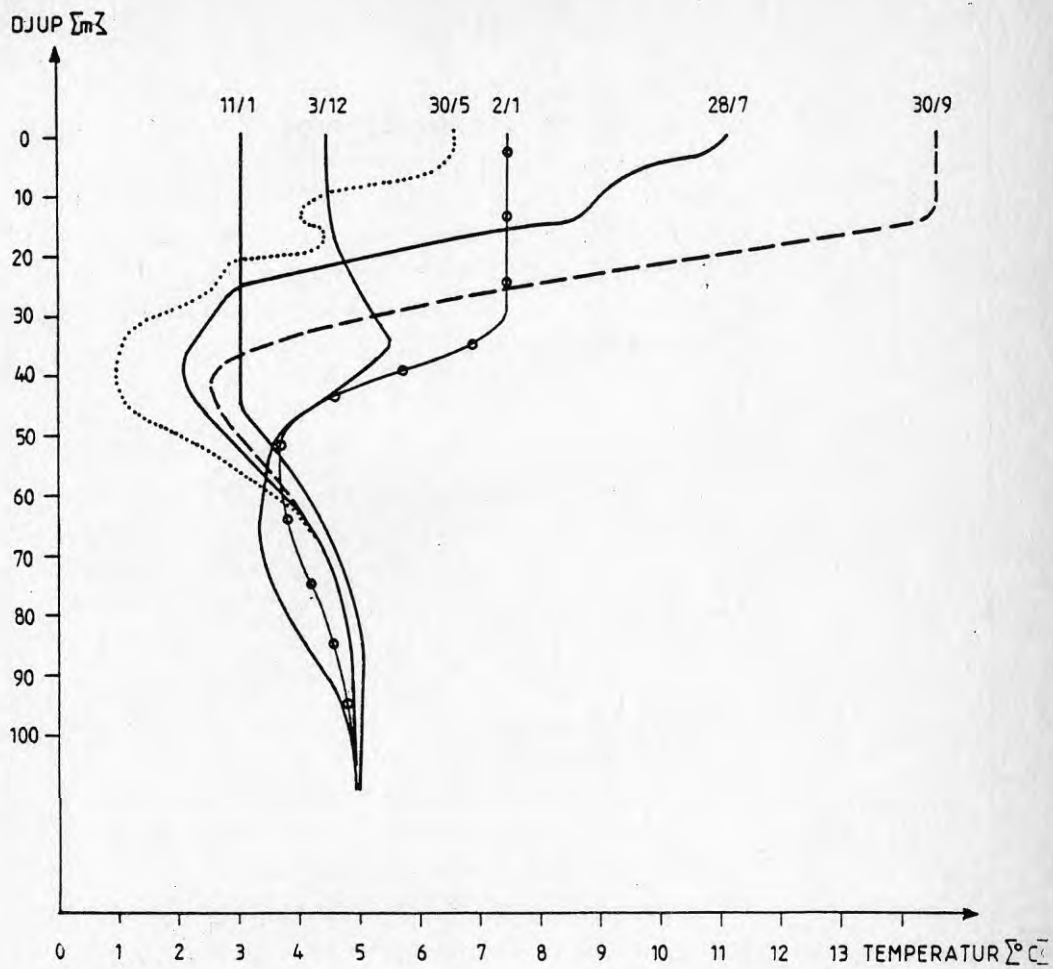
oktober/november har en temperaturmässig och salthaltsmässig utjämning skett i ytlagret genom inverkan av denna s k termoklin konvektion samt vindinducerad turbulens.

Då ytskiktets temperatur sjunker under temperaturen för maximal densitet (ca  $2,5^{\circ}\text{C}$  i Östersjön) minskar densiteten vid ytterligare avkylning och förutsättningar har bildats för en omvänd temperaturskiktning. Ytterligare avkylning medför att vattnet fryser till is vilket sker vid ca  $-0,4^{\circ}\text{C}$ .

När väl isen lagt sig kommer den stabila omvända temperaturskiktningen att bibehållas till islossningen.

Som exempel på temperaturförhållanden i Östersjön redovisas nedanstående kurva, figur 4.1, som gäller för Landsortsdjupet, vilket är Östersjöns djupaste plats (459 m). Temperaturförhållanden har uppritats för ett år (1970-71).





Figur 4.1 Temperaturvariationer åren 1970-1971 vid Landsortsdjupet

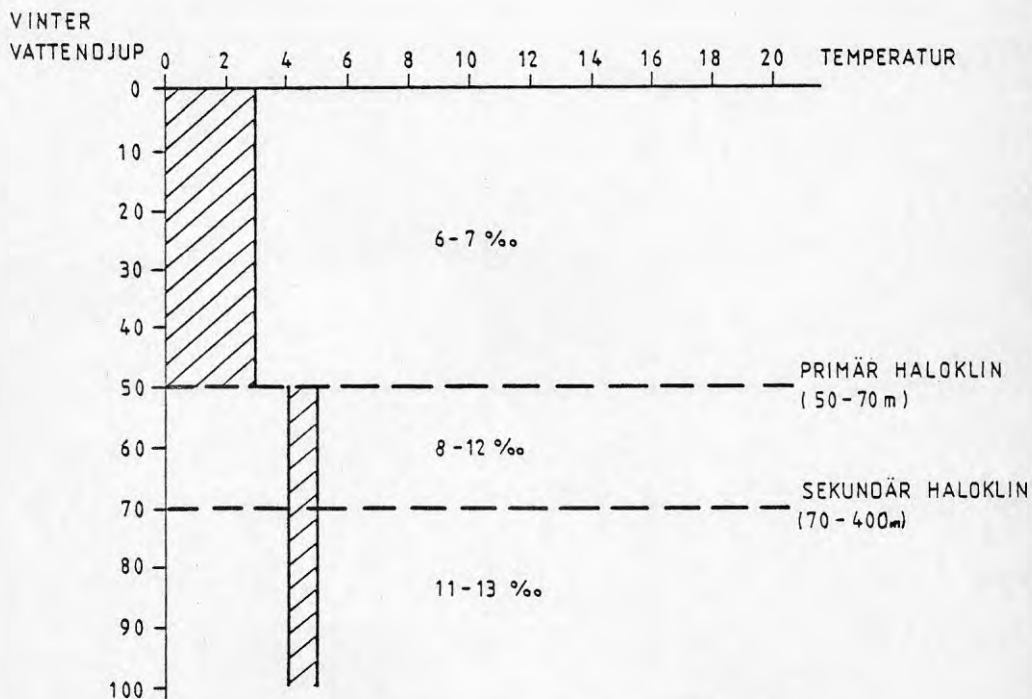
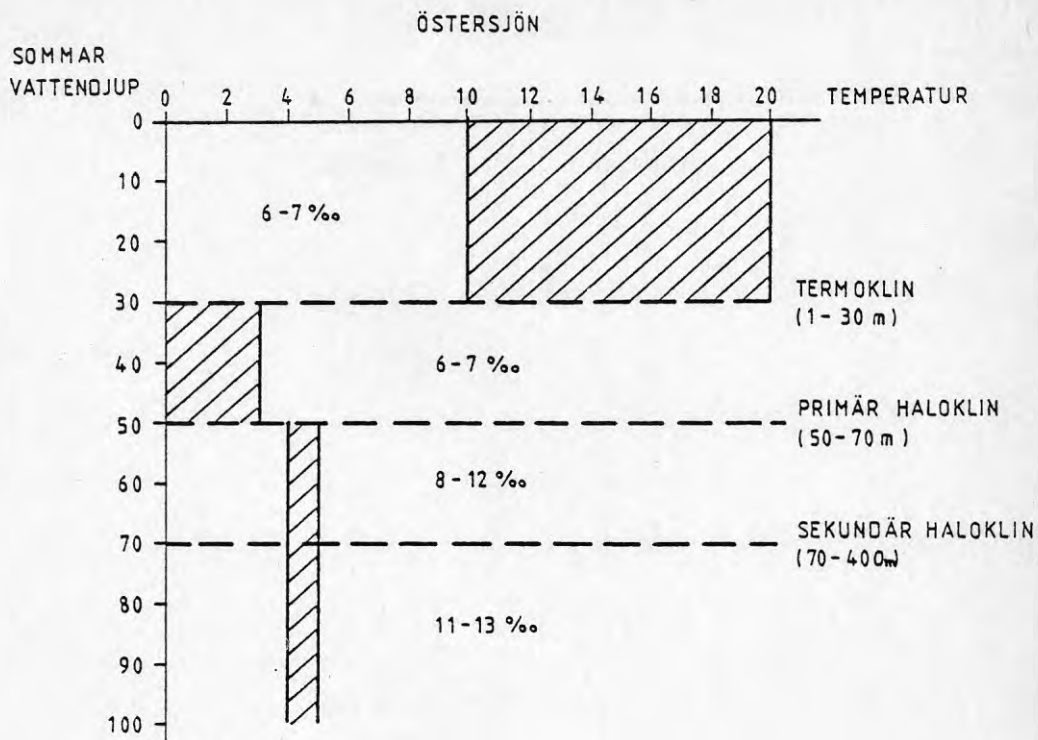
Temperaturen i de undre delarna av Östersjöns ytskikt, det vill säga strax över den primära haloklinen varierar således förhållandevis litet under året, beroende på att salthaltsgradienten, som tidvis förekommer i ytskiktet, hämmar den vertikala omblandningen. Även under den primära haloklinen varierar temperaturen obetydligt. Vid Landsort skiljer maximi- och minimitemperatur på 100 m djup endast ca  $0,2^{\circ}\text{C}$ .

#### Skagerack-Kattegatt

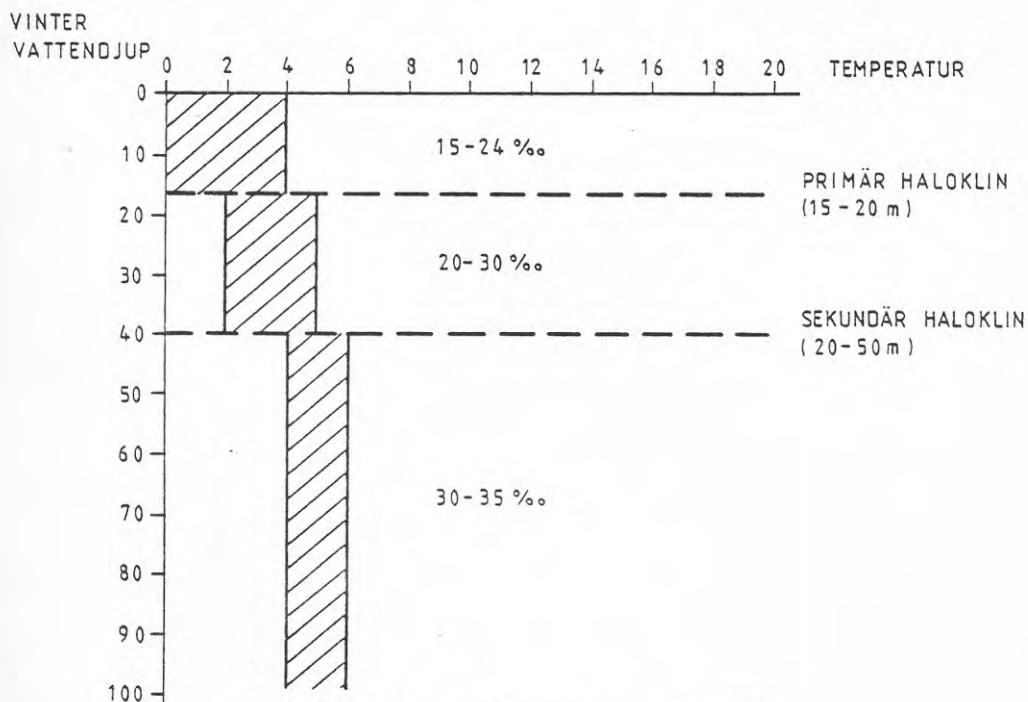
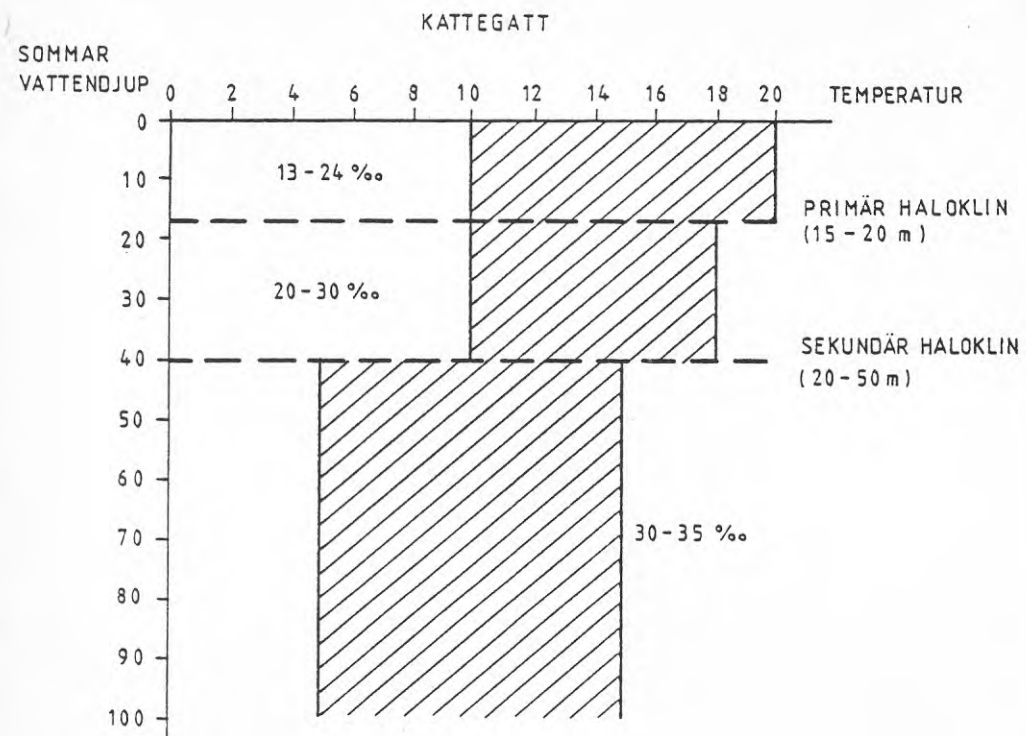
Liksom för Östersjön gäller naturligtvis att årstidsvariationerna i ytskiktet i princip bestäms av värmeutttet mellan vattenytan och atmosfären respektive rymden.

Det vattenskikt som direkt påverkas, sträcker sig ner till ett djup av ca 20 m där den primära haloklinen ligger. Den skarpa haloklinen bromsar kraftigt omblandningen av vatten, och därmed värmeflödet mellan djup och ytskikt. Vattnet under haloklinen står i förbindelse med vattnet i Skagerack och dess temperatur bestäms därför av temperaturen i de öppna delarna av Skagerack. I Skagerack finns för övrigt ingen salthaltsskiktning då ingen tillförsel av större mängder sötvatten sker. Ytterligare en haloklin, den sekundära, kan återfinnas i Kattegatt. Denna, som på grund av sin höga salthalt, står i förbindelse med den öppna Nordsjön, kommer att få en något högre temperatur vintertid och en något lägre sommartemperatur än de ovanförliggande vattenlagren.

För att sammanfattningsvis ge en översiktlig bild av de temperaturnivåer som kan förväntas på olika djup i Östersjön respektive i Kattegatt redovisas nedanstående figurer, 4.2 och 4.3. Även salthalten har medtagits för respektive skikt.



Figur 4.2 Temperatur och salthaltsnivåer i Östersjön



Figur 4.3 Temperatur och salthaltsnivåer i Kattegatt

#### 4.2 Värmeinhåll och möjlighet till värmeuttag under olika förhållanden

Havets storlek gör att konventionella beräkningar av värmeinhållet som begränsande faktor för värmeuttag har liten betydelse. Detta gäller utom i sådana sammanhang där vattenmassan är fysiskt begränsad av en vikstränder eller där vattendjupet är så ringa att omblandning inte kan ske tillräckligt snabbt.

Havets temperaturvariationer kan allmänt betraktas som svängningar kring ett medeltillstånd som för världshaven som helhet, är  $+3,8^{\circ}\text{C}$ . Havets värmebudget omfattar följande poster:

$$Q_{IN} = QS + QC + QJ + QF + QR$$

$$Q_{UT} = QV + QK + QA$$

där

QS är värmen i absorberad sol och himmelstrålning

QC är tillskott i biologisk-kemiska processer

QJ är värmeförsel från jordens inre

QF är värmeförsel genom friktionsvärme

QR är tillskott från radioaktiva ämnens sönderfall i havsvattnet

QV är förluster genom utstrålning till världsrymden

QK är konvektiv värmetransport mot luften

QA är värmeförlust genom avdunstning

Dessa ekvationer gäller endast för havet som helhet. För viss del av havsvolymen tillkommer en post  $Q_{STR}$  motsvarande skillnaden i värmeinhåll mellan in och utströmmande vatten. Över en längre tidsperiod än  $Q_{IN}$  lika med  $Q_{UT}$ . Havets medeltemperatur är konstant. Beror av önskad noggrannhet kan några av posterna elimineras på grund av sitt ringa inflytande. Posterna QC, QJ, QF och QR motsvarar tillsammans högst 0,8 % av QS. QS är som ett medelvärde 3,4 kWh per dygn och  $\text{m}^2$ . I kapitel 3 har tidigare formler för beräkning

av värmeförlusten till följd av utstrålning, konvektion och avdunstning redovisats. Posten  $Q_{STR}$  har däremot stort intresse då det är strömningen av vatten som begränsar värmeuttagets storlek. Vattenströmning genom ett visst kustavsnitt kan ha många skilda orsaker.

Man kan principiellt skilja på stadigvarande strömmar och tillfälliga strömmar. Stadigvarande strömmar är sådana som uppkommer till följd av yttre påverkan t.ex. av jordrotation skapade av havsströmmar. Andra stadigvarande strömmar i mer kustnära vatten är utflöden från floder och andra vattendrag. En speciell ström är utflödet till följd av mänskliga aktiviteter, t.ex. avloppsreningsverk och kylvattenutsläpp.

Tillfälliga strömmar uppkommer till följd av vindinduktion eller är densitetsberoende, t.ex. de temperaturberoende vertikala strömmar som uppkommer vår och höst. Strömmar kan även uppkomma till följd av skillnader i lufttryck mellan olika punkter på jordytan.

För den fortsatta behandlingen gäller följande förutsättningar.

1. Värmeinhåll och värmeuttagsmöjlighet vår, sommar och höst behandlas ej.
2. Värmeinhållet är baserat på nedkylning till  $+0,5^{\circ}\text{C}$ .
3. Ingen hänsyn tas till värmeinhåll i bottensedimenten.

Förutsättning 1 har sin grund i det faktum att möjligt värmeuttag under denna tid är så hög att den inte utgör

en begränsande faktor vid dimensionering av en anläggning för åretrunt-drift. En uppfattning av storleken kan erhållas från kapitel 3. Den andra förutsättningen har valts för att få en överensstämmelse med de beräkningar som redovisas i kapitel 3, för sjöar. Temperaturen  $+0,5^{\circ}\text{C}$  är ett riktvärde baserat på möjlig nedkylning i moderna värmepumpar. Det latent värmeinnehållet vid nedkylning till is är naturligtvis mycket större än här angivna värden. Den tredje förutsättningen har givits då kunskapen om havssedimentens värmeinnehåll är mycket liten.

Värmeinnehållet i havsvatten har behandlats sparsamt i den svenska forskningslitteraturen. En rapport som dock innehåller en förtjänstfull analys har framtagits på uppdrag av AB Svarthålsforsen, ref. 16. Rapporten behandlar dock endast förhållandena i innerskärgården<sup>1)</sup> vid Stockholm. Man konstaterar i rapporten att värmeom-sättningen i skärgården skiljer sig radikalt från den i Mälaren och andra insjöar, beroende på saltinnehållet. Innerskärgården är liksom förhållandet i de flesta kustområden med relativt stor sötvattengenomströmning ett blandningsområde mellan salthaltigt bottenvatten och relativt "sött" ytvatten. Förhållandena blir därmed helt speciella, då den normala termiska konvektionen i vilken även bottenvattnet deltar, här inte är aktuell i samma utsträckning. En bedömning av värmeinnehållets storlek kommer att baseras på de vattenströmmar, tillfälliga och stadigvarande, som finns. Dessa strömmar är för aktuellt område.

---

1) Innerskärgården innanför Oxdjupet vid Vaxholm

- \* Utströmmande Mälarvatten
- \* Inströmmande Östersjövatten, medeldjupt vatten
- \* Avloppsvatten från Henriksdal och Käppala
- \* Inströmmande bottenvatten

Den starka densitetsskiktning som uppkommer till följd av salthaltiga strömmar medför att sommaruppvärmningen endast tränger ned 10-15 m. Vattnet under denna nivå härrör främst från inströmmande bottenvatten vid Oxdjupet utanför Vaxholm. En del av bottenvattnet är inblandat ytvatten. Temperaturen under vintern har ett maximum i den undre delen av språngskiktet på 5-15 m djup, till följd av inblandning av varmt avloppsvatten. Enligt rapporten är nettotemperaturhöjningen vintertid till följd av inblandning av avloppsvatten ca  $0,5^{\circ}\text{C}$ . För bedömning av innerskärgårdens värmeinhåll konstaterar man i rapporten att de största uttagbara värmemängderna finns i språngskiktet och i djupvattnet. Värmeinhållet i vattnet avtar successivt under vintern genom inströmning av kallare vatten i djupskiktet och genom värmeförluster i ytskiktet. Rapporten bedömer värmeinhållet vid temperatursänkning ned till  $+0,5^{\circ}\text{C}$  under normalår till ca  $3.000 \text{ GWh per } 83,7 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ . Specifikt uttag är därmed  $35 \text{ kWh/m}^2$ . Denna vattenvolym har ett medeldjup av drygt 18 m. Extrema "kallår", vilket inträffar med frekvensen ett år av sju, innebär betydligt lägre värden, uppskattningsvis  $10-12 \text{ kWh/m}^2$ .

En annan undersökning har utförts av SMHI, ref. 15, för att utröna värmeuttagsförhållandena utanför Visby. Dessa vattenområden är huvudsakligen att betrakta som naturliga i motsats till ovan redovisade förhållanden i Stockholms skärgård.

Bottenförhållandena utanför Gotland kännetecknas av en långgrund strand med ett vattendjup på ca 1 m på 100 m avstånd från strandlinjen. Där utanför faller botten hastigt ned till ca 10 m djup för att därefter plana ut till en lutning av 2 m per

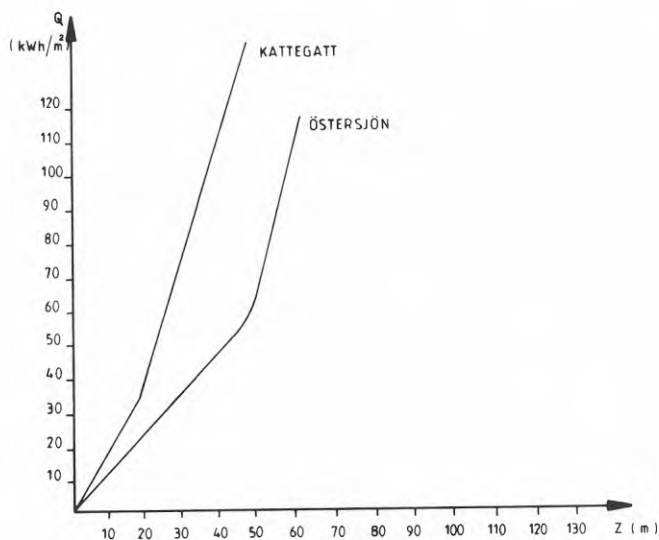


100 m. Till följd av den normalt förhärskande sydvästliga vinden är en nordlig kustström vanligt förekommande. Rapporten anger att ytvattentemperaturen under mars månad är  $+1^{\circ}\text{C}$  eller högre, 6 år av 10. Temperaturen är  $+2^{\circ}\text{C}$ , 2 år av 10. Någon isläggning inträffar mycket sällan. Vattentemperaturen är lika vid ytan och ner till 10 à 15 m djup. Möjligt värmeuttag bestäms förutom av möjlig temperatursänkning, av risken för återinblandning av det avkylda vattnet. I rapporten anges att det avkylda vattnet kommer att lägga sig i ett **tunt** ytskikt. En intagspunkt bör därför placeras så djupt som möjligt. Alternativt kan intaget placeras i ytan men sidoförskjuten något hundratal meter. I den värmepumpanläggning som byggts på platsen har intagspunkter placerats ca 60 m norr om utsläppet. Avståndet är därmed så litet att viss påverkan kommer att uppstå.

Aktuell värmepump har en dimensionerad kyleffekt av 6000 kW. Havsvatten blandas med avloppsvatten som därefter kyls i förångare. Om den normala värmemängden i avloppsvattnet avräknas återstår en kyleffekt på havsvattnet av 3600 kW. Under perioden 1 januari till 1 april kommer ca 7,7 GWh att kunna utvinnas ur havsvattnet. Det är inte möjligt att exakt avgränsa den vattenvolym i havet vars värme utvinns i detta speciella fall. Under ovan angiven period kommer 7 milj.  $\text{m}^3$  havsvatten att passera värmepumpen. Med de speciella djupförhållanden som råder utanför Visby motsvarar detta vattenvolymen i en cylinderformad vattenmassa med radien 360 m och djupet 17 m. Specifikt värmeuttag ur denna vattenvolym blir  $18,7 \text{ kWh/m}^2$ . Observera dock att denna beräkning är rent teoretisk då det är inströmmande vatten som i detta fall ger god värmeuttagsmöjlighet.

Ovan redovisade litteraturgenomgång syftar till att visa att någon generell uttagspotential inte utan vidare går att bestämma för havsförhållanden.

Baserat på figurerna 4.1 och 4.3 kan dock grova överslagsvärden för totalt värmeinnehåll (ned till  $+0,5^{\circ}\text{C}$ ) i Östersjön respektive Kattegatt bestämmas.



Figur 4.4 Förenklad beräkning av lägsta värmeinnehåll i havet på fritt vatten

### 4.3 Salthalt och fryspunktsnedsättning

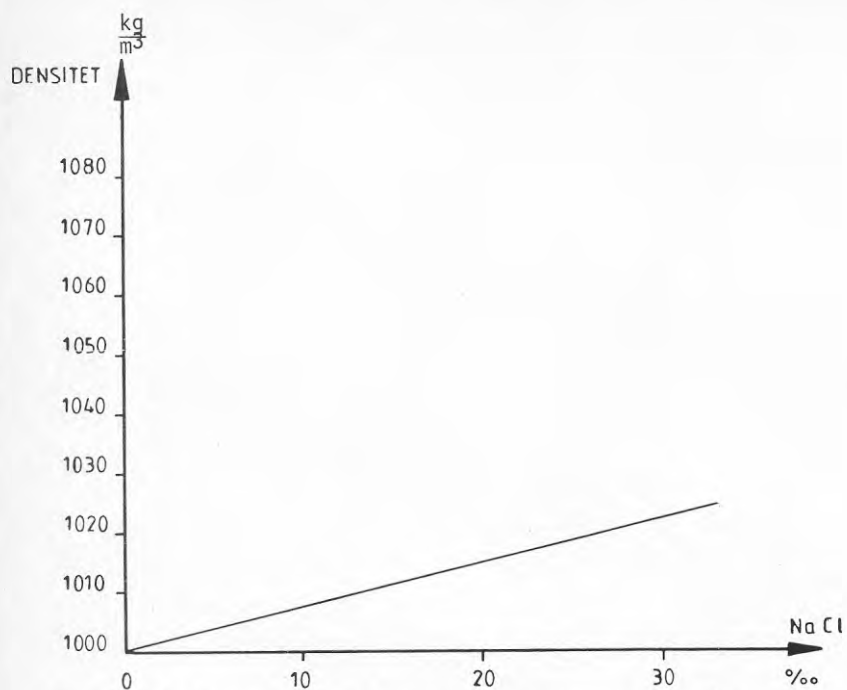
Vattnet i världshaven har en salthalt av 35 o/oo. Denna är förvånansvärt konstant, vilket visar att blandningen av vatten i oceanerna är omfattande. Endast randhav och vikar med stor sötvattentillförsel visar variationer i salthalten. I Östersjön är salthalten i norra Bottenviken nära 0. Mellersta Östersjön uppvisar en salthalt av 7 o/oo i ytvattnet och högst 13 o/oo vid botten. Högre salthalter finner man nära Östersjöns utlopp vid Bälten och Öresund. På västkusten har bottenvattnet som högst en salthalt av 35 o/oo. Typiska värden för salthalten i Östersjön respektive Kattegatt framgår av figur 4.2 och 4.3. Vid indunstning av 1000 kg havsvatten med salthalten 35 o/oo kommer det återstående saltet att bestå av 28 kg natriumklorid, 3,8 kg magnesiumklorid, 1,7 kg magnesiumsulfat, 1,28 kg kalciumsulfat, 0,8 kg kaliumsulfat samt 0,28 kg övriga salter.

Förhållandet mellan vattnets ingående salter är nästan oberoende av salthalten varför förhållandet gäller även i t.ex. Östersjön.

Salthalten i Östersjön varierar som ovan visas i både vertikal och horisontal riktning. Orsaken är avdunstning, nederbörd, frysning och sötvattentillflöden samt densitetsskillnader.

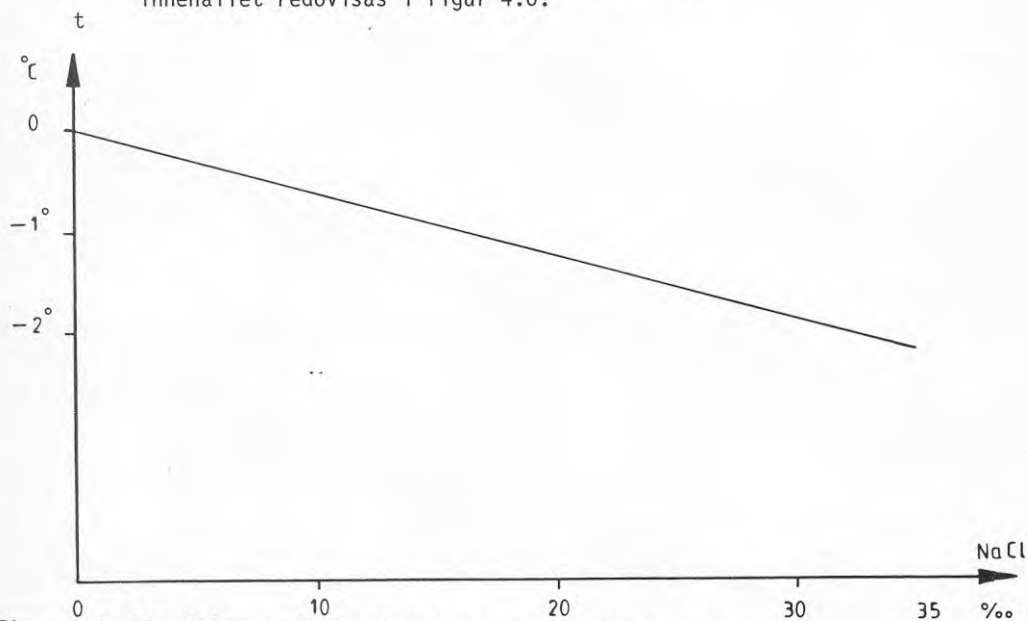
Havsvattnets densitet är ungefär proportionell mot saltinnehållet, se figur 4.5.

Rent vatten har en största densitet vid  $+4^{\circ}\text{C}$ . Då salthalten ökar kommer en förskjutning att äga rum av den temperatur vid vilken densitetsmaximum nås. Vid en salthalt högre än ca 15 o/oo kommer temperaturen för densitetsmaximum att vara lägre än fryspunkten. En sådan vattenmassa kan



Figur 4.5 Havsvattnets densitet (vattentemperatur 0°C)

En saltlösning får en lägre fryspunkt än 0°C, fryspunktsnedsättningar i förhållande till saltinnehållet redovisas i figur 4.6.



Figur 4.6 Blandning av NaCl och H<sub>2</sub>O och den temperatur vid vilken det i lösningen börjar bildas iskristaller.

därmed inte frysa förrän hela vattenmassan från ytan till botten antagit frystemperatur (ca  $-1^{\circ}\text{C}$ ). Detta förklarar varför de stora världshaven inte fryser trots att lufttemperaturen vid ytan kan vara betydligt under fryspunkten.

#### 4.4 Speciella förhållanden

Intill kusten förstärks ofta vissa effekter. Särskilt gäller detta för skärgårdsområden, i vikar och vid flodmynningar.

Två effekter som ofta gör sig gällande är uppvällning och pålandsvind.

Uppvällningen är speciellt märkbar i vikar och sund och orsakas av att vind, som blåser från land, driver ut det varma ytvattnet. Detta vatten måste ersättas och det sker genom att kallt bottenvatten väller upp i viken eller sundet.

Pålandsvinden har en analog men omvänd effekt. Det varma ytvattnet tvingas av vinden in i viken eller sundet och det kalla bottenvattnet pressas ut.

En tredje effekt är märkbar vid flodmynningar. Det söta vattnet kommer på grund av låg densitet att utbreda sig plymformigt, i ett tunnt skikt vid ytan, ut från land. När väl kontakten med land är bruten böjer plymen av i den vid platsen rådande havsströmmens riktning.

## 5 KORROSION I SJÖ- OCH HAVSVATTEN

Korrosion är ett av de större problemen i samband med installationer i sjö- och havsvatten. Speciellt gäller detta i havsvatten, där problemen med korrosion är avsevärt större än i sötvatten. Av den anledningen behandlas olika typer av korrosion samt de fysikaliska mekanismerna bakom relativt ingående i det följande.

### 5.1 Allmän korrosionsteori

Korrosion innebär en nedbrytning av (metall)materialets struktur. Sker nedbrytningen över hela ytan är korrosionen allmän annars är materialet utsatt för lokal korrosion. Begreppet förklaras närmare i det följande.

Allmän korrosion innebär att materialet korroderar med samma hastighet över hela ytan. Den allmänna korrosionens omfattning anges som viktförlusten per ytenhet eller som medelavfrätningen per år. Allmän korrosion förekommer på alla material. Den uppkommer normalt genom inverkan på korrosionsceller utan särskiljbara anod- och katodytor.

Angreppet koncentreras vid lokal korrosion till vissa begränsade delar av den yta som är utsatt för korrosivt medium. Vid lokal korrosion verkar i allmänhet korrosionsceller med särskiljbara anod- och katodytor. Lokal korrosion delas upp i en rad undergrupper beroende på var korrosion äger rum, eller på skadans omfattning. Lokal korrosion leder ofta till svårare skador än allmän korrosion eftersom en lokal genomfrätning kan gå relativt snabbt.

Punktfrätning innebär att det skyddade oxidskiktet nedbryts på en metallyta i vissa punkter. Man får då en frätgrop som kan variera i omfattning och djup. Närbesläktad med punktfrätning är erosionskorrosion.

Erosionskorrosion uppkommer vid samtidig nötning och korrosion vid inverkan av hastigt strömmande vätska.

Angreppet står i viss korrelation till turbulensgraden hos vätskan och eventuellt innehållande slitande material. På de flesta metaller som är utsatta för stillastående syrehaltigt vatten bildas en ytbeläggning av korrosionsprodukter.

Ytbeläggningen försvårar jontransporten och hämmar därigenom korrosionen, mer allteftersom beläggningens tjocklek tilltar. Om emellertid ytan lokalt påverkas av en turbulent strömmande vätska kan detta medföra, att någon ytbeläggning inte bildas eller, att redan bildad beläggning skadas och slits bort. På det utsatta stället kan därför korrosionen fortsätta med oförminskad hastighet. Korrosionshastigheten ökas om den strömmande vätskan innehåller gasblåsor eller fasta föroreningar.

Galvanisk korrosion uppkommer genom verkan av (en bimetallcell, dvs) en galvanisk cell, där elektroderna består av olika material. De kan utgöras av två olika metaller eller av en metall och ett annat elektronledande material.

För att korrosion skall uppstå krävs att området kring gränslinjen mellan materialen är täckt med elektrolytlösning. I det fall man har två olika metaller blir den ädlare metallen katod och den oädlare anod. Anoden angrips och förstörs genom korrosion.

Metallers ädelhet bestäms ur den galvaniska spänningsserien. Denna gäller dock enbart för ett specifikt korrosionsmedium, t ex havsvatten.

Vid galvanisk korrosion är ytförhållandet mellan katod och anod av stor betydelse för angreppets hastighet. I de fall anodytan

är betydligt större än katodytan och elektrolyten (fuktfilmen) har god ledningsförmåga blir angreppet ej så kraftigt, som i de fall anod och katod är lika stora.

Spaltkorrosion. I trånga vätskefyllda spalter finns en tendens till lokal korrosion som kallas spaltkorrosion. Spaltkorrosion orsakas av att det bildas en sk "luftningscell", där vätsketillströmningen är försvårad. Spaltkorrosionen kan förekomma på de flesta metaller, men är speciellt vanlig på metaller med en tunn skyddande oxidfilm på ytan.

Avlagringskorrosion uppkommer under icke metalliska avlagringar och beläggningar. Den orsakas av att fukt hålls kvar i och under avlagringen. Själva korrosionsangreppet påminner om spaltkorrosion.

Spänningskorrosion uppkommer genom samverkan mellan statiska dragspänningar i ett material och ett specifikt korrosionsmedium. Spänningskorrosion förekommer endast hos legeringar, aldrig på rena metaller. Den yttrar sig genom sprickor i materialet. Sprickorna kan vara transkristallina eller interkristallina.

Endast mekaniska dragspänningar, över en viss kritisk storlek, orsakar spänningskorrosion. Dragspänningen kan vara antingen restspänning från tidigare kalldeformation eller tillsatsspänningar, orsakade av direkt belastning.

Korrosionsmedlet som medverkar till sprickbildningen är specifikt för legeringstypen. På kopparlegeringar verkar kväveföreningar medan kolstål påverkas av nitrater. Vid sprickbildningen kan materialet brista. Brottet kännetecknas av liten eller ingen plastisk deformation, s k sprött brott. Spänningskorrosion kan undvikas genom eliminering av dragspänningarna i materialet. Detta kan ske genom avspänningsglödning.



## 5.2 Korrosion i vatten

Vanligen korroderar en metall endast om vatten och syre samtidigt finns på metallens yta. Syret som krävs finns oftast direkt i luften och fungerar som ett oxidationsmedel och vattnet med föroreningar, t ex salter, kolsyra och svaveldioxid, svarar för transporten av frigjorda elektroner från metallytan, dvs. är elektrolyt.

För värmepumpanläggningar uppstår risk för korrosion på metallytor för i första hand de anläggningsdelar som står i direkt kontakt med värmekällor som havsvatten, sjövattnet och avloppsvatten. Grundvatten är ofta syrefritt och rent och ger av detta skäl små korrosionsproblem.

Ingenjörsvetenskapsakademiens korrosionsnämnd har utfört vissa prover med korrosion av metaller i naturliga vatten. Tabellen 5.1 anger skyddat och oskyddat ståls korrosionshastighet i naturliga vatten.

|                | Älvvatten | Havsvatten |
|----------------|-----------|------------|
| Oskyddat stål  | 500       | 1000       |
| Förzinkat stål | 300       | 200        |

Tabell 5.1 Korrosion i  $\mu\text{m}$  på 10 år.

Elektrolytens inverkan på korrosions utbredning beror av följande faktorer, här redovisade utan inbördes rangordning.

- \* pH-värde
- \* temperatur
- \* syreinhåll
- \* halt av bl.a. koldioxid, klorid, alkalinitet, sulfid och sulfat samt kväveföroreningar
- \* fasta föroreningar såsom sand etc.

Grunden för en metalls korrosionsmotstånd är dess förmåga att bilda ett oxidskikt på metallytan som skyddar mot vidare angrepp. Alla aktuella konstruktionsmaterial kan under vissa omständigheter bilda sådana skikt. Därför kan ibland t.o.m. vanliga stålrör fungera väl med vissa vattenkvaliteter.

Koppar, som är en s.k. elektropositiv metall, har goda egenskaper i korrosionshänseende. Koppar legeras ofta för att ytterligare förstärka dessa egenskaper t.ex. med zink till mässing. En välkänd legering är amiralitet smäsing. Även legeringar med aluminium, nickel eller tenn förekommer i dessa sammanhang. Ett problem med koppar-zinklegeringar är risken för s.k. avzinkning, en form av selektiv korrosion där zinken lakas ur mässingen och lämnar en spröd rest av koppar. Avzinkning kan särskilt förekomma i kloridhaltiga lösningar. En mässing är avzinkningshärdig om den innehåller mer än 85 % koppar. Vid tillsatser av arsenik, fosfor eller antimon kan avzinkningshärdigheten ökas även vid lägre kopparhalter. Koppar är känslig för erosionskorrosion.

Vattenhastigheten på ytan bör inte dimensioneras högre än ca 1,5 m/s. De faktorer som vidare är särskilt ogynnsamma för koppar är mjukt, syrerikt, vatten med klorider och aktiv kolsyra. Däremot har sulfater och karbonater ingen inverkan.

Rostfria stål förekommer i en stor mängd legeringar. De främsta legeringsämnen är krom och nickel. Det är kännetecknande för rostfria stål är att de lätt passiveras varvid ytan täcks av en tunn hinna av kromoxid. Stålet är normalt känsligt för kloridlösningar, åtminstone i halter över 200 ppm.

Titan är ett extremt dyrt material som har utomordentliga korrosionsegenskaper. För havsvatten torde titan i många fall vara motiverat att använda.

### 5.3 Vattenanalys

Valet av material för förångare och övriga vattenberörda system är av största vikt för anläggningens ekonomiska utfall. Det är därför mycket viktigt att materialbestämningen utgår från grundligt utförda analyser av vattnets tekniska, fysikaliska och kemiska förhållande.

Vattenanalyser bör omfatta mätning av pH-värde, kloridhalt, halt av svavel- och kräveföreningar, alkalinitet, hårdhet samt halt av suspenderande ämnen.

Analysen bör helst göras vid provtagningar under en längre period och på de djup som är aktuella för intagsledningarna. Observera särskilt risken för höga svavelvätehalter i bottenvattnet. Hänsyn bör vid provtagningen tas till de vanligen förekommande strömmarna.

Som komplement till vattenanalys kan forcerade korrosionsprover göras av aktuella material i en s.k. Campellapparat.

### 5.4 Erfarenheter från idrifttagna anläggningar

Genom kontakter med tillverkare, konstruktörer och användare har svenska erfarenheter av materialval i förångare inhämtats.

Nedan redovisas i tabell 5.2 en sammanställning av några anläggningar uppdelade på värmekälla och storlek samt förångarnas konstruktion. Enbart anläggningar med ytvatten har medtagits.

Tabell 5.2

Anläggningar som utnyttjar sjö- och havsvatten

| <u>Anl.</u> | <u>Värmekälla</u> | <u>Storlek</u> | <u>Förångare</u>  | <u>Erfarenheter</u>   |
|-------------|-------------------|----------------|---|---|
| 1           | Östersjön         | 2              | Tubpanna<br>Legerad<br>aluminium-<br>brons  | Anläggningen i drift<br>1981. Inga korro-<br>sionsskador  |
| 2           | Östersjön         | 3              | Strilför-<br>ångare av<br>plattmodell<br>Ferritis-<br>tiskt rost-<br>fritt stål   | Anläggning i drift<br>1983. Korrosionsska-<br>dor till följd av<br>materialblandning  |
| 3           | Östersjön         | 3              | Strilför-<br>ångare av<br>typ ståen-<br>de rör. Rost-<br>fritt stål               | Anläggningen i drift<br>1983. Inga korro-<br>sionsskador  |
| 4           | Nordsjön          | 2              | Plattvärme-<br>växlare av<br>titan med<br>tubpanna i<br>sekundär-<br>krets        | Anläggningen i drift<br>1977. Ursprungligen<br>endast med kopparrör<br>i tubpanna och en-<br>krets. Till följd<br>av korrosionsskador<br>orsakade av svavelvä-<br>te har systemet<br>byggts om till sekun-<br>därsystem |
| 5           | Östersjön         | 3              | Strilför-<br>ångare med<br>plattor<br>Monit och<br>SMO 254<br>(Rostfritt<br>stål) | Anläggningen i drift<br>1983. Vissa korro-<br>sionsskador   |
| 6           | Sjövatten         | 2              | Strilför-<br>ångare med<br>vertikala<br>stålrör                                   | Fungerat väl sedan<br>starten 1981  |
| 7           | Sjövatten         | 3              | Strilför-<br>ångare   | Idrifttagen 1982  |

### Förklaringar - storlek

- 1:     ≤100 kW värmeeffekt
- 2:     100-1000 kW   "
- 3:     >1000 kW       "

Tyvär är som tabellen visar erfarenheterna avseende sjö- och havsvärmepumpar relativt begränsade. Materialvalet har ofta skett med stor säkerhetsmarginal, vilket leder till onödigt dyrbara lösningar. Som exempel kan nämnas att en 3 MW värmepumpanläggning fördyras ca 500 000 kr om strilförångare med horisontala rör utförs av rostfritt stål i stället för av förzinkat stål.

Genom att studera den marina kyltekniken och erfarenheterna från kraftindustrin kan dock viktiga slutsatser dras om erforderliga materialkvaliteter.

Kondensortuber i ytvattenkylda kraftverk utsätts för betydande korrosionspåverkan. Temperaturen är t ex betydligt högre än för motsvarande värmepumpsvärmeväxlare.

Svenska kraftverk använder i stor utsträckning aluminiummässing även om kopparnickel och titan ökar till följd av havets nedsmutsning. Kraftverk lokaliserade vid de amerikanska kusterna utförs med kopparnickeltuber i mer än hälften av antalet anläggningar. Aluminiummässing har använts i ca 40 % av anläggningarna.

I Europa är det framförallt Storbritannien som har erfarenhet från havsvattenkyllning. Livslängderna på tuber av materialen aluminiummässing och kopparnickel har uppvisat samma livslängd som i de amerikanska undersökningarna, dvs. 10 till 15 år. Man har nu beslutat att även för vanliga kraftverk använda kondensortuber av titan. I Frankrike har jämförelsen mellan kopparlegeringar och titan tydligt visat att titantuber är överlägsna.

I Västtyskland har man även börjat använda titan för kondensorer och kylare i floder. Titan har nämligen förutom god allmän korrosionsbeständighet även beständighet mot svavelväte.

Trots att vattnet runt svenska kusten är mindre aggressivt än i världshaven har erfarenhetsvärdena från våra kärnkraftverk inte varit goda.

I en sammanställning som Korrosionsinstitutet har gjort över praktiska erfarenheter från kylare och pumpar, framgår att kylare av kopparlegeringar beter sig på samma sätt som stora kondensorer dvs skadorna som uppstår är huvudsakligen stilleståndskorrosion och erosionskorrosion.

Tubmaterialet har då huvudsakligen varit aluminiummäsning. Vanligaste angreppet är avzinkning som dock inte brukar orsaka några djupare angrepp.

## 6 PÅVÄXT OCH AVLAGRINGAR

### 6.1 Allmänt om påväxt

Påväxt ur biologisk synpunkt är de samlande namnet för djur och växter som lever i vatten och är fästa på botten eller andra föremål. I tekniskt sammanhang används ordet påväxt på djur och växter som lever på tekniska installationer. Det förekommer ca 2 000 st arter, men det är endast ca 100 st som förekommer i sådan mängd att de orsakar några problem.

När en ren metallyta sänks ner i vattnet täcks den redan efter några timmar av bakterier, svampar och encelliga alger. Detta första skikt som bildas kallas "Primary slime". Inom några dagar börjar larver, sjöpungrar, nässeljur och snabbväxande alger att komma. Dessa kommer senare att konkurreras ut av livskraftigare men långsamt växande arter. Man bör notera att påväxten på en yta med få undantag utvecklas av larver.

### 6.2 Påväxtens beroende av miljön

Typen av påväxt beror på närmaste vattenområde. En rik flora och fauna ökar risken för påväxtproblem. Hög medeltemperatur och hög salthalt gör att antalet arter är stort i tropiska vatten eftersom mogna larver och sporer finns där under hela året. De tempererade vattenområdena däremot uppvisar en årstidsvariation när det gäller påväxtrisk. Anledningen till detta är troligen att fortplantningen hos många arter startas vid en bestämd temperatur. Ett skyddat läge och god tillgång på näring och syresatt vatten gynnar påväxten. Största risken för påväxt i svenska kustvatten är under perioden mars-oktober. Påväxten i Sverige är förhållandevis lindrig. Följande tabell visar påväxtrisken i relativa tal.

|                      |           |      |
|----------------------|-----------|------|
| Sverige - ostkusten  | mars-okt  | 0,8  |
| Sverige - västkusten | "-        | 4,0  |
| Atlanten             | hela året | 8,0  |
| Indiska oceanen      | "-        | 12,0 |

### 6.3 Korrosion i samband med påväxt

Det är svårt att avgöra påväxtens betydelse från korrosionssynpunkt, bland annat därför att korrosionen kan uppkomma av flera orsaker. Anmärkningsvärt är emellertid att påväxt kan minska korrosion genom att syretillförseln till metallytorna minskas.

Korrosion orsakad av påväxt och avlagring uppträder alltid i samband med annan korrosion. Detta gör att det kan vara svårt att avgöra hur stor del av den totala korrosionen som orsakas därav. Vid nedbrytningen av döda organismer uppkommer svavel- och kvävehaltiga sönderdelningsprodukter. Produkterna kan vid stillastående vatten få höga koncentrationer. Risken för den typen av korrosion blir stor när sådana bekämpningsåtgärder används där systemet sluts och fylls med sötvatten. Ett skyddande oxidskikt kan då ersättas av sulfider, vilket medför en risk för erosionskorrosion.

Vad som sagts här ovan gäller i första hand havsvatten. Ett visst problem med korrosion förekommer även i sötvatten. Problemet är dock betydligt mindre än i havsvatten. Lokal korrosion kan förekomma genom sulfatreducerande bakterier. Slembildning som alltid förekommer i sötvatten ger upphov till betydligt större problem än korrosion, genom att det sätter sig fast på värmeöverföringsytorna och därigenom försämrar värmeöverföringen. Bakterierna som ger upphov till slemmet kan naturligtvis inte bekämpas med rensgaller utan andra metoder måste användas, exempelvis klorering.



#### 6.4 Åtgärder mot påväxt

Många metoder har prövats mot påväxt. Ur ekonomisk synvinkel är metoder som hindrar organismer att fästa sig på konstruktionerna att föredra framför metoder som dödar organismerna men inte avlägsnar dem. Den åtgärden medför ofta en större risk än själva påväxten.

Stora problem kan man komma ifrån om den tänkta lokaliseringsplatsen för maskinelementet undersöks noga ur biologisk synpunkt. På detta vis kan naturliga yngelplatser för organismer undvikas.

Skador kan motverkas med flera metoder:

- Periodisk eller kontinuerlig klorering
- Beläggning med ett tunt skikt av TC99 eller motsvarande genom elektroavgivning skall både hindra påväxt och korrosion
- Kopparytor kan skyddas med  $\text{FeSO}_4$ -dosering
- Målning. Används dock sällan i dessa sammanhang

Organiska gifter är däremot olämpligt med hänsyn till miljön. Dessutom är denna metod dyr vid stora vattenmängder.

För att uppnå önskad effekt är det viktigt att behandlingsprogrammet är anpassat till de lokala biologiska förhållandena. Efter undersökning av vattentemperatur och observation av larv- och planktonförekomst kan behandlingsprogrammet bestämmas.

## 7 VÄRMEUPPTAGARE

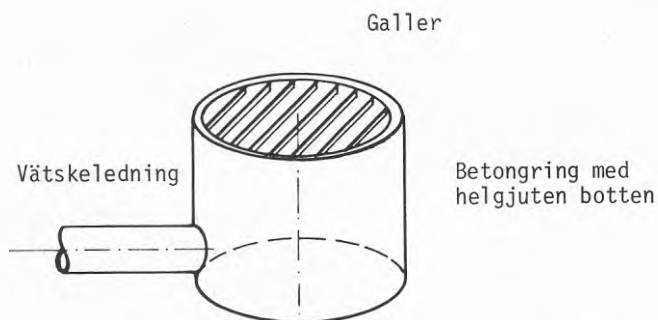
Med värmeupptagare avses i detta avsnitt hela systemet för överföring av värme från ytvattenkällan till värmepumpens köldmedium.

För värmepumpar med sjö- och havsvatten som värmekälla svarar denna del av anläggningen för mellan 10 och 50 % av anläggningskostnaderna, främst beroende på kostnader för ledningssystemet. Det är därför av största intresse att denna del av anläggningen konstrueras och utförs optimalt med hänsyn till kostnad och funktion.

### 7.1 Upptagningssystemets delar

Systemet kan i princip indelas i följande delar:

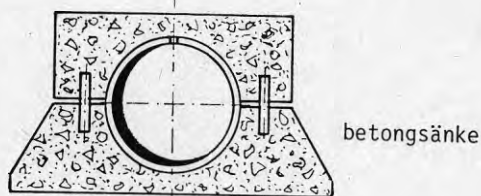
|                    |  |
|--------------------|--|
| <u>Vattenintag</u> | Funktionskravet inskränker sig till silanordning med låsning vid botten. I sin enklare form för små anläggningar ett metalldon med grovsil. Med ökande anläggningsstorlek alltmer sofistikerat med varierande höjdnivå beroende på bl.a. vattentemperatur. |
|--------------------|--|



Figur 7.1 Exempel, vattenintag 0.1-1 MW

### Vätskeledning under vatten

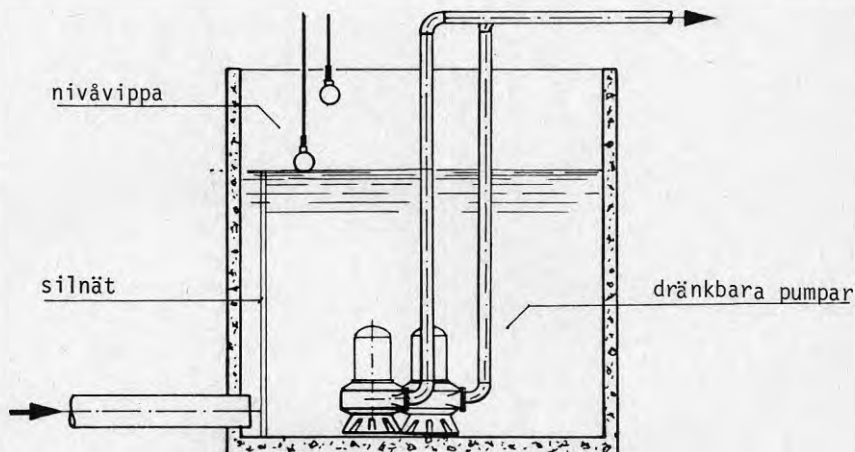
Funktionskravet är vattentransport vid lågt kraftbehov samt stabilitet mot strömmar och vågor. För små anläggningar används ofta plaströr med tyngder i form av blytråd eller betongvikter. Större anläggningar utförs med betong- eller träträtub.



Figur 7.2 Exempel, trätub diam 1000 mm under vatten

### Pumpanordning

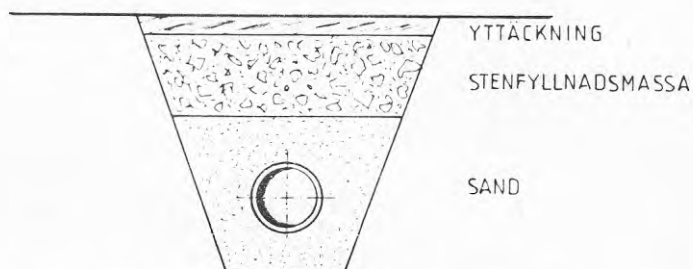
Funktionskravet infodring med lågt energi-behov. Vid små anläggningar kan pumpen placeras i anslutning till värmepumpen och utföras självsugande. Större anläggningar har ofta en pumpgrop i närheten av stranden med en bottennivå under sjövattnenytan



Figur 7.3 Exempel, pumpanordning 0.1-10 MW

Vätskeledning  
i mark

Funktionskravet är vattentransport vid lågt kraftbehov samt tåla förekommande marktryck. Utförs som konv. avloppsledning i betong, trä eller plast

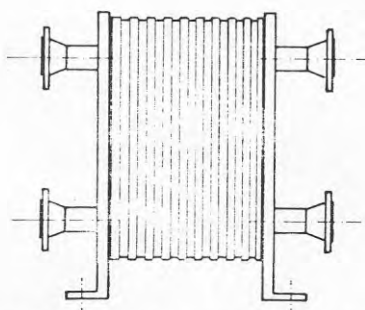


Figur 7.4 Exempel, plastledning i mark, diam 200 mm

Värmeväxlare  
ytvatten/brine

(Vid indirekt system)

Funktionskravet är korrosionsmotstånd, lågt vätskemotstånd och goda värmeöverförande egenskaper. Plattvärmeväxlare är fördelaktiga vid större system



Figur 7.5 Exempel, plattvärmeväxlare

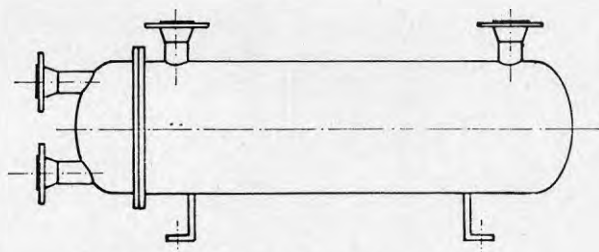
Brinepump,  
brineledningar  
m.m.

(Vid indirekt system)

Eftersom brine är blandning av vatten och frysskyddsmedel måste ingående delar utföras för detta speciella medium

Förångare

Funktionskravet innefattar motståndskraft mot höga tryck, goda korrosionsegenskaper, värmeöverföringstal som motsvarar det specifika medium som berör resp. yta. För sjö- och havsvatten har framförallt den låga vintertemperaturen lett fram till konstruktioner som är okänsliga för påfrysning. Dessa görs av detta skäl ofta öppna i form av rör eller plattor. Den öppna konstruktionen underlättar även inspektion och rengöring. För förångare med latent värmeupptagning gäller att dessa lätt skall kunna avisas.



Figur 7.6 Förångare av tubpannetyp

Isutmatnings-  
och krosspump-  
anordning

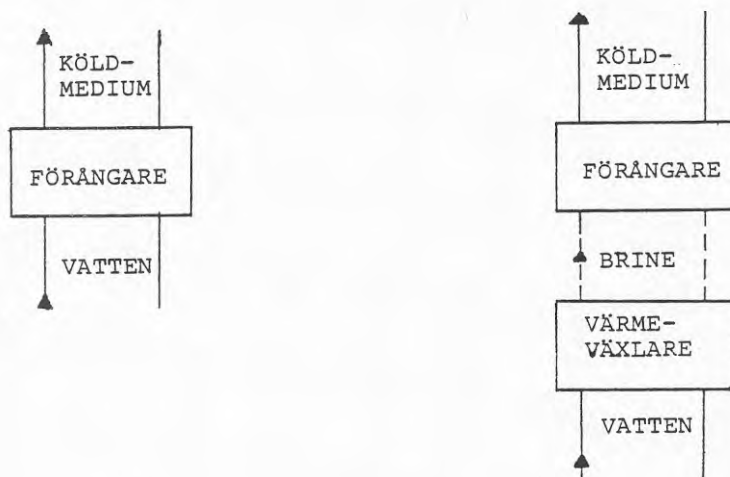
Speciell funktion som är nödvändig vid värmepumpar som utnyttjar latent värme

Returledning

Ofta är det möjligt att utnyttja befintligt dike, dagvattenledning etc för återföring av vatten till värmekällan.

## 7.2 Olika använda system

Man skiljer allmänt mellan direkt och indirekt kylning och värmeutvinning genom temperatursänkning (förnimbart värme) och latent värmeutvinning. Även begreppen öppna och slutna system används. Med ett öppet system avses alla system där vattnet pumpas till anläggningen, medan slutna är sådana där värmeupptagningen sker med värmeväxling i vattnet. Vid direkt kylning överförs värmen i vattnet direkt till köldmediet, medan man vid indirekt kylning låter vattnet, via en värmeväxlare, värma en värmebärare (även kallad brine). Brinen passerar sedan förångaren och värmer där köldmediet.



Figur 7.7. Direkt resp. indirekt system

Brinen utgörs av en vattenblandning med låg fryspunkt för att undvika sönderfrysning av förångaren. Vanligen används saltlösningar eller blandningar av sprit och vatten.

Ur energisynpunkt är direkta system att föredra då man erhåller en högre förångartemperatur på grund av den direkta värmeöverföringen mellan sjö eller havsvatten och köldmedium. Den högre förångningstemperaturen leder till en bättre värmefaktor.

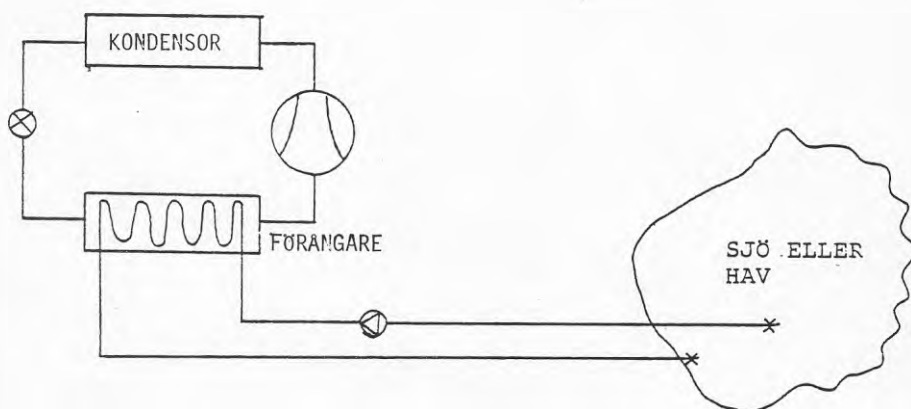
Med det indirekta systemet kan förångaren göras billigare då risken för korrosion minskar. Vidare elimineras frysrisk. Då man dessutom kan utnyttja större temperaturdifferens mellan in- och utgående vätska i förångaren kan brineflödet och därmed kulvertkostnad och pumparbete sänkas, jämfört med direkt system.

Vilket system som är lämpligast är en optimeringsfråga, där hänsyn också måste tas till driftsäkerhet, värmevärlarkostnad m m.

Vid sensibel värmeutvinning kyls vattnet aldrig ned till frysning. Vattnet är därmed ständigt i vätskefas. De flesta anläggningar görs på detta sätt. De senaste årens utveckling mot allt bättre förångarkonstruktioner har inneburit att möjligheten att utnyttja även vatten nära  $0^{\circ}\text{C}$  för sensibel värmeutvinning har ökat.

Vid latent värmeutvinning utnyttjas isbildningsvärmets för en del av vattenflödet. Återstående vatten utnyttjas för borttransport av den bildade isen.

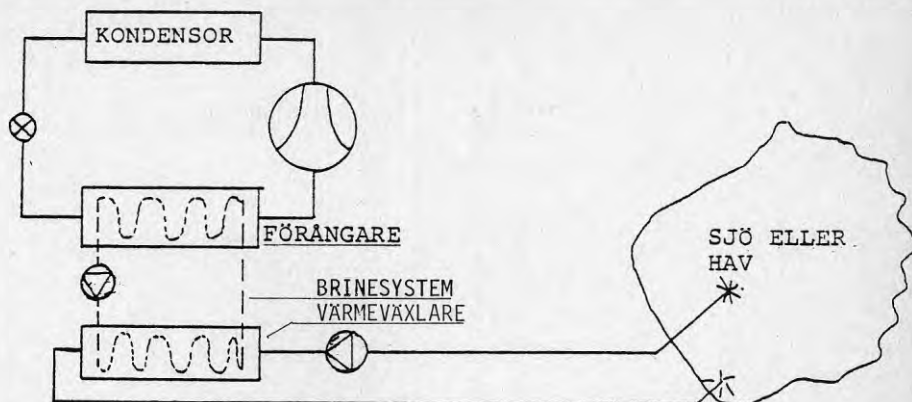
De alternativa metoderna redovisas i det följande i form av schematiska figurer.



Figur 7.8 Direkt, öppet system med värmeutvinning genom temperatur-sänkning av vattnet (förmåbart värme)

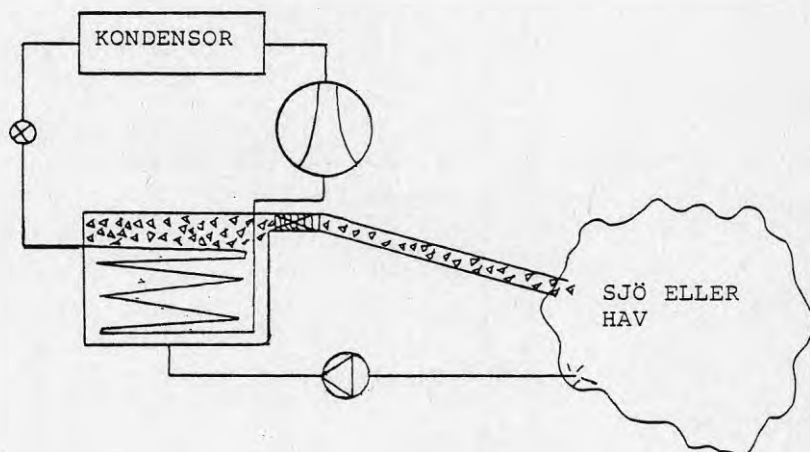
Sjö- eller havsvattnet tas direkt in i förångaren. Förångaren utgörs t ex av en öppen strilförångare med köldmediet inuti rören och följdaktligen s.k. "direktförångning." Risken för sönderfrysning är därmed minimerad.





Figur 7.9 Indirekt, sensibelt öppet system med värmeutvinning genom temperatursänkning av vattnet (förnibbart värme)

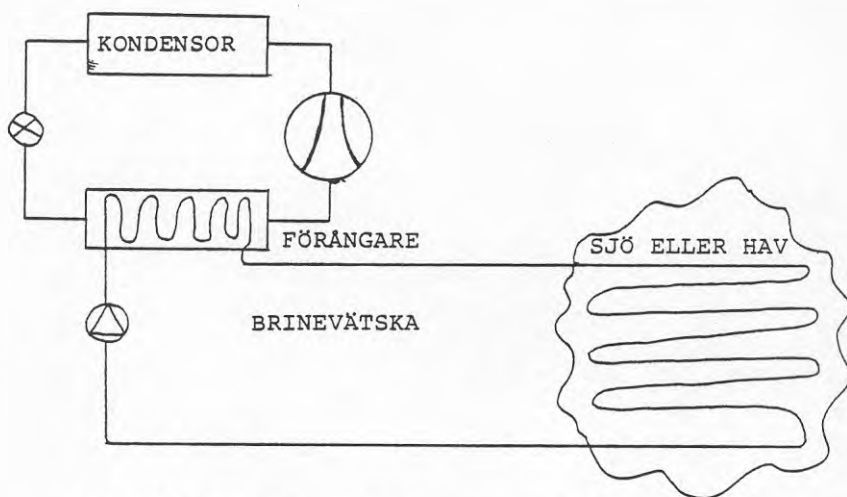
Sjö- eller havsvattnet passerar en plattvärmeväxlare, där det avger värme till en brine. Brinen förs sedan till en förångare av t.ex. tubpannetyp där den avkyls. Genom att brine används kan förångaren göras relativt enkel och till lågt pris. Dock kommer förångningstemperaturen att sänkas ca  $5^{\circ}\text{C}$  på grund av den extra värmeväxlaren.



Figur 7.10 Direkt, öppet system med latent värmeutvinning

Sjö- eller havsvattnet får delvis frysa så att issörja bildas. Issörjan återförs med skruvtransportör eller annan lämplig mekanism.

Systemet medför små vattenflöden genom isens höga smältvärme.



Figur 7.11 Indirekt, slutet system med latent värmeutvinning

Värme tas från sjön eller havet via en brinevätska i plastslang på botten. Brinevätskan förs sedan till en konventionell förångare. För att hålla ned slanglängden bör man låta temperaturdifferensen vara hög. Därigenom kommer slangens utsida att hålla en temperatur under  $0^{\circ}\text{C}$  och ispåfrysning sker.

Isen isolerar slangen och därför bör man ej låta isskiktet växa sig alltför tjockt. En viss istillväxt påverkar dock inte värmeöverföringen negativt då samtidigt ytterytan ökar och därmed flänsverkan uppstår.

Det stora problemet med denna typ av system är dock lyftkraften från de isbelagda slangarna.

### 7.3 Alternativens förutsättningar

Teoretiskt krävs följande vattenflöden för en anläggning med ca 100 kW värmeeffekt, värmefaktor 3 och förnimbar temperatursänkning 2°C.

| <u>Andel is/vatten</u> | <u>Vattenflöde</u> |
|------------------------|--------------------|
| 0 %                    | 7.9 l/s            |
| 25 %                   | 0.8 l/s            |
| 50 %                   | 0.4 l/s            |
| 75 %                   | 0.3 l/s            |
| 100 %                  | 0.2 l/s            |

De förutsättningar som i övrigt bör gälla för att visst system skall vara fördelaktigt att välja redovisas i nedanstående tabell 7.1.

Tabell 7.1

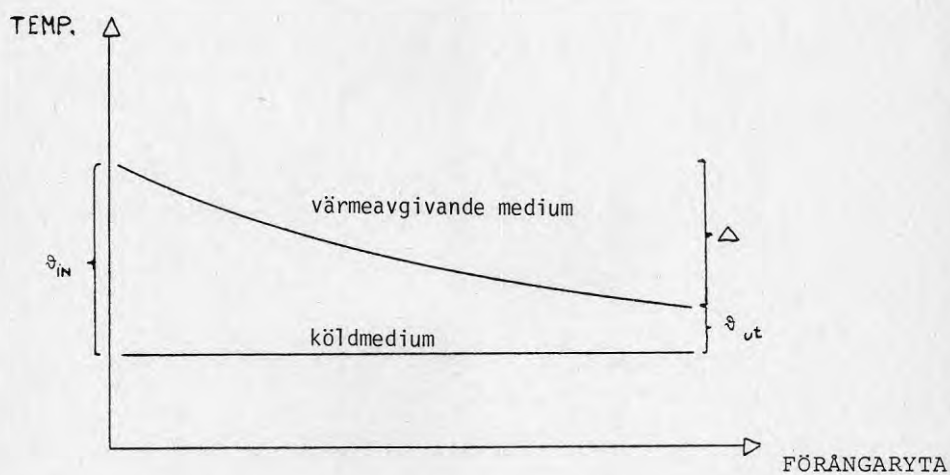
| System                      | Villkor   |
|-----------------------------|---|
| <u>Direkt, förnimbart</u>   | Värmepump över 100 kW<br>Lägsta vattentemperatur 2,5-3°C<br>Vattenkvalitet acceptabel. Möjlighet att transportera större vattenflöden<br>Värmekällan ej begränsad |
| <u>Indirekt, förnimbart</u> | Generellt för villavärmepumpar som utnyttjar utlagda slangar på sjöbotten.<br>Svåra korrosionsförhållanden<br>Höga vattentemperaturer                             |
| <u>Direkt, latent</u>       | (Finns endast enstaka provanläggning vid Älvkarleby)<br>Närhet till strömmande vattendrag<br>Låg vattentemperatur (0°C)   |
| <u>Indirekt, latent</u>     | Begränsad möjlighet till slanglängd vid utläggning på sjöbotten<br>Mindre anläggningar  |

Man bör observera att latent system producerar avsevärda ismängder. En teoretisk villavärmepump kommer att under ett normalår producera en ismängd om ca 250 m<sup>3</sup>.

#### 7.4 Formler för förångardimensionering

I förångaren sker värmeförseln till värmepumpprocessen. Värmet upptas av köldmediet, huvudsakligen i form av ångbildningsvärme. Därigenom sker värmeupptagningen i förångaren i princip vid konstant temperatur. Temperaturen i det värmeavgivande mediet, exempelvis sjövattnet, kommer däremot att sjunka under värmeavgivning.

Schematiskt kan temperaturförloppet i förångaren beskrivas enligt figur nedan:



Figur 7.12 Temperaturer i förångare

Temperatursänkningen på det avgivande mediet enligt figur

$$\Delta = \vartheta_{in} - \vartheta_{ut} \quad (^\circ\text{C})$$

Rent allmänt gäller för en värmväxlare:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \vartheta_{lm}$$

$\dot{Q}$  = överförd värme (W)

$k$  = värmegenomgångstal ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

$A$  = den värmeöverförande ytan ( $\text{m}^2$ )

$\vartheta_{lm}$  = den logaritmska medeltemperaturdifferensen ( $^\circ\text{C}$ )

Den logaritmiska medeltemperaturdifferensen  $\vartheta_{lm}$  definieras som:

$$\vartheta_{lm} = \frac{\vartheta_{in} - \vartheta_{ut}}{\ln(\vartheta_{in}/\vartheta_{ut})}$$

men kan vid överslagsberäkningar sättas till:

$$\vartheta_{lm} = \sqrt{\vartheta_{in} \cdot \vartheta_{ut}}$$

Värmeomgångstalet  $k$  beror av en mängd faktorer. Bland annat inverkar valet av köldmedium, förångarens ytförhållanden (flänsar), uppträdande temperaturdifferenser m.m.

Vanliga  $k$ -värden är 150-500 W/m<sup>2</sup>C för brinekylare med R 12 eller R 22 som köldmedium.

För ytor belagda med smuts eller alger kommer  $k$ -värdet att sjunka avsevärt. Det är därför mycket viktigt att ytorna hålls rena.

Inversen till ett  $k$ -värde,  $1/k$ , kallas för totala värmemotståndet  $m_{tot}$ . Det totala värmemotståndet sammansätts av värmemotstånden på köldmediesidan  $m_k$ , brinesidan  $m_b$  samt värmemotståndet i förångarväggen  $m_f$  i vilket också inkluderas motståndet i smutsskiktet.

Alltså gäller:

$$m_{tot} = (1/k) = m_k + m_b + m_f$$

$m_k$  och  $m_b$  är under normala förhållanden konstanta oavsett försmutsning. Vid tjockare smutsbeläggning kommer dock tryckfallet på brinesidan att öka så mycket att vätskeflödet minskar, med följden att  $m_b$  stiger,

$m_f$  kan skrivas:

$$m_f = \frac{\delta f}{\lambda f} + \frac{\delta s}{\lambda s}$$

$\delta f$  = förångarmaterialets tjocklek  
 $\delta s$  = smuts eller algskiktets tjocklek  
 $\lambda f$  = förångarmaterialets värmeledningstal  
 $\lambda s$  = belägningens värmeledningstal

Beräkningen av de tekniskt och ekonomiskt optimala temperaturdifferenserna i förångaren är ett komplicerat problem som bland annat involverar uppskattningar av anläggningskostnad, drifttid, framtida energikostnader m m.

Väljer man den logaritmiska medeltemperaturdifferensen  $v_{lm}$  liten kommer förångaren att få stora ytor, vilket medför en hög anläggningskostnad men en lägre energiförbrukning. Gör man  $v_{lm}$  stor blir anläggningen billigare men driften dyrare. Till detta kommer i fallet med direktkylning risken för isbildning i förångaren, vilket ytterligare komplicerar problemet.

Ytförsmutsningen orsakas dels av smuts och korrosionsprodukter i vattnet eller köldmediet och dels av alger och annan påväxt på vattensidan.

Vid normal förångardimensionering räknar man med "ett smutsmotstånd" på ca  $1/2000 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ . Om värmeväxlarytorna beläggs med alger kommer smutsmotståndet att stiga kraftigt.

Enligt tidigare gäller:

$$m_f = \frac{\delta f}{\lambda f} + \frac{\delta s}{\lambda s}$$

Vid påväxt av värmeväxlarytorna med 1 mm alger kommer smutsmotståndet att bli:

$$\frac{\delta s}{\lambda s} = \frac{0,001}{0,56} \approx \frac{1}{600}$$

om vi antar att värmeledningstalet i algskiktet motsvarar stillastående vatten vid  $0^\circ\text{C}$ .

Likaså gäller:

$$m_{\text{tot}} = \frac{1}{k} = m_k + m_b + m_f$$

men  $m_k$  och  $m_b$  samt  $\frac{\delta f}{\lambda f}$  är konstanta oberoende av algpåväxt.

En förångare med k-värdet  $500 \text{ (W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C)}$  kommer alltså efter algpåväxt att endast ha:

$$\frac{1}{500} + \frac{1}{600} = m_{\text{tot}} + \frac{\delta s}{\lambda s} \Rightarrow k = 270 \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

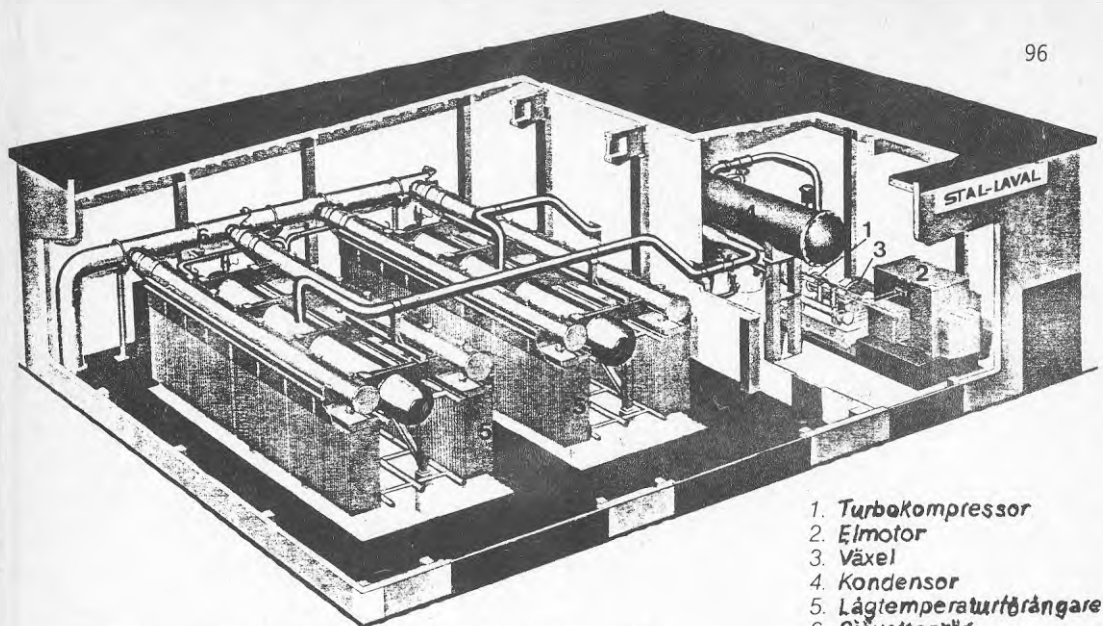
dvs nära en halvering. Omvänt krävs dubbelt så hög  $v_{1m}$  för att överföra samma värmemängd vilket mycket ogynnsamt påverkar värmefaktorn.



### 7.5 Förångarsystem vid sensibel värmeutvinning, exempel (Källa: Stal-Laval)

Som exempel redovisas förångarsystemet vid värmepump-  
läggningen i ASEA:s fabrik i Ludvika. Värmekällan är sjön  
Väsman.

|                     |  |
|---------------------|--|
| <u>Värmekällan:</u> | Area: $35 \text{ km}^2$<br>Volym $410 \times 10^6 \text{ m}^3$<br>Medeldjup: 12 m<br>Maxdjup: 60 m<br>Volym i den del av sjön som direkt<br>utnyttjas av värmepumpen<br>är $130 \times 10^6 \text{ m}^3$ |
| <u>Vattenintag:</u> | Dubbla vattenintag för optimal tempera-<br>tur. Vinterintag beläget på 30 m djup.<br>Sommarintag är beläget vid vattenytan   |
| <u>Ledningar:</u>   | Ledningstyp: trätuber<br>Vinterledning 1100 m<br>Sommarledning 200 m<br>Utloppsledning 400 m   |
| <u>Pumpstation:</u> | Pumpstation med pumpgrop<br>belägen vid strandlinjen<br>Antal pumpar: 2 st   |
| <u>Förångare:</u>   | Strilförångare, se figur 7.13<br>Kyleffekt vid ingående vattentemperatur<br>$+ 2^\circ\text{C}$ och flöde 1200 l/s är 7.8 MW   |



Figur 7.13 Strilförångare 7.8 MW vid ASEA, Ludvika

7.6 Förångarsystem vid latent värmeutvinning, exempel  
(Källa: TETAB AB, Vattenfall)

Denna typ av anläggning finns endast i ett exemplar vid Vattenfalls anläggning i Älvkarleby.

Anläggningen är en provanläggning där vissa problem förekommit med bl a utmatning av is. Efter en omkonstruktion av iskrossen har anläggningen fungerat tillfredsställande.

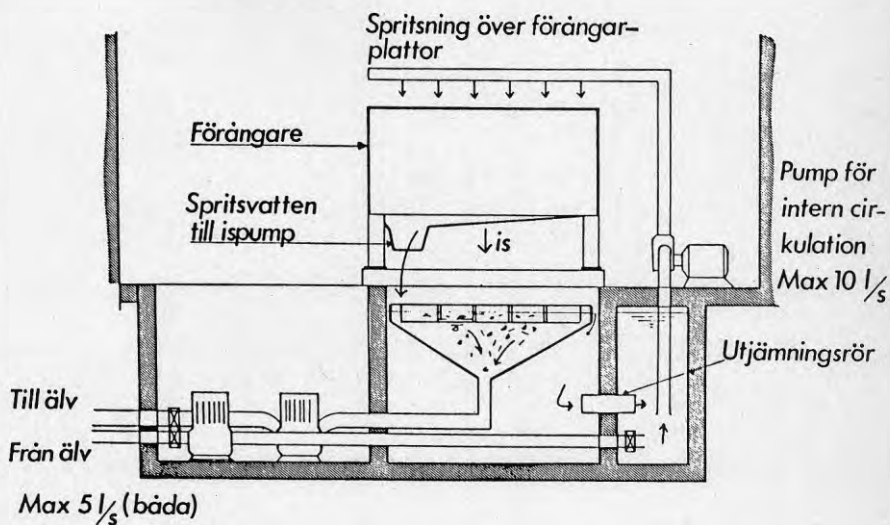
Vatten pumpas från Dalälven till en bassäng där det blandas med "isvatten" från förångaren.

Den cirkulerande vattenmängden är ca 10 l/s medan intaget vatten från älven är ca 4 l/s.

Isvattenblandningen pumpas från anläggningen tillbaka till recipienten som en slurry, blandningsförhållandet är då ca 5.

- Värmekälla: Dalälven
- Ledningar: Ledningstyp: plastledningar, 40 m, diam ca 75 mm
- Pumpstation: Pumparna är belägna i anläggningen.  
Antal: 2 st
- Förångare: Strilförångare  
Kyleffekt ca 100 kW  
Vattenflöde ca 4 l/s  
Isproduktion 1 m<sup>3</sup> fast is per timme

### SYSTEM FÖR ÄLVVATTEN-PRINCIP



Ur ref 17

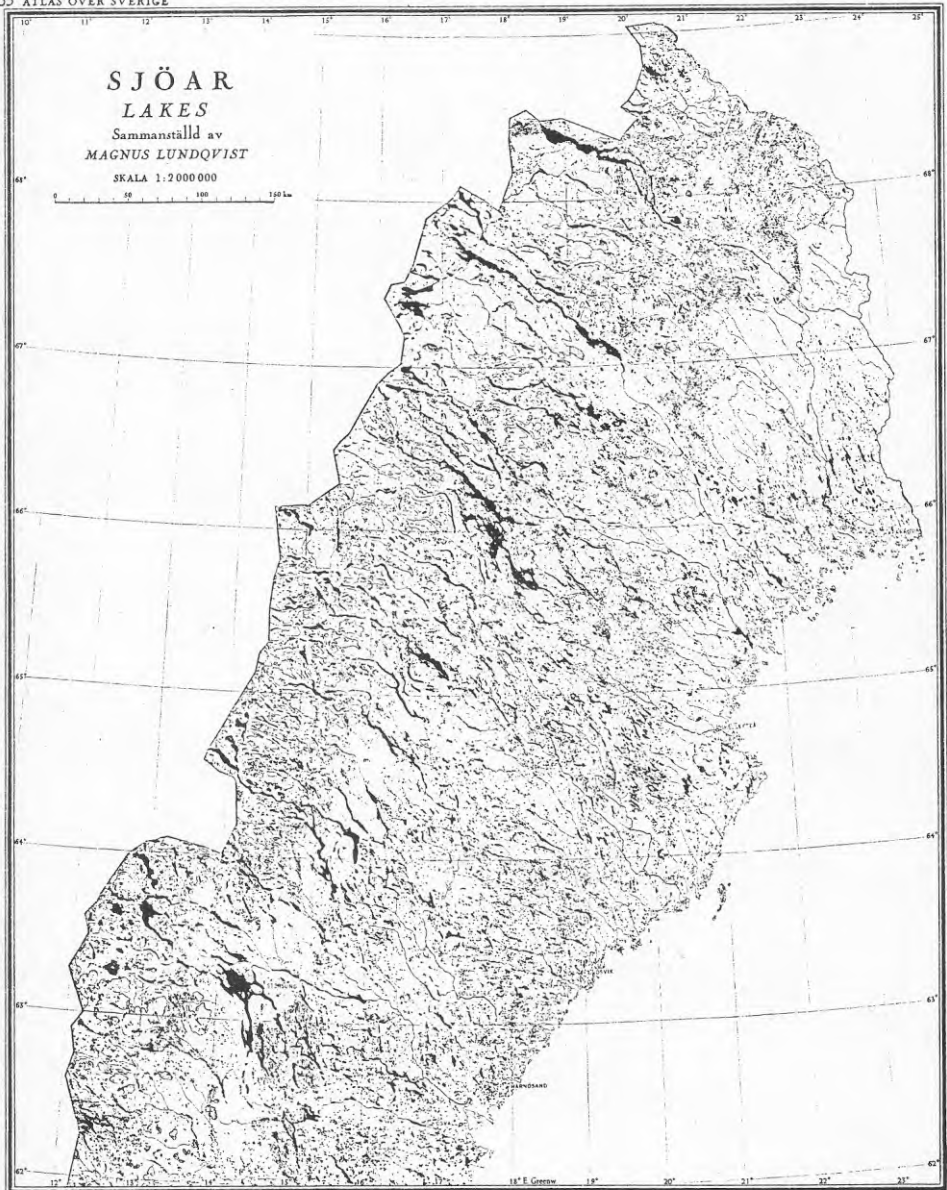
Figur 7.14

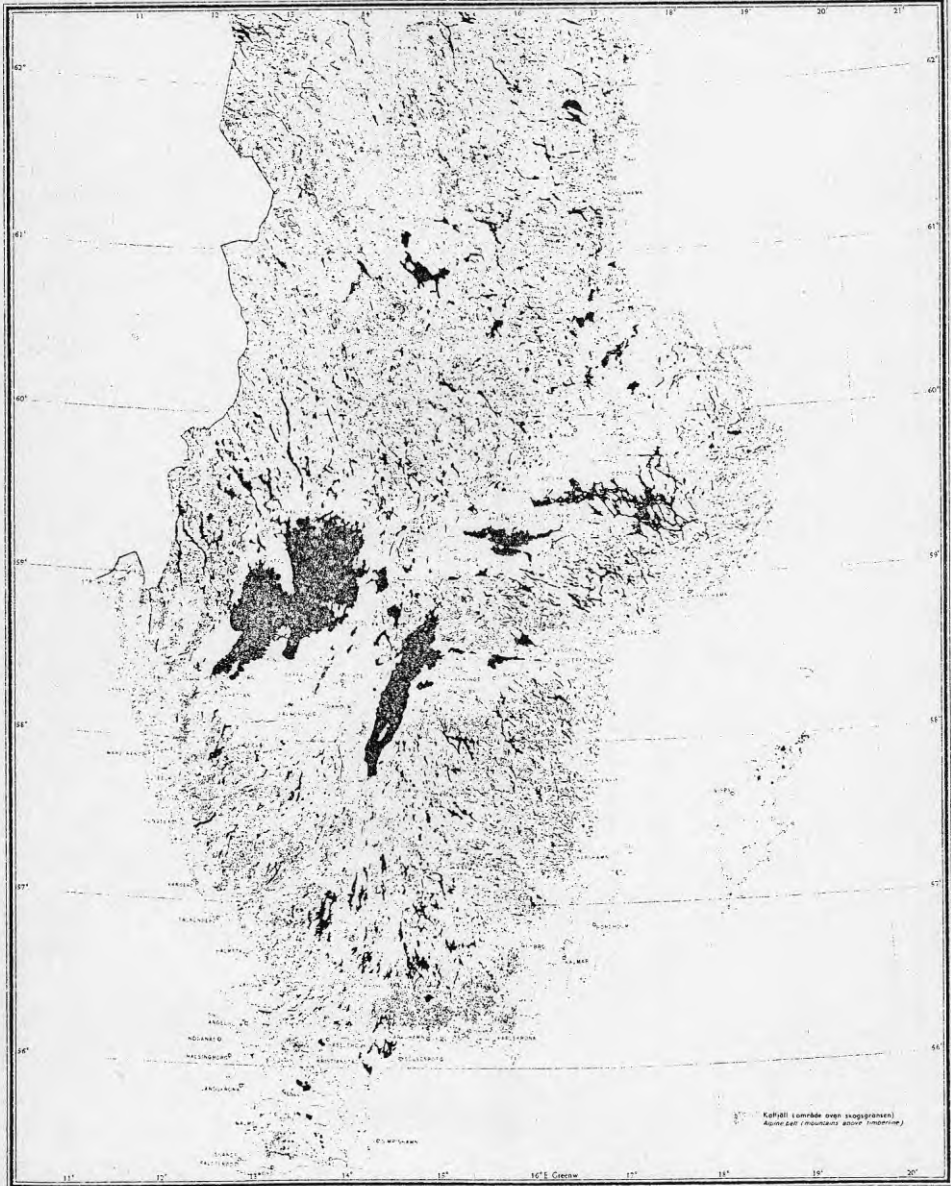
8. REFERENSLISTA

1. Bäckström, M, 1970, Kyltekniker (Almqvist & Wiksell) Stockholm
2. Dynamiska studier i sjöar 1973-1974, 1975, Rapport av IHD:s sjögrupp, Stockholm
3. Dynamiska studier i sjön Velen, 1973 Rapport av IDH:s sjögrupp, Stockholm
4. Dynamic Studies in Lake Velen, 1973 Rapport 31 av IDH:s sjögrupp, Stockholm
5. Hutchinson, G.E., 1957, A Treatise on Limnology, Volume 1 (John Wiley & Sons) New York
6. Johnsson, O.H., 1948, Termisk-Hydrologiska studier i sjön Klämningen, Geografiska Annaler 28-29, Stockholm
7. Lindfors, L.G. 1974, Miljövård (Ekologi och miljövårdsteknik), Miljövårdscentrum KTH, Stockholm
8. Pierre, Bo, 1972, Kylteknik, Institutionen för Mekanisk värmeteorik och kylteknik, KTH, Stockholm
9. Ruttner, F, 1970, Fundamentals of Limnology, (University of Toronto Press), Toronto
10. Sjöars dynamik - studier av datainsamlings- och bearbetningsmetoder, 1971, Preliminärrapport IDH:s sjögrupp, Stockholm
11. Vasseur, B, 1975, Temperaturförhållanden i svenska kustvatten, SMHI Rapporter Nr RH03, Stockholm
12. Lind, G, Falkenmark M, 1979, Hydrologi (Studentlitteratur)
13. Atlas över Sverige, Hydrologi Svenska sällskapet för autropologi och geografi
14. Moberg, A., Svenska sjöars isläggings- och islossningstidpunkter, 1967. Rapport från SMHI Serie Hydrologi Nr 4
15. Temperaturmätningar vid Visby, B Broman Spridning av utsläppt vatten, B Vasseur 1981. HB Rapport Nr 47 från SMHI
16. Naturliga värmekällor för värmepumpar inom Stockholms Kommun VIAC 1981
17. Sjövärmesystem BFR Seminarium maj 1982

9. BILAGOR

1. Karta över Sveriges sjöar
2. Temperaturkurvans förlopp i en sjö vid olika årstider
3. Vattentemperatur i Klämningen, 1941-42
4. Vattentemperaturen i Klämningen, 1941-44
5. Densiteten för rent vatten
6. Vattentemperatur under isen
7. Vattentemperaturens utveckling i Velen, 1969-71
8. Värmeinhållet i sjön Velen 1969-71
9. Multipellinjär regression
10. Sjömaterialets spridning
11. Djupkarta över sjön Velen
12. SMHI rapport

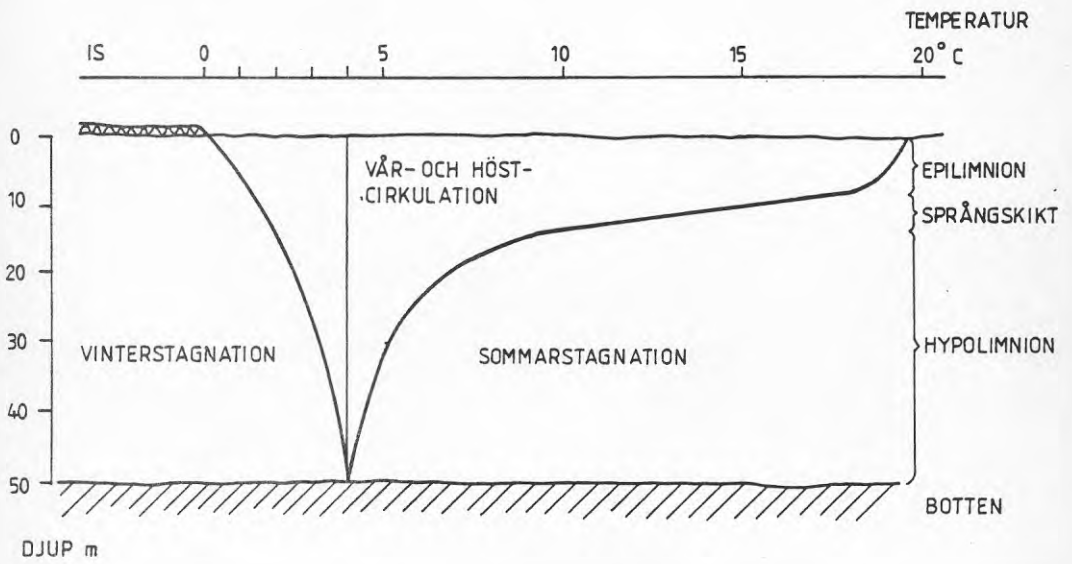




1965

UR RLF 13

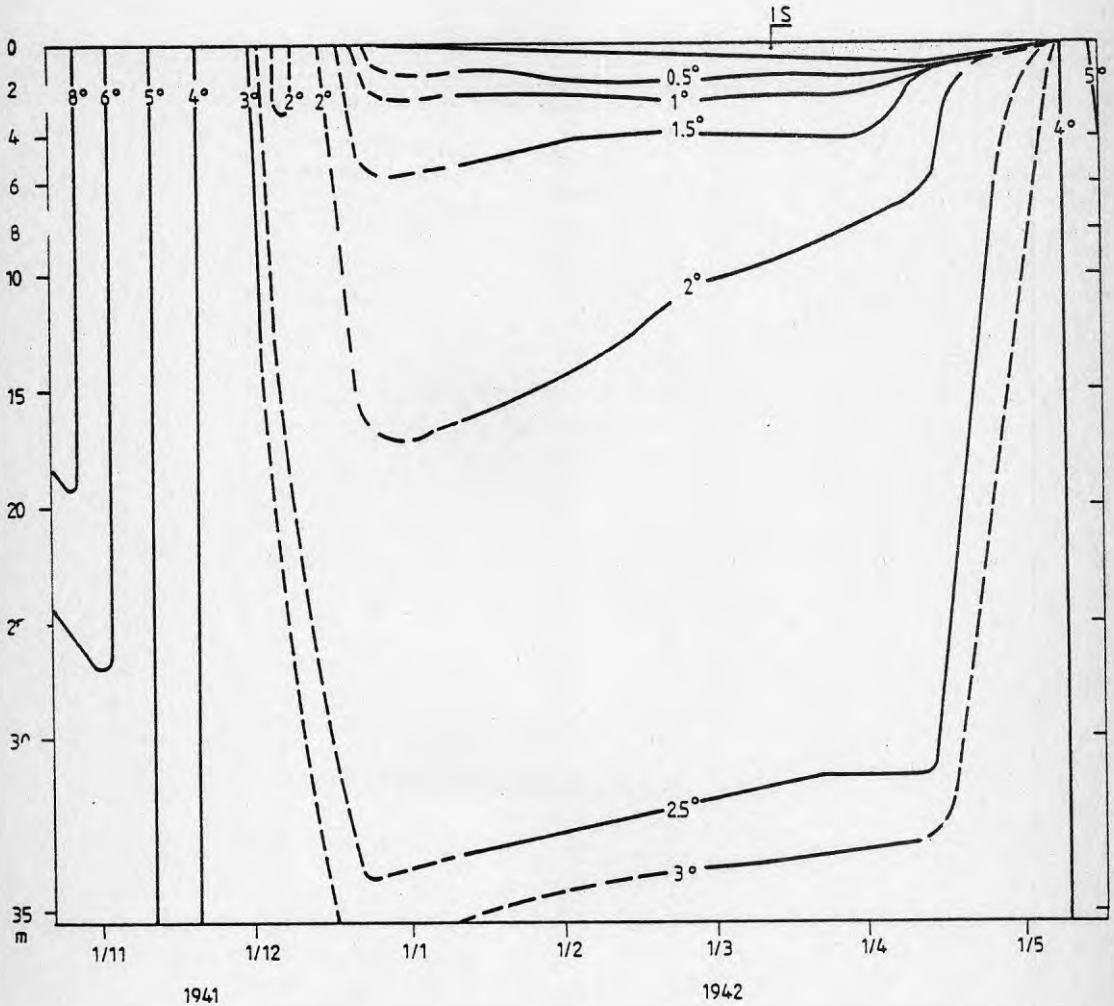
AB KARTOGRAFISKA INSTITUTET



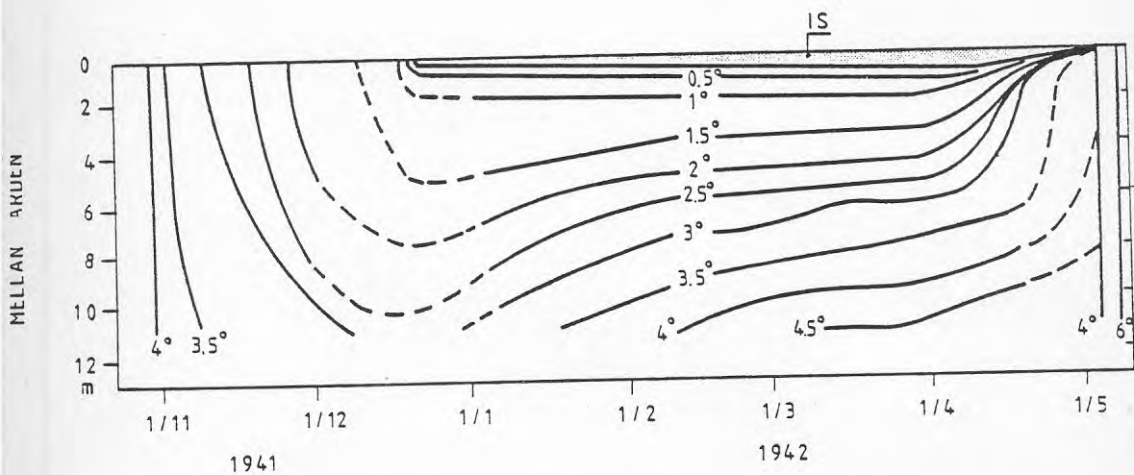
TEMPERATURKURVANS FÖRLOPP I EN SJÖ VID OLIKA ÅRSTIDER

UR REF. 7.





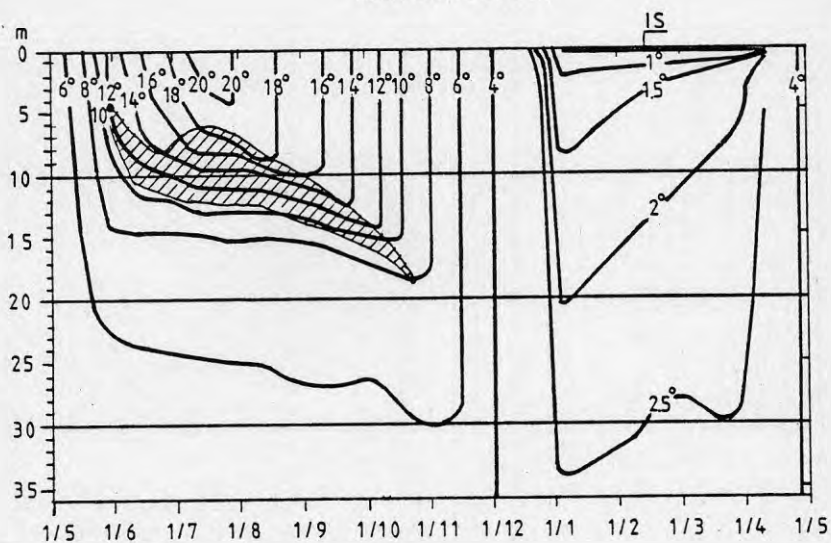
VATTENTEMPERATUREN VID OLIKA DJUP I KLÖVSTAFJÄRDEN I SJÖN KLÄMMINGEN UNDER VINTERN 1941 - 1942



VATTENTEMPERATUREN VID OLIKA DJUP I MELLANFJÄRDEN I SJÖN KLÄMMINGEN. UNDER VINTERN 1941-1942

UR REF. 6.

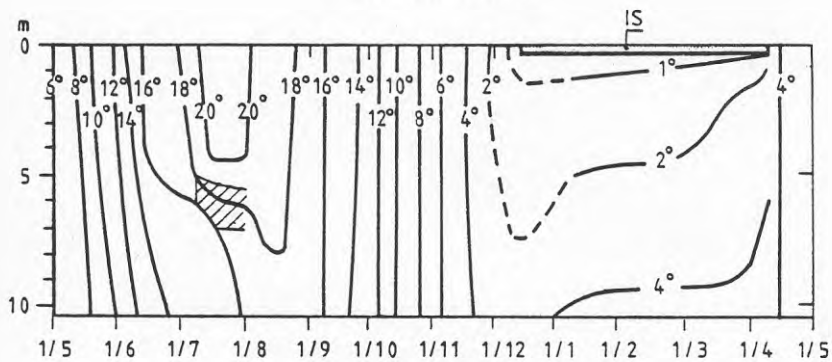
KLÖVSTAFJÄRDEN



VATTENTEMPERATUREN I SJÖN KLÄMMINGEN 1/5 1941 - 30/4 1949

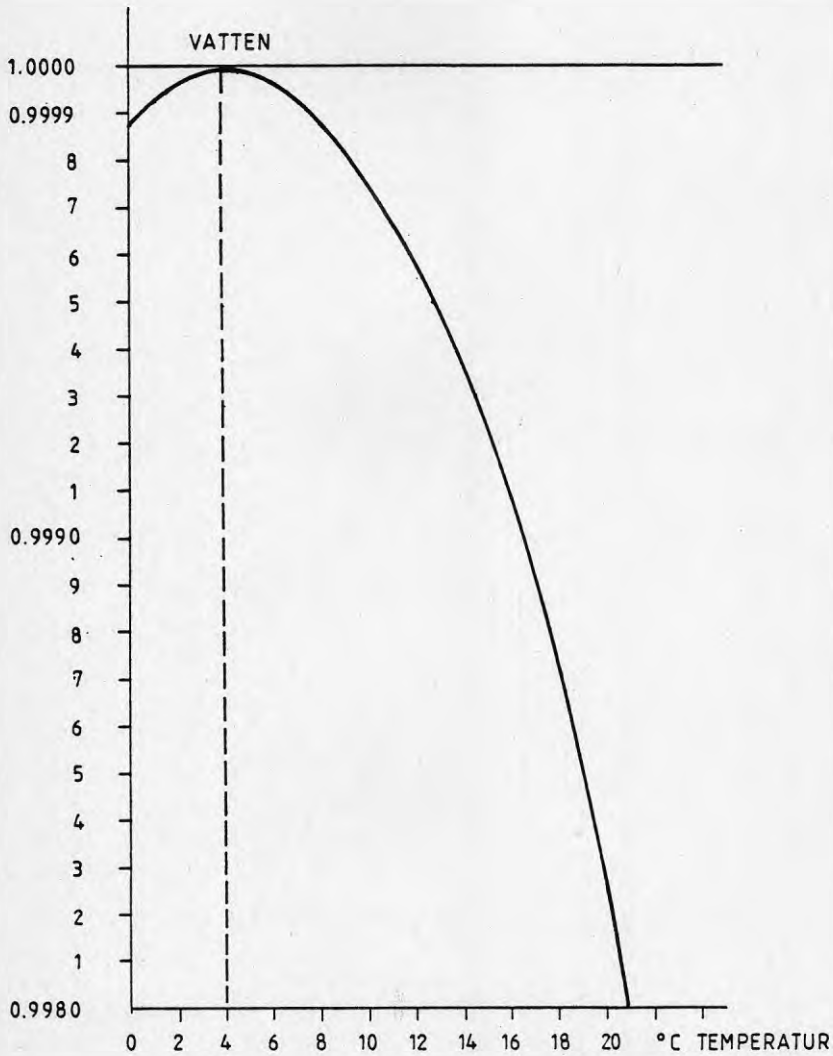
UR REF. 6.

MELLANFJÄRDEN



VATTENTEMPERATUREN I SJÖN KLÄMMINGEN 1/5 1941-30/4 1944

UR REF. 8.

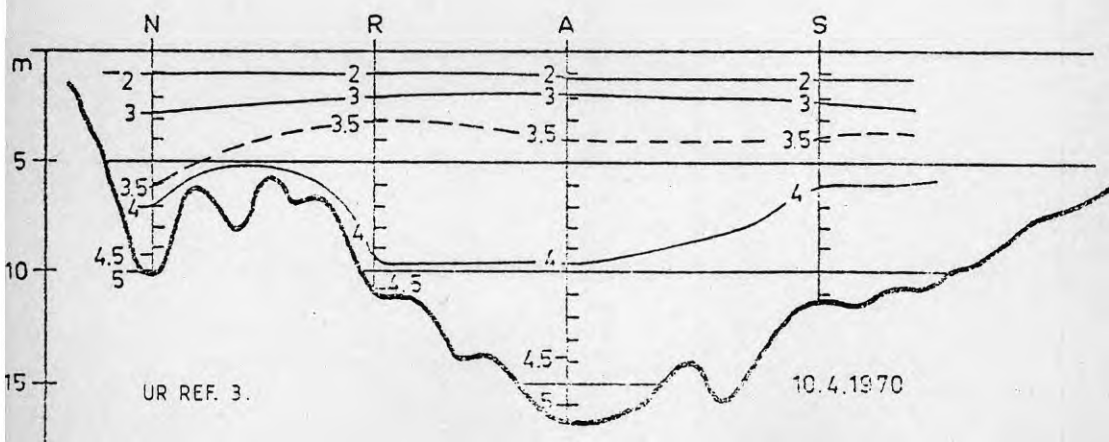
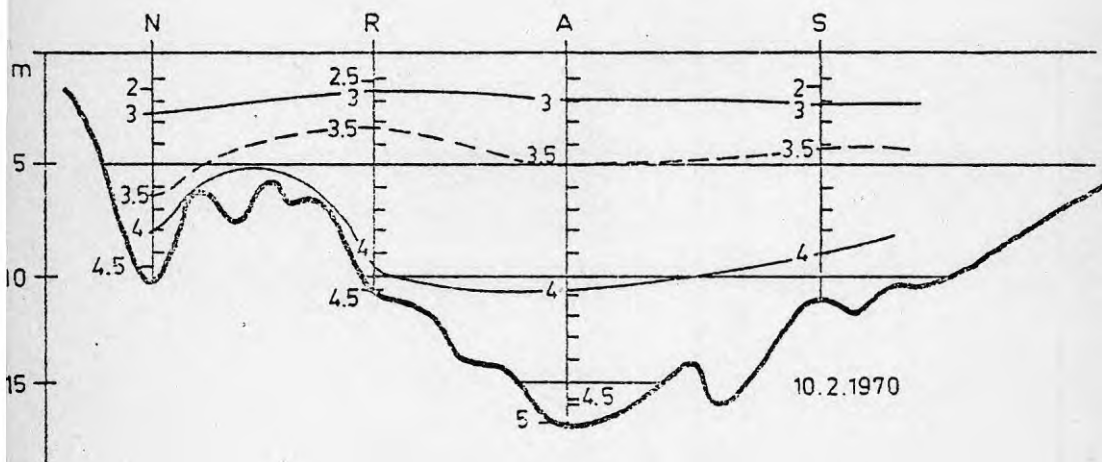
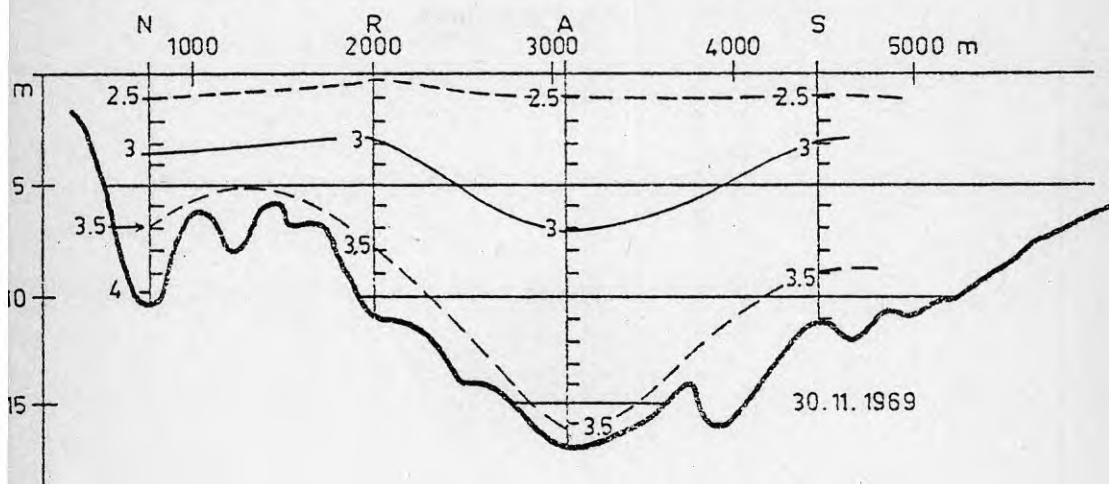


DENSITETEN SOM FUNKTION AV TEMPERATUREN FÖR RENT VATTEN

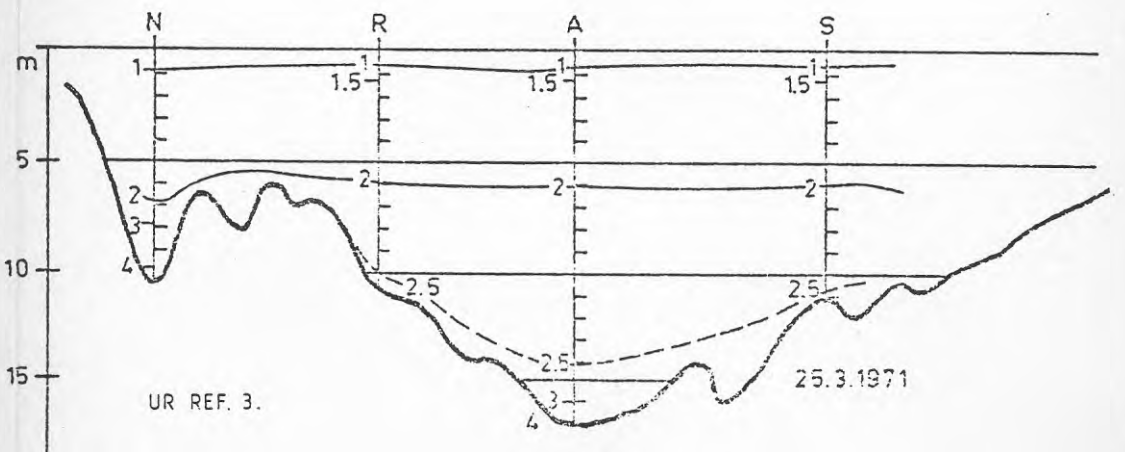
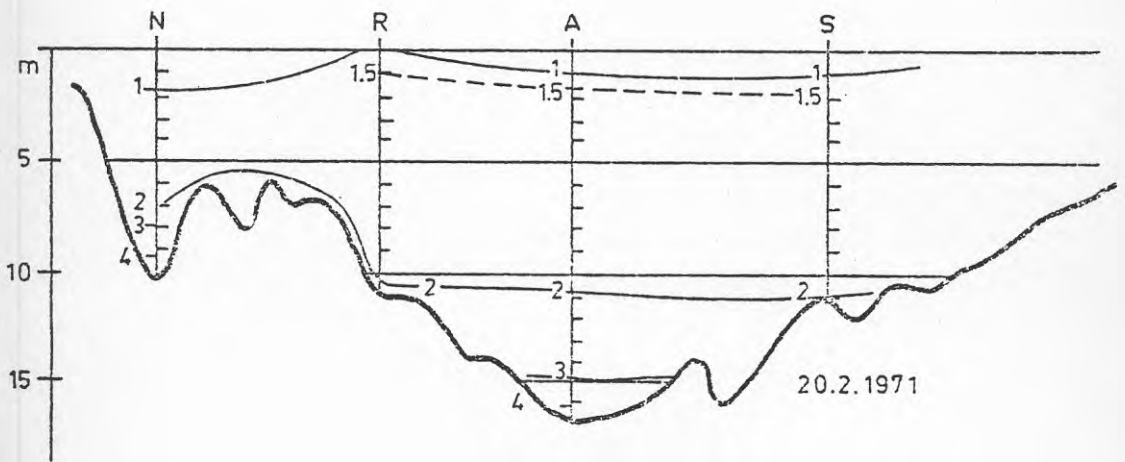
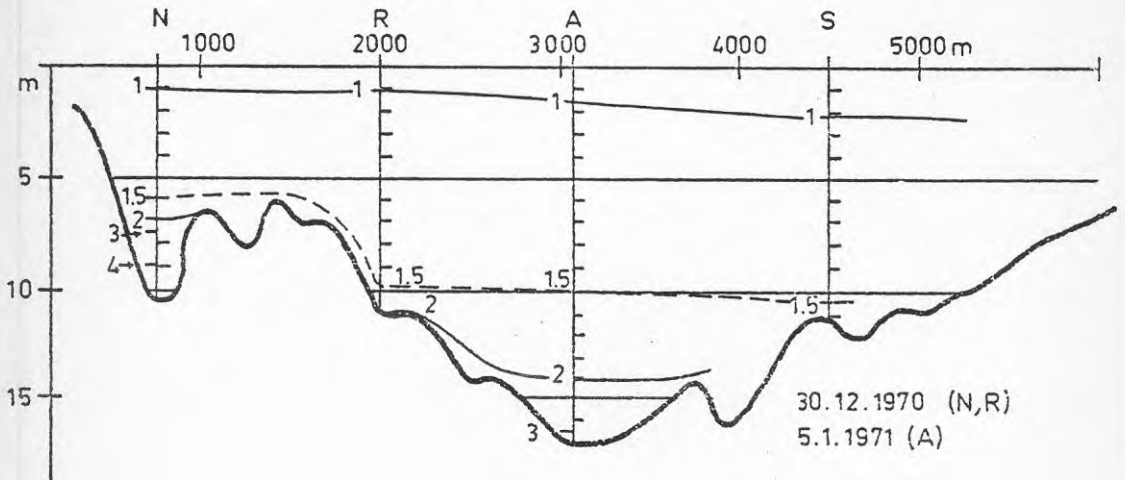
UR REF. 9



VATTENTEMPERATURENS UTVECKLING I VELEN VINTERN 1969-70

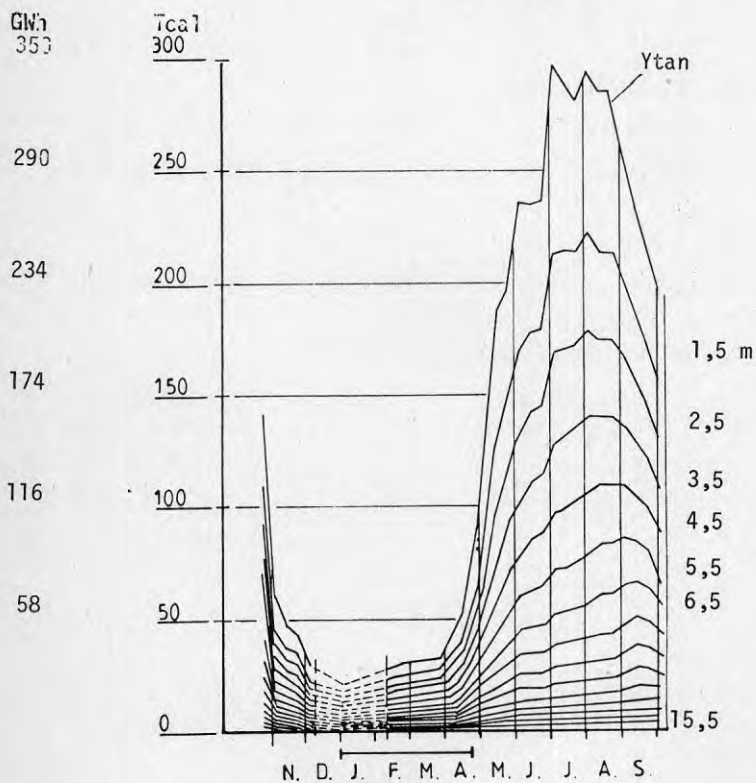
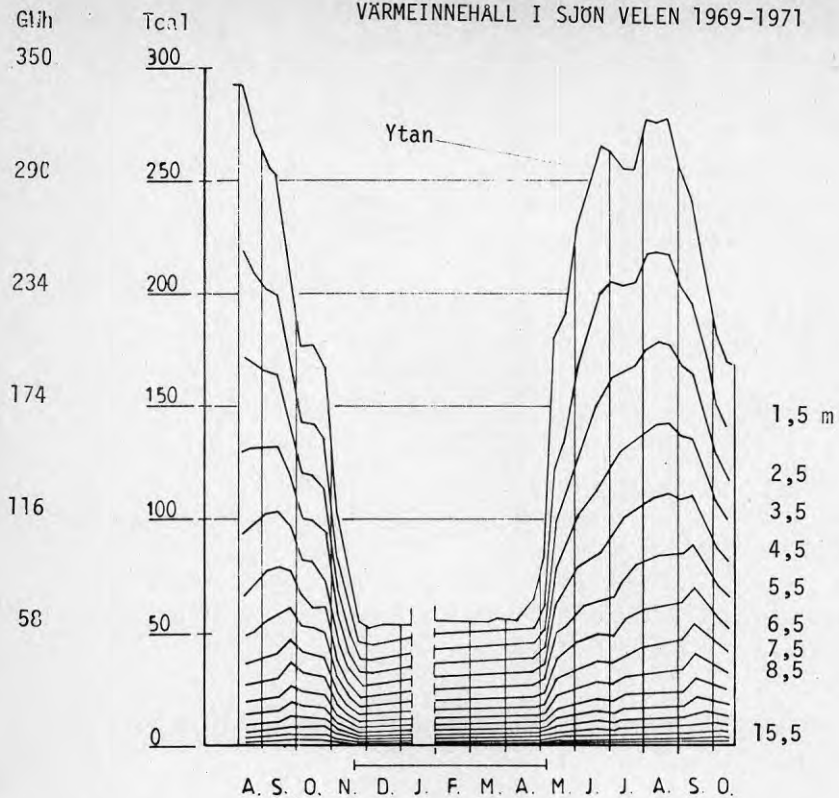


VATTENTEMPERATURENS UTVECKLING I VELEN VINTERN 1970/71



UR REF. 3.

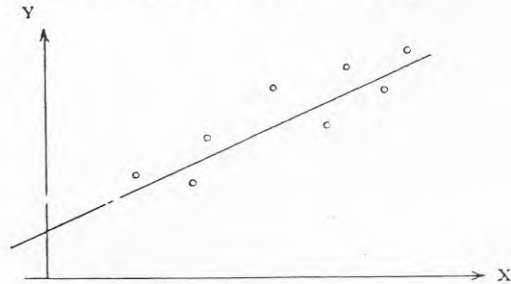




### Multipleregression

Multipleregression innebär att en rät linje anpassas till en datamängd med hjälp av minsta kvadratmetoden. I två dimensioner kan det åskådliggöras på följande sätt.

$$y = ax + b$$



Kvadraten på det vinkelräta avståndet mellan punkterna och den beräknade linjen minimeras.

I detta fall med flera dimensioner blir det svårare att åskådliggöra i diagramform.

$$y = k + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n$$

$y$  = beroende variabel

$x$  = oberoende variabel

$a$  = multipleregressionskoefficienter för resp oberoende variabel

$k$  = konstant

Koefficienterna och konstanten beräknas så att avvikelserna mellan beräknade och verkliga värden blir så liten som möjligt (liten restvarians)

Måttet på hur väl den framtagna ekvationen överensstämmer med det ingående materialet kan utläsas av den multipla korrelationskoefficienten.

Korrelationskoefficienten är ett mått på hur väl den givna datamängden "följer en rät linje",  $r = 1$  anger total överensstämmelse medan  $r = 0$  medför att inget samband finns. Kvadraten på  $r$ , determinationskoefficient ( $D$ ) anger hur stor del av den totala variansen i den beroende variabeln som kan förklaras av de ingående oberoende variablerna.

Standardavvikelsen på uppskattningen ( $S$ ) för den beroende variabeln är ett viktigt mått. Även om man har ett högt  $r$ -värde kan modellen vara osäker att använda om standardavvikelsen är hög. Det kan i vissa fall vara att föredra en större noggrannhet, lägre  $S$ -värde, på bekostnad av korrelationskoefficienter.

Från de dataprogram som utnyttjas för detta projekt erhålls följande uppgifter om varje uttryck (ekvation).

$S$  = standardavvikelsen för det uppskattade uttrycket (Standard Error of Estimate)

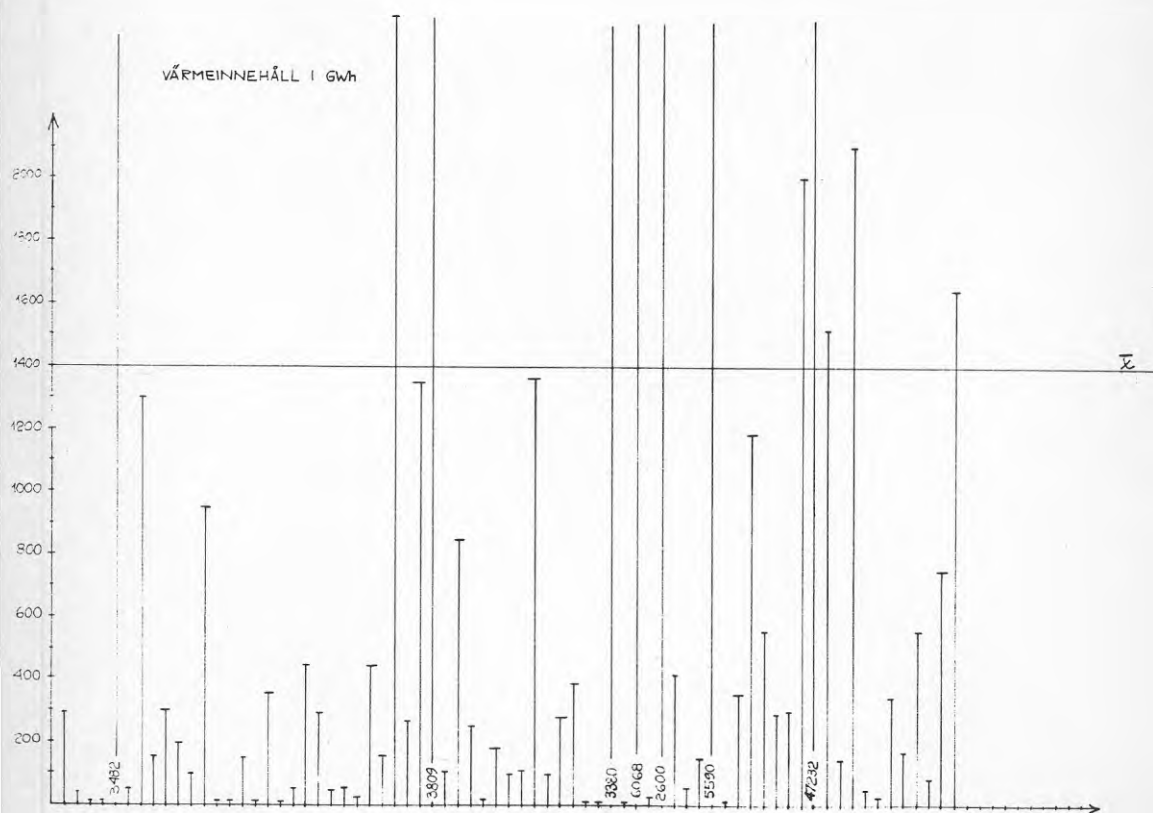
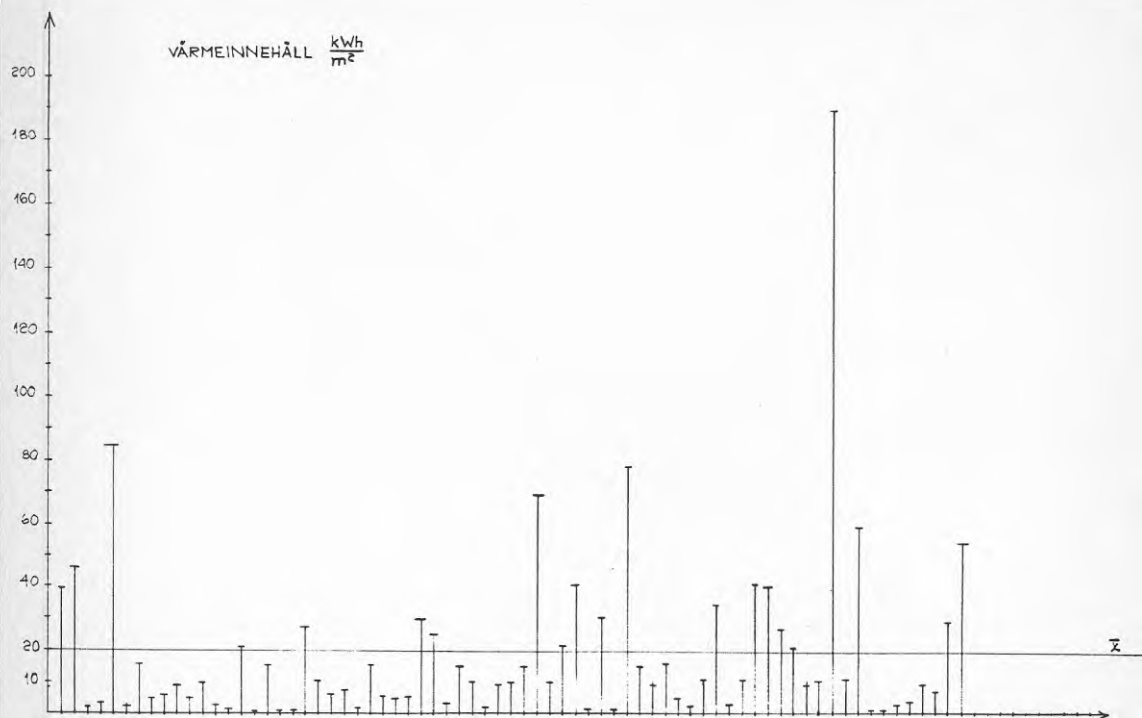
$r$  = multipelkorrelationskoefficient

$D$  = determinationskoefficient =  $r^2$

F-Ratio = modellens godhet. Vid bedömningar av olika modeller med samma ingående variabler har den bästa modellen det högsta F-Ratiotalet

$P_2$  (TAIL) = ett mått på den oberoende variabelns inverkan på resultatet. Vid allt för högt värde på  $P_2$  (TAIL) blir resultatet alltför osäkert för att kunna användas.

För att den oberoende variabeln skall ha en signifikant inverkan på resultatet skall  $P_2$  (TAIL) vara mindre än 0,05.



Djupkarta över sjön Velen.

Isobaternas ekvidistans 2 m.



# KARTLÄGGNING AV ENERGIINNEHÅLL I SVENSKA SJÖAR VINTERTID

Barry Broman

Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut  
Box 923  
601 19 NORRKÖPING

## FÖRORD

## SAMMANFATTNING

1. Bakgrund
2. Urval av sjöar
3. Datamaterial
4. Djupuppgifter - Hypsografiska kurvor
5. Datamaterialets behandling
6. Värmeinhåll
7. Regression - klimatdata
8. Klassning av sjömaterialet
9. Potentialbedömning
10. Praktisk användning av materialet
11. Fortsatta studier

Tabellbilaga 1 Värmeinhåll relativt 0,5 °C för samtliga 85 sjöar

Tabellbilaga 2 Värmeinhåll relativt 1,5 °C för samtliga 85 sjöar

Tabellbilaga 3 Klassade sjödata. Uppgifter för klasser med 5 sjöar eller mer

## FÖRORD

I arbetet med sammanställning av sjömaterialet har Birgitta Raab och Sture Lindahl bidragit med värdefulla synpunkter och insatser. Agneta Lindblad har bidragit med den mödosamma datainsamlingen och stansningen av sjötemperaturdata.

## SAMMANFATTNING

Vid SMHI finns vintertemperaturdata från mer än 200 svenska sjöar 85 av dem har valts ut för en statistisk behandling av energiinnehåll i svenska sjöar. Värmeinnehåll baserade på olika temperaturer har bestämts och redovisas för varje sjö i tabellbilagor. En temperatur - "Standardtemperatur" har införts för att få ett mått på hur mycket värme som finns tillgängligt i kanske 6 år av 7. Värmemängderna är beräknade relativt 0,5 °C och 1,5 °C vilka för närvarande är tekniska begränsningar respektive vanliga krav. Ingående temperatur till en värmepump beroende av typ skall överstiga dessa värden. Utgående från referenstemperaturen 0,5 °C och standardtemperaturen så är energimedelvärdet för de 85 sjöarna och - kanske för Sveriges sjöar ca 16 kWh/m<sup>2</sup>. Detta ger en tillgänglig energimängd av 600 TWh under vintern. Allt detta kan emellertid inte utvinnas på grund av sjöarnas läge, men troligen är 15 TWh en realistisk siffra.

Med hjälp av här tillgängligt material borde det vara möjligt att göra grova bedömningar av energitillgång i okända sjöar genom jämförelser avseende storlek, maxdjup, läge m m.

## 1. Bakgrund

SMHI inledde i början på 1950-talet mer eller mindre regelbundna temperaturmätningar i många svenska sjöar. Syftet med dem var främst att utröna inverkan av vattenkraftutbyggnaden i norrlandsälvarna. Därför finns mätningar i betydligt fler sjöar i norrland än i södra och mellersta Sverige.

Intresset för sjöarnas vintertemperaturer har ökat med möjligheterna att utnyttja den i sjöarna lagrade energin med hjälp av värmepumpsteknik. Men för detta behövs underlag för energipotentialbedömningar och underlag för dimensionering av värmepumpsystem. SMHIs vintertemperaturmaterial är en naturlig del i detta underlag.

## 2. Urval av sjöar

Omfattningen av SMHIs sjötemperaturmaterial finns redovisade i "Mätningar av sjötemperatur vid SMHI" av Moberg (1981). Av den skriften framgår bl a från hur många säsonger det finns mätdata. Mätningarna har i regel utförts två gånger per år; en gång på högsommaren och en gång på högvintern. Temperaturen mäts på flera nivåer mellan yta och botten, där sjöns djup är stort, sannolikt det största djupet i sjön.

Vintertemperaturmätningar finns från mer än 200 sjöar, varav ca 40 söder om Ljusnan. Bland dessa sjöar har 85 valts ut för denna studie på följande grunder:

- antal vintrar med temperaturdata skall vara fem eller mer
- åstadkom så stor geografisk spridning som möjligt
- tillgång på djupkartor eller hypsografiska kurvor

Sjöns läge representeras av dess utlopp och anges, med koordinater i rikets nät, vilket bl a återges med svarta koordinatvärden i ramen på vanliga svenska topografiska kartor. (Sveriges sjöar med arean större än i regel 0,01 km<sup>2</sup> finns koordinatsatta och upplagda i ett datorregister vid SMHI, en katalog över ca 52 000 sjöar är under utarbetande 1982).



Sjöarnas geografiska läge återges på kartan i figur 2.1.



Figur 2.1 De 85 sjöarnas geografiska läge

### 3. Datamaterial

För samtliga 85 sjöar har uppgifter om area, maxdjup, höjd över havet, älvnr, sjönamn, utloppskoordinater i rikets nät, samt naturligtvis temperaturdata sammanställt. Dessutom har uppgifter om djup-areafördelningen - s k hypsografiska kurvor - tagits fram. Detta gäller dock inte samtliga 85 sjöar utan för 23 sjöar saknas sådana uppgifter.

Tabell 3.1 innehåller uppgifter om sjöarna varav vissa är beräknade såsom volym, medeldjup, värmeinnehåll samt antal mätsåsonger. Rubrikerna står för följande: Löpnr kopplat till sjöns namn och är enbart ett internt nummer för denna studie. Älvnr anger till vilket flodsystem sjön hör. (Tabell 3.2 översätter älvnummer till kända älvnamn). Arean anges i  $\text{km}^2$ , volymen i miljoner  $\text{m}^3$ .



Tabell 3.1 forts.

| Löpnr | Sjönamn            | Koordinater   | Älvnr | Area<br>km <sup>2</sup> | Volym<br>milj.m <sup>3</sup> | Zmax<br>m | Zmed<br>m | h.ö.h<br>m | Värrne<br>kuh/m <sup>2</sup> | Värrne<br>kuh/m <sup>2</sup> | Hyps | Obs<br>antal |
|-------|--------------------|---------------|-------|-------------------------|------------------------------|-----------|-----------|------------|------------------------------|------------------------------|------|--------------|
| 01    | STRÖMS VATTUDAL    | 708032 149042 | 38    | 163.5                   | 2946.3                       | 74.0      | 18.0      | 285.0      | 15.9                         | 25.1                         | JA   | 16           |
| 02    | VOLGSJÖN           | 716086 154363 | 38    | 23.6                    | 109.4                        | 15.0      | 4.6       | 334.1      | .0                           | .0                           | JA   | 13           |
| 03    | VÄNGELSJÖN         | 706648 152408 | 38    | 4.9                     | 18.3                         | 23.1      | 3.7       | 219.0      | .0                           | 1.7                          | JA   | 20           |
| 04    | ÖVERUMAN           | 731740 146435 | 28    | 75.0                    | 1568.1                       | 85.0      | 20.9      | 520.0      | 5.5                          | 14.6                         | JA   | 14           |
| 05    | VÄSTANSJÖN-LAISAN  | 729320 147860 | 28    | 19.8                    | 187.6                        | 38.5      | 9.5       | 452.6      | 2.6                          | 6.4                          | JA   | 13           |
| 06    | TÄNGVATTNET        | 730366 145885 | 28    | 14.1                    | 350.4                        | 54.0      | 24.8      | 474.0      | 11.7                         | 36.0                         | JA   | 14           |
| 07    | STORUMAN           | 722188 156091 | 28    | 163.0                   | 4345.4                       | 139.0     | 26.7      | 350.0      | 34.3                         | 47.3                         | JA   | 14           |
| 08    | NEDRE JOVATTNET    | 729356 146651 | 28    | 4.0                     | 28.6                         | 22.0      | 7.2       | 456.0      | 1.9                          | 5.7                          | JA   | 10           |
| 09    | GRUTAJAURE         | 727782 146680 | 28    | 30.7                    | 534.7                        | 63.3      | 17.4      | 439.0      | 11.3                         | 19.7                         | JA   | 13           |
| 10    | ÖVRE HJÖREKVATTNET | 727529 147653 | 20    | 29.1                    | 896.5                        | 74.0      | 30.9      | 390.0      | 40.7                         | 58.7                         | JA   | 11           |
| 71    | NEDRE BOKSJÖN      | 727176 151437 | 28    | 14.1                    | 419.7                        | 77.0      | 29.8      | .0         | 40.0                         | 57.0                         | JA   | 6            |
| 72    | ÖVRE BOKSJÖN       | 727823 150614 | 28    | 10.6                    | 259.3                        | 67.0      | 24.5      | 473.0      | 27.2                         | 32.9                         | JA   | 6            |
| 73    | FJÖRÖKKEN          | 727018 154719 | 28    | 13.5                    | 225.4                        | 64.0      | 16.8      | 409.0      | 22.2                         | 31.0                         | JA   | 7            |
| 74    | LÖDDJAURE          | 730691 160221 | 20    | 238.3                   | 2350.0                       | 29.3      | 9.0       | 419.2      | 8.3                          | 12.7                         | NEJ  | 16           |
| 75    | STORAVAN           | 728786 160751 | 20    | 171.7                   | 1505.4                       | 26.0      | 8.2       | 418.6      | 8.8                          | 13.0                         | NEJ  | 16           |
| 76    | HORNÄVAN           | 733037 159366 | 20    | 251.1                   | 20037.6                      | 221.0     | 79.8      | 425.0      | 188.1                        | 225.3                        | NEJ  | 16           |
| 77    | VÄIJAJAURE         | 739833 167769 | 9     | 23.1                    | 85.8                         | 11.0      | 3.7       | 257.7      | .0                           | .0                           | NEJ  | 20           |
| 78    | TJÄRVISSJÄLRE      | 742618 161833 | 9     | 12.0                    | 117.1                        | 29.0      | 9.9       | 294.0      | 11.6                         | 15.8                         | NEJ  | 26           |
| 79    | SAGGAT             | 742164 160561 | 9     | 35.2                    | 988.8                        | 83.0      | 28.1      | 302.0      | 59.9                         | 71.7                         | NEJ  | 27           |
| 80    | PÄNDIJAURE         | 740015 163895 | 9     | 48.7                    | 262.6                        | 31.0      | 5.4       | 282.3      | .8                           | 2.3                          | JA   | 18           |
| 81    | PURRIJAURE         | 739758 166711 | 9     | 20.2                    | 121.1                        | 17.7      | 6.0       | 272.0      | .6                           | 2.5                          | NEJ  | 26           |
| 82    | STORA LULEJAURE    | 744265 167316 | 9     | 141.0                   | 1294.2                       | 28.5      | 9.2       | 368.3      | 2.3                          | 4.6                          | JA   | 8            |
| 83    | LANGAS             | 747161 163565 | 9     | 55.0                    | 1468.6                       | 78.8      | 26.7      | 374.0      | 3.1                          | 11.0                         | NEJ  | 23           |
| 84    | KARATS             | 739796 163363 | 9     | 57.8                    | 425.4                        | 31.5      | 7.4       | 414.0      | 9.7                          | 13.3                         | JA   | 10           |
| 85    | HÖLJES DÖMP        | 576382 132326 | 108   | 10.0                    | 227.0                        | 67.0      | 22.7      | 292.0      | 7.3                          | 21.9                         | NEJ  | 13           |
| 86    | HÄSSELEY           | 558080 162871 | 61    | 26.6                    | 814.2                        | 62.5      | 23.1      | .3         | 28.4                         | 41.2                         | JA   | 5            |
| 87    | TRANGSLETS D.ÖMR   | 880914 138954 | 53    | 30.0                    | 1012.8                       | 100.0     | 33.9      | 415.0      | 54.3                         | 79.9                         | NEJ  | 11           |

Tabell 3.2 Översättning av älvnummer till älvnamn

| Älvnr | Älvnamn                |
|-------|------------------------|
| 9     | Luleälven              |
| 20    | Skellefteälven         |
| 28    | Umeälven               |
| 38    | Ängermanälven          |
| 40    | Indalsälven            |
| 42    | Ljungan                |
| 48    | Ljusnan                |
| 53    | Dalälven               |
| 61    | Mälaren - Norrström    |
| 67    | Vättern - Motala ström |
| 71    | Botorpsströmmen        |
| 87    | Skräbeån               |
| 96    | Rönneån                |
| 103   | Ätran                  |
| 108   | Vänern - Göta älv      |
| 110   | Örekilsälven           |
| 112   | Enningdalsälven        |

#### 4. Djupuppgifter - Hypsografisk kurva

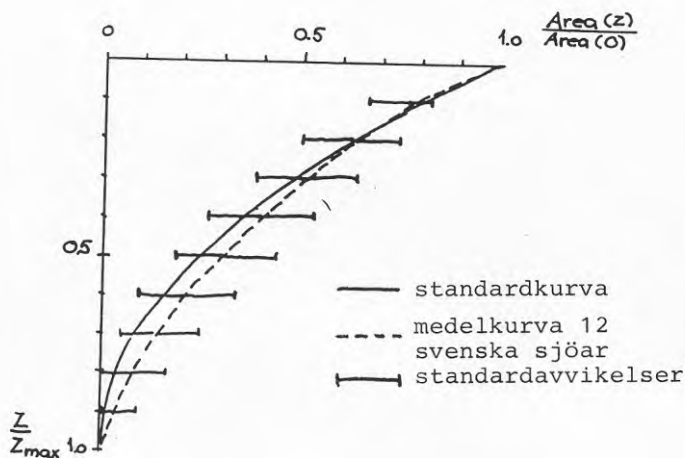
En sjös volym, area, och djupfördelning beskrivs av dess hypsografiska kurva. Den hypsografiska kurvan visar hur stor area sjön upptar på olika djup. Ytan mellan kurvan och djup- respektive area-axlarna bestämmer sjöns volym. För ungefär hälften av de utvalda sjöarna har SMHI färdiga hypsografiska kurvor, och för en stor del av de övriga finns djupkartor i någon form. Av dessa har vi bestämt hypsografiska kurvor för ca 20 st. För resterande 23 sjöar har en "standardhypsografisk kurva" använts. Denna har fått

en mycket enkel matematisk form:

$$A(Z) = A(0) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{Z}{Z_{\max}} \right) \right]^2$$

där  $A(Z)$  betyder arean på djupet  $Z$ ,  $A(0)$  arean vid vattenytan,  $Z$  djupet och  $Z_{\max}$  sjöns största djup. Genom att presentera areor och djup i förhållande till sjöns area vid ytan respektive djupet i förhållande till sjöns maxdjup kan alla sjöars hypsografiska kurvor presenteras med jämförbart omfång i ett enda diagram.

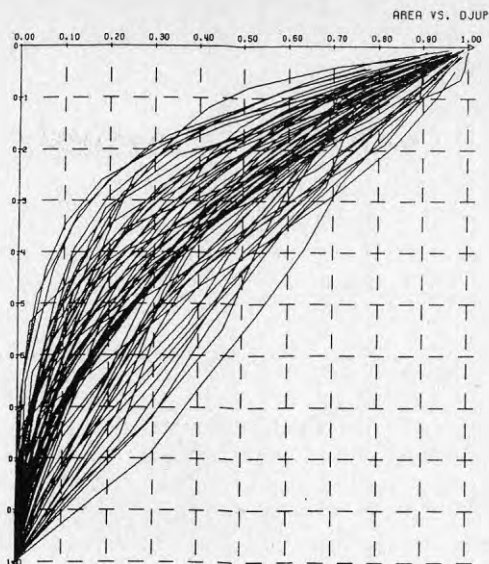
Standardhypsografiska kurvan som den beskrivs här jämfördes med medelkurvan för 12 svenska sjöar. I figur 4.1 visas både standardkurvan och de tolv sjöarnas medelkurva tillsammans med standardavvikelseerna på de nivåer kurvan beräknats ifrån.



Figur 4.1 Relativa hypsografiska kurvor

Det framgår att standardkurvan väl faller inom variationsområdet för de tolv sjöarna. Det torde därför vara ett gott alternativ då man skall skatta djupareafördelningen i en sjö utan djupkarta.<sup>1)</sup> Den kan emellertid aldrig ersätta en sann area-djupfördelning. Som ytterligare jämförelse kan de hypsografiska kurvorna för samtliga 85 sjöar tjäna. De är uppritade på samma sätt i figur 4.2 och det är uppenbart att standardkurvan som ritats för 23 av sjöarna hamnar mycket centralt i diagrammet.

<sup>1)</sup> Både M Falkenmark (Yttre vattenomsättning i större svenska sjöar. Vatten 1 1975) och L Håkansson (On lake form, lake volume and lake hypsographic survey). Geografiska annaler 59A, 1977) har behandlat olika slags sjöformer samt givit metoder för volymuppskattningar av sjöar.



Figur 4.2 Hypsografiska kurvor för alla 85 sjöarna (relativa skalor)

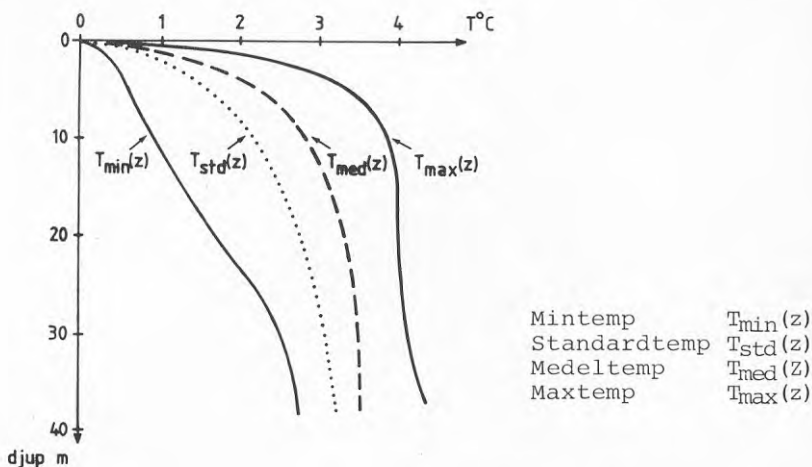
## 5. Datamaterialets behandling

I studien ingår enbart vintertemperaturdata. Dessa data har sammanställts så att värden från 15 djupnivåer erhållits (1,2,4,6,8,10,15,20,25,30,40,60,80,100 samt största observationsdjup i m). I de överstatio metrarna är upplösningen finare därför att där är den största temperturändringen per djupenhet. I ursprungsmaterialet finns vanligen inte observationer på exakt angivna nivåer, därför har temperaturdata grafiskt interpolerats så att uppgifter från önskad nivå kunnat sammanställas. Erhållna resultat har angivits med en upplösning av  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Tillsammans med andra uppgifter om sjön har de behandlade temperaturdata lagrats i dator. Interpoleringen innebär en osäkerhetsfaktor, vilket kan påverka skiktjockleken något, men torde inte vara av avgörande betydelse för de efterföljande beräkningarna.

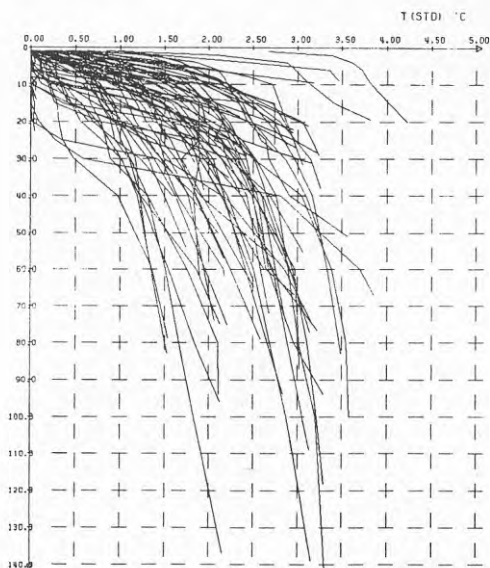
För varje sjö och fastställd nivå beräknades den vertikala fördelningen av medeltemperatur, maxtemperatur, mintemperatur och standardavvikelse, vilka behövs för att kunna beräkna sjöns värmeinnehåll under olika förhållanden. En "standardtemperatur" konstruerades genom att standardavvikelsen drogs från medeltemperaturen. I grova drag skulle standardtemperaturen sägas representera den temperatur som överstigs 6 år av 7 under förutsättning att temperaturmaterialet vore normalfördelat. Av fysiska skäl kan temperaturen emellertid inte vara normalfördelat ty vid  $0^{\circ}\text{C}$  fryser vatten. Dessutom krävs det tillgång

på minst 30 värden för att bestämma vilken statistisk fördelning som gäller t ex normalfördelningen. Detta innebär att uppskattningen 6 år av 7 inte är helt korrekt, men den ger ändå en säkrare uppskattning än observerade mintemperaturer.

Figur 5.1 visar i princip hur de 4 olika temperaturerna varierar med djupet och figur 5.2 visar standardtemperaturens variation med djupet för 85 sjöar.

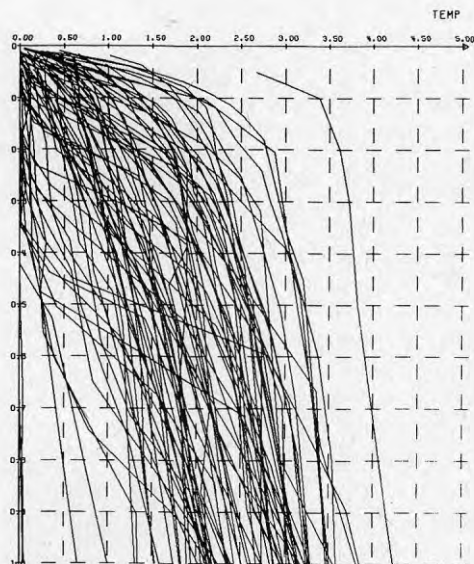


Figur 5.1 Principbild som visar den vertikala fördelningen hos de olika beräknade temperaturerna



Figur 5.2 Standardtemperaturens variation med djupet för 85 sjöar

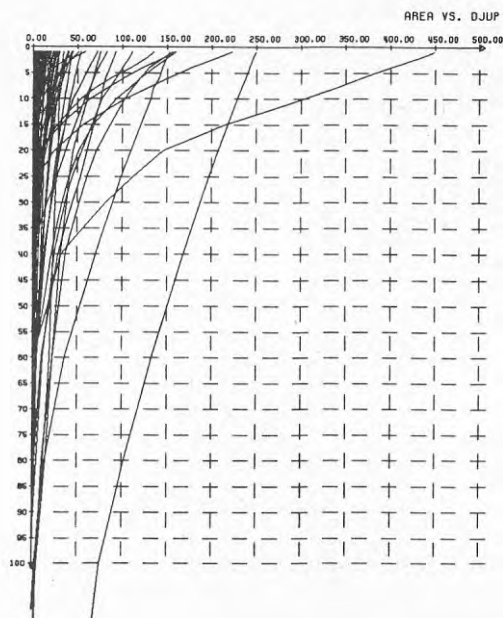
Det framgår av diagrammet att spridningen i standardtemperatur mellan sjöarna är mycket stor men att standardtemperaturen i de flesta fall överstiger  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  på djup större än 30 m. Standardtemperaturen är vanligen mindre än  $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  även på stora djup. Man kan även se att det välomblandade ytskiktet är av olika tjocklek till en del beroende på genomrinning och hur långt ner i sjön denna verkar. Det framgår även att för några sjöar är standardtemperaturen nära noll från ytan till botten. Exempel här är sjöarna Orten, övre och nedre Ransjön. Alla dessa sjöar är typiska genomströmningssjöar, vilket innebär att det är kallt älvvatten som bestämmer vintertemperaturen i dem. Samma temperaturmaterial som i figur 5.2 åskådliggörs även i figur 5.3, men här är djupskalan relativ, d v s djupet är relaterat till den enskilda sjöns maxdjup.



Figur 5.3 Standardtemperaturens variation med relativa djupet för 85 sjöar

Figuren ger en bättre detaljupplösning av enskilda sjöars kurvor. Det framgår tydligare att botten-temperaturen vintertid i svenska sjöar vanligen är  $2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , men att spridningen mellan olika sjöar är mycket stor, i princip mellan  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  och  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Sjöarnas inbördes storlek framgår av diagrammet i figur 5.4 som visar använda hypsografiska kurvor för samtliga 85 sjöar.



Figur 5.4 Hypsografiska kurvor för 85 sjöar, areor i km<sup>2</sup> och djup i m

Flertalet sjöar är mindre än 100 km<sup>2</sup> och mer än hälften är mindre än 50 km<sup>2</sup>.

## 6. Värmeinhåll

Med hjälp av uppgifter om area-fördelning, maxdjup och temperaturfördelningar kan man bestämma en sjös värmeinhåll. Sjövolymen bestäms av area-djupfördelningen - den hypsografiska kurvan. I princip bestäms sjöns volym och energiinhåll av ekvationerna:

$$V(Z) = \int_0^Z A(Z) dz$$

$$H(Z) = \int_0^Z c \cdot A(Z) [T(Z) - T_{ref}] dz$$

där  $V(Z)$  står för volymen mellan ytan och djupet  $z$ ,  $H(Z)$  värmemängden mellan ytan och djupet  $z$ .  $A(Z)$  anger sjöarean på olika djupnivåer och  $T(Z)$  anger temperaturen på olika djupnivåer.  $T_{ref}$  är den temperatur vartill värmeinhållet refereras. För sjöar använder man vanligen  $T_{ref} = 0$  °C men för värmepump-tillämpningar borde några andra temperaturer vara



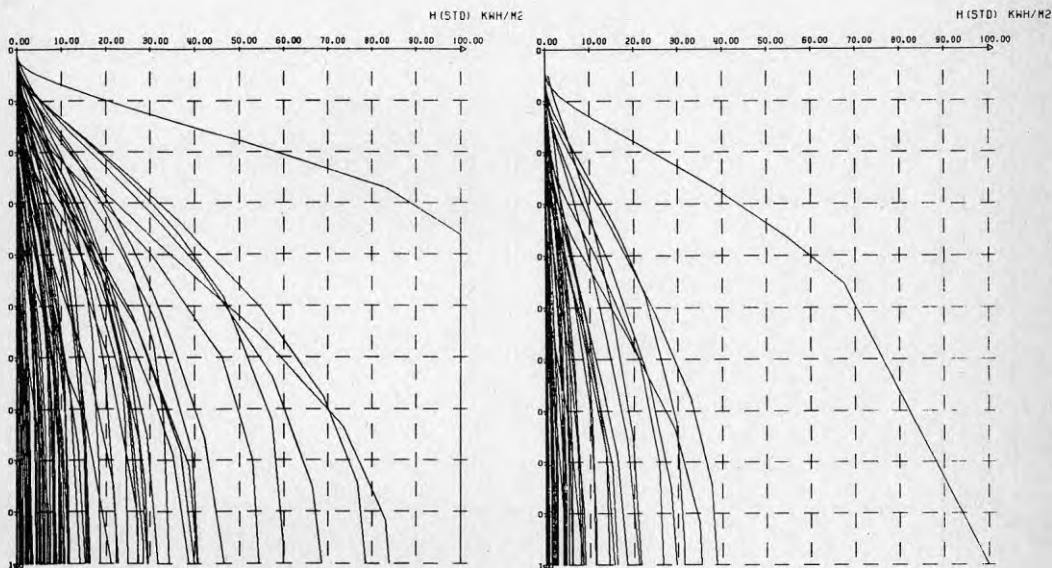
bättre t ex  $0,5^{\circ}\text{C}$  som f n är en tekniskt - praktisk gräns där värmepumpar kan utnyttja sjövattnen som värmekälla. Vissa system kräver högre temperaturer Ett värde som ofta nämns är  $1,5^{\circ}\text{C}$ .

$\rho$  är vattnets densitet och c dess värmekapacitet. Variationen hos dessa storheter är inte stor och för praktiskt bruk kan man använda

$$\rho c \approx 1,16 \text{ kWh}/^{\circ}\text{C m}^3$$

För praktiska beräkningar i dator görs beräkningarna som summationer mellan nivåer med data istället för analytisk integration.

För varje sjö har värmeinnehållet bestämts för fyra olika vertikala temperaturfördelningar. Dessa är fördelningen av sjöns minimitemperatur, "standardtemperatur" medeltemperatur och maximitemperatur. Standardtemperaturen är medeltemperaturen minus standardavvikelsen. Beräkningarna omfattar två referenstemperaturer  $0,5^{\circ}\text{C}$  och  $1,5^{\circ}\text{C}$ . I figurerna 6.1 a och b visas de från ytan kumulativt summerade värmeinnehållen baserade på standardtemperaturen men med olika referenstemperaturer. Diagrammen visar värmeinnehållet per ytenhet.



Figur 6.1 a och b Kumulativt summerat värmeinnehåll  $\text{kWh}/\text{m}^2$  baserat på standardtemperaturen men med olika referenstemperatur  
a)  $0,5^{\circ}\text{C}$  b)  $1,5^{\circ}\text{C}$

Detta är den till nivån summerade värmemängden men dividerad med arean vid sjöns nollnivå. Det framgår tydligt hur den tillgängliga energin drastiskt minskar om man ställer krav på temperaturer ovan 1,5 °C.

Alla beräkningar återges i tabellbilagorna 1 och 2. Där finns tabeller för alla i studien ingående sjöar. Tabellerna innehåller uppgifter om sjön såsom area, maxdjup och volym samt om standardhypsografisk eller känd hypsografisk kurva använts vid beräkningarna. Där finns även uppgifter om sjöns totala värmeinhåll för olika temperaturer samt summerat nivå för nivå från ytan. Tabellbilaga 1 återger värmemängder i GWh relativt 0,5 °C och tabellbilaga 2 motsvarande relativt 1,5 °C.

## 7. Regression - klimatdata

Projektet syftade bl a till att få fram en "formel" för att relativt enkelt från klimatdata bedöma en godtycklig sjös lämplighet som energikälla, då värmepumpar skall utnyttjas för uppvärmning. Flera försök har genomförts för att finna samband mellan klimatstatistik i form av vindar, temperatur, sjöns längdriktning m m. Hittintills har emellertid alla försök visat att något sådant enkelt samband inte finns. Det som krävs är väderuppgifter med hög tidsupplösning vilket innebär att man måste ta hänsyn till vad som händer inom delar av dygn. Detta betyder också att man inte heller bör konstruera något standardår utan det krävs att man studerar varje sjö för sig med verkliga väderförlopp. En så omfattande studie ryms inte inom detta projekt, men resultat inom ett närstående projekt antyder att detta är en framkomlig väg då man med hjälp av en numerisk modell kan beräkna en sjös temperaturfördelning.

Bortsett från att vi ej funnit några klara samband mellan vindstatistik, temperaturstatistik, kombinationer av dem och sjövärmepotential så kan man ändå säga att några högre värmeinhåll inte förekommit då vindstatistiken visar en hög frekvens av hårda vindar före isläggning.

I stället för regression har vi prövat en annan väg att göra det nu framtagna sjömaterialet användbart för grova bedömningar nämligen genom att klassindela sjöarna i ett antal olika grupper beroende på värmeinhåll, area, maxdjup, höjd över havet och läge.

## 8. Klassning av sjömaterialet

Sjöarna har indelats i 4 grupper med vardera 16 klasser, sammanlagt 64 klasser, beroende på i första hand värmeinhåll och därefter kopplad till storlek och läge. I tabell 8.1 anges klasserna i de 4 grupperna, vilka gränser som använts samt antalet sjöar ingående i varje klass.

Tabell 8.1 Klassindelning av sjöar

Sammanställning av sjöar i 64 klasser  
 Presenterade klasser innehåller 5 sjöar eller mer  
 De 64 klasserna är indelade i 4 grupper

| Grupp1:Värme/Area  |     |      |      |       | km <sup>2</sup> | Grupp2:Värme/Maxdjup |      |      |      |       |
|--------------------|-----|------|------|-------|-----------------|----------------------|------|------|------|-------|
| kWh/m <sup>2</sup> | 1.0 | 10.0 | 50.0 | 500.0 |                 | kWh/m <sup>2</sup>   | 10.0 | 30.0 | 50.0 | 300.0 |
| 3.0                | 1   | 17   | 11   | 5     |                 | 3.0                  | 1    | 22   | 5    | 6     |
| 6.0                | 0   | 3    | 4    | 1     |                 | 6.0                  | 1    | 3    | 2    | 2     |
| 9.0                | 0   | 5    | 6    | 3     |                 | 9.0                  | 0    | 6    | 1    | 7     |
| 12.0               | 0   | 0    | 5    | 2     |                 | 12.0                 | 0    | 2    | 1    | 4     |

| Grupp3:Värme/höjd öh. |      |       |       |        | m | Grupp4:Värme/Nordläge |    |    |    |    |
|-----------------------|------|-------|-------|--------|---|-----------------------|----|----|----|----|
| kWh/m <sup>2</sup>    | 50.0 | 150.0 | 300.0 | 1000.0 |   | kWh/m <sup>2</sup>    | 65 | 68 | 71 | 80 |
| 3.0                   | 2    | 9     | 10    | 13     |   | 3.0                   | 1  | 12 | 13 | 8  |
| 6.0                   | 1    | 2     | 3     | 2      |   | 6.0                   | 3  | 2  | 3  | 0  |
| 9.0                   | 0    | 2     | 2     | 10     |   | 9.0                   | 1  | 1  | 9  | 3  |
| 12.0                  | 0    | 1     | 2     | 4      |   | 12.0                  | 0  | 0  | 4  | 3  |

I alla grupper utgör värmeinnehåll per ytenhet den ena parametern. Detta värmeinnehåll är värdet summerat från ytan ned till botten dock högst 30 m. Grupperna skiljer sig sedan åt genom att den andra parametern är en av area, maxdjup, höjd över havet eller nordläge. (Nordläge innebär de två första siffrorna i den första koordinaten i rikets nät). Fyra gränsvärden anges för samtliga parametrar och kravet för att tillhöra en klass är att värdet ligger mellan gränserna och där det högre gränsvärdet tillhör klassen. Grupperna är nummerade från ett till fyra och klasserna anges som en tresifferkombination där första siffran betyder grupp den andra siffran inom vilket intervall värmeinnehållet är. Den tredje siffran anger intervallet för gruppens andra parameter. Exempel: 1,3,2 betyder att sjön tillhör grupp 1 med sitt värmeinnehåll inom intervallet

$$9 \text{ kWh/m}^2 \geq \frac{H_{\text{std}}(30\text{m})}{A} > 6 \text{ kWh/m}^2$$

sjöns area återfinns i intervallet

$$10 \text{ km}^2 \geq A > 1 \text{ km}^2$$

Ur tabell 8.1 kan man utläsa att fem sjöar uppfyller de kraven. Tabeller som anger medelvärden för djup, areor, volymer, temperaturer och värmeinnehåll per ytenhet för olika temperaturfördelningar finns i tabellbilaga 3. Vidare finns standardavvikelser för motsvarande medelvärden så snart underlaget för att beräkna dem uppgår till fem värden eller mer. I övrigt anges siffervärdet -1,0.

Av klassningen framgår att för en stor del av sjöarna är värmeinnehållet ned till 30 m-nivån mindre än eller lika med 12 kWh/m<sup>2</sup>.<sup>1)</sup> För att finna större värmemängder måste man för de flesta sjöar gå ned till större djup.

1) Det finns ett antal sjöar där värmeinnehållet är större än 12 kWh/m<sup>2</sup> som inte är med i klassningen.

Några klara slutsatser kan man inte finna i denna klassning. För små värmemängder, vilket gäller de flesta sjöar, är fördelningen mellan klasserna jämn. Däremot kan man skönja att större värmemängder hittar man i större, djupare, högre och mer nordligt belägna sjöar.

#### 9. Potentialbedömning

Sveriges sjöareal är ca 38 000 km<sup>2</sup>. Medelvärdet för det totala värmeinnehållet  $d v s$  från ytan till botten och refererat till 0,5 °C - för de 85 sjöarna baserat på standardtemperaturen (medeltemperatur-standardavvikelse) är ca 16 kWh/m<sup>2</sup>. Antag att detta värde är representativt för Sveriges sjöar då skulle det finnas en sjövärmepotential av storleksordningen 600 TWh för vintersäsongen. Spridningen kring medelvärdet är emellertid stor och sjöarna är inte lämpligt belägna i förhållande till värmebehoven, men antag vidare att vi kan utnyttja halva arealen och att det praktiskt ekonomiskt är värt att utvinna ca 5 % av detta. Då kan värmebidraget - under vintern - från Sveriges sjöar bli ca 15 TWh, vilket är ca 10 % av den energi som används för uppvärmning. Om referenstemperaturen sätts till 1,5 °C reduceras ovanstående energimängder till ca 5 TWh. Härtill skall även läggas den värmepotential som finns i sjösedimenten, som är av betydelse speciellt för grunda sjöar. Denna har emellertid inte behandlats i den här studien.

#### 10. Praktisk användning av materialet

Syftet med projektet var att få fram en relativt enkel metod för att göra grova bedömningar om en godtycklig sjö kan vara lämplig som värmekälla. Någon enkel generell formel har vi inte lyckats få fram men med hjälp av sjöarnas klassindelning kan man jämföra en godtycklig sjö med någon i studien ingående sjö av någorlunda samma storlek, djup, läge m m. Klassen för den kända sjön kan ge en uppfattning om temperaturer och spridningen mellan olika sjöar. För vidare dimensionering och noggrannare potentialbedömningar krävs emellertid särskilda insatser.

#### 11. Fortsatta studier

Som framgått av sjömaterialet är det en klar nordlig dominans. Utmed östersjökusten saknas också uppgifter från sjöar. Det skulle därför vara värdefullt om materialet kunde utökas med mer sydligt belägna samt mer kustnära sjöar. Då delar av detta material presenterades i ett föredrag (B Broman: "Vintertemperatur och värmeinnehåll i svenska sjöar") visade det sig att det på olika håll i landet finns data om sjöar i södra Sverige som klarar urvalskriterierna för denna studie. Därför vore det angeläget att fortsätta arbetet med att söka kontakter med länsstyrelser, kommuner och

övriga som kan ha temperaturuppgifter under vintern samt insamla, lagra och bearbeta sådant material. Parallellt med detta bör arbetet försätta att med teoretiska och numeriska modeller beräkna sjötemperaturer utifrån verkliga väderdata.

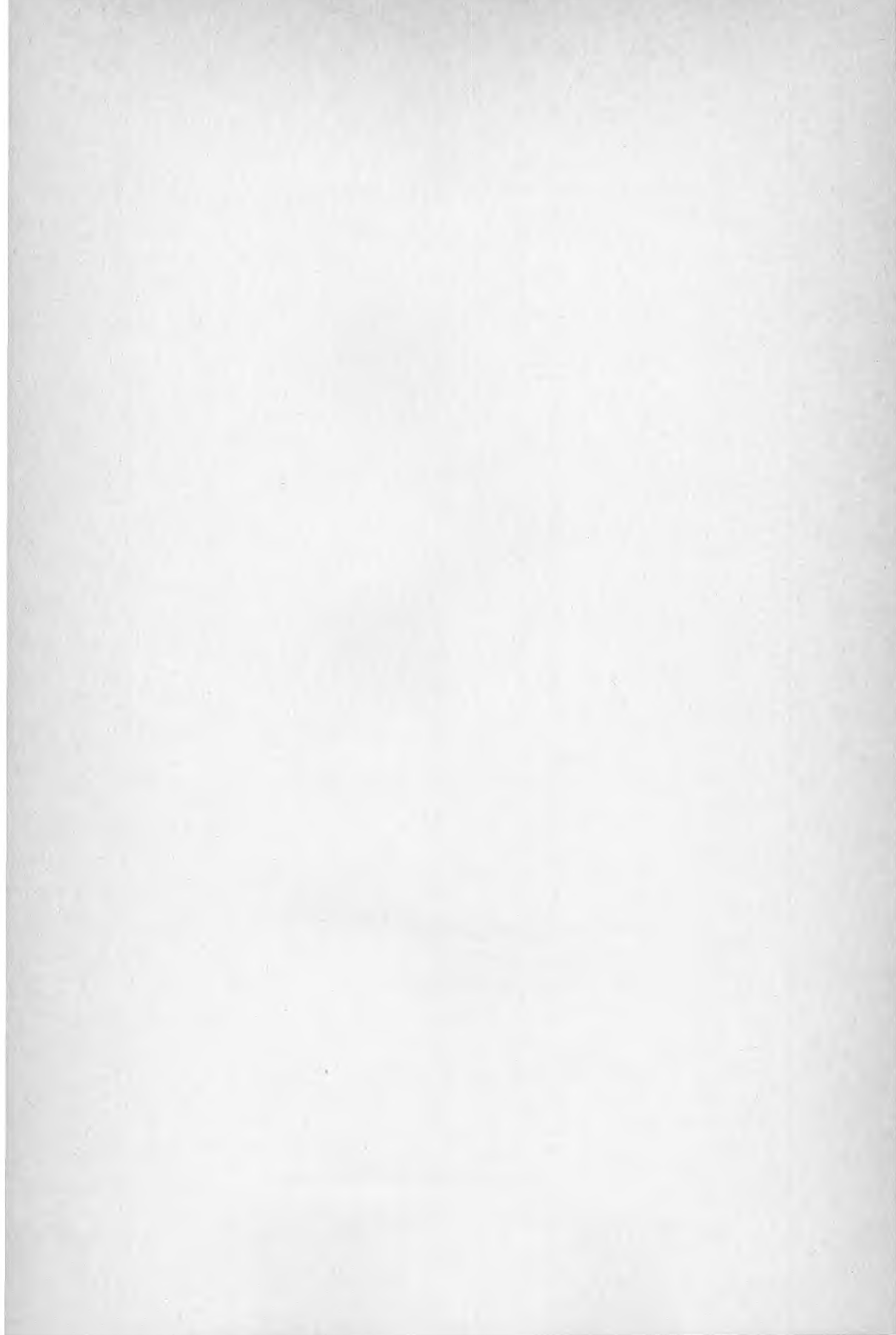
Därutöver behöver man göra en samlande inventering av tillgången på sjöareal i anslutning till samhällen, som skulle kunna utnyttja sjövärmes nu och i framtiden. Med den sjöarealen känd kan en bättre bedömning göras av den verkliga sjövärmepotentialen i Sverige.













**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
770979-0 från Statens råd för byggnadsforskning  
till Scandiaconsult AB, Stockholm.**

**Art.nr: 6704178**

**Abonnemangsgrupp:  
W. Istallationer**

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

**R178: 1984**

**ISBN 91-540-4288-7**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Cirka pris: 45 kr exkl moms**