



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.



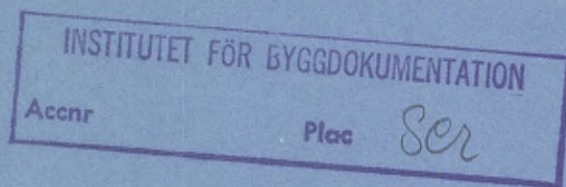
Rapport

R115:1983

Vättern som värmekälla för värmepumpar

En regional studie

**Torbjörn Svensson
Barry Broman**



Byggforskningsrådet

VÄTTERN SOM VÄRMEKÄLLA FÖR VÄRMEPUMPAR

En regional studie

Torbjörn Svensson

Barry Broman



Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821098-3 från Statens råd för byggnadsforskning till Jönköpings kommun

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

R115:1983

ISBN 91-540-4008-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1983

INNEHÅLL

Sammanfattning		5
1.	INLEDNING	6
1.1	Bakgrund	6
1.2	Problembeskrivning	6
2.	VÄTTERN - ALLMÄN BESKRIVNING	8
2.1	Topografi	8
2.2	Hydrologi	10
2.3	Bottenförhållanden	11
2.4	Vind och vågor	13
3.	TEMPERATURER I VÄTTERN	14
3.1	Allmänt	14
3.2	Dataunderlag	14
3.3	Temperaturer ute i sjön	15
3.4	Vattentemperaturer vid vattenverken	19
3.5	Samband mellan isläggning och temperatur	32
4.	STRÖMMAR I VÄTTERN	37
4.1	Ström drivande faktorer	37
4.2	Vindströmmen	37
4.3	Ytvågor	37
4.4	Stående vågor	37
4.5	Fortskridande interna vågor	38
4.6	Densitetsdrivna strömmar	38
4.7	Exempel på uppmätta strömhastigheter	39
4.8	Beräknade strömmar i Vättern	42
5.	TEKNISKA SYSTEM FÖR VÄRMEUTTAG I SJÖAR	45
5.1	Värmepumpen	45
5.2	Teknik för värmeuttag	46
6.	BEDÖMNING AV FÖRUTSÄTTNINGAR I OLIKA ORTER RUNT VÄTTERN	49
6.1	Jönköping - Husqvarna	49
6.2	Ödeshög	51
6.3	Vadstena	52
6.4	Motala	52

7. REFERENSER

53

Bilaga 1 Beräkning av temperaturförändring i intagsledningar

Bilaga 2 Vågpåverkan på ledningar

SAMMANFATTNING

I denna utredning har sammanställts uppgifter om temperatur, strömmar vågor, bottenförhållanden m.m., vilka är av betydelse vid bedömning av Vättern som värmekälla för värmepumpar.

Vattentemperaturen under vintern är den kanske viktigaste parametern, och denna varierar kraftigt i intervallet 0-4°C mellan olika år. Med data från bl.a. vattenverkens intagsjournaler har varaktighetskurvor för vattentemperaturen konstruerats, liksom kurvor över årsvariationen på olika djup. Lägre temperatur än 2°C uppträder i genomsnitt under 8-9 veckor per år på djup omkring 25 m. På litet djup, 0-5 m, är motsvarande tid 11-12 veckor. Under vissa vintrar kan temperaturen gå ned till endast någon eller några få tiondels grad på grunt vatten.

Strömmarna i Vättern är förhållandevis starka. Detta är gynnsamt för värmeväxlare av typ bottenförlagda slangsystem, genom att deras värmeupptagning ökar och isbildningen kring slangarna reduceras. Samtidigt ger kraftiga strömmar och vågor upphov till stora krafter på ledningar i vattnet. P.g.a. våg- och strömpåverkan bör slangsystem och vattenintag placeras på så djupt vatten som möjligt.

De tekniska förutsättningarna för värmeuttag vid de olika tätorterna runt Vättern är förhållandevis ogynnsamma beroende på låg temperatur, flack bottenprofil och kraftig våg- och strömpåverkan. Vid Jönköping och Ödes hög bör det dock vara möjligt att ta in vatten från 20-40 m djup för värmeväxling i t.ex. strilförångare. I Motala och Vadstena är möjliga arbetsdjup i storleksordningen 10 m eller mindre och detta gäller sannolikt även för de övriga mindre tätorterna vid Vättern. Värmeväxlingen bör här dimensioneras för temperaturer nära fryspunkten, vilket kan utföras med bottenförlagda slangsystem eller speciella typer av värmeväxlare som klarar låga temperaturer eller som baseras på frysning.

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

Detta projekt har tillkommit efter överläggningar mellan företrädare för Jönköpings kommun, Byggforskningsrådet och VIAK AB i syfte att hitta alternativa värmekällor för Jönköpings fjärrvärmenät. Vättern utgör här en mycket stor resurs som kan utnyttjas med hjälp av värmepumpar. De tekniska förutsättningarna för detta var dock dåligt kända, och VIAK AB fick i uppdrag att utforma ett program för en regional studie av temperaturförhållanden och andra faktorer av betydelse för utnyttjande av Vättern som värmekälla.

Uppdraget har genomförts gemensamt av VIAK AB och SMHI och baseras genomgående på befintliga uppgifter och tidigare utredningar. Projektledare har varit tekn. dr Torbjörn Svensson VIAK AB, medan huvuddelen av data-sammanställning och datainsamling utförts av statsoceanograf Barry Broman vid SMHI

1.2 Problembeskrivning

De värmeupptagande system som används för att hämta värme från sjöar ställer olika krav på lägsta vattentemperatur. Några sådana metoder beskrivs närmare i kap. 6. I princip torde gälla att kostnaden för värmeupptagaren ökar med minskad dimensionerande temperatur. Då den dimensionerande temperaturen underskrides minskar värmepumpens effekt och vid någon temperaturnivå måste driften stoppas. Det senare gäller dock inte för system som baseras på isbildningsvärme.

Med denna bakgrund kan problemet att beskriva sjöns funktion som värmekälla formuleras enligt följande:

- Bestäm den statistiska fördelningen av temperaturen i sjön under olika delar av året. Detta bör göras för olika djup och olika delar av sjön.

Utgående från en sådan statistisk beskrivning av sjötemperatur kan olika slutsatser dras såsom t.ex.

- Medelvärdet av den tid då värmeupptagningens dimensionerande temperatur underskrides.
- Medelvärdet, maxvärdet etc. av det årliga driftbortfall som orsakas av för låg temperatur hos värmekällan.
- Värmefaktorns årliga variation.

I princip krävs det ett sådant statistiskt underlag för att kunna optimera olika typer av värmeupptagare och beräkna värmepumpsystemets lönsamhet gentemot andra uppvärmningsalternativ.

Andra faktorer som påverkar möjligheterna att utnyttja Vättern som värmekälla är den påverkan som ström och vågor utövar på ledningar och andra konstruktioner i vattnet. Genom sjöns storlek och djup, och dess brist på skyddande öar är strandzonen mycket utsatt. Förutom av kraftiga strömmar kan isbrötning och iskravning utgöra ett hot för anläggningarna. Det är därför endast realistiskt att utnyttja Vättern som värmekälla för relativt stora system för vilka vattenintag eller värmeväxlare kan placeras på större djup. Undantag från detta kan dock förekomma i den nordligaste delen som är mera skyddad.

Den påverkan som vågor, strömmar och is kan ge upphov till måste bedömas i varje enskilt fall. I denna utredning har storleken på uppträdande vågkrafter på en bottenförlagd ledning beräknats för ett idealiserat fall för att illustrera de storleksordningar som är aktuella.

2. VÄTTERN - ALLMÄN BESKRIVNING

2.1 Topografisk beskrivning

Vättern är, genom sin storlek och sitt djup unik bland Sveriges sjöar. Sjön har beskrivits utförligt av Norrman (1964), Håkanson och Ahl (1976) och i en rad publikationer från Kommitten för Vätterns vattenvård.

Djupförhållanden framgår av karta i fig. 2.1. De lodningar som ligger till grund för kartan är utförda på 1870-talet och djupkartan får betraktas som ganska onoggrann. Detaljlodningar inom vissa områden finns dock redovisade av Norrman (1964).

Topografiskt kan sjön indelas i tre delar; den storleksmässigt dominerande öppna Vättern, Motalabukten och skärgårdsområdet i norr. Inom den öppna delen finns vidsträckta platåområden med i allmänhet 30-40 m djup samt djuprännor med upp till över 100 m djup. Motalabukten liksom skärgården i norr är däremot grunda, med i allmänhet mindre än 20 m djup. Topografiska data för sjön ges i tabell 2.1.

Tabell 2.1. Några topografiska data för Vättern

Sjöyta	1856	km ²
Volym	74	km ³
Största uppmätta djup	128	m
Medeldjup	39,0	m
Längd	ca 135	km
Maximal bredd	31	km
Medelbredd	15	km

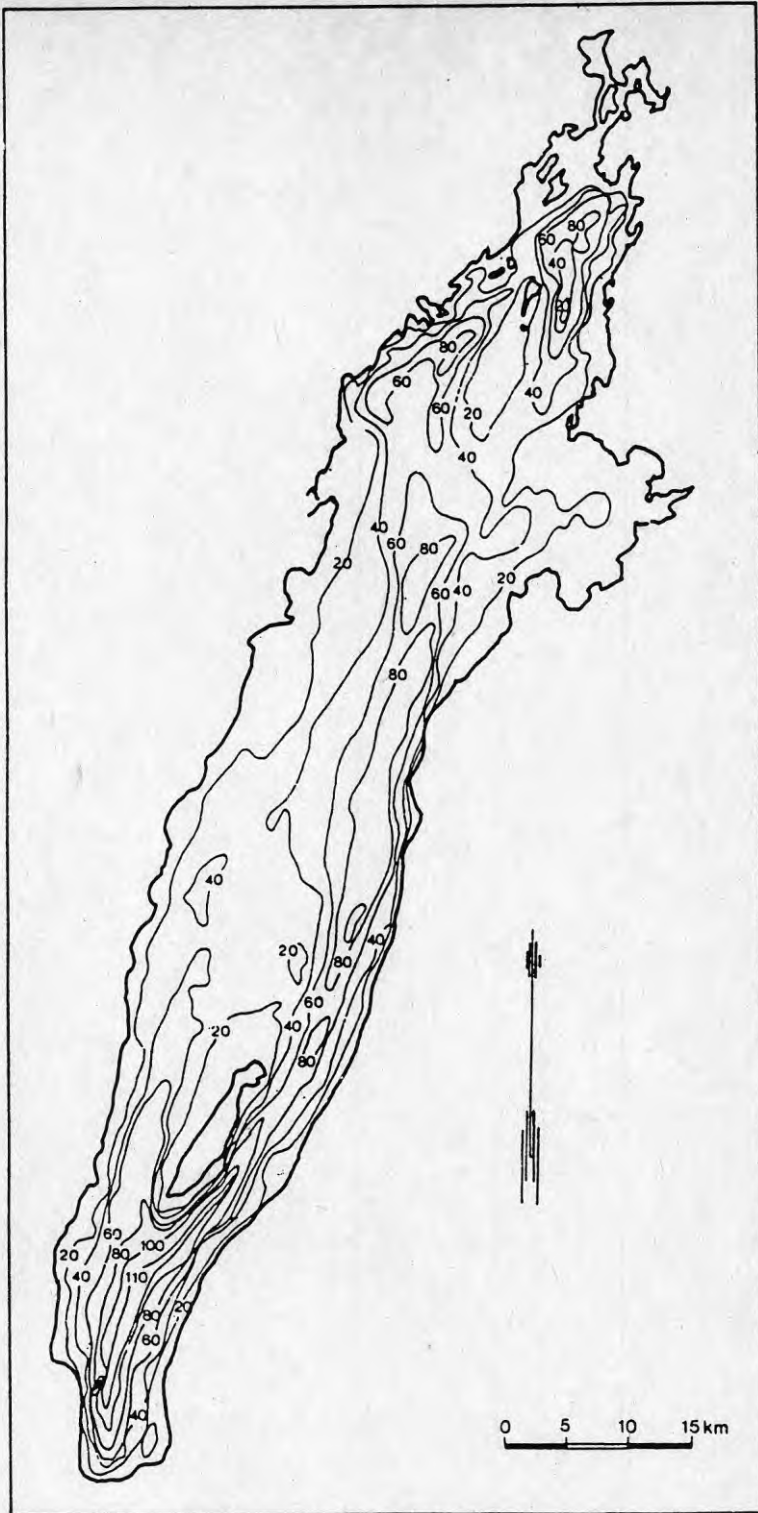


Fig. 2.1 Djupkarta över Vättern.

Den hypsografiska kurvan, som visar sjöns areal på olika djup, ges i figur 2.2.

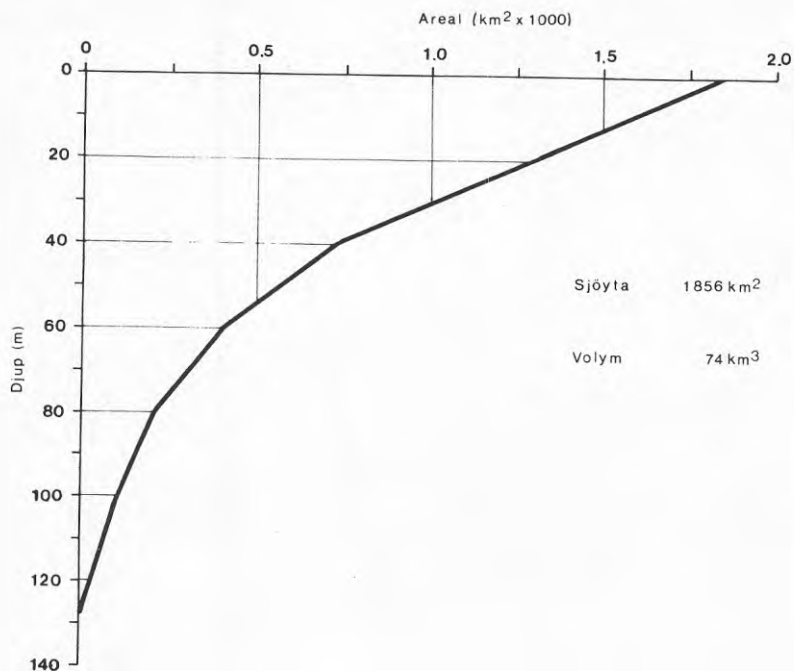


Fig. 2.2. Hypsografisk kurva för Vättern (efter Håkansson och Ahl, 1976)

2.2 Hydrologi

Vätterns tillrinningsområde är förhållandevis litet, och av området utgör hela 36 % sjöyta. Tillrinningen fördelas på ett antal relativt små åar och avrinningen sker genom Motala ström. Medelvattenföringen uppgår till ca 40 m³/s, vilket ger en nominell uppehållstid av 59 år.

Den ringa vattenomsättningen har stor betydelse för näringsförhållandena i sjön. Genom den stora sjöytan utjämnas årsvariationer i avrinning och vattenstånd. Karakteristiska vattenstånd ges i tabell 2.2.

Tabell 2.2. Vattenståndsvariationer i Vättern

Högsta vattenstånd	88,87 m ö h
Normalt "	88,59 "
Medelvattenstånd	88,45 "
Normalt lågvattenstånd	88,30 "
Lägsta "	88,00 "

2.3 Bottenförhållanden

Bottenmaterialets sammansättning avspeglar en rad olika processer såsom bottenerosion och bottentransport pga vågor och strömmar, sedimentation av organiskt och oorganiskt material. Sedimenten i Vättern finns utförligt beskrivna av Håkansson och Ahl (1976), vilka presenterade en översiktlig sedimentkarta, fig. 2.3.

De olika sedimenttypernas fysikaliska egenskaper kan relativt väl bestämmas utgående från deras vattenhalt och organiska halt, som redovisas i tabell 2.3.

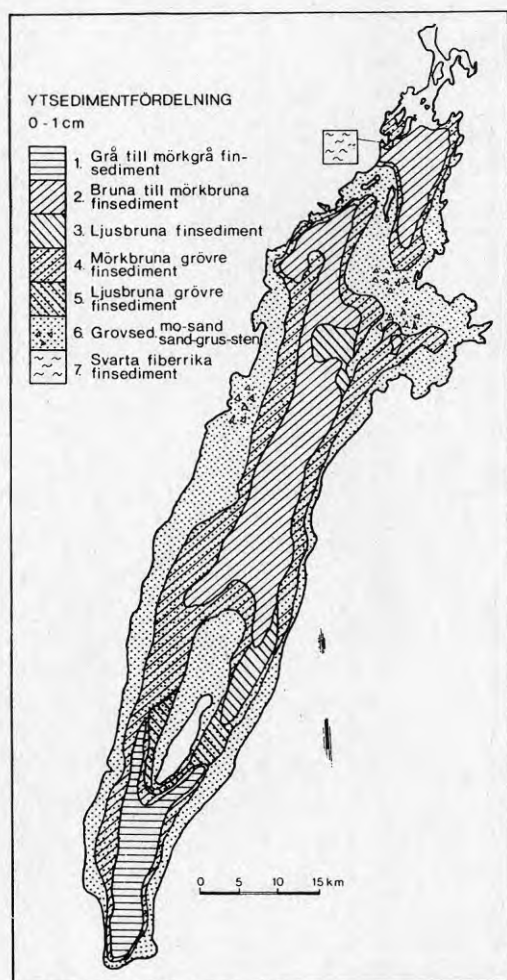
















Fig. 2.3. Ytsedimentfördelning i Vättern. Efter Håkansson och Ahl (1976)

Tabell 2.3. Ytsedimentens egenskaper i Vättern
Efter Håkansson och Ahl (1976)

Beteckning	Benämning	Vattenhalt	Organisk halt
	Grå till mörkgrå finsediment Grey to dark grey fine sediments	74.1 n=33,s=8.0	9.6 n=33,s=4.3
	Ljusgrå finsediment Light grey fine sediments	73.2 n=19,s=7.2	7.0 n=19,s=1.2
	Bruna till mörkbruna finsediment Brown to dark brown fine sediments	81,7 n=32,s=7.0	9.2 n=32,s=2.2
	Ljusbruna finsediment Light brown fine sediments	52.8 n=20,s=3.9	3.4 n=20,s=1.1
	Svarta finsediment Black fine sediments	66.6 n=5	5.6 n=5
	Grå striade finsediment Grey fine sediments, with striae	79.0 n=4	8.6 n=4
	Bruna striade finsediment Brown fine sediments, with striae	57.7 n=10,s=7.8	4.4 n=10,s=2.1
	Svarta fibersediment Black sediments with fibre	86.1 n=3	32.9 n=3
	Röda-bruna-svarta relativt konsoliderade finsediment Red-brown-black consolidated fine sediments	67.1 n=10,s=4.3	7.1 n=10,s=2.3
	Grovsediment (mo-sand) Coarse sediments	27.7 n=17,s=9.3	1.8 n=17,s=1.7
	Grovsediment (sand-grus) Coarse sediments (sand-pebbles)	20.8 n=7	0.5 n=7
	Bruna till mörkbruna grövre finsediment Brown to dark brown coarser fine sediments	46.9 n=20,s=13.0	3.7 n=20,s=3.1
	Ljusbruna grövre finsediment Light brown coarser fine sediments	40.0 n=24,s=11.7	3.5 n=24,s=2.6
	Inget prov erhållet (No sample obtained)	n=5	

Grövre finsediment betyder att det finns ett markant inslag av mo/sand.
Coarser fine sediments imply that there is a significant content of sand.

Vattenhalten (i % vs) och organiska halten (i % ts) är angivna som medelvärden.
The water content (% wet substance) and the organic content (% dry substance) are given as means.

n = antalet värden (number of analyses), s = standardavvikelsen (the standard deviation)

Karaktäristiskt för Vättern är att botten från 0-ca 20 m djup är täckt med grovsediment (mo-sand-grus-sten). Därunder vidtar ett område med grövre finsediment. Lösa finsediment med hög vattenhalt och organisk halt påträffas först på stora djup (>60 m)

De grunda partierna utgör erosionsbottnar där sedimenterat finmaterial förs bort mer eller mindre kontinuerligt av strömmar och vågor. Dessa erosionsbottnar upptar 32 % av bottenarealen. Intagsledningar och andra konstruktioner för värmeuttag kommer i praktiken att till största delen bli förlagda på sådana bottnar.

2.4 Vind och vågor

Vindmätningar utföres i Jönköping, Karlsborg, Askersund och på Visingsö genom SMHI:s försorg. Statistiskt bearbetade vinddata från de tre förstnämnda stationerna finns redovisade i Klimatdataboken. Detaljerade statistiska bearbetningar för speciella ändamål utföres på beställning.

En översiktligt bearbetning av vindstatistiken för att uppskatta de vindförhållanden som ger upphov till dimensionerande vågor ges i bilaga 2. Här framgår bl.a. att vindhastigheter över 20 m/s kan uppskattas uppträda i genomsnitt en gång vart annat till vart tionde år beroende på läge och vindriktning. Denna vindhastighet ger upphov till en signifikant våghöjd av ca 2 m i de mest exponerade vindriktningarna. Motsvarande våglängd är ca 40 m.

3. TEMPERATURER I VÄTTERN

3.1 Allmänt

Vättern är känd som en mycket kall sjö. Under sommaren är temperaturen i regel lägre än i mindre sjöar.

Temperaturens årliga gång i en sjö på våra breddgrader beskrivs i det följande.

På våren värms ytvattnet upp av solen. Så länge temperaturen är lägre än ca 4°C är det uppvärmda vattnet tyngre och sjunker ned mot botten och ger upphov till en omblandning av vattenmassan (värcirkulation). Fortsatt uppvärmning sedan 4°C uppnåtts medför att ytvattnet blir lättare och stannar kvar vid ytan. Härigenom deltar enbart en mindre volym i uppvärmningen och temperaturen stiger därför snabbt. Vindens verkan gör att ytvattnet blandas med underliggande kallare vatten och en större volym tillförs värme. För varje vindtillfälle blir det varma ytskiktet allt tjockare. Vätterns form och relativt utsatta läge gör att värmen fördelas över relativt stora djup och därmed stor volym. Allt detta bidrar till att hålla sommartemperaturen relativt låg, men samtidigt magasinerar mycket stora värmemängder i sjön. På hösten minskar solstrålningen och sjön avger mer värme än den mottar, vilket gör att sjötemperaturen minskar. När ytvattnet avkyls blir det tyngre än det underliggande och sjunker under detta. Temperaturen blir därför homogen i det övre skiktet, vars tjocklek blir allt större, för att så småningom omfatta hela sjön (höstcirkulation).

När temperaturen sjunkit till 4°C ändras detta förlopp ty ytterligare avkylning innebär att ytvattnet återigen blir lättare och en mindre vattenvolym berörs av avkylningen. Detta inträffar dock under den del av året då frekvensen av stormtillfällen och höga vindhastigheter är hög. Genom sitt läge och utseende blir vindens verkan sådan att sjön blandas om ordentligt varvid stora vattenvolymer avkyls. Det tar därför lång tid att avkyla ytvattnet till 0°C så att isbildning kan ske. Beroende på hur vind- och lufttemperaturerna är under hösten så kan större eller mindre värmemängder bevaras i sjön. I en normal mindre sjö avkyls i regel ytskiktet till 0°C och isläggning sker varje år. För Vättern däremot tycks det krävas att avkylningen tränger ner till stort djup för att isläggning skall kunna ske.

3.2 Dataunderlag

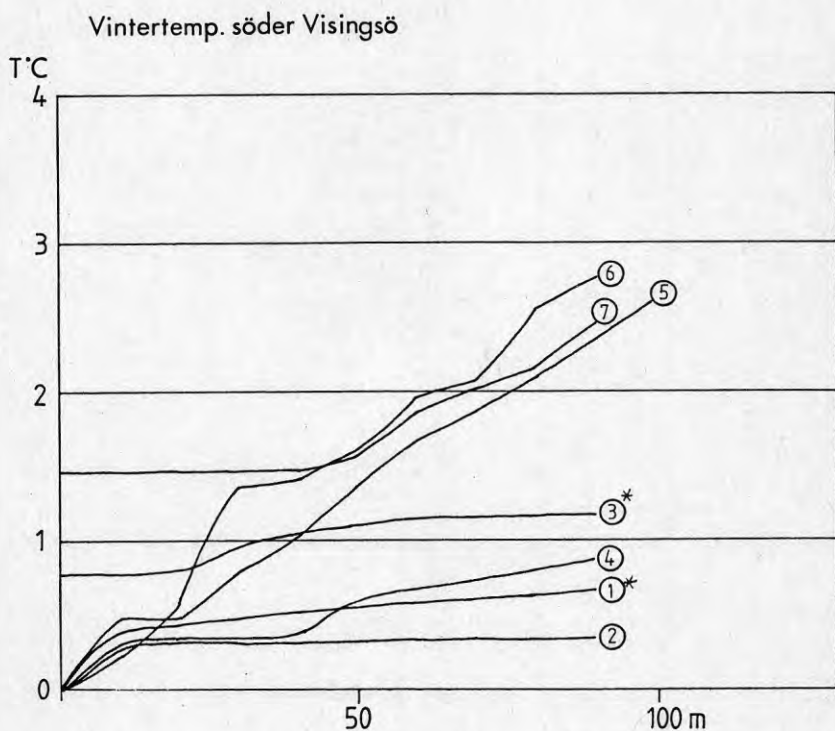
Trots att åtskilliga studier genomförts i Vättern så saknas i allmänhet temperaturopbservationer från vinterperioden. Endast något fåtal mätningar finns. Från djupbäckenet söder om Visingsö är det möjligt att sammanställa data från sju olika vintrar mellan åren 1855-1980. Mätningarna har dock en övervikt av kalla år, varför de ger en alltför skev bild av temperaturförhållandena en genomsnittsvinter. Under den övriga delen av året finns månatliga (april-november) observationer på olika djup från en station söder om Visingsö (Lat. $N57^{\circ} 54'45$ Long E $14^{\circ} 13'75$) under åren 1970-1981 (SNV). Dessa data kan sägas representera mer centrala delar av Vättern. Sommartid finns mätdata på flera djup från ett flertal stationer. Temperaturerna på många djup har insamlats med automatiskt registrerande temperaturmätare under perioderna juli-aug 1977 och aug-okt 1979 (SMHI).

Utöver detta finns sommarmätningar som visar temperaturfördelningen i olika delar av Vättern. Dessa senare har emellertid inte gjorts med någon regelbundenhet att någon statistisk behandling varit möjlig.

Däremot utnyttjas Vättern som vattentäkt utav många kommuner runt sjön. De olika vattenintagen är belägna på olika djup och vid vattenverken observeras vattnets ingående temperatur regelbundet men med varierande precision och noggrannhet. Från flera av vattenverken har vi erhållit temperaturdata från 1 dag per vecka under åren 1969-1982.

3.3 Temperaturer ute i sjön

Temperaturens variation med djupet under några olika vintrar visas i figur 3.1. Dessa data är till stor del hämtade från en uppsats av Liljequist (Liljequist, 1941).

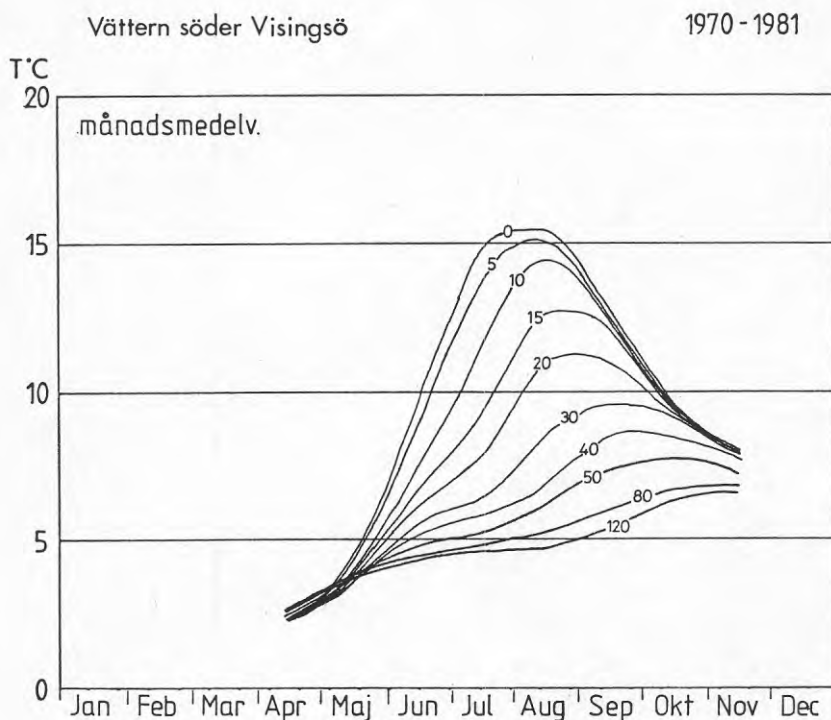


Figur 3.1 Vintertemperaturer på olika djup i Vättern

1. 1855-02-25 (ej söder Visingsö utan strax utanför Borghamn)
2. 1900-03-24
3. 1903-02-25 (ej söder Visingsö utan strax söder om Omberg)
4. 1940-03-12
5. 1941-03-14
6. 1942-03-15
7. 1980-04-10

Bilden visar att det kan vara mycket låga temperaturer även på stora djup. Vintertemperaturerna 1980 (kurva 7) var för den här serien relativt höga. Vintern 1980 var emellertid relativt kall, varför temperaturfördelningen under ett medelår borde ge högre värden.

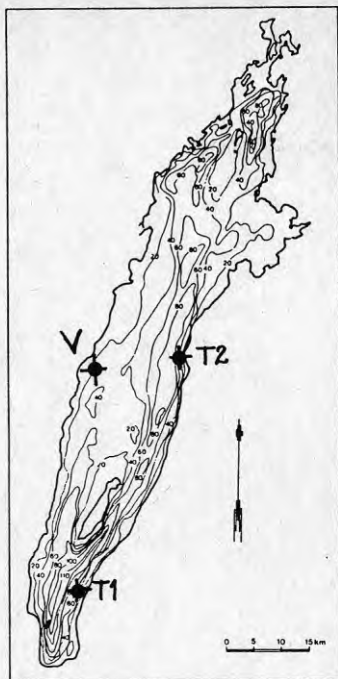
Temperaturfördelningen för olika djup under vår, sommar och höst åskådliggörs i figur 3.2.



Figur 3.2 Månadsmedeltemperaturer på olika djup under perioden 1970-1981. Läge: N57°54'.45 E14° 13'.75

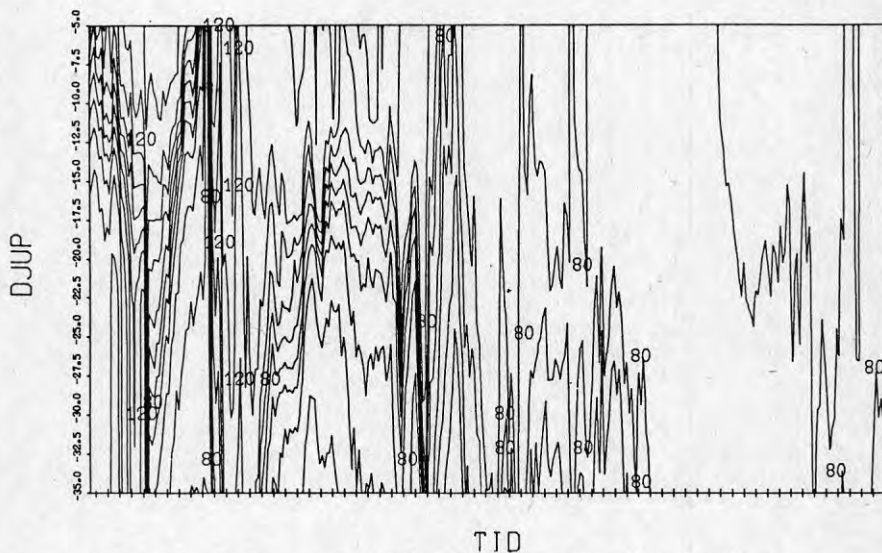
Diagrammet visar den gradvisa uppvärmningen på olika djup under våren och sommaren samt hur tidpunkten för temperaturmaximum förskjuts med djupet. Bilden visar dock ett mycket utslätat förlopp. Temperaturväxlingarna sker ofta mycket hastigt, speciellt i samband med vindpåverkan. I figurerna 3.4, 3.5 och 3.6 visas exempel på att temperaturen snabbt kan förändras ganska mycket. Läget för observationspunkterna visas i kartan i figur 3.3.

Temperaturens variation visas för stationerna T1 och T2 i figurerna 3.4 och 3.5 i form av djup-tidsdiagram, där temperaturen representeras av isotermer (d.v.s. linjer som förbinder punkter med samma temperatur).



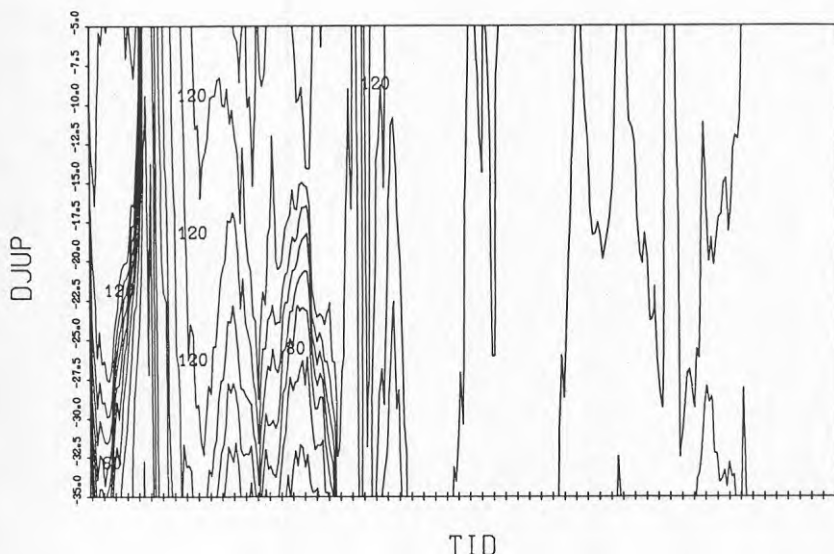
Figur 3.3 Mätpunkter med temperaturdata

STARTTID 790816 KL. 12.00 STOPPTID 791023 KL. 8.30



Figur 3.4 Isopletdiagram för temperatur i station T1 1979

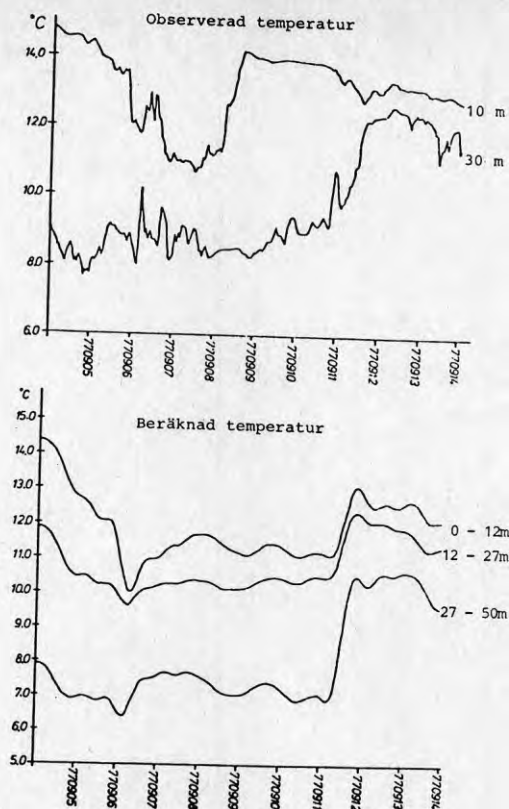
STARTTID 790821 KL. 19.00 STOPTID 791024 KL. 9.30



Figur 3.5 Isopletdiagram för temperatur i stationen T2 1979.

Observera att djupskalan i vänstra kanten ej börjar på 0 m utan på det första mätdjupet. På tidsaxeln anges markeringar för varje dygn. Siffrorna i diagrammen avser tiondels grader så att t.ex. 120 betyder 12.0°C. Temperaturfördelningen i sjön är under sommaren sådan att ett mer eller mindre tjockt ytskikt är varmt och ett djupskikt är relativt kallt. I gränsytan mellan skikten ändras temperaturen snabbt med djupet. Vid denna gränsyta samlas därför många isotermer. Diagrammen i figurerna 3.4 och 3.5 visar hur denna gränsyta rör sig upp och ner. Man kan ur diagrammen utläsa att temperaturen i ytskiktet kan förändras åtskilliga grader på några få dagar. Dessa temperaturvariationer sammanhänger med s.k. interna vågor, vilket innebär att gränsytan mellan varmt och kallt vatten står och gungar. Ibland når det kalla bottenvattnet upp till ytan. Temperaturerna har observerats med instrument som har temperaturgivare på 11 nivåer. Temperaturen har registrerats varje halvtimme. I figur 3.6 visas temperaturvariationer under några dygn för två djupnivåer observerade med automatiskt registrerande strömmätare i den västra delen av Vättern (station V i figur 3.3). Instrumenten registrerade ström och temperatur var tionde minut.

De snabba temperaturförändringarna syns tydligt. De sammanhänger med dynamiska förlopp i Vättern. Drivkraften utgöres av vind och lufttrycksförändringar. Figuren visar också beräkningar av temperaturvariationer som en följd av dynamiska förlopp (se Funqvist, 1979).



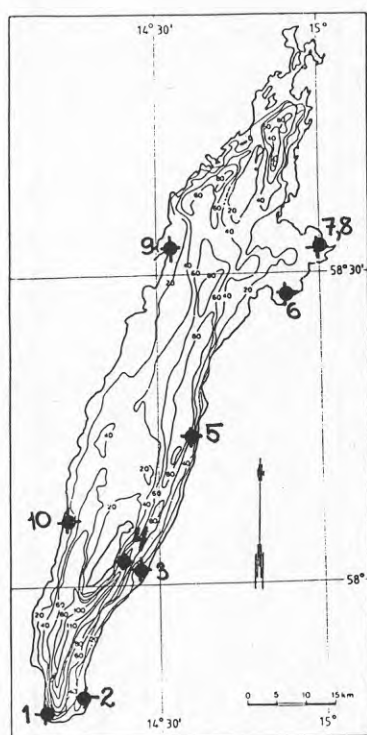
Figur 3.6 Registrerad och beräknad temperatur i vertikal V under tiden 5.9-14.9 1977

3.4 Vattentemperaturen vid vattenverken

Temperaturdata från flera orter utmed Vätterns kust har insamlats. I tabell 3.1 återges de platser varifrån data erhållits, vilket djup de representerar, vilka år som omfattas samt anges beteckning för referens på kartan i figur 3.7.

Tabell 3.1 Orter med temperaturdata

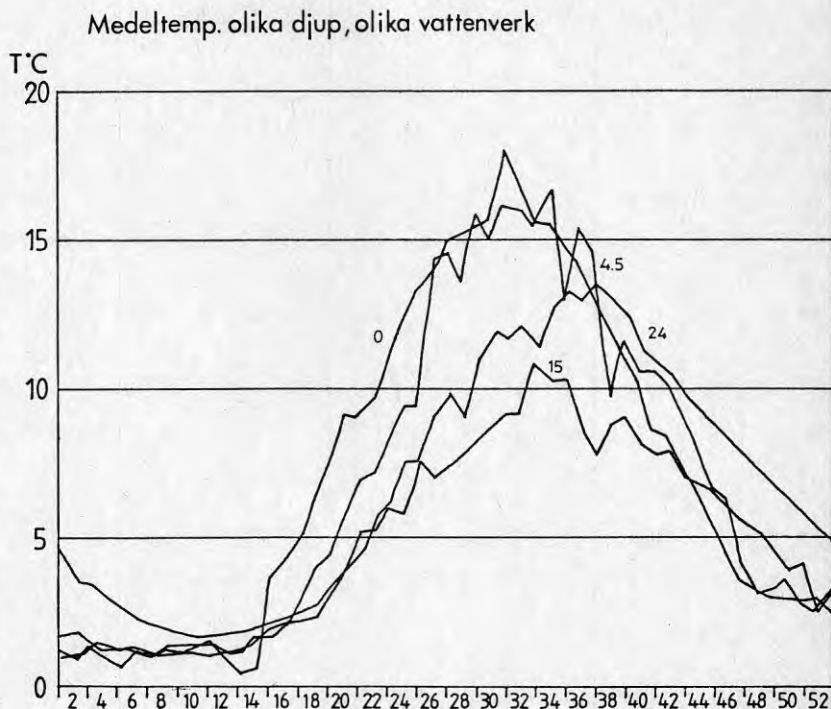
Kartbe- teckn. (fig.3.7)	Ort	Vattenverk	Intags- nivå	Frekvens	Period	T-upp- lös.
1	Jönköping	Häggeberg	26.4 m	Veckovis	1970-82	1°C
2	Husqvarna	Brunnstorp	15.0 m	"	1973-82	1°C
3	Gränna		8 m	Sporadiskt	1971-82	1°C
4	Visingsö		4 m	"	1975-82	1°C
5	Ödeshög	Ödeshög	24.0 m	Veckovis	1969-83	0.1°C
6	Vadstena	Vadstena	4.1 m	"	1968-82	0.1°C
7	Motala	Råsnäs	4.5 m	"	1968-71	0.1-1°C
8	Motala	Råsnäs	10.5 m	"	1972-82	0.1-1°C
9	Karlsborg	-	ytan	i reg dagl	1969-82	0.1°C
10	Borgunda	Skaraborgs Vatten- verksförb.	16 m	veckovis	1980:82	0.1°C



Figur 3.7 Ungefärliga lägen för de olika observationsplatserna

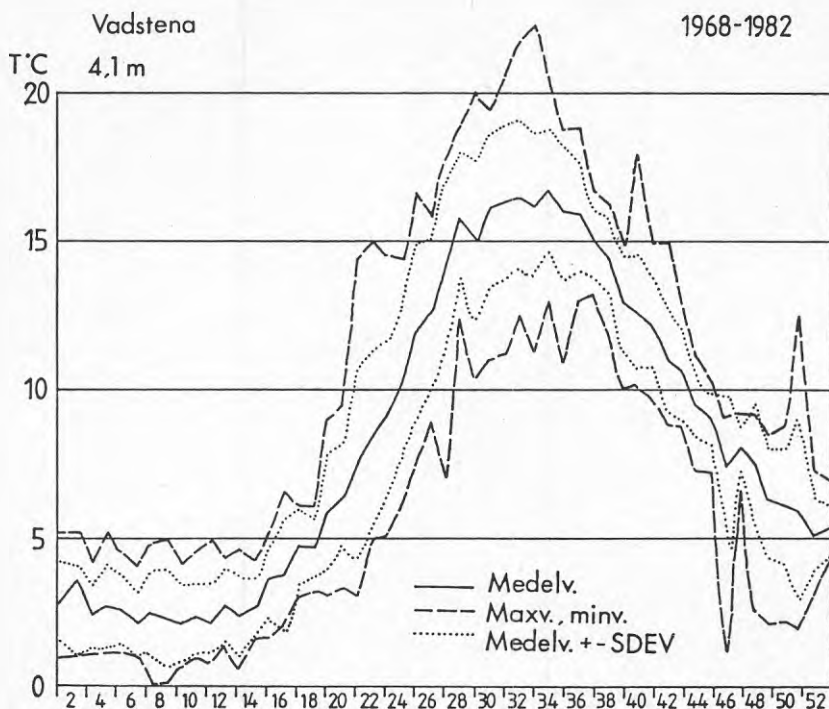
Medeltemperaturerna för olika djupnivåer längs Vätterns kust finns sammanställda i figur 3.8.

Resultatet blir ungefär detsamma som månadsmedelvärden för en station ute i sjön. Man kan dock konstatera att temperaturvärdena är högre på sommaren och lägre under vår och höst. Kurvan som representerar 15 m (från Brunnstorp vid Husqvarna) är uppenbarligen för låg under sommaren, vintertemperaturen förefaller rimlig. Temperaturkurvens maximum verkar vara rätt placerat i tiden men absoluttemperaturen är ca 4°C för låg.



Figur 3.8 Medeltemperatur för några olika nivåer i Vättern. (Siffrorna intill avser djupen i meter.)

Det är viktigt att konstatera om temperaturregistreringarna representerar förhållandena ute i sjön eller inte. Temperaturen kan förändras från intaget fram till mätplatsen. I bilaga 1. visas att temperaturförändringarna längs en intagsledning är mycket små och i stort sett erhålles samma temperatur ven vintertid. Detta resultat är mycket osannolikt och än mer osannolika ter sig de höga maximitemperaturerna under motsvarande tid. Vid närmare analys av dataunderlaget visade det sig att mätningarna utförts på skilda ställen i distributionsnätet. Effekten av detta togs bort för vinterperioden genom att mätvärdena för övriga mätställen än vattenverket uteslöts för underlagsmaterialet. I figur 3.9 visas resultaten sedan dessa mätvärden uteslutits. Det framgår av diagrammet att trots denna korrektion kvarstår såväl höga maximitemperaturer som höga medeltemperaturer under vintern. Vid en inspektion på platsen fann vi att vattnet vid mätplatsen först passerade en varmvattenberedare. Vid besöket mätte vi temperaturen förutom vid mätstället även i en sedimenteringsbassäng och i en intagsbrunn. Det visade sig då att temperaturen vid mät-

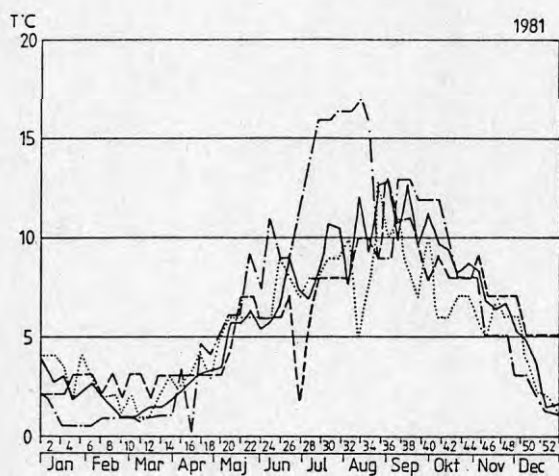
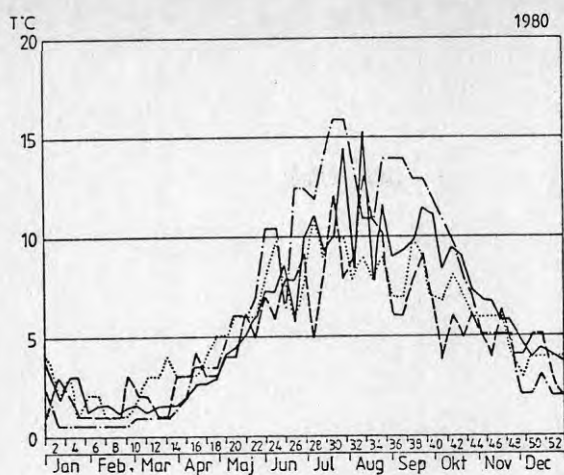


Figur 3.9 Temperaturstatistik från Vadstens vattenverk 1968-1982

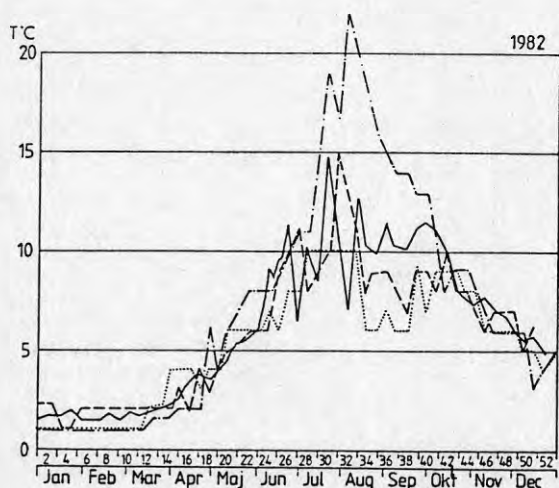
platsen var 1-1,5^oC högre än de övriga temperaturerna. Mätningarna vid Vadstena kan därför inte representera temperaturförhållandena vid Vättern. (Materialet skulle möjligen kunna korrigeras något med hjälp av samtidiga mätningar vid den ordinarie mätplatsen och i intagsbrunnen under någon vinter.)

Det har varit termometrar av skiftande kvalitet och upplösning som utnyttjats vid de olika vattenverken. Endast i Häggeberg och i Ödeshög har vi kunnat se de använda instrumenten. Häggebergs termometer var graderad mellan 0^oC och 200^oC och därför kunde enbart hela grader avläsas. Termometern i Ödeshög var graderad mellan 0^oC och 20^oC med markeringar för varje 0,1^oC. Den senare termometern har jämförts med två normaltermometrar och befunnits ge samma värden inom +0,1^oC för intervallet 2-20^oC. I intervallet 0-2^oC var största avvikelsen 0,2^oC. Vid de övriga vattenverken fanns ingen brukbar termometer vid våra besök. Dessutom hade de bytt termometrar (p.g.a. haverier) flera gånger under mätperioden.

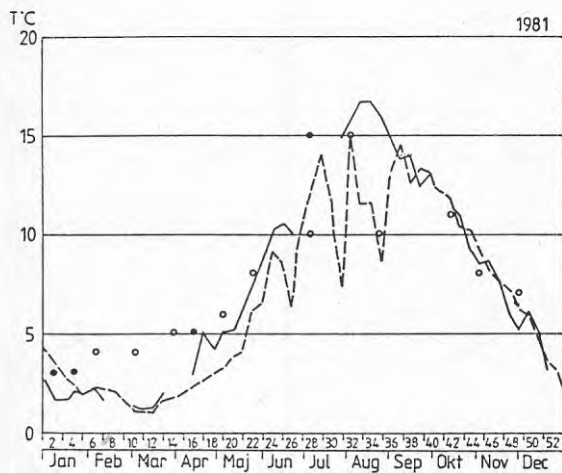
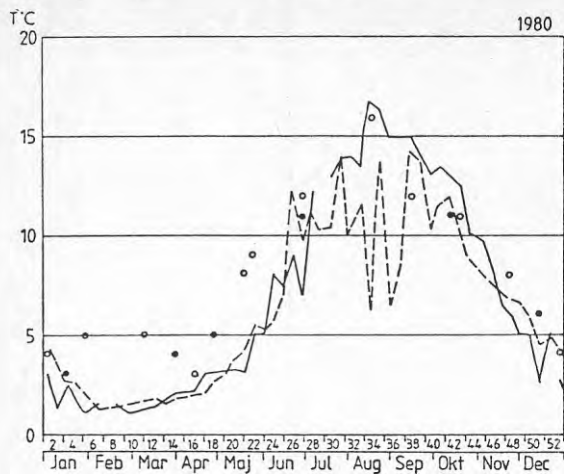
För att illustrera hur temperaturen varierar under några enskilda år och hur temperaturen varierar mellan olika delar av Vättern, har temperaturdata från samtliga vattenverk under åren 1980, 1981 och 1982 sammanställts till diagrammen i figurerna 3.10 och 3.11. Temperaturvärdena från Gränna och Visingsö är under vintern alldeles för höga och kan inte representera förhållandena i Vättern utan måste ha värmts före mätplatserna. Temperaturkurvorna för intag på större djup än 10 m visar att variationerna kan vara stora och ske på kort tid. Dessa variationer hänger säkert samman med stående eller långa fortskridande vågor i gränsskiktet mellan



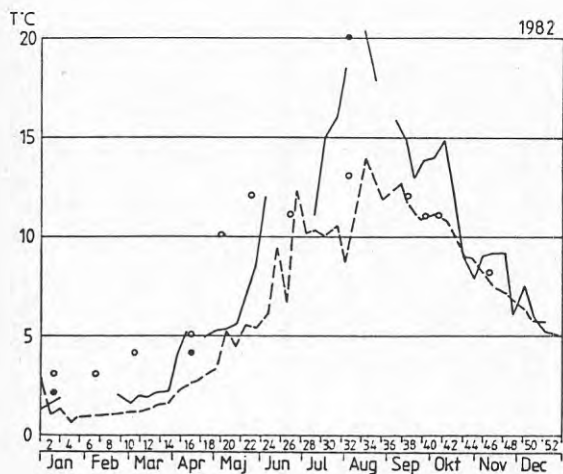
— Borgunda 16m
— Rässnäs 10.5m
..... Häggeberg 26.4m
- - - Brunnstorp 15m



Figur 3.10
Temperaturdata från
1980, 1981 och 1982
från Borgunda, Rässnäs,
Häggeberg och
Brunnstorp.



- Gränna
- Visingsö
- Vadstena 41 m
- - - Ödeshög 24 m



Figur 3.11 Temperaturdata från 1980, 1981 och 1982 från Gränna, Visingsö, Vadstena och Ödeshög

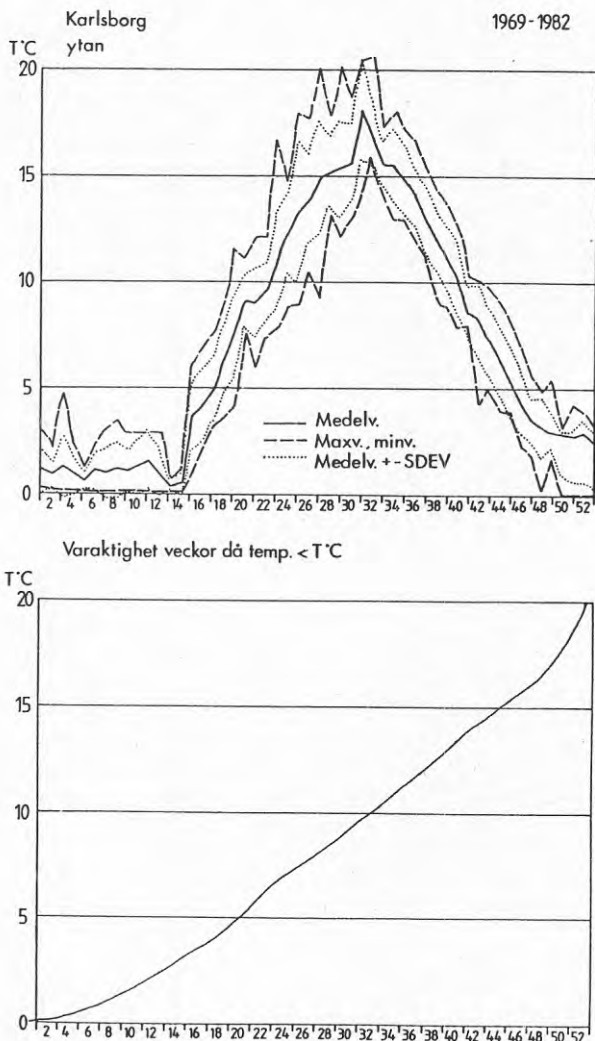
det varmare ytvattnet och det kallare djupvattnet under sommaren. Under den övriga delen av året är temperaturskillnaderna mycket mindre, vilket betyder att temperatureffekterna blir mycket mindre. Kurvorna visar inte på någon påtaglig regional skillnad utan illustrerar mer hur temperaturen varierar med djupet under olika delar av året. Temperaturuppgifterna från Brunnstorp (15 m) visar även här att de sannolikt är för låga. Ett minivärde 2°C under vecka 27 1981 är säkerligen en felavläsning. Värdet skulle eventuellt ha varit 12°C . Vadstena-värdena är hela tiden för höga. Under avkylningsperioden borde temperaturen minska i ytskiktet först.

Resultatet av temperaturmaterialets statistiska behandling visas i ett antal diagram (figurerna 3.12-3.16) för de platser där data omfattar fyra år eller mer. För varje vecka har medeltemperatur, maximi- och minimitemperatur samt standardavvikelse beräknats. Maxantalet observationer för en viss vecka utgör därför det antal år serien omfattar. Saknas något veckovärde blir antalet mindre. I diagramform har fem kurvor angivits en för vardera maxtemperatur, medeltemperatur plus standardavvikelse, medeltemperatur, medeltemperatur minus standardavvikelse samt mintemperatur. Ett praktiskt mått, som man kan kalla "standardtemperatur", är medeltemperaturen minus standardavvikelsen, vilket är den temperatur som överstigs sex år av sju. (Förutsätter att materialet är normalfördelat.) Utöver detta har temperaturens varaktighet för de olika platserna beräknats som det antal veckor då temperaturen understiger vissa gradtal. De har sedan omräknats till att gälla ett år omfattande 53 veckor. Tidsaxeln i diagrammen börjar på vecka 1 och slutar på vecka 53. Detta gör att varaktighetskurvan börjar "utanför" axlarna.

Härefter följer en kort beskrivning av resultaten vid de enskilda platserna.

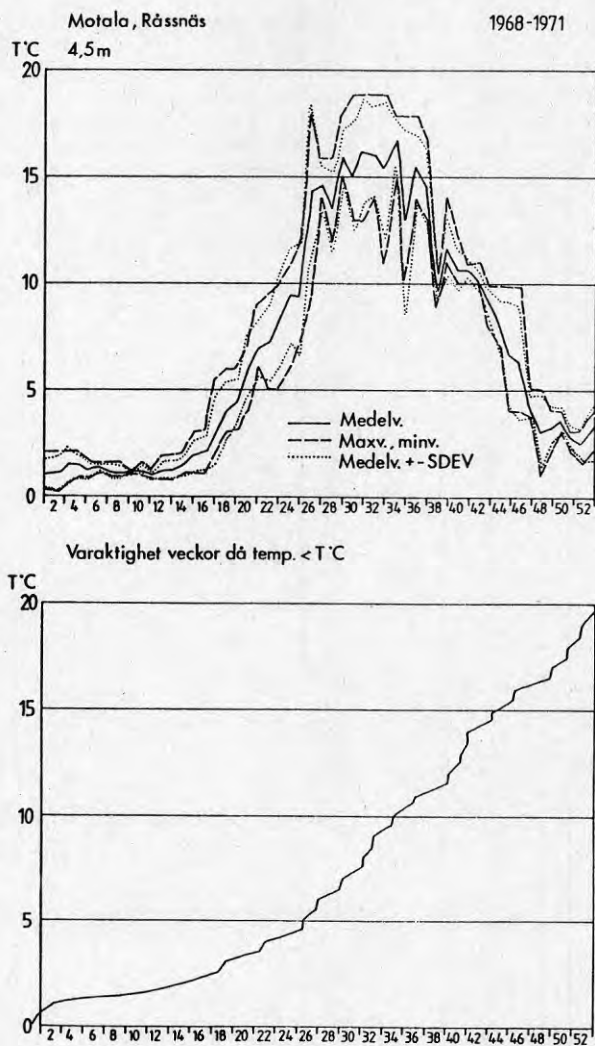
I Karlsborg har man mätt ytvattentemperaturen vid kajen i stort sett dagligen alltsedan 1969. I figur 3.12 återges statistik omfattande ett värde per vecka under perioden 1969-1982. Tyvärr saknas ofta temperaturvärden under månaderna februari och mars. För dessa månader saknas data från sex av de fjorton år serien omfattar. Detta gör att statistiken blir något skev för veckorna 5-12.

Effekten av detta kan vara något för höga medeltemperaturer under denna period, men än mer påverkas dock varaktighetskurvan, ty det är sannolikt att temperaturen under dessa veckor understiger 2°C , varför kurvan kan ge någon eller några veckors kortare period med låga temperaturer för ett genomsnittsår.



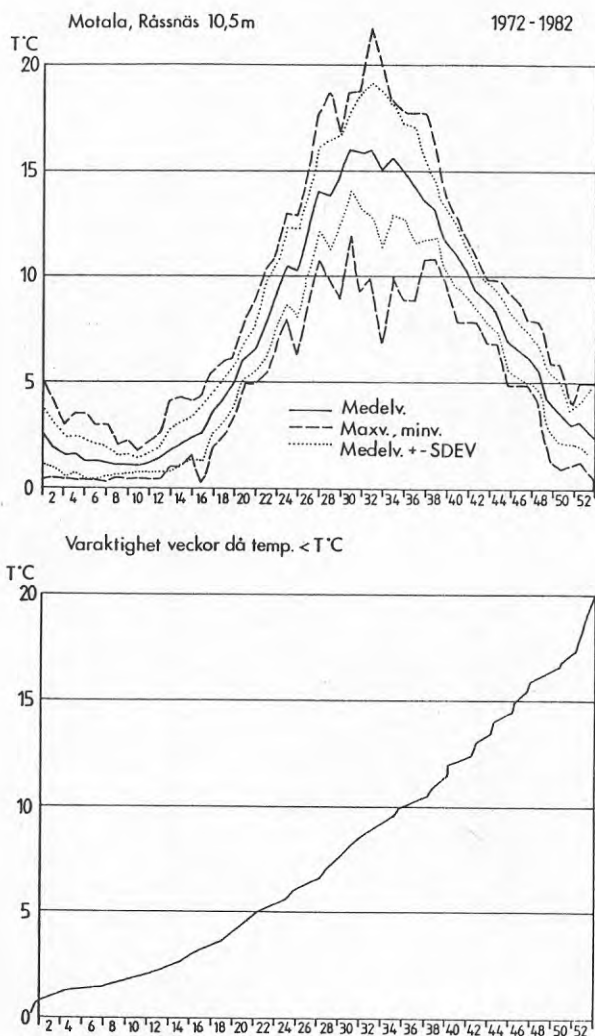
Figur 3.12 Temperaturstatistik från Karlsborg. (Obs begränsat datamaterial för veckorna 5-12.)

Vid vattenverket i Motala har man under årens lopp ändrat intagsnivån från 4,5 m till 10,5 m. Därför finns statistik från båda nivåerna (figurerna 3.13 och 3.14) men under skilda tidsperioder.



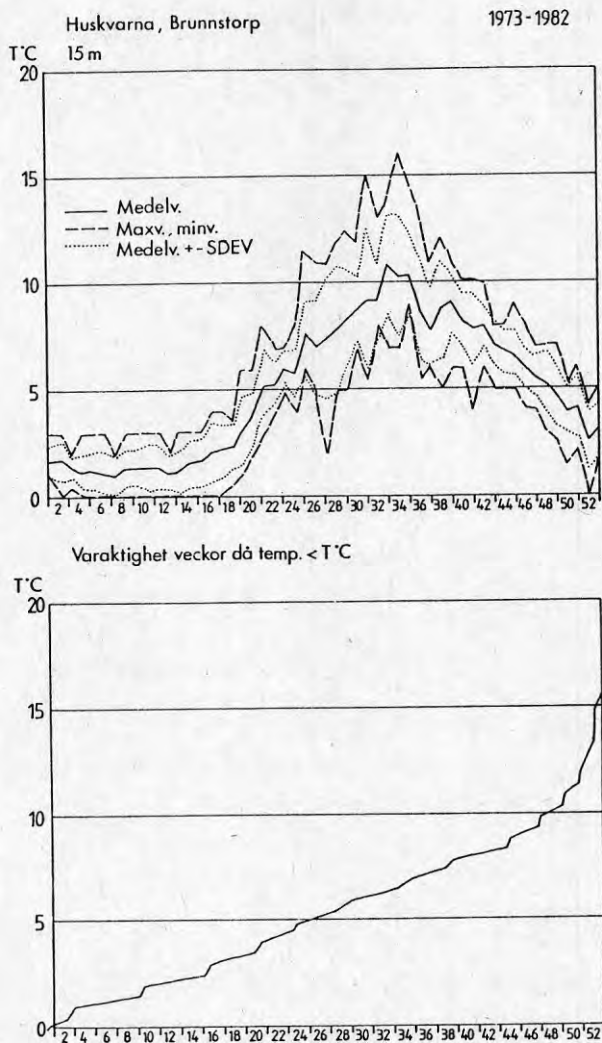
Figur 3.13 Temperaturstatistik från Motala, Rässnäs 4,5 m.

I figur 3.13 är kurvorna väl samlade speciellt under vintern. Mätserien 1968-1971 representerar en period då Vättern var islagd. Istäcke finns troligen varje år i Motalaviken och det är därför rimligt att en viss uppvärmning sker från botten. En svag effekt av detta kan iakttas i diagrammet. Detta återverkar även på varaktighetskurvan så att tiden då temperaturen understiger 2°C blir kortare än den annars skulle vara. Av materialet framgår även hur väl temperaturen avlästs under olika delar av året. Upplösningen under vintern var 0.1°C medan den under sommarmånaderna var bara $0.1-1^{\circ}\text{C}$. Detta återspeglas i varaktighetskurvans trappstegsformade utseende. Samma sak men i mindre utsträckning gäller det djupare belägna intaget, figur 3.13. Temperaturvariationerna var för detta djup något större, men kan också vara ett resultat av den längre observationsperioden.



Figur 3.14 Temperaturstatistik från Motala, Rässnäs 10.5 m

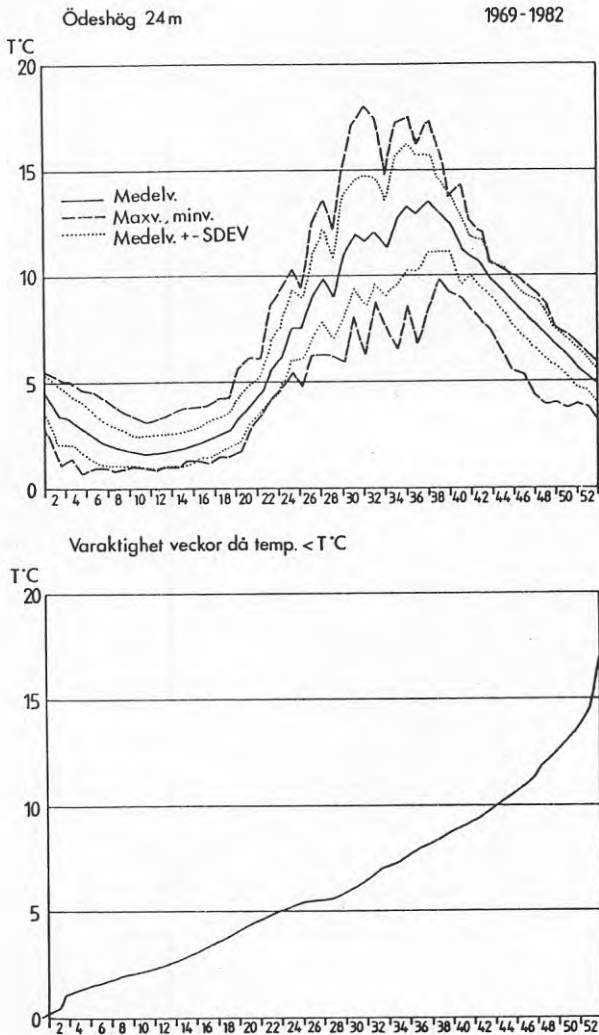
Temperaturdata från Brunnstorp, figur 3.15, verkar som helhet vara för låga speciellt under sommaren.



Figur 3.15 Temperaturstatistik från Brunnstorp 15 m

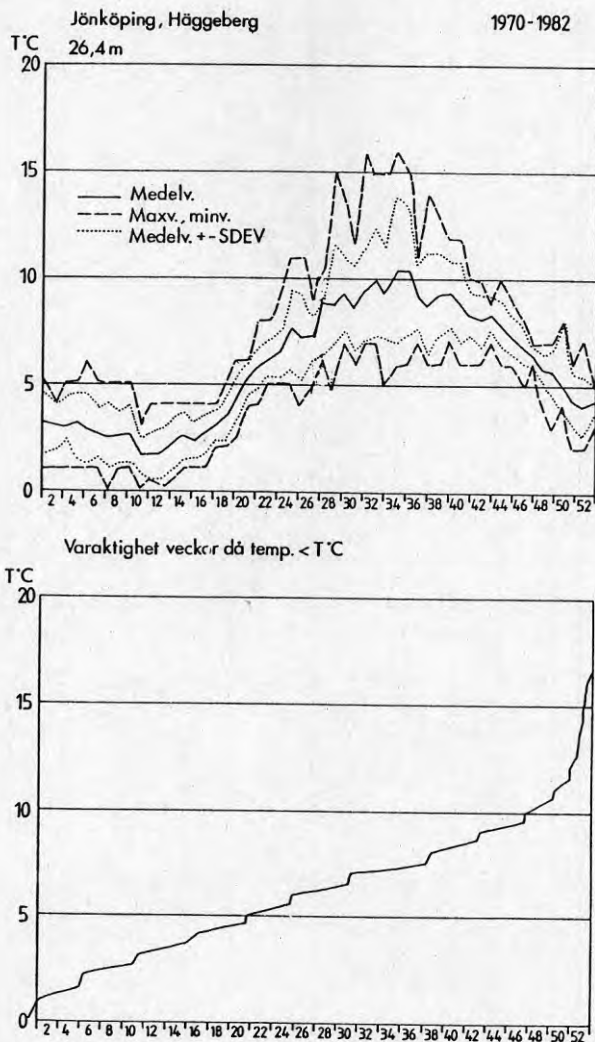
Temperaturerna har i Brunnstorp avlästs på hela och ibland på halva grader när. Detta framgår av varaktighetskurvans trappstegsformade utseende. Tidsrymden då temperaturen understiger 2°C verkar dock rimlig, varför materialet torde kunna utnyttjas för att bedöma och eventuellt dimensionera en värmepump för förhållandena i Husqvarna. Det torde finnas en viss extra säkerhetsmarginal genom att de observerade temperaturerna "är för låga" i jämförelse med t.ex. Ödeshög.

Data från Ödeshög utgör det mest homogena materialet i hela denna studie. Data har under hela året observerats med angivande av tiondels grader. Temperaturkurvorna i figur 3.16 blir mycket jämna och varaktighetskurvan saknar trappstegsformen helt.



Figur 3.16 Temperaturstatistik från Ödeshög 24 m

Slutligen visas statistiken från Hägeberg i figur 3.17. Temperaturerna har avlästs nästan enbart på hela grader, vilket syns tydligt i kurvornas taggiga form och av varaktighetskurvans trappstegsform. Trots detta erhålles en relativt god uppfattning om temperaturförhållandena, ty både form och varaktighet överensstämmer ganska väl med dem i Ödeshög på ett djup av samma storleksordning.



Figur 3.17 Temperaturstatistik från Hägeberg 26.4 m

Sammanfattningsvis kan sägas att data från de olika platserna ger en god bild av temperaturförhållandena i Vättern och resultaten hänger väl samman så att tveksamma data relativt lätt avslöjas. Den tid då temperaturen understiger 2°C anges i tabell 3.2

Tabell 3.2 **Antal veckor då temp. < 2°C vid de olika mätplatserna**

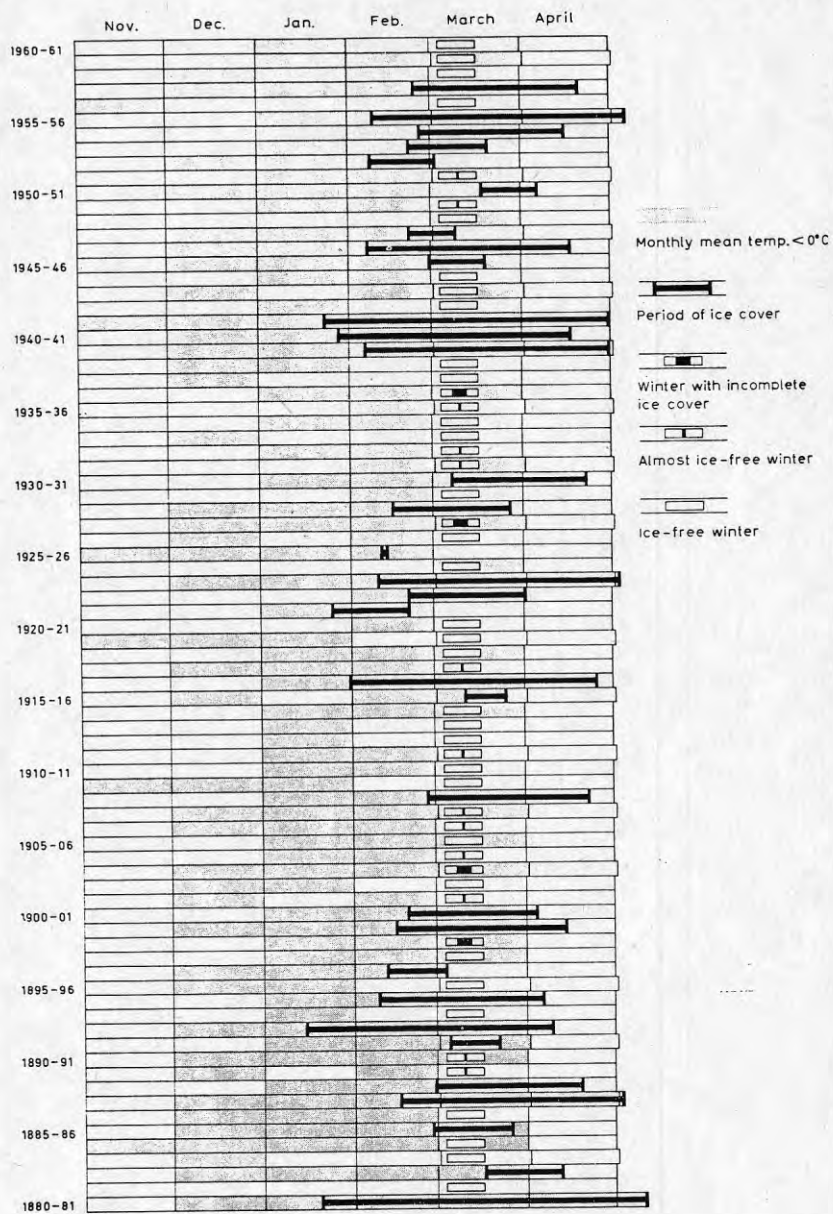
Plats	Djup (m)	Tid då $t < 2^{\circ}\text{C}$ veckor/år	Anm.
Häggeberg	26	5	Sannolikt ytterligare några veckor, ty observationer enbart på hela grader
Brunnstorp	15	9	
Ödeshög	24	9	
Vadstena	4	6	Alltför höga temperaturvärden
Motala	4	15	
Motala	10	13	
Karlsberg	0	11	Stort bortfall av data under kalla månaderna, (februari och mars)

Av tabellen framgår att man kan räkna med att temperaturen understiger 2°C under ca 10 veckor per år för djup större än ca 15 m och kanske 15 veckor för djup mellan 0 och 15 m.

3.5 Samband mellan isläggning och temperatur

Avkylningsförloppet och isläggningen i en sjö beror på ett komplicerat sätt av meteorologiska faktorer (lufttemperatur, vind, utstrålning, avdunstning). I en given temperatursituation avgör vindförhållandena i hög grad hur snabbt avkylningen fortplantas till djupare skikt. I och med isläggningen upphör vädrets direkta inverkan på vattentemperaturen. Djupvattnets lägsta temperatur uppträder i allmänhet i samband med isläggningen. Därefter sker en kontinuerlig uppvärmning genom värmeavgivning från botten.

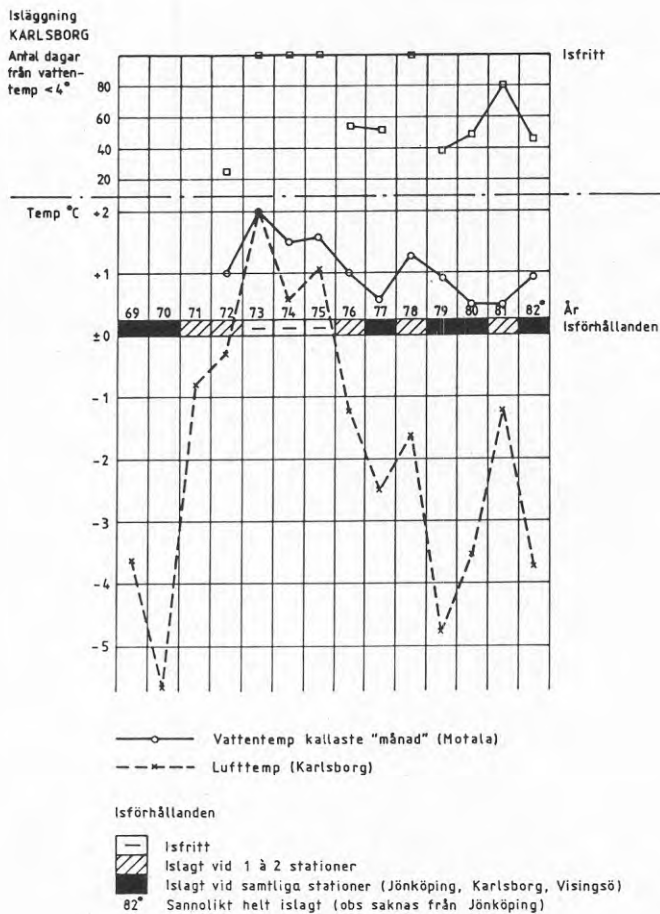
Is- och temperaturförhållandena i Vättern har tidigare studerats (Liljequist 1941). Under perioden 1881-1940 har Vättern varit isfri eller i det närmaste isfri 35 vintrar av 60. Övriga år har sjön varit helt eller delvis islagd (21 resp. 4 vintrar). Norrman (1964) har sammanställt isförhållanden under perioden 1880/81 - 1960/61, figur 3.18.



Figur 3.18 Isförhållandena i Vättern under vintrarna 1880/81 till 1960/61 efter Norrman (1964).

Här behandlas perioden 1969-82

Figur 3.19 illustrerar att lufttemperaturen har stor betydelse för om ett istäcke skall bildas eller inte.

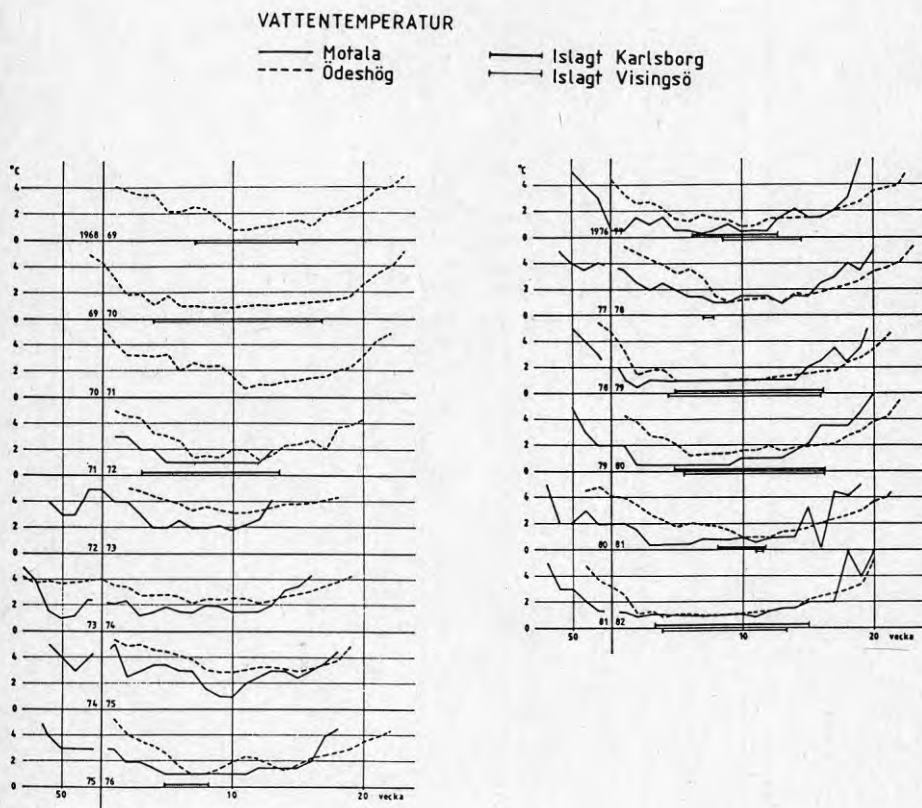


Figur 3.19 Is- och temperaturförhållanden vid Vättern från vintrarna 1968/69 till 1981/82.

Förekomsten av istäcke kan där jämföras med olika temperaturmätt såsom luftens medeltemperatur dec-mars i Karlsborg och vattentemperaturen vid vattenverket i Motala (10.5 m djup). Det förefaller som om lufttemperaturen i medeltal under vintermånaderna bör ligga under -1.5°C - 2°C för att ett istäcke skall kunna bildas. Man bör emellertid också ta hänsyn till vilka månader som är kallast. Eftersom avkylning till 4°C inte inträffar förrän kring årsskiftet kan isläggning i allmänhet inte ske förrän tidigast i början av januari. En vinter med låga temperaturer i december - januari men blidväder i februari - mars ger normalt inte någon isläggning, medan där-

emot ett år med mild förvinter och kall februari - mars är gynnsamt för isläggning. Enligt Liljequist är följande förhållanden idealiska för att det skall bildas ett istäcke på Vättern: Starka vindar i november - januari och lugnt väder i februari. De kallaste månaderna bör vara februari och mars. Medeltemperaturen under januari bör vara under 0°C för att medge effektiv avkylning av sjön. Figur 3.19 visar också vattentemperaturvärden från Motala vattenverk, 10.5 m intag, uttryckta som medelvärden vid Karlsborg, beräknad från den tidpunkt då vattentemperaturen sjunkit under 4°C . Det visar sig att isläggning vid Karlsborg förekommer under de år vattentemperaturen vid Motala (10.5 m djup) varaktigt går ned till 1°C eller lägre. Som man kan vänta sig sker isläggningen tidigare ju lägre lufttemperaturen är.

Vattentemperaturen i Vättern under den tid vinterskiktning råder (d.v.s. vid temperaturer under 4°C) framgår av figur 3.20, där veckovärden från Motala (10.5 m) och Ödeshög (24 m) finns uppritade.



Figur 3.20 Vattentemperatur och isläge 1968/69 - 1981/82.

Genom att observationerna avser olika djup (10.5 m resp 24 m) får man också en uppfattning om eftersläpningen i såväl avkylnings- som uppvärmningsförloppen mellan de båda nivåerna. Avkylning till 4°C har i medeltal skett 25 dagar senare på 24 m än på 10.5 m. Också minimitemperaturen visar en liknande eftersläpning (27 dagar, spridningen är dock stor). Minimitemperaturerna ligger i medeltal 0.5°C högre på det större djupet.

Förekomsten av is vid Karlsborg och Visingsö redovisas i figur 3.20. Isläggning vid Karlsborg inträffar i medeltal ca två veckor efter det att vattentemperaturen vid Motala (10.5 m djup) sjunkit under 1°C . Tidsförskjutningen mellan isläggning vid Visingsö och avkylning under 2°C vid Ödeshög (24 m djup) är ungefär lika stor.

Under perioder med lång isliggetid (1970, 1979, 1980, 1982) kan en långsam temperaturstegring iakttas vid Ödeshög (24 m).

Slutligen kan sägas att en isläggning av Vättern sker först sedan hela sjön blivit ordentligt nedkyld.

4. STRÖMMAR I VÄTTERN

4.1 Strömmande faktorer

Meteorologiska faktorer som vind och lufttrycksförändringar sätter i gång rörelser i vattenmassan. Uppvärmning och avkylning medför densitetsskillnader mellan strandnära områden och öppna sjön. Tillrinning och avrinning för vatten till eller från sjön. Allt detta bidrar till rörelser av olika slag i en sjö.

Vinden verkar på flera sätt: Den driver ytskiktet direkt, den sätter upp vågor, vars rörelser ger bidrag till den momentana strömmen, den stavar upp vatten mot den ena stranden. Både driftström och vågor är begränsade till ett ytskikt ty de avtar snabbt med djupet. Lufttrycksvariationer tvingar vattenytan att ställa in sig efter tryckfördelningen och medför på så sätt strömmar. När vinden upphör eller lufttrycket ändras igen vill vattenmassan återgå till sitt ursprungliga läge. Då sker svängningsrörelser i sjön, när vattenytan står och "gungar". Dessa svängningar finns även i gränsytan mellan varmt ytvatten och kallt bottenvatten. På vår och försommar uppvärms vattnet i grundare områden nära stranden snabbare än vattnet ute i sjön. Härigenom blir vattnet invid land lättare. Det tyngre vattnet strävar då mot land samtidigt som det lättare vattnet strävar ut mot öppna sjön. Vättern är emellertid så stor att jordrotationen gör att strömmen böjer av och blir mer eller mindre strandparallell.

4.2 Vindströmmen

Som en tumregel för vindströmmen brukar man ange att strömshastigheten i ytskiktet är någon procent av vindhastigheten (Dietrich, 1865). Strömshastigheten avtar med djupet och i Vättern är vindströmmen begränsad till de översta 10 - 20 metrarna, d.v.s. till skiktet ovan temperatursprångskiktet. Strömshastigheter direkt orsakade av vinden kan uppgå till 20 - 30 cm/s.

4.3 Ytvågor

Vattnets rörelse i en ytvåg sker i cirkulära banor så länge vattendjupet är större än våglängden. Denna rörelse kan på ett visst djup uppfattas som en strömshastighet, vars storlek beror på våghöjd och period. Vågens amplitud avtar med vattendjupet och därmed även strömshastigheten. Hastigheten för en 2 m hög våg med perioden 5 sek. och våglängden 40 m (jmf bil. 2) ger upphov till strömshastigheter av storleksordningen 100 cm/sek i ytan men har reducerats till ca 10 cm/sek på ca 15 m och till ca 1 cm/sek på ca 30 m djup.

4.4 Stående vågor

I Vättern förekommer stående vågor i både ytskikt och i temperatursprångskiktet, gränsytan mellan varmt ytvatten och kallt bottenvatten. De stående vågorna bestäms av bassängens dimensioner; längd, bredd och medeldjup. Stående vågor kan förekomma både längs och tvärs sjön. De yttrar sig så att vattenytan i ena änden av sjön stiger samtidigt som den sjunker i andra änden. Perioden för den stående vågen i ytan kan skrivas

$$T = \frac{2L}{n\sqrt{gh}} \quad \cdot \text{ (Dietrich, 1965)}$$

där T är perioden i sekunder, L är sjöns längd, g är jordaccelerationen, h är sjöns medeldjup och n är antalet noder i den stående vågen. Den mest markerade är den uninodala vågen (seichen) och dess period blir ca 4 timmar.

Amplituden hos vattenståndsvariationerna vid Jönköping kan bli ca 0.3 m. Detta betyder att under halva perioden d.v.s. ca 2 timmar skall en stor vattenmängd strömma t.ex. från den södra delen till den norra delen av Vättern. Storleksordningen av den strömhastighet som behövs för att denna vattenmängd skall kunna transporteras är 4 cm/sek.

För den interna seichen kan perioden på motsvarande sätt skrivas

$$T = \frac{2L}{n} \sqrt{\frac{h_1 + h_2}{g \frac{\Delta \rho}{\rho_2} h_1 h_2}} \quad (\text{Dietrich, 1965})$$

där $h_1 + h_2 = h$, d.v.s. medeldjupet, h_1 är sprängskiktets djupet och h_2 skiktjockleken under sprängskiktet. $\Delta \rho$ är densitetsskillnaden mellan skikten och ρ_2 är densiteten i det undre skiktet. Sprängskiktet kan under sommaren vara beläget på ca 15 m djup. Perioden kan då uppskattas till ca 10 dygn. Amplituden hos den interna seichen kan bli mycket stor, ca 10 m. På grund av den långa perioden krävs det dock endast ca 3 cm/sek för att transportera den erforderliga vattenmängden.

4.5 Fortskridande interna vågor

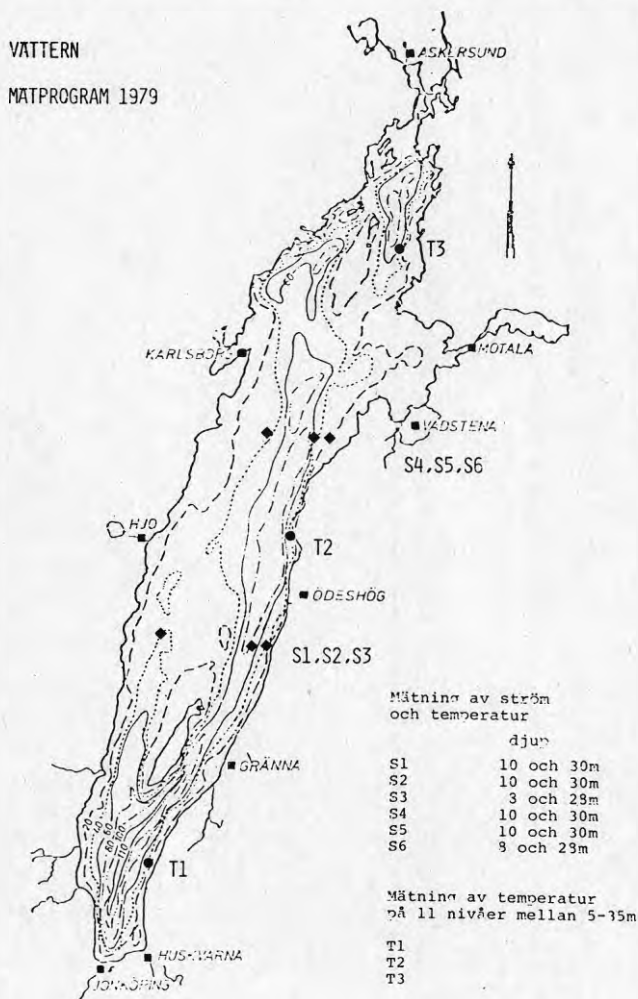
I Vättern är perioden för den interna stående vågen sådan att den hinner påverkas av jordrotationen och fortskridande interna, s.k. Kelvinvågor kan bildas. Dessa vågor är koncentrerade i kustzonen och deras amplitud avtar exponentiellt med avståndet till kusten. Normalt kan man bara observera den första moden. Vågen rör sig moturs längs kusten. De strömhastigheter denna våg ger upphov till kan vara av storleksordningen 5 cm/sek.

4.6 Densitetsdrivna strömmar

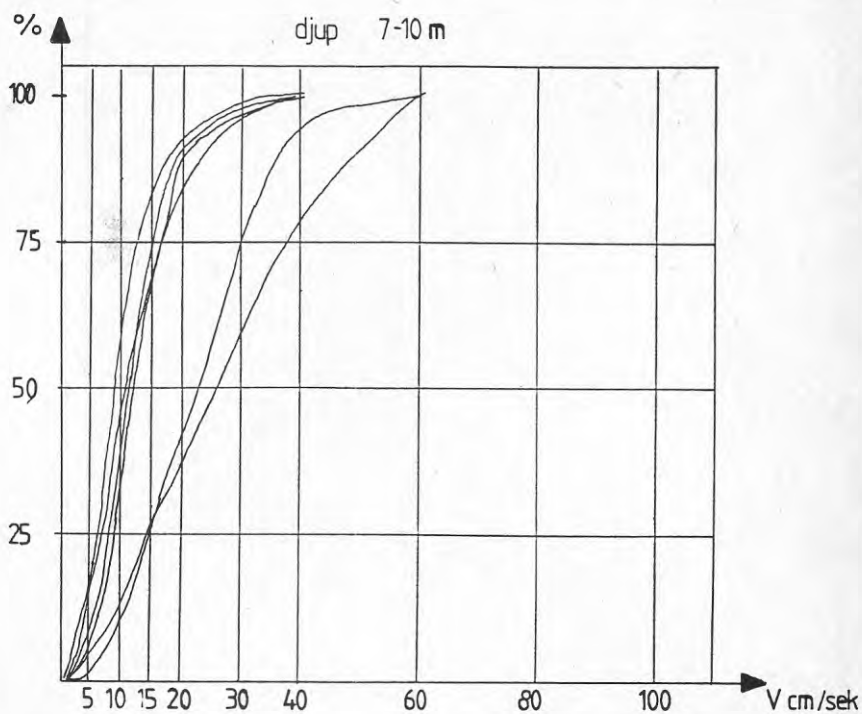
Skillnaden i temperatur mellan strandzonen och den öppna sjön gör att det strandnära vattnet har lägre densitet. Det uppstår då tryckskillnader mellan olika delar av bassängen, vilka strävar efter att utjämnas, genom att vattnet sättes i rörelse. Jordrotationen verkar på det strömmande vattnet och en balans mellan tryckkrafter och tröghetskrafter erhålles. Detta kan observeras genom att isotermerna i en sektion tvärs strömmen lutar i förhållande till horisontalplanet. De lutningar som observerats i Vättern tyder på hastighetsskillnader mellan olika skikt på ca 5 cm/sek.

4.7 Exempel på uppmätta strömhastigheter

SMHI har utfört strömmätningar i Vättern med automatiskt registrerande mätare på flera stationer, dels sommaren 1977 (Funkquist, 1979) dels sommaren och hösten 1979 (opublicerat material). Från de senare visas här strömhastighetsstatistik i form av kumulativa fördelningar, figurerna 4.2 och 4.3 för samtliga strömmätningar för studierna 1979. I figur 4.1 visas mätprogram för studierna under 1979.



Figur 4.1 SMHI:s mätprogram för Vättern 1979



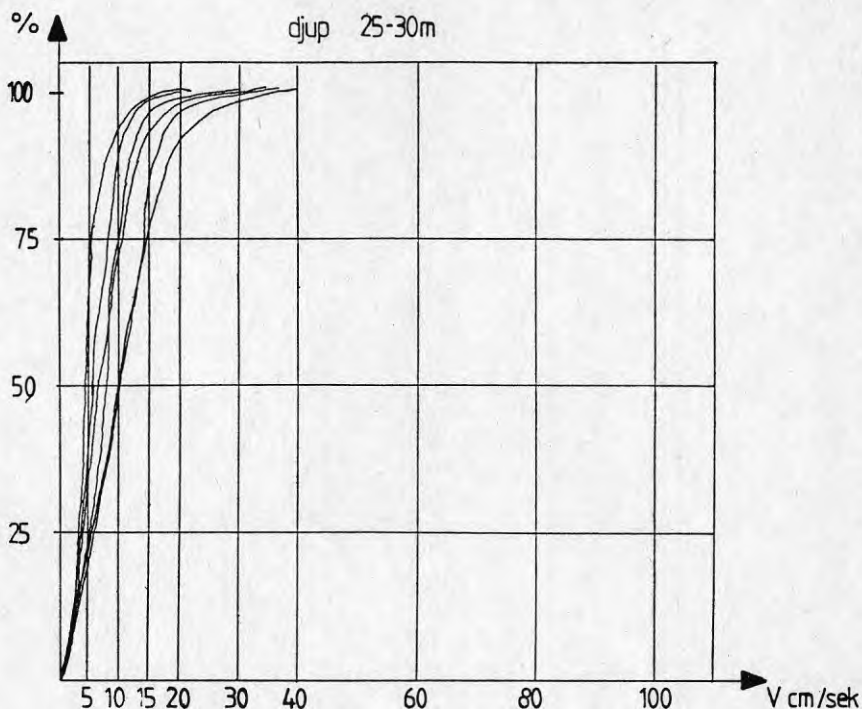
Figur 4.2 Kumulativ fördelning av strömhastigheter för ytliga mätningar under 1979, stationerna S1-S6

Diagrammet i figur 4.2 visar att strömhastigheterna i skiktet mellan 7 och 10 m vanligen var lägre än 40 cm/sek. Samtliga värden var lägre än 60 cm/sek. I tabell 4.1 anges medelhastigheter oavsett riktning för de ytliga mätningarna.

Tabell 4.1 Medelhastigheter i skiktet 7-10 m för olika stationer

Station	Djup m	Tidsperiod	Medelhastighet cm/sek
S1	7	790816-791024	12.9
S2	10	790820-791023	26.4
S3	8	790820-791023	11.9
S4	8	790814-791024	12.7
S5	9	790814-791024	10.2
S6	8	790813-791024	22.0

Den kumulativa hastighetsfördelningen för alla stationer med djup mellan 25 och 30 m visas i figur 4.3.



Figur 4.3 Kumulativ fördelning av strömhastigheter för strömmätningar på 25-30 m djup vid stationerna S1-S6, 1979.

Det framgår klart att strömhastigheterna är väsentlig lägre, men att det ändå förekommer hastigheter upp till ca 40 cm/sek. I tabell 4.2 anges medelhastigheterna för det djupare skiktet.

Tabell 4.2 Medelhastigheter i skiktet 25-30 m för olika stationer

Station	Djup m	Tidsperiod	Medelhastighet cm/sek
S1	28	790816-791024	5.8
S2	30	790820-791023	11.5
S3	28	790820-791023	7.4
S4	28	790814-791024	8.6
S5	29	790814-791024	3.9
S6	25	790813-791024	10.1

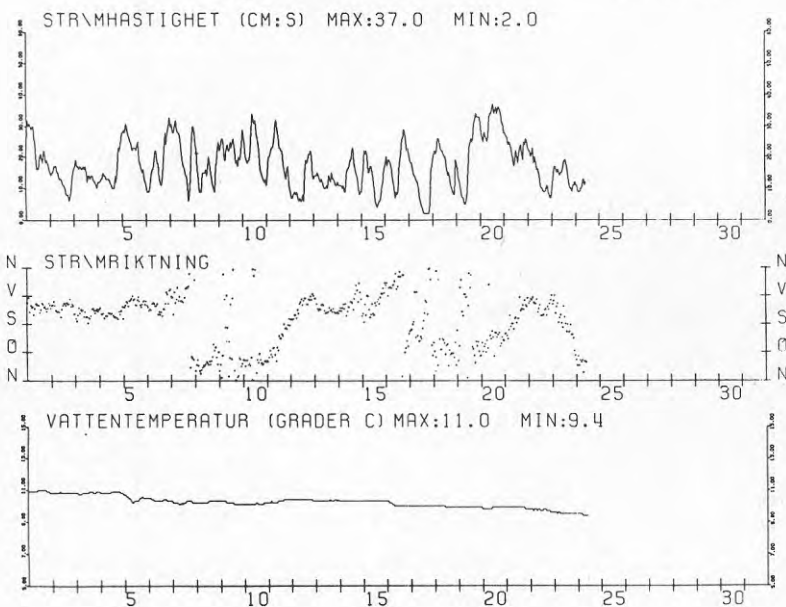
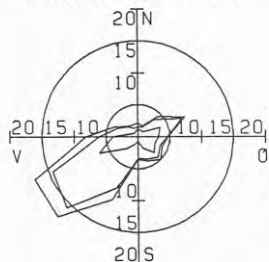
Det framgår att hastigheterna ligger i intervallet 5-10 cm/sek. För att illustrera hur strömmen varierar över en längre period har data från station S6 8 m under oktober 1979 valts ut (figur 4.4). Oktoberresultaten därför att de är de enda som kan liknas vid strömförhållanden under vintern. Stationens läge återfinns på kartan i figur 4.1 i Vätterns nordöstra del strax söder om Motalaviken.

SMHI OCEANOGRAFISKA OBSERVATIONER
VÄTTERN S6 OKTOBER 1979

DJUP 8 METER

STRÄMRS PROCENT AV TOT ANTL REG
V>0 CM:S, V>10 CM:S, V>20 CM:S

FREKVENSTABELL	
STRÄMRIKTNING	GRADER
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0
24	0
25	0
26	0
27	0
28	0
29	0
30	0
31	0
32	0
33	0
34	0
35	0
36	0
37	0
38	0
39	0
40	0
41	0
42	0
43	0
44	0
45	0
46	0
47	0
48	0
49	0
50	0
51	0
52	0
53	0
54	0
55	0
56	0
57	0
58	0
59	0
60	0
61	0
62	0
63	0
64	0
65	0
66	0
67	0
68	0
69	0
70	0
71	0
72	0
73	0
74	0
75	0
76	0
77	0
78	0
79	0
80	0
81	0
82	0
83	0
84	0
85	0
86	0
87	0
88	0
89	0
90	0
91	0
92	0
93	0
94	0
95	0
96	0
97	0
98	0
99	0
100	0



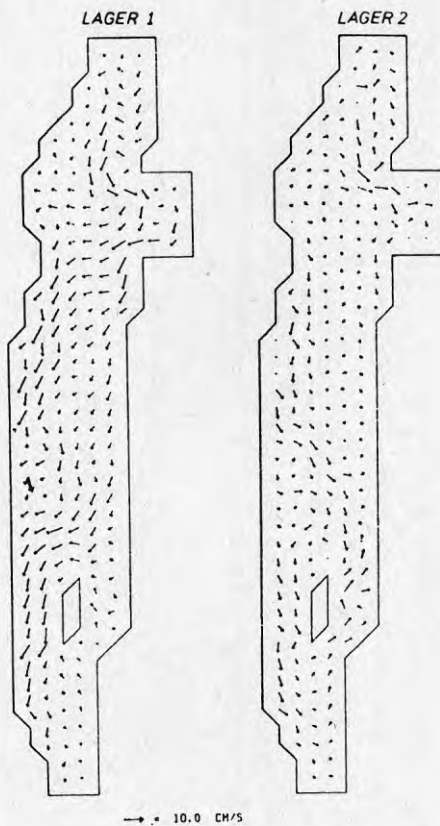
Figur 4.4 Exempel på strömresultat från station S6 i Vättern

Exemplet visar att strömmen varierar mycket med strömhastigheter mellan 2 och 37 cm/sek, medan riktningen är mer stabil riktad mot SV.

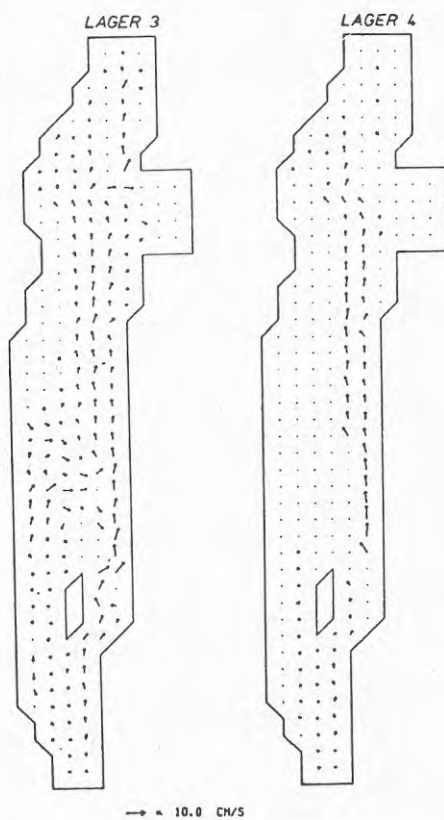
4.8 Beräknade strömmar i Vättern

SMHI har med hjälp av en hydrodynamisk modell beräknat strömmarna i Vättern under några korta perioder då vi utfört mätningar. De första resultaten var från 1977 och gav goda resultat (Funkquist, 1979). Av dessa visas här bara några exempel på producerade strömkartor (figurerna 4.5 och 4.6).

Observerad ström i station V (10 m) är markerad med en fet pil.
Observed current at Station V (10 m) is indicated by a heavy arrow.



Figur 4.5 Kartor över beräknad medelströmning för lager 1 och 2 i Vättern 10.8-19-8 1977. (Efter Funkquist, 1979)



Figur 4.6 Kartor över beräknad medelströmning för lager 3 och 4 i Vättern under tiden 10.8-19.8 1977. (Efter Funkquist, 1979)

Beräkningar för senare perioder har ännu inte publicerats.

5. TEKNISKA SYSTEM FÖR VÄRMEUTTAG I SJÖAR

5.1 Värmepumpen

Med hjälp av värmepumpar kan den värmeenergi som finns i vår omgivning vid låga och annars ointressanta temperaturer utnyttjas för uppvärmning av bostäder och lokaler. Värmepumpen upptar värme vid en låg temperatur och avger den vid en högre tillsammans med den högvärdiga drivenergi som fordras för att driva processen, fig 5.1. Den avgivna värmeenergin är betydligt större än den tillförda drivenergin. Användning av t.ex. eldrivna värmepumpar innebär därför effektivt utnyttjande av energi.

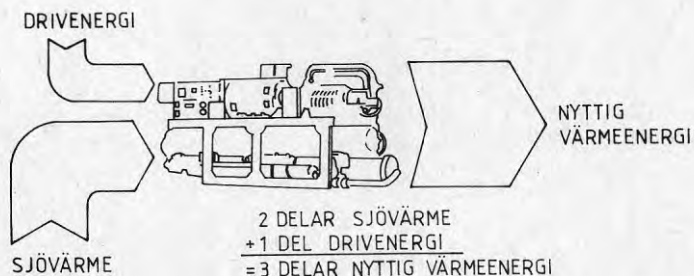
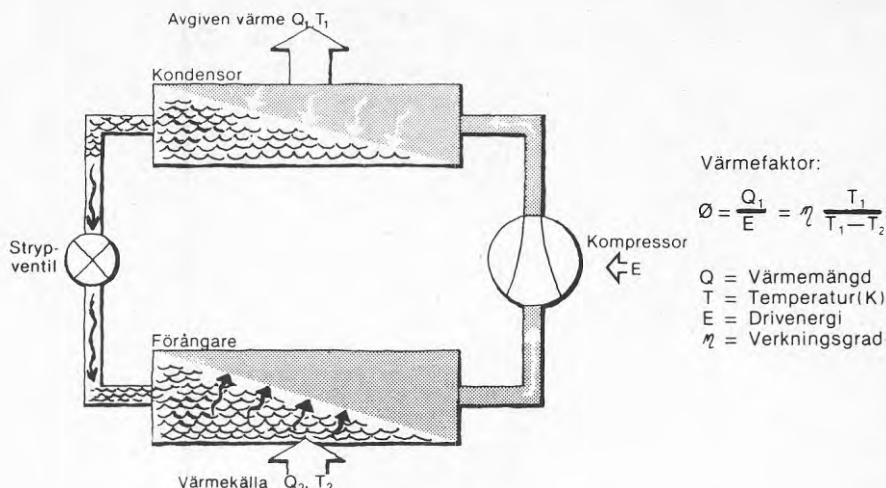


Fig. 5.1. Värmepumpens energiomsättning

Arbetsprincipen för en värmepump är densamma som för en kylanläggning.

Ett principschema för en kompressordriven värmepump visas i figur 5.2. Kompressorn har till uppgift att pumpa runt freon i värmepumpen. Värme avges vid hög temperatur genom att freongas med högt tryck kondenseras till vätska i kondensorn där värmeväxling sker till t.ex. ett fjärrvärmenät. Efter passage av en strypventil bringas freonvätskan att koka vid lågt tryck och temperatur i förångaren. Kokningen kräver energi som tas genom värmeväxling mot sjövattnet.



Figur 5.2. Principen för en kompressordriven värmepump

Värmepumpens effektivitet anges av den s.k. värmefaktorn, ϕ . Denna definieras som kvoten mellan avgiven värmeenergi och tillförd drivenergi. Vanliga värden på värmefaktorn ligger oftast i intervallet 2,5 till 3,0 men såväl högre som lägre värden kan förekomma.

Värmefaktorn försämras om skillnaden mellan den temperatur vid vilken värme avges respektive upptas ökar, enligt formeln i figur 5.2. Värmeavgivningen till uppvärmningsändamål bör därför ske vid så låg temperatur som är praktiskt möjligt och värmekällan bör ha högsta möjliga temperatur.

5.2 Teknik för värmeuttag

På grund av den låga temperaturen i sjövattnet vintertid (mindre än $+4^{\circ}\text{C}$) kan inte sjövattnet användas direkt för värmeväxling i en konventionell tubförångare. Flera olika speciella typer av värmeväxlingssystem har därför utvecklats för användning i sjöar, kustvatten etc. En kortfattad beskrivning av dessa ges i det följande.

Några erfarenheter av de olika systemen ges av Billfalk (1982). Juridiska aspekter finns behandlade av Svensson m.fl. (1980) och Brink och Tullberg (1982). Miljöaspekter och forskningsbehov för miljöfrågor behandlas i BFR-rapport T23:1981 och G 1983.

Öppna system med strilförångare

Sjövattnet pumpas här direkt upp till värmepumpens förångare. Denna är av en speciell konstruktion som kan arbeta även vid mycket låg inkommande vattentemperatur.

Förångaren dimensioneras vanligen för en inkommande vattentemperatur av $2-2,5^{\circ}\text{C}$. Den tål emellertid att arbeta även med viss ispåfrysning varför en succesivt lägre effekt avges vid lägre temperaturer.

Vattenintaget bör ske så djupt som möjligt under vintern för att få högsta möjliga temperatur på intagsvattnet. Under sommaren är däremot temperaturen högst vid ytan vilket kan motivera att ett separat sommarintag arrangeras. Genom den lilla temperaturdifferens som utnyttjas vid värmeväxlingen blir det erforderliga vattenflödet stort. För en anläggning med 1 MW avgiven värmeeffekt erfordras ett flöde av ca 100 l/s och vid 10 MW ett flöde av 1 m³/s.

De stora sjövärmepumpar som finns i drift bl.a. i Ludvika (10 MW), Lidingö (10 MW) och Torsång (750 kW) är av denna typ. Exempel på utformning av en sådan anläggning visas i fig. 5.3.

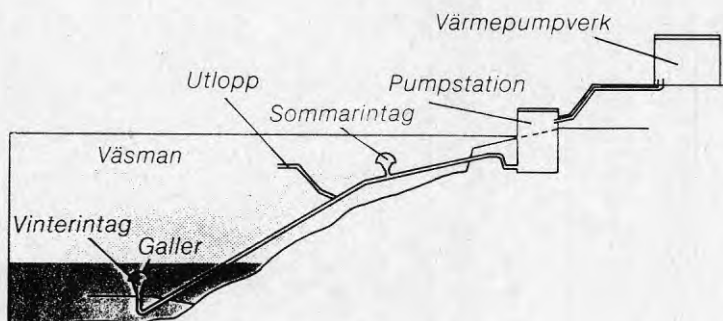


Fig. 5.3 Exempel på sjövärmesystem av typ öppet system.

Slutet system med plattvärmväxlare eller motsvarande

Värmeväxlingen sker här i två steg. Först pumpas sjövattnet genom en plattvärmväxlare eller annan typ av kompakt värmväxlare där värme tas upp av en vätska med lägre fryspunkt än vattnet (s.k. brine). Brinevätskan pumpas sedan till värmepumpen och avger värme i en konventionell förångare varefter den återcirkuleras till värmväxlaren.

Värmväxlaren kan dimensioneras för mycket låga vattentemperaturer, kanske nedåt 1°C. Erforderligt vattenflöde blir då i motsvarande grad större varför värmväxlaren bör placeras nära strandkanten eller direkt i vattnet.

Konstruktioner av denna typ är ännu ganska ovanliga med de synes erbjuda ett intressant alternativ till de öppna systemen.

Slutet system med slangvärmväxlare

Värmväxlaren består i detta fall av ett slangsystem som utlägges på sjöbotten. Genom slangsystemet cirkulerar en brinevätska som tar upp värme från vattnet och bottensedimenten och avger det till värmepumpens förångare, fig. 5.4. Systemet kan sägas vara en vidareutveckling av ytjordvärmesystemet. Närmare beskrivning av förutsättningar och prestanda ges i Svensson m.fl. (1980) och Sörman och Svensson (1982).

Slangsystemets dimensionering beror av vattentemperaturen, strömmarna vid botten och slangens nedsjunkning i bottenmaterialet. Som riktvärde kan anges en upptagen effekt av 20 W per meter slang om vattentemperaturen överstiger ca $0,5^{\circ}\text{C}$. En viss påfrysning sker på slangerna vid denna temperatur och ökar snabbt vid lägre temperatur. Strömmar i vattnet förbättrar värmeupptagningen och minskar ispåfrysningen avsevärt.

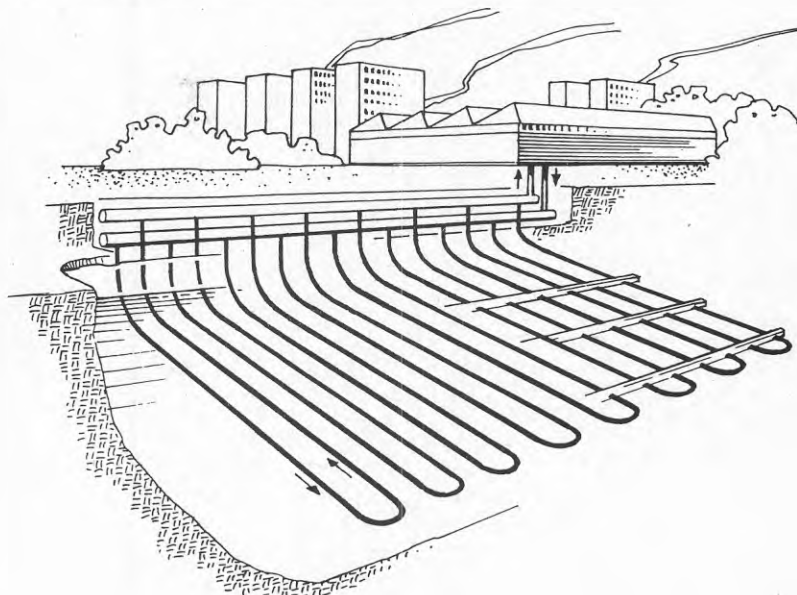


Fig. 5.4

Värmeutvinning ur sjövattnen och botten sediment med bottenförlagda slangar. Slangarna förankras med betongvikter el. dyl.

Ett stort antal sjövärmesystem med bottenförlagda slangar har byggts, i huvudsak för enskilda villor. Större system, upp till några 100-tal kW, har också utförts i några fall. En väsentlig faktor för systemets tillämpning i Vättern är påverkan på slangsystemet av vågor, ström och is. En beräkning av vågkrafter på bottenförlagda ledningar redovisas i bilaga 2. Av denna kan man sluta sig till att det sannolikt inte är rimligt att förlägga ledningssystemet på mindre än 10-15 m djup med hänsyn till förankringsbehovet.

Öppna system med isbildning

Förångaren utformas här som en ismaskin så att huvuddelen av värmen upptas genom frysning av vatten. Sjövattnet pumpas upp till förångaren som utformas på sådant sätt att vattnet får frysa till is varvid stora värmemängder avges. Efter avfrostning kan den bildade isen malas ned i småbitar och pumpas som en is-vattenblandning tillbaka till sjön.

Fördelen med detta system är att nollgradigt vatten kan användas och att vattenbehovet blir betydligt mindre än för andra öppna system. En provanläggning finns utförd vid Vattenfalls laboratorium intill Dalälven. Tekniken har ännu inte visats vara ekonomiskt konkurrenskraftig men har intressanta utvecklingsmöjligheter.

6. BEDÖMNING AV FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR OLIKA ORTER RUNT VÄTTERN

Den värmemängd som finns tillgänglig i Vättern är tillräcklig för att tillgodose uppvärmningsbehovet för hela den befolkning som bor runt sjön. En temperatursänkning av endast $1/100^{\circ}\text{C}$ svarar mot en energimängd av 860 GWh, vilket är jämförbart med hela värmelasten i Jönköpings planerade fjärrvärmenät.

Vättern som värmekälla blir således inte begränsande för utbyggnaden av värmepumpsystem. Avgörande blir i stället tekniska och ekonomiska faktorer. I detta kapitel skall en översiktlig värdering av förutsättningarna för sjövärme i några tätorter göras. Bedömningen baseras, förutom på tidigare redovisat material, på intervjuer med ansvariga för energifrågor och vatten- och avloppsanläggningar, samt på iakttagelser vid besök på platsen.

6.1 Jönköping - Husqvarna

Jönköpings kommun har beslutat om och startat utbyggnad av fjärrvärmenät. Det maximala framtida effektbehovet uppgår till 300-400 MW, vilket även inkluderar fjärrvärme i Husqvarna. Den påbörjade etappen har ett effektbehov av ca 200 MW. Minimibelastningen under sommaren uppges till 10-12 MW.

Fjärrvärmenätet har en gemensam returledning som passerar området mellan Munksjön och Vättern, se fig. 6.1. En värmepumpsanläggning som ansluter här kan mata in största möjliga effekt på nätet och har litet avstånd till Vättern. Övriga värmeproduktionsanläggningar planeras att förläggas väster om Munksjön.

Bottenprofilen i Jönköpingstrakten, liksom även i Husqvarnatrakten, är relativt flack. Vid centrala delen uppnås ett vattendjup av 10 m på ca 600 m avstånd från stranden och 20 m på 1000 m avstånd, se fig. 6.2. Området är också mycket utsatt för vågor och strömmar, varför bottenförlagda slangsystem som värmeväxlare knappast kan komma i fråga. Ett system där vatten pumpas genom en intagsledning till värmepumpens förångare eller en separat värmeväxlare är mera lämplig.

Intagsdjupet, och därmed intagsledningen längd, bör optimeras tillsammans med värmeväxlare. Det produktionsbortfall som beror av för låg vattentemperatur minskar med ett ökat intagsdjup, men beror också på den dimensionerande temperaturen för värmeväxlaren.

Som exempel kan tas en värmeväxlare som är dimensionerad för en lägsta inkommande temperatur av 2°C och en utgående temperatur av $0,5^{\circ}\text{C}$. Produktionsbortfallet blir då ca 5-8 % om intaget sker på ca 25 m djup och värmepumpen är avsedd att gå med full effekt under hela året. Detta gäller som genomsnitt. Vissa år kan bortfallet bli betydligt större. Om intaget sker mera ytligt, på mindre än 10 m djup, torde motsvarande produktionsbortfall bli omkring 15 %

Efter avkylning släpps vattnet ut ytligt till Vättern eller ev. i kanalen mellan Munksjön och Vättern. För att utnyttja det varma ytvattnet under sommaren kan ett separat sommarintag anordnas eller också kan flödesriktningen i intags- och utloppsledning reverseras.

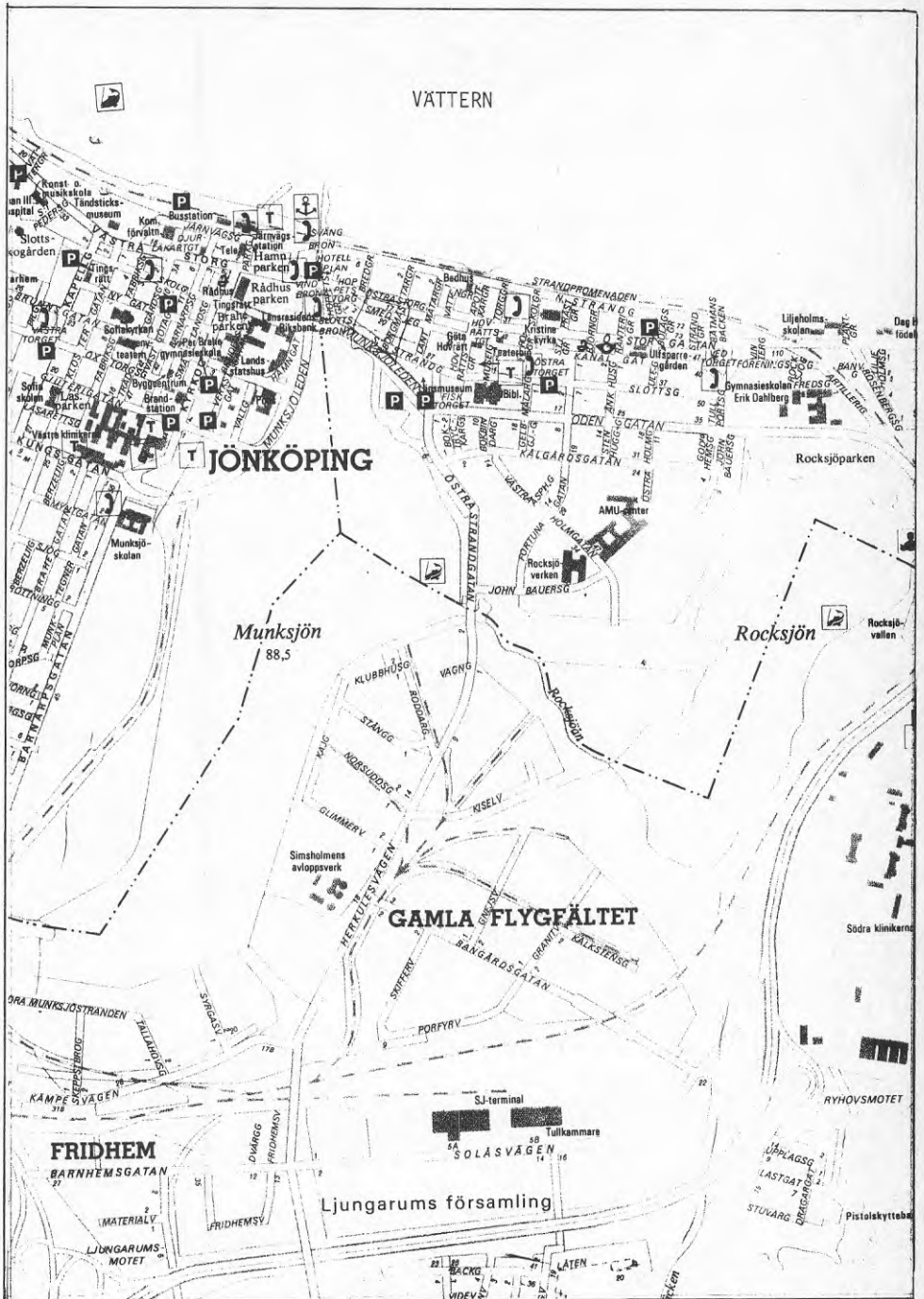


Fig. 6.1 Karta över Jönköping

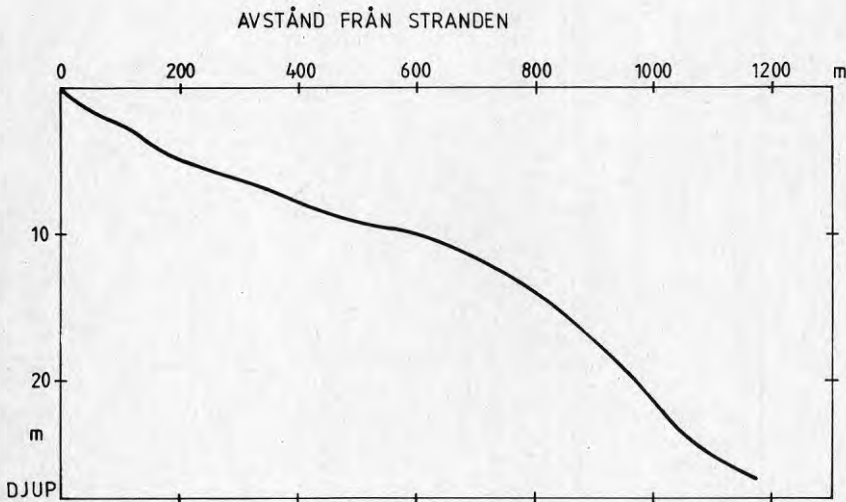


Fig. 6.2. Bottenprofil i Vättern från centrala Jönköping och norrut

6.2 Ödeshög

Fjärrvärme är f.n. inte aktuell i Ödeshög p.g.a. att bebyggelsen är alltför gles. Uppvärmningen sker i huvudsak med små värme pannor. Några värmepumpar med grundvatten som värmekälla har installerats. Enstaka större värmeförbrukare utgöres av centrumbebyggelsen och ett sjukhem. Dessa skulle vara lämpade för värmepumpsuppvärmning om lämplig värmekälla kan ordnas.

Vättern ligger på ca 2 km avstånd från Ödeshög. Stranden stupar brant ned i vattnet till ca 40 m djup. Förutsättningarna för att anordna ett djupintag av vatten är därför mycket goda. Avståndet till bebyggelsen är emellertid för stort för att det skall vara ekonomiskt motiverat att bygga en separat vattenledning för värmepumpsbruk. Om samma ledning användes för vattenförsörjningen blir kostnaderna mera rimliga. Den befintliga vattenledningen har dock inte någon nämnvärd överkapacitet som kan utnyttjas.

6.3 Vadstena

Det totala värmeeffektbehovet i Vadstena uppgår till ca 10 MW. Oljeförbrukningen är 9000 m³/år varav landstingets värdinrättningar svarar för 2000 m³/år. Inom kommunen pågår diskussioner om en begränsad fjärrvärmeutbyggnad, vilken i en första etapp skulle betjäna landstinget samt kommunala byggnader, flerbostadshus och några andra större abonnenter i centrala delarna av kommunen. Vid en större utbyggnad kan ytterligare bostadsområden anslutas och ledningsnätet få en sådan sträckning att avloppsvattenvärme från kommunens reningsverk kan utnyttjas för en del av värmebehovet.

Vattendjupet i Vättern utanför Vadstena är litet. Vid nuvarande råvattenintag, som är beläget 900 m från stranden 2 km norr om Birgittas sjukhem, är vattendjupet endast 5,5 m. Det ringa intagsdjupet har lett till problem i form av issörpa i ledningen, vilket uppträder vid kallt och blåsigt väder när sjön inte är isbelagd.

Förutsättningarna för värmeuttag i Vättern utanför Vadstena är relativt ogynnsamma. Detta beror främst på det ringa vattendjupet som ger en låg temperatur vintertid och kraftig vågpåverkan. Värmeupptagande slangsystem kan sannolikt inte placeras på botten p.g.a. vågpåverkan.

Ett alternativ kan dock vara att plöja eller spola ned ett slangsystem i botten och ta ut värme under vintern främst genom frysning kring slangarna. Ett sådant system kan förläggas nära stranden förutsatt att botten är lämplig.

Ett annat alternativ kan vara att utnyttja ett gemensamt vattenintag för konsumtionsvatten och vatten till värmeväxling. Den låga temperaturen under vintern leder då till ett produktionsbortfall som kan uppskattas till i genomsnitt 10-20 % om värmeväxlaren dimensioneras för ca 2°C in och 0,5°C ut.

6.4 Motala

Fjärrvärmeutbyggnad i Motala diskuteras, men har ännu inte resulterat i konkreta planer. En trolig värmeeffekt i ett sådant nät är ca 60 MW, varav värmepumpar maximalt bör kunna svara för ca 20 MW. Parallellt med kommunens planering pågår förundersökningar om värmepumpsinstallationer i två bostadsområden i Motala V med sammanlagt ca 1500 lägenheter och ett maximalt effektbehov av 12 MW. En rimlig värmepumpseffekt är här i storleksordningen 4-5 MW och Vättern är också här aktuell som värmekälla.

Förutsättningarna för värmeuttag vid Motala är likartade de i Vadstena. Det är dock möjligt att nå ut till djup över 10 m på rimligt avstånd från stranden, vilket medför något högre temperatur och mindre vågpåverkan. Värmeuttag bör därför kunna utföras med slangsystem på botten såväl som med värmeväxare på land. Existerande intagsledning har en överkapacitet som motsvarar en avgiven värmeeffekt av 2-3 MW vid en temperatursänkning av 1,5°C. Produktionsbortfallet blir, med samma förutsättningar som tidigare, 10-15 %.

En annan möjlighet kan vara att utnyttja det strömmande vattnet vid inloppet till Motala ström. Kompakta värmeväxlare i form av slangpaket eller motsvarande bör kunna placeras i det strömmande vattnet och dimensioneras för temperaturer på endast några få tiondels grader.

7. REFERENSER

- BFR G2:1983. Miljökonsekvenser av värmeutvinning och värmelagring i mark och vatten. Förslag till forskningsprogram.
- BFR T23:1981. Miljökonsekvenser vid värmeutvinning och värmelagring i mark och vatten. Utredning av Statens naturvårdsverk på uppdrag av Byggnadsrådet.
- Billfalk, L (red.) (1982). Sjövärmesystem. BFR-seminarium maj 1982.
- Brink, R och Tullberg, H (1972). Att utvinna och lagra värme i mark och vatten. Juridiska aspekter. BFR-rapport T44:1982.
- Dietrich, G (1965). General Oceanography. Wiley & Son, N.Y. , 1965
- Funkquist, L (1979). En inledande studie av Vätterns dynamik. SMHI Rapport nr RH016.
- Hedar, P A (1960). Våghöjdsräkningar. Väg- och Vattenbyggaren nr 5, 1960
- Hedar, P A och Kjellqvist, M (1960). Strandskoning vid vägbank utmed Vättern. Väg- och Vattenbyggaren nr 5, 1960.
- Håkansson, L och Ahl, T (1976). Vättern - recenta sediment och sedimentkemi. Statens naturvårdsverk SNV PM 740, 1976.
- Kommitten för Vätterns vattenvård: Vättern Vatten Vård. Vattenvårdsplan för Vättern. Motala 1970.
- Liljequist, G (1941). Winter temperature and ice conditions of Lake Vetter with special regard to the winter 1939/40. Statens meteorologisk-hydrografiska anstalt, meddelanden serien uppsatser nr 35, 1941
- Norrman, J O (1964). Lake Vättern. Investigations on shore and bottom morphology. Geografiska annaler, Vol. XLVI, Nr 1-2, 1964.
- Svensson, T, Degerman, E, Jansson, B och Westerlund, S (1980). Energiutvinning ur sjö- och havssediment. En förstudie. BFR-rapport R76:1980.
- Svensson, T och Sörman, L-O (1982). Värmeupptagning med bottenförlagda kylslangar i stillastående vatten. Laboratorieförsök. Inst. för vattenbyggnad, CTH, Rapportserie B:36, 1982. BFR-projekt

Bilaga 1

BERÄKNING AV TEMPERATURÄNDRING I INTAGSLEDNING

Vattentemperaturen i en intagsledning kommer att ändras något på vägen från intagspunkten till vattenverket eller pumpstationen där mätningar görs. I denna bilaga skall den maximala temperaturförändringen beräknas för de olika vattenintagen i Vättern.

Under vintern avkyles vattnet i den del av ledningen som ligger i sjön, eftersom sjövattnets temperatur då minskar med minskat djup. Under vår och sommar råder motsatt förhållande genom att ytskiktet då är varmare än vattnet på större djup. Under avkylningsperioden på hösten sker varken uppvärmning eller avkylning eftersom sjövattnets temperaturen är konstant till stort djup.

Från stranden och in till vattenverket eller pumpstationen är ledningen nedgrävd till frostfritt djup i marken. Temperaturen i marken på 1,5 m djup torde inte avvika nämnvärt från vattentemperaturen i Vättern. I båda fallen får man en likartad fördröjning av temperaturvägen p.g.a. den stora värmemagasineringsförmågan i resp. medium. En jämförelse mellan intagstemperaturen på 23 m djup i Ödeshög och simulerad marktemperatur i lerjord på 1,6 m djup i mellansverige visar en maximal temperaturskillnad av ca 2°C. Som extremfall kan vi anta att marktemperaturen under vintern är 3°C och intagstemperaturen 0,5°C, d.v.s. en differens av 2,5°C. Värmeledningen från marken bidrar då till att höja temperaturen på vattnet i intagsledningen.

För beräkning av temperaturförändringen i ledningen under vintern görs följande antaganden:

- Flödet, Q , är konstant
- Sjöledning, med längd L_s och diameter D_s , ligger fritt ovanpå sjöbotten.
- Strömhastigheten är 10 cm/s.
- Sjövattnets temperaturen är 0°C längs halva sjöledningen och lika med intagstemperaturen, T_{in} den andra halvan.
- Marktemperaturen $T_m = +3°C$ på markledningens nivå.
- Markens värmeledningsförmåga $\lambda_m = 2 \text{ W/m} \cdot °\text{C}$.
- Temperaturskillnaden mellan ledningens ändar är liten jämfört med skillnaden mot omgivande vatten resp. mark.

Det totala värmeflödet till ledningen, V , kan tecknas enligt följande:

$$V = - \frac{L_s}{2} \pi D_s K_s T_{in} + L_m \pi D_m K_m (T_m - T_{in}) \quad ..(1)$$

där K_s och K_m är värmeegenomgångstal för sjö- resp. markledningen.

Temperaturförändringen längs ledningen blir:

..(2)

$$\Delta T = V/Q\varrho c$$

För sjöledningen bestäms K_s -värdet av rörväggens värmemotstånd och det yttre värmeövergångstalet α . Det senare har beräknats till $407 \text{ W/m}^2\text{C}$ för en ledning med diametern $\varnothing 800$ och $477 \text{ W/m}^2\text{C}$ för $\varnothing 400$. Det resulterande K_s -värdet beräknas enligt följande ekv.:

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1}{\alpha} + \frac{d_{\text{vägg}}}{\lambda_{\text{vägg}}} \quad \text{..(3)}$$

där $d_{\text{vägg}}$ är rörväggens tjocklek

$\lambda_{\text{vägg}}$ är rörväggens värmeledningstal.

Det inre värmeövergångstalet försummas och ledningen antas vara fritt kringfluten med vatten. Den beräknade värmeöverföringen blir därför en överskattning av det verkliga värdet.

För markledningen är värmeflödet i första hand beroende av värmeledning i omgivande mark. Värmeflödet avtar med tiden genom att marktemperaturen närmar sig ledningstemperaturen. Om marken antas ha oändlig utsträckning kan förloppet beräknas analytiskt (se Svensson et al 1980). Med aktuella värden insatta erhålles efter 40 dygn ett värmeövergångstal av ca $5 \text{ W/m}^2\text{C}$. Om även väggens värmemotstånd medräknas blir, för ett PEH-rör $\varnothing 400$, värdet på K_m ca $4 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Den totala värmeupptagningen för några olika intagsledningar framgår av följande tabell:

	Häggeberg	Ödeshög	Motala
Intagsdjup (m)	26	24	10,5
Diameter (mm)	800	2 x 400	800
Material	Betong	Järn	PEH
Medelflöde (l/s)	300	23	115
K_s	11	500	9
L_s (m)	510	50	300
L_m (m)	2000	25	50
V för $T_{in}=0,5^{\circ}\text{C}$	46740	-7500	440
" $=2^{\circ}\text{C}$	6000	-31300	-6280
ΔT för $T_{in}=0,5^{\circ}\text{C}$	+0,037	-0,08	-0,001
" $=2^{\circ}\text{C}$	+0,005	-0,32	-0,013

Beräkningen visar att den temperaturförändring som kan uppstå mellan intaget och mätpunkten är mycket liten. Under vintern understiger felet sannolikt $0,1^{\circ}\text{C}$. Ett något större fel kan uppträda på sommaren p.g.a. den starkare temperaturskiktning som då råder i sjön, men även detta fel torde vara försumbart.

Bilaga 2

VÄGPÅVERKAN PÅ LEDNINGAR

Vid utläggning av ledningar i Vättern måste hänsyn tas till de krafter som uppkommer på grund av vågor och is. Speciellt för de klena ledningar som vanligen används som värmeväxlare i indirekta system kan vågpåverkan bli ett stort problem. Ledningarna måste förankras för att klara uppkommande krafter, vilket kan öka kostnaden för systemet betydligt.

Även grövre ledningar måste dimensioneras och utformas med hänsyn till yttre påverkan. Det finns exempel på att grova intagsledningar har havererat på grund av yttre krafter. Intagsledningen till vattenverket i Häggeberg (Jönköping) t.ex., vilken är av betong, bröts av vid ett tillfälle p.g.a. att ström och vågor eroderat botten under ledningen.

Syftet med detta kapitel är att redovisa beräknade och uppmätta vågor och strömmar på olika platser i Vättern. Utgående från dessa ges exempel på hur stora krafter som kan uppträda på bottenförlagda ledningar. För dimensionering och utformning i konkreta fall krävs dock kompletterande utredningar för den aktuella platsen.

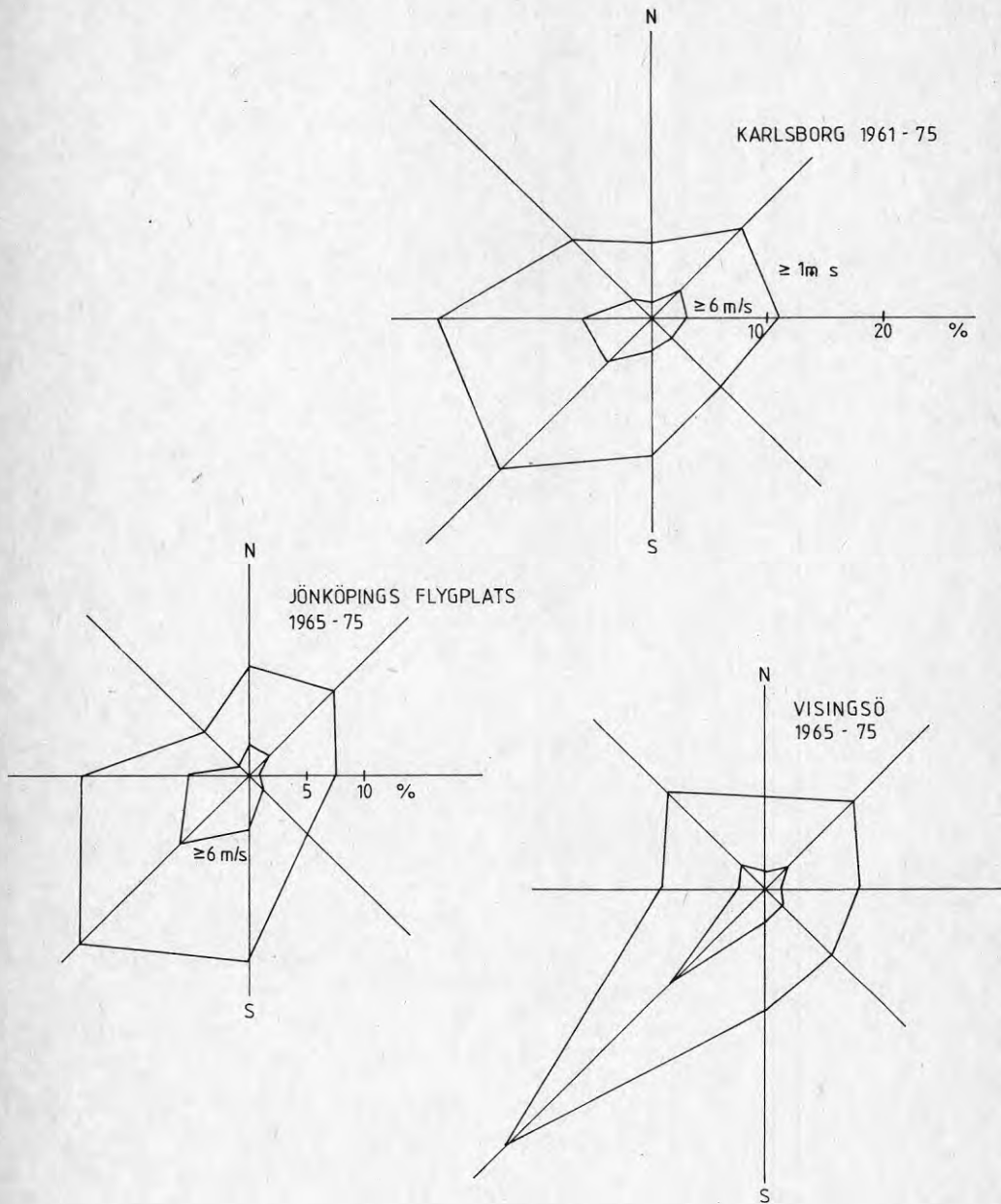
Vindförhållanden

Avgörande för våghöjden på en plats är dels vindstyrkan och dels hur lång sträcka som vinden verkat på vattnet fram till den aktuella platsen, den s.k. stryklängden. Förekomsten av stark vind i den vindriktning som ger maximal stryklängd ger alltså den dimensionerande situation som konstruktionen måste dimensioneras för. Sannolikheten minskar med ökande vindstyrka, och man kan därför tala om ettårsstorm, tvåårsstorm, tioårsstorm etc. för den högsta vindhastighet som uppträder i genomsnitt en gång per år, två gånger per år, etc.

Vid Vättern uppträder de högsta vindstyrkorna i regel under månaderna okt - mars och i huvudsak riktade i sjöns längsriktning och i sektorn SV-V. Man kan därför förvänta sig en kraftigare vågpåverkan på den östra än på den västra sidan.

Vindarna vid Vättern är till övervägande delen riktade i sjöns längdriktning vilket framgår av vindrosorna i figur 1. Även inom sektorn W-SW är vindfrekvensen hög, men den kraftiga dominansen av dessa vindar i Karlsborg anses delvis bero på lokalt topografiskt inflytande. Som helhet kan man dock förvänta sig att vågpåverkan är kraftigare på den östra sidan av Vättern än på den västra.

Förekomsten av extrema vindhastigheter som ger upphov till dimensionerande vågpåverkan har diskuterats av Hedar och Kjellqvist (1960) och Norrman (1964). De starkaste vindarna uppträder företrädesvis under vintern. Vindmätningarna på olika stationer kan utnyttjas för att beräkna frekvens och återkomsttid för vindar i olika vindsektorer. En sådan utvärdering av vinden i Jönköping i sektorn VSV-ONO visas i fig. 2



Figur 1. Vindrosor vid Vättern

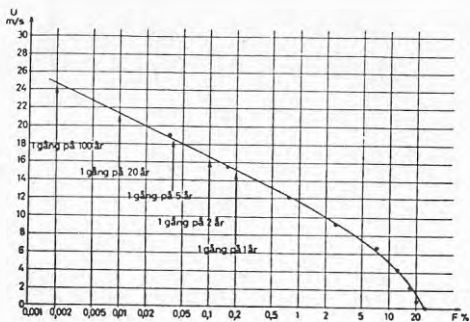


Fig. 2 Frekvens av vindar från VSV-ONO i Jönköping under dec.-mars. (Från Hedar och Kjellqvist, 1960)

Vid beräkning av vindstyrka och vindfrekvens över sjöytan utgående från landbaserade mätningar måste hänsyn tas till att vindhastigheten förändras vid övergång från land till vatten och även varierar över sjöytan. En sådan detaljerad bearbetning ligger utanför denna utredning. För fortsatt beräkning av våghöjder användes vindhastigheten 20 m/s, som torde uppträda med en återkomsttid av mellan 2 och 10 år inom de flesta aktuella vindsektorerna.

Beräkning av vågparametrar

För beräkning av våghöjd, våglängd etc. användes den s.k. Sverdrup-Munk-Bretschneider-metoden, vilken främst är avsedd att användas för stationära situationer, då vindens hastighet och riktning ej varierar signifikant varken i tid eller rum. Vi antar också att vindens varaktighet är sådan att fullt utbildad sjö hinner utbildas. Vågmätningar som redovisats av Hedar (1960) visar att denna vågprognosmetod ger en god överensstämmelse med verkliga värden.

Den effektiva stryklängden i den riktning som bedöms ge de största vågorna redovisas för några platser i Tabell 1.

Tabell 1. Riktning och effektiv stryklängd för de vindar som bedöms ge största vågorna vid några orter.

Ort	Riktning	Stryklängd
Jönköping	NNO	17,6 km
Vadstena	NNV	18,1
Motala	VSV	21,8
Karlsborg	SSO	28,5

Med utgångspunkt från vindhastighet och effektiv stryklängd beräknas signifikant våghöjd, H_s , och signifikant vågperiod, T_s , med hjälp av empiriskt framtagna diagram. Dessa värden ges i tabell 2, tillsammans med våglängden L_s för den signifikanta vågen när denna uppträder på djupt vatten. Den signifikanta vågen definieras som medelvärdet av de $N/3$ högsta vågorna i en serie om N vågor.

Tabell. 2. Beräknade vågparametrar för en vindhastighet av 20 m/s.

Ort	H_s	T_s	L_s
Jönköping	1,8 m	5,1 s	41 m
Vadstena	1,8 m	5,1 s	41 m
Motala	2,0 m	5,3 s	44 m
Karlsborg	2,2 m	5,8 s	52 m

Man bör observera att den signifikanta vågen inte är ett mått på den allra största våg som kan uppträda i ett givet vägfält. Förekomsten av större vågor kan dock uppskattas utgående från den dimensionerande vågen. Den våg för vilken ledningssystemet dimensioneras måste väljas utgående från systemets tålighet mot överlast, konsekvenser av haverier, kostnader för reparationer m.m. Sådana överväganden bör göras i varje enskilt fall. För att fortsättningsvis exemplifiera påverkan och förankringsbehov utgår vi från en dimensionerande våg med följande karakteristika:

Våghöjd $H_s = 2,0$ m
 Vågperiod $T_s = 5$ sek
 Våglängd $L_s = 40$ m (djupt vatten)

Vågor på grunt vatten

Om vattendjupet är större än halva våglängden påverkas vågen ej av botten och ger ej upphov till nämnvärda bottenströmmar. I vårt fall sträcker sig vågpåverkan ned till ett djup av ca 20 m. Detta stämmer väl med iakttagelsen av bottenmaterialet som är fritt från finmaterial på mindre djup än ca 20 m.

När en våg kommer in mot en strand med uppgrundande vattendjup avtar dess längd medan våghöjden ökar. Detta åskådliggörs i figur 3. för fallet att vågen infaller vinkelrät mot en rak strand och där djupkonturerna är parallella med stranden.

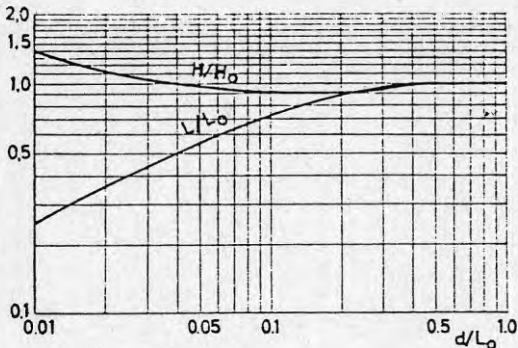


Fig. 3. Relativ våghöjd H/H_0 och våglängden L/L_0 som funktion av det relativa vattendjupet d/H_0 . H_0 och L_0 avser djupvatten-vågen.

Om strand- och bottenkonturerna är krökta förändras vågfrontens riktning så att man får större vågor vid uddar och mindre i vikar. Denna s.k. refraktion måste utvärderas separat för aktuella lägen. I vissa fall kan också reflexion och resonansfenomen ha stor betydelse. Närmast stranden, där de infallande vågorna bryter, är påkänningarna störst och ledningen måste ofta skyddas genom sprängstenstäckning el.dyl.

Krafter på bottenförlagda ledningar

Rörledningar på botten i ett vågpåverkat område påverkas av horisontella och vertikala släpkrafter och tröghetskrafter.

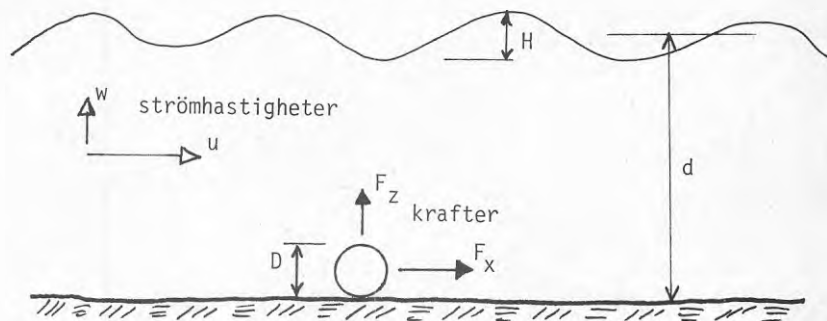


Fig. 4. Definitionsskiss för krafter på bottenförlagd rörledning.

Förutom vågkrafterna tillkommer släpkrafter p.g.a. den stationära strömmen samt gravitationskrafter p.g.a. ledningens egen massa. De senare kan bli uppåtriktade om ledningen är luftfylld eller omfrusen med is.

Vågkrafterna kan beräknas approximativt med följande uttryck:

$$F_x = C_{DX} \cdot \rho D \frac{1}{2} u |u| + C_{MX} \cdot \rho \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$F_z = C_{MZ} \cdot \rho \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\partial w}{\partial t} + C_L \cdot \rho D \cdot \frac{1}{2} u^2 \quad \dots(1)$$

där C_{DX} , C_{MX} , C_M och C_L är experimentellt bestämda koefficienter och ρ är vattnets densitet (1000 kg/m^3).

De olika strömhastighets- och accelerationstermerna ges av följande formler:

$$u = -\frac{H}{2} \cdot \frac{gT}{L} \cdot \frac{\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cdot \cosh\left(\frac{\pi D}{L}\right) \quad \dots(2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \cdot \frac{2g\pi}{L} \cdot \frac{\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cdot \cosh\left(\frac{\pi D}{L}\right) \quad \dots(3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{H}{2} \cdot \frac{2g\pi}{L} \cdot \frac{\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \cdot \sinh\left(\frac{\pi D}{L}\right) \quad \dots(4)$$

För de klena ledningar som här är aktuella kan tröghetstermerna försummas. Den maximala kraften i horisontell resp. vertikal led kan då skrivas:

$$F_{X \max} = C_{DX} \cdot \rho \cdot D \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{Hgt}{2L} \right)^2 \frac{1}{\cosh^2 \left(\frac{2\pi d}{L} \right)} \quad ..(5)$$

$$F_{Z \max} = C_L \rho \cdot D \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{Hgt}{2L} \right)^2 \frac{1}{\cosh^2 \left(\frac{2\pi d}{L} \right)}$$

Storleken på koefficienterna C_{DX} och C_L är relativt osäker och olika värden kan återfinnas i litteraturen. För denna beräkning väljes följande värden:

$$C_{DX} = 2$$

$$C_L = 4$$

Ett lägre värde på C_{DX} brukar ibland rekommenderas, men eftersom F_X har mindre betydelse för dimensioneringen väljes det högre värdet. Lyftkraften, som uttrycks genom C_L , gäller endast för det fall att röret har god anliggning mot botten. Om det finns en spalt mellan röret och botten försvinner lyftkraften och kan t.o.m. bli negativ, d.v.s. röret pressas mot botten. Det kan alltså finnas en risk att röret ömsom lyfts och trycks mot botten om det inte är tillfredsställande förankrat.

Beräknade krafter för rörledningar med diameter 5, 20 resp. 50 cm ges i tabell 3, som funktion av vattendjupet.

Tabell 3. Beräknade vågkrafter (N/m) på bottenförlagda rörledningar som funktion av vattendjupet.

d (m)	u_{\max} (m/s)	D = 0,05 m		D = 0,20 m		D = 0,50 m	
		F_x	F_z	F_x	F_z	F_x	F_z
20	0,11	0,6	1,2	2,2	4,4	5,6	11,2
15	0,23	2,7	5,4	10,6	21,2	26,5	53,0
10	0,41	8,6	17,2	34,5	69,0	86,3	172,6
8	0,57	16,4	32,8	65,4	130,8	163,6	327,2
6	0,78	30,1	60,2	120	240	301	602
4	1,10	60,7	121,4	243	486	607	1214
3	1,36	92,7	185,4	371	742	927	1854
2	1,91	182,3	364,6	729	1458	1823	3646
1	3,13	489,2	978,4	1957	3914	4892	9782

På större djup än 15 -20 m är sannolikt den ordinära strömmen lika stark eller starkare än de våginducerade strömmarna. Hårtill kommer lyftkraft p.g.a. is kring ledningen eller luft. En isdiameter av 20 cm t.ex. ger en lyftkraft av ca 30 N/m. Innesluten luft i en ledning med innerdiameter 40 mm ger en lyftkraft av ca 12 N/m.

Vågor och strömmar ger således en avsevärd påverkan på bottenförlagda ledningar. Med hänsyn till detta är det sannolikt inte rimligt att förlägga värmeupptagande slangsystem på mindre än 10-15 m djup. Tillöppsledningar som passerar grundare partier bör läggas längs med den dominerande vågriktningen för att minimera påverkan.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
821098-3 från Statens råd för byggnadsforskning
till Jönköpings kommun.**

A

R115: 1983

ISBN 91-540-4008-6

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700815

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

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

Cirka pris: 25 kr exkl moms