



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.



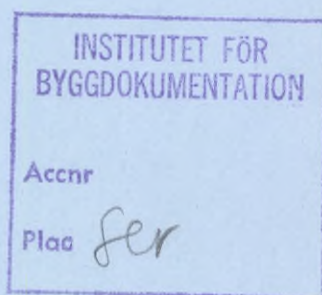
Rapport

R9:1987

# Värme i rinnande vatten

Potential och uttagskonsekvenser  
Förstudie

Leif Nyberg  
Gun Zachrisson



R  
Alt

Byggeforskningsrådet

R9:1987

VÄRME I RINNANDE VATTEN

Potential och uttagskonsekvenser  
Förstudie

Leif Nyberg  
Gun Zachrisson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840139-4  
från Statens råd för byggnadsforskning till SMHI,  
Norrköping.

## REFERAT

Värmetransporterna i våra vattendrag är tidvis betydande och kan sommartid för en större älv motsvara 50 000 MW (relativt 0°C). Vintertid ligger vattentemperaturen i många älvar och åar under längre eller kortare perioder nära 0°C och värmetransporterna blir då flera storleksordningar mindre. I denna förstudie har de dagliga värmetransporterna beräknats för sju älvstationer med tillgängliga vattenförings- och temperaturmätdata. Vinterperioden har ägnats särskild uppmärksamhet. Värmetransporterna var vid ett par stationer endast under någon vecka per vinter mindre än 10 MW. Vid utloppet av en stor regleringsdamm (Trängslet) var värmetransporten vintertid aldrig mindre än 100 MW.

Hur ett värmeuttag i en älv eller en å inverkar på vattentemperatur och isförhållanden nedanför uttagsområdet kan studeras med hjälp av numeriska modeller. Den modell som testats i förstudien bygger på det etablerade modellsystemet PHOENICS. Modellen kan lätt anpassas till olika förutsättningar: öppet eller slutet värmepumpsystem, isbildning på kollektorerna, utsläpp av krossad is etc. De första resultaten visar att beräkningsrutinerna fungerar tillfredsställande. Modellen bör därför kunna utgöra ett värdefullt verktyg i de fortsatta studierna av förutsättningarna för värmeuttag i rinnande vatten.

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

R9:1987

ISBN 91-540-4688-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1987

## I N N E H Å L L

1	INLEDNING	Sid	4
2	VÄRMEPOTENTIAL I RINNANDE VATTEN		5
2.1	Allmänt om värmepotential i svenska vattendrag		5
2.2	SMHIs mätstationer för vattenföring och vattentemperatur		5
2.3	Vattentemperaturens variationer		6
2.4	Vattenföringens variationer		9
2.5	Värmetransporter i rinnande vatten		12
3	KONSEKVENSER AV VÄRMEUTTAG - BERÄKNINGAR MED NUMERISK MODELL		17
3.1	Modellteknikens möjligheter i studier av avkylningsförlopp		17
3.2	Beskrivning av modellen (grundversion)		17
3.3	Resultat		18
4	SAMMANFATTANDE BEDÖMNING		24
5	FORTSATTA STUDIER		25
	LITTERATUR		26



## SAMMANFATTNING

Ytvatten som värmekälla för värmepumpar har kommit att utnyttjas allt mer. Det är då i första hand sjövattnet som kommit i fråga. Denna förstudie handlar om möjligheter och konsekvenser när det gäller att utnyttja värmeenergin i rinnande vatten.

Studien består av två delar, där den första ägnas åt värmepotentialen. Här har dagliga värmetransporter beräknats i några vattendrag i olika delar av landet. Sommartid är värmetransporterna betydande och kan för en större älv röra sig om 50 000 MW. Vintertid ligger vattentemperaturerna i många vattendrag nära  $0^{\circ}\text{C}$  och värmetransporterna blir obetydliga. Nedanför vissa sjöar och kraftverksmagasin kan dock temperaturen vintertid varaktigt uppgå till 1 å  $2^{\circ}\text{C}$ . Vid den i förstudien valda stationen av denna typ (Trängslet) var värmetransporten vintertid aldrig mindre än 100 MW (relativt  $0^{\circ}\text{C}$ ).

I den andra delen av studien testas en numerisk modell för beräkning av temperatureffekter av ett värmeuttag på en viss älvsträcka. Modellen, som bygger på det etablerade modellsystemet PHOENICS, kan lätt anpassas till olika förutsättningar: öppet eller slutet värmepumpsystem, isbildning på kollektorerna, utsläpp av krossad is etc. De första resultaten visar att beräkningsrutinerna fungerar tillfredsställande. Modellen bör därför kunna utgöra ett värdefullt verktyg i de fortsatta studierna av förutsättningarna för värmeuttag i rinnande vatten.



## 1 INLEDNING

Antalet värmepumpar som utnyttjar ytvatten som energikälla har ökat snabbt under de senaste åren. De flesta bygger på sjövärmes som med nuvarande teknik är lättast att utnyttja, eftersom temperaturen i sjöar under den kritiska vinterperioden ofta ligger en eller ett par grader över  $0^{\circ}$  C. Emellertid finns det betydande värmemängder även i våra floder. Vintertemperaturerna är visserligen i allmänhet lägre än i sjöarna, men den geografiska tillgängligheten är hög och med nyare teknik - värmeväxling till temperaturer nära  $0^{\circ}$  C och utnyttjande av isbildningsvärme - blir värme i rinnande vatten alltmer intressant.

Föreliggande projekt är tänkt som en förstudie i syfte att undersöka möjligheterna att för rinnande vatten dels beskriva värmepotentialen, dels bedöma konsekvenserna av värmeuttag. I den första delen av förstudien skall, med hjälp av ett speciellt datorprogram, beräkningar göras av värmeflödet vid vissa av SMHIs mätstationer där samtidiga observationer finns av vattentemperatur och vattenföring. I den andra delen av projektet skall en beräkningsmodell, baserad på det beprövade programsystemet PHOENICS, anpassas för beskrivning av inverkan av ett energiuttag på temperaturfördelningen i en flod nedströms uttagspunkten. Modellens kapacitet för bedömning av konsekvenserna av värmeuttag med både öppna och slutna värmepumpssystem skall också undersökas.



## 2 VÄRMEPOTENTIAL I RINNANDE VATTEN

### 2.1 Allmänt om värmepotentialen i svenska vattendrag

Med de goda avrinningsförhållanden som råder i vårt land är det givet att värmetransporten med floderna kan bli betydande, särskilt sommartid. I juni månad, då temperaturen i norrlandsälvarna i allmänhet ligger en bit över  $10^{\circ}\text{C}$ , motsvarar exempelvis den samlade värmetransporten till Bottniska viken från svenska vattendrag en effekt av upp till 500 GW. Vintertid är emellertid motsvarande värde flera storleksordningar mindre.

I samband med en energiutredning för Nordvästra Skånes Kommunalförbund fann man att vattendragen i denna region representerade den största energiresursen av de studerade markvärmekällorna. Resultaten citeras i en rapport om värmeuttag ur Rönne å (Andersson & Linder, 1984). I nämnda rapport ges även en översiktlig potentialanalys för ett antal svenska vattendrag, baserat på månadsmedelvärden av vattentemperatur och vattenföring. De årliga energitransporterna kan vid mynningen i en av de större älvarna uppgå till närmare 100 TWh. Vintertid är värmetransporterna små: i de nordliga vattendragen nära 0, i de sydliga ett par hundra MW som månadsmedeleffekt.

I det följande skall vattentemperaturernas och energitransporternas variationer närmare belysas.

### 2.2 SMHIs mätstationer för vattenföring och vattentemperatur

SMHIs stationsnät för mätning av vattenföring omfattade den 1 januari 1986 386 stationer. Av dessa var ca hälften belägna i vattendrag som mynnar i Bottniska viken, dvs floder från och med Torneälven till och med Dalälven. Vattenföringsstationerna har till stor del inrättats i samband med projektering eller kontroll av vattenkraftverk och regleringsmagasin. Vattenföringsuppgifter lämnas i vissa fall av kraftföretag som beräknat dessa med hjälp av tekniska data (elproduktion, luckställning m m). Vid SMHIs pegelstationer erhålles vattenföringen ur vattensöndersobservationer eller -registreringar via ett genom mätningar fastställt samband (avbördningskurva). Vattenföringsstationsnätet omstruktureras för närvarande för att tillgodose ett bredare samhällsintresse. Nya stationer inrättas därför företrädesvis i landets södra delar.

Också stationerna för mätning av vattentemperatur i rinnande vatten har i stor utsträckning varit knutna till vattenkraftens intressen, där bl a risken för iskravning motiverat noggranna mätningar vintertid. En stor del av mätningarna utförs vid kraftverk. På grund av den fortgående automatiseringen av kraftverksdriften har observationerna upphört på många

ställen. Den 1 januari 1986 fanns 104 vattentemperaturstationer i drift. Av dessa är de flesta belägna i de norra delarna av landet. Endast 35 stycken ligger i vattendrag söder om Dalälven. Vattentemperaturobservationerna är av varierande kvalitet med hänsyn till mätfrekvens, mätmetod och mätplatsens representativitet. I allmänhet utförs mätningarna med kvicksilvertermometer, som för vinterbruk i vissa fall är graderad i 100-dels grader.

Stationsnäten för vattenföring och vattentemperatur har tillkommit vid skilda tidpunkter och med olika syften. Samlokalisering är därför inte alltid förekommande. Antalet stationer med samtidiga och användbara observationer blir därför begränsat, särskilt om man ställer speciella kvalitetskrav på stationerna. I norra Sverige har för vattentemperaturobservationerna följande kriterier tillämpats:

Dagliga, pågående mätningar omfattande minst 10 års serie samt högsta kvalitetsklass. Med dessa kriterier återstår knappt 40 stationer i landets norra hälft. För drygt 20 av dessa finns vattenföringsmätningar på platsen. I södra Sverige är antalet stationer, som tidigare nämnts, litet. Kvalitetskraven har därför sänkts, men kraven på aktualitet, hög mätfrekvens (i princip dagliga mätningar) och 10-årig serie kvarstår. Antalet stationer med samtidiga vattenföringsmätningar blir ändå bara drygt 10. I föreliggande studie har av samtliga dessa stationer valts 7 stycken, representerande olika delar av landet med skilda klimat- och hydrologiska förhållanden liksom olika stora vattendrag.

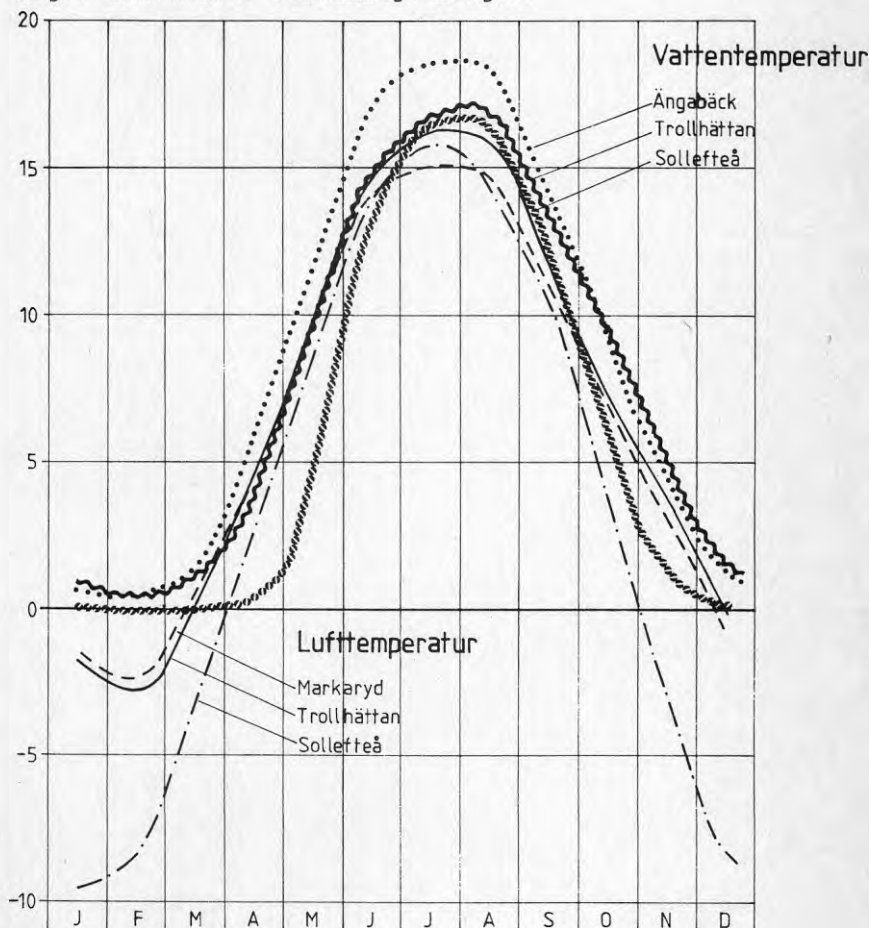
### 2.3 Vattentemperaturens variationer

Vattentemperaturen i rinnande vatten bestäms främst av värmeutbytet med atmosfären som försiggår genom in- och utstrålning, avdunstning och kondensation samt värmeledning till och från luften. (Med kännedom om meteorologiska faktorer som lufttemperatur, vind, molnighet och relativ fuktighet kan komponenterna i värmeutbytet teoretiskt beräknas). Dessutom sker ett visst värmeutbyte med botten och en viss inverkan av inläckande grundvatten.

Vattentemperaturen i en viss punkt i ett vattendrag beror också på punktens läge i förhållande till sjöar och regleringsmagasin eller forsar. Så kan exempelvis under vintern det vatten som avrinner från en stor och djup sjö ha en relativt hög temperatur medan öppet vatten på en forssträcka snabbt avkyls och vid stark kyla blir något underkyllt.

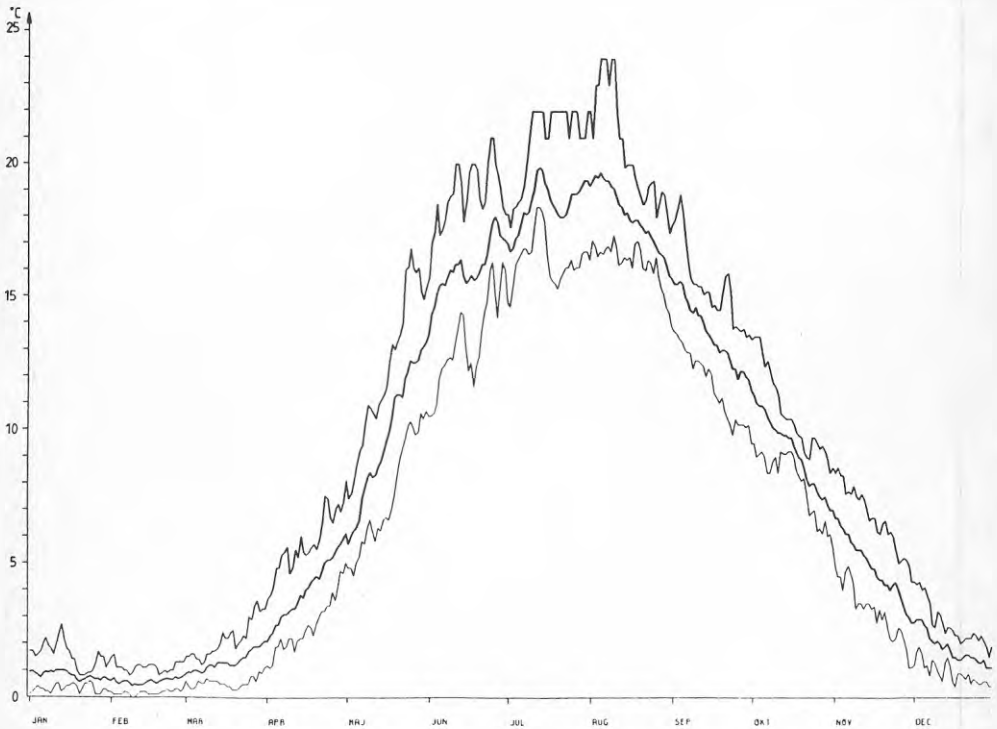
Vattentemperaturens årliga gång kännetecknas av ett maximum i juli-augusti och låga temperaturer, i vissa vattendrag tidvis  $0^{\circ}\text{C}$ , under vintermånaderna. I figur 2.1 visas månadsmedeltemperaturens variationer under året i Ångermanälven (Sollefteå), Lagan (Ängabäck, nära Markaryd) och Göta älv (Trollhättan).

I diagrammet har också lagts in lufttemperaturens månadsmedelvärden för samma period. Man ser att lufttemperaturen under vår och sommar är ganska lika vid de tre stationerna, medan vintern naturligtvis är avsevärt längre och kallare i Sollefteå än i Sydsvrige. Så är också vattentemperaturen i Ångermanälven lägre än i de sydligare vattendragen, särskilt vår och höst. Under högsommaren är emellertid vattnet i Ångermanälven endast obetydligt kallare än vattnet i Göta älv, vars temperatur påverkas av Vänerns stora och tröguppvärmda vattenmagasin. I Lagan, ett mindre vattendrag, där värmeutbytet med atmosfären har större genomslagskraft, är sommartemperaturerna betydligt högre än i Göta älv. Man lägger också märke till att vattentemperaturerna ofta är högre än lufttemperaturerna vilket beror på vattnets större förmåga att absorbera och behålla den under dagen inkommande strålningsenergin.



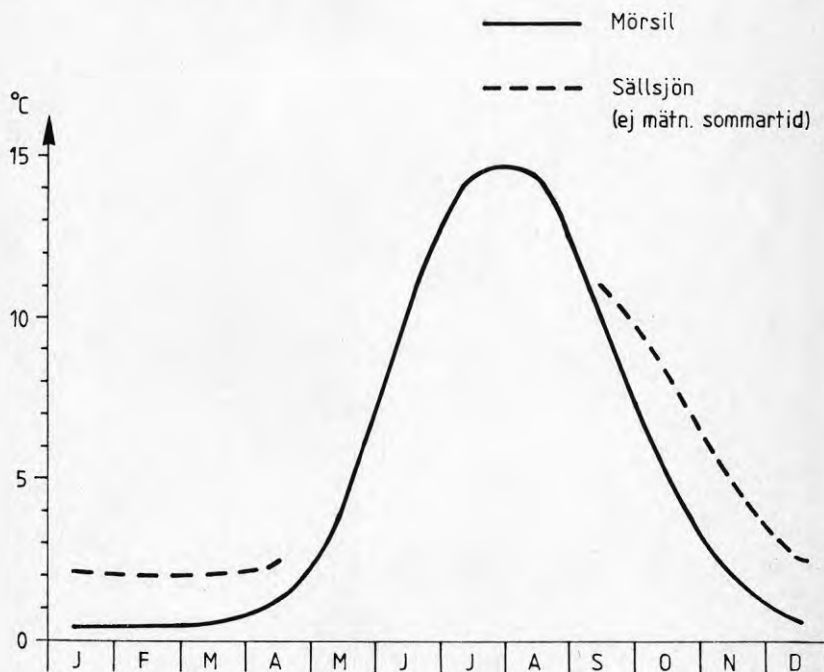
Figur 2.1 Månadsmedelvärden (1974-1983) av vattentemperatur vid Ångabäck, Trollhättan och Sollefteå samt d:o lufttemperatur i Markaryd, Trollhättan och Sollefteå

Vattentemperaturens variationer under året och mellan olika år belyses närmare av figur 2.2 som visar medel-, maximi- och minimivärden av vattentemperaturen i Svartån vid Boxholm enligt dagliga mätningar 1977-1983. Under högvintern har temperaturen i allmänhet hållit sig mellan 0,2 och 1,5<sup>o</sup> C, men sommartid har variationerna varit vida större med en spännvidd på uppemot 7 grader. Dygnsmedeltemperaturerna ligger vintertid på 0,5 å 1<sup>o</sup>C, ökar snabbt i april-maj och når i juli-augusti 19 å 20<sup>o</sup> C. Under hösten visar temperaturen ett i stort sett lineärt avtagande med tiden.



Figur 2.2 Medel-, maximi- och minimivärden av daglig vattentemperatur i Svartån vid Boxholm 1977-1983

Vattentemperaturen vintertid är, som framgått, mestadels låg, i vissa vattendragssträckor periodvis  $0^{\circ}\text{C}$ . Vintersäsongen, då de lägsta temperaturerna förekommer, uppgår i södra Sverige till ca 3 månader och i norra Sverige till ca 5 månader. Höga vintertemperaturer kan emellertid förekomma lokalt, t ex nedanför stora kraftverksmagasin. Som exempel visas i figur 2.3 månadsmedeltemperaturer i Indalsälven vid Sällsjöns respektive Mörsils kraftverk. De förra är som synes kraftigt påverkade av utströmmande vatten från Sällsjön (Häckren magasinet) med vintertemperaturer över  $2^{\circ}\text{C}$ .

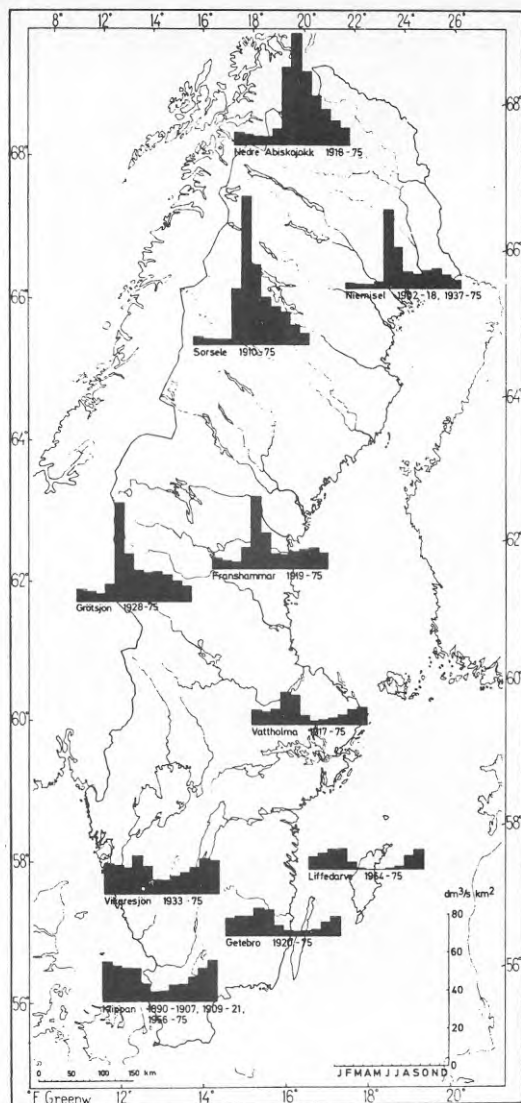


Figur 2.3 Månadsmedelvärden (1974-1983) av vattentemperatur i Indalsälven vid Sällsjöns och Mörsils kraftverk

#### 2.4 Vattenföringens variationer

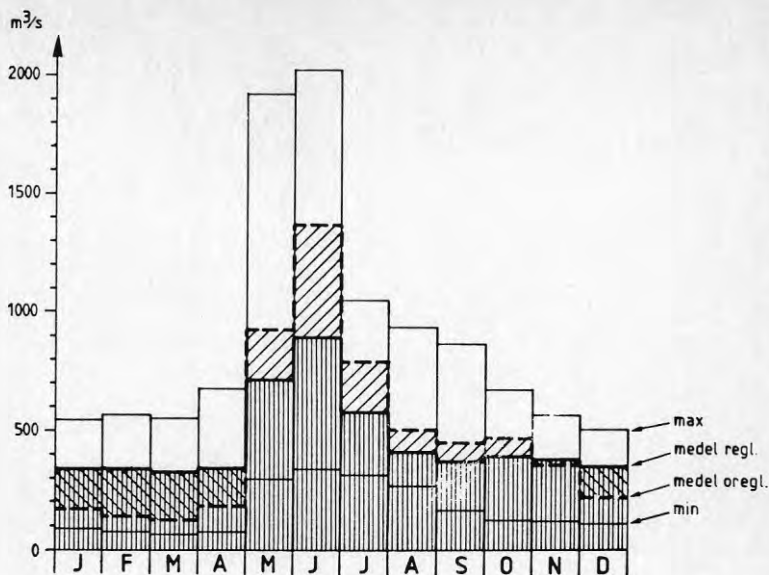
Eftersom värmetransporten i vattendragen är proportionell mot produkten av vattentemperatur och vattenföring är också vattenföringens regionala och tidsmässiga variationer av intresse. Avrinningen, som bestämmer den naturliga vattenföringen, varierar både mellan olika årstider och mellan olika delar av landet. I norr är det lågvatten under vintern och högvatten i samband med snösmältningen. Längst i söder är det oftast lågvatten under sommaren på grund av hög avdunstning och/eller liten nederbörd. Högvatten inträffar här vanligen på senhösten i samband med regn (se figur 2.4).



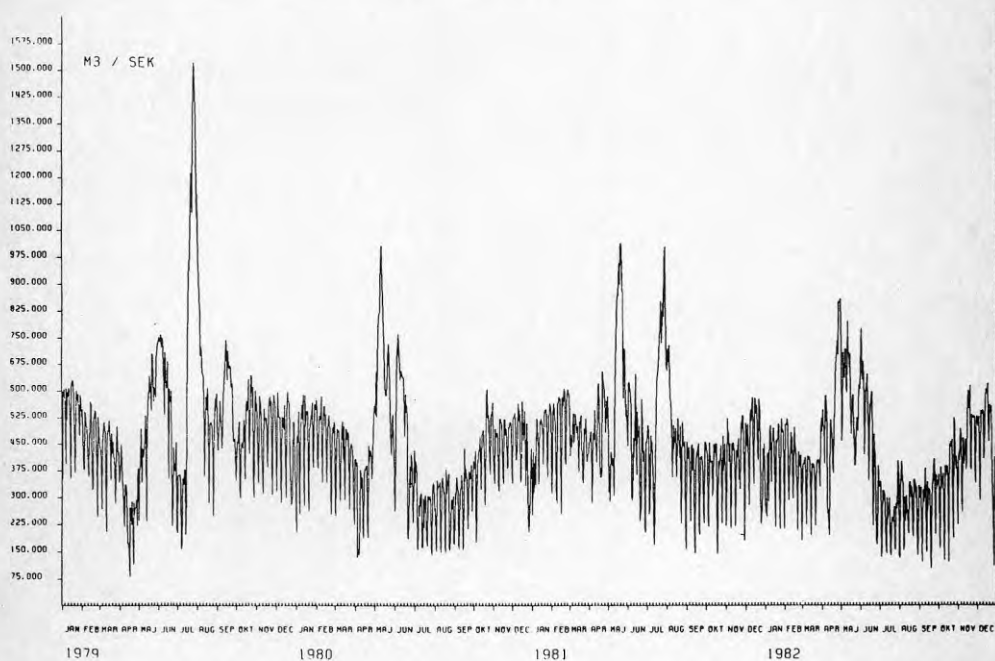


Figur 2.4 Avrinningens variation under året vid några vattenföringsstationer (Källa: Vattenföring i Sverige)

Vattenföringen visar stora variationer mellan olika år, främst beroende på varierande nederbördsmängder. Månadsmedelvärden av den reglerade vattenföringen i Ångermanälven framgår av figur 2.5. Som jämförelse har i diagrammet lagts in månadsmedelvärden för oreglerade förhållanden. Årsregleringen innebär att vatten från vårfloren sparas för att tappas under vintern, då vattenföringen normalt är liten men kraftbehovet stort.



Figur 2.5 Månadsmedelvärden, maximi- och minimivärden 1939-1975 av vattenföring i Ångermanälven vid Sollefteå jämfört oreglerad vattenföring 1909-1938 (Källa: Vattenföring i Sverige)



Figur 2.6 Dygnsmedelvärden av vattenföring i Ångermanälven vid Sollefteå 1979-1982.



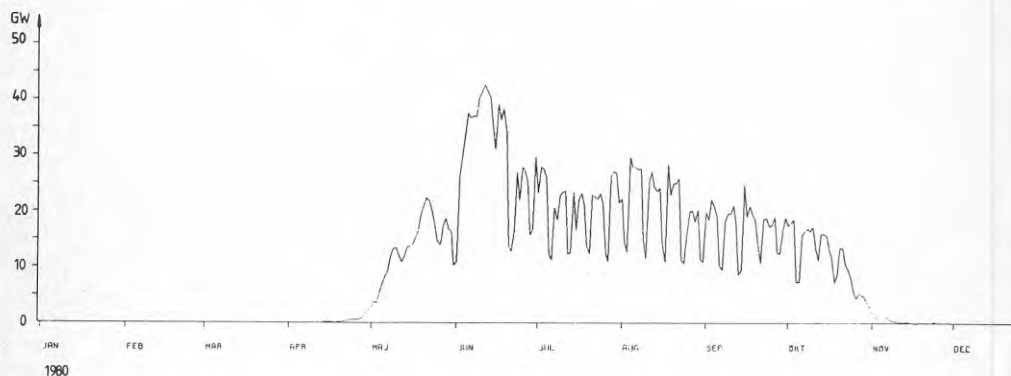
Vattenföringen kan visa stora variationer också från dygn till dygn, särskilt i reglerade vattendrag. I figur 2.6 visas som exempel ett diagram över vattenföringens dygnsmedelvärden i Ångermanälven vid Sollefteå. De variationer som framkallas av veckoregleringen framträder tydligt.

## 2.5 Värmetransporter i rinnande vatten

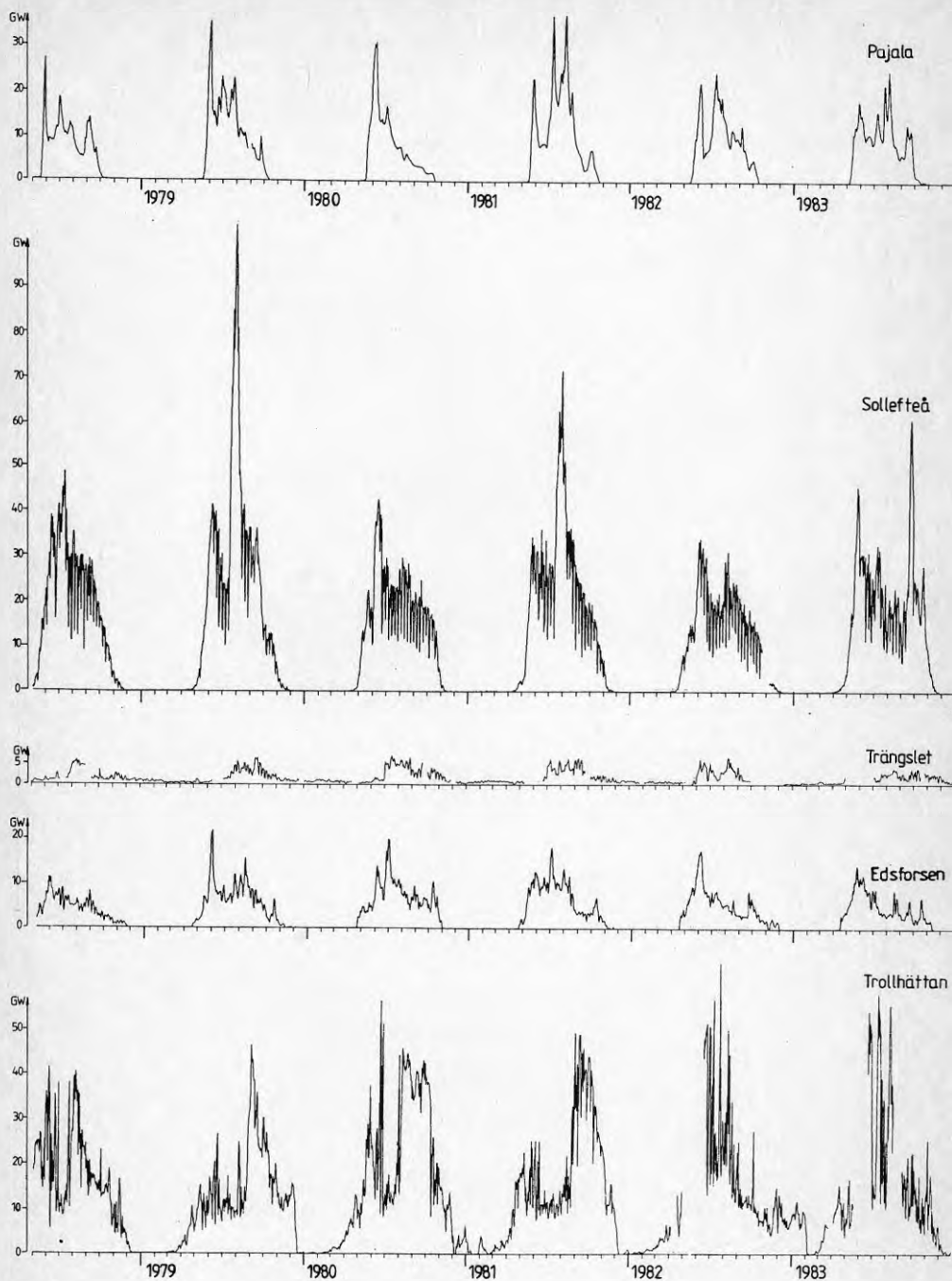
Vattenföringsdata och en stor del av vattentemperaturdata vid SMHI är lagrade på ADB-medium, vilket gör att beräkningar av värmetransporter dygn för dygn lätt kan göras för punkter med samtidiga mätningar av vattenföring och vattentemperatur. SMHI har utvecklat rutiner för sådana beräkningar och i det följande skall några resultat presenteras.

För värmetransportberäkningarna har sju stationer valts ut. Dessa är belägna i Torneälven (Pajala), Ångermanälven (Sollefteå), Dalälven (Trängslet), Motala ström - Svartån (Boxholms bruk), Lagan (Ängabäck), Klarälven (Edsforsen) och Göta älv (Trollhättan). Medelvattenföringen vid nämnda stationer varierar mellan 11 och 520 m<sup>3</sup>/s (Boxholm resp Trollhättan).

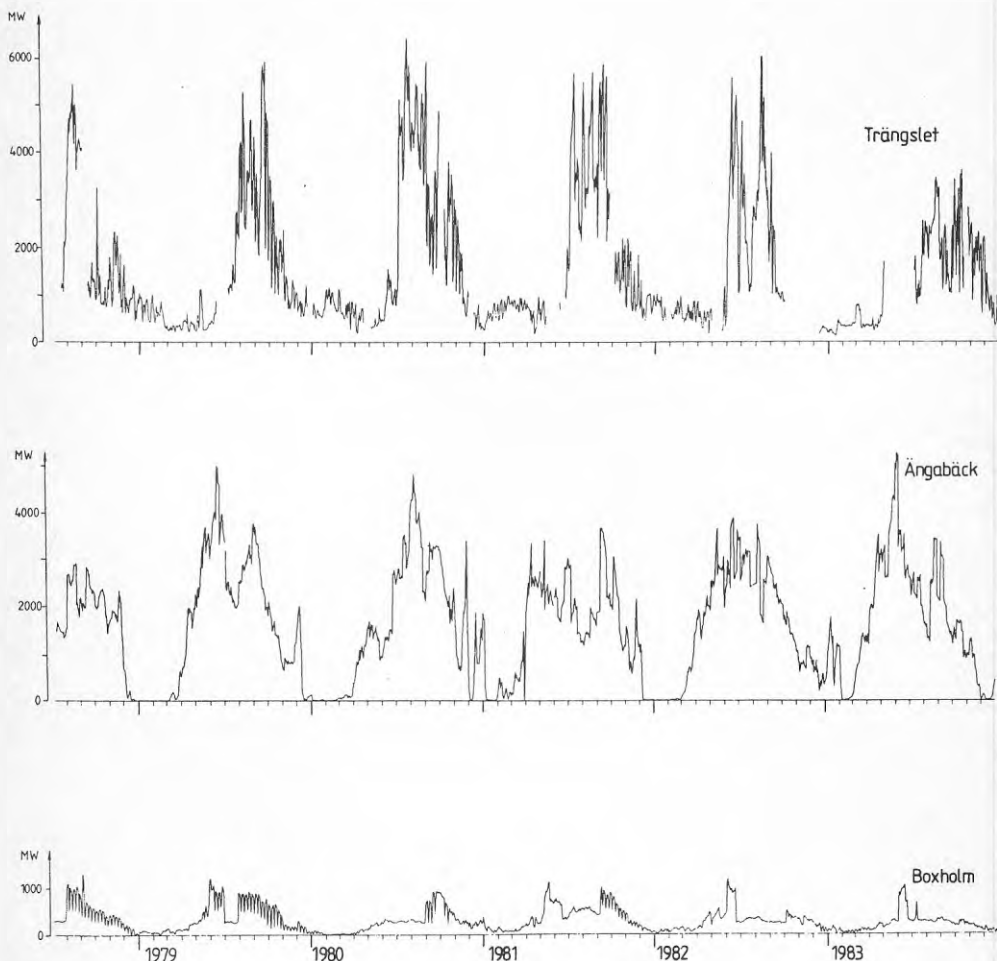
I figur 2.8 och 2.9 visas i diagramform dagliga värmetransporter (relativt 0° C) under åren 1978-1983 för samtliga stationer. (Obs att skalorna i figur 2.8 och 2.9 är olika. Station Trängslet i Dalälven finns med i båda figurerna för att underlätta jämförelser). De extremt taggiga konturerna vid några av stationerna återspeglar vattenföringsvariationerna till följd av korttidsregleringar. Detta framgår tydligare av figur 2.7 där som exempel visas värmetransportens variationer i Ångermanälven vid Sollefteå under ett år, med tidsskalan expanderad.



Figur 2.7 Dygnsvärden av värmetransporter relativt 0° C i Ångermanälven vid Sollefteå 1980



Figur 2.8 Värmetransporter (dygnsvärden, GW) 1978-1983 vid Pajala, Sollefteå, Trängslet, Edsforsen och Trollhättan



Figur 2.9 Värmetransporter (dygnsvärden, MW) 1978-1983 vid Trängslet, Ångabäck och Boxholm

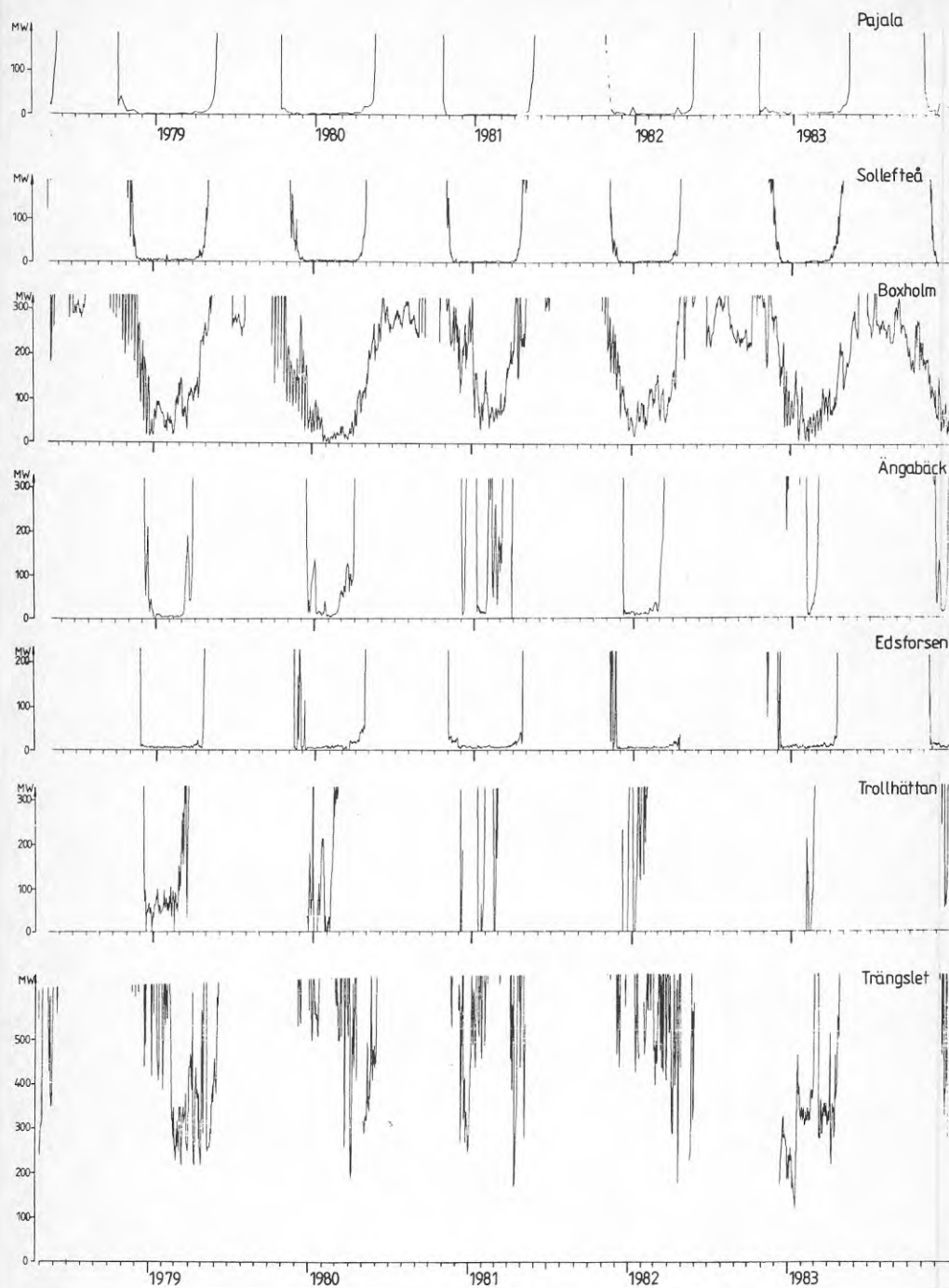
Att värmetransporterna vintertid i många fall är o-  
 betydliga framgår klart av figur 2.8 och 2.9. Endast  
 vid Trängslet, där relativt varmt djupvatten tappas  
 från regleringsmagasinet, ligger vintervärdena hela  
 tiden över 0 med god marginal.

För att närmare belysa förhållandena vintertid har en plottning skett med ytterligare förstoring av vertikalskalan (se figur 2.10). Ihållande perioder med värmetransporter nära 0 finner man vid Pajala, Sollefteå och Edsforsen. Även vid Ängabäck i Lagan har längre perioder med obetydliga värmetransporter förekommit. Vid Boxholm och Trollhättan är variationerna stora. 0-gradigt vatten kan här uppträda under kortare perioder. Trängslet skiljer sig från alla andra stationer genom sina höga värden: värmetransporter under 100 MW har ej observerats.

I tabell 2.1 ges en sammanställning av vissa beräkningsresultat för de sju stationerna. Medelvärdena är beräknade för perioden 1974-83 (i vissa fall 1976-83). Medelvattenföringen avser emellertid en längre tidsperiod. De genomsnittliga värmetransporterna står i relation till vattenföringen och uppgår för de största vattendragen till drygt 10 GW motsvarande en energimängd av ca 100 TWh/år. Som redan framgått av fig. 2.8 och 2.9 är skillnaderna mellan vinter och sommar betydande. I tabellen redovisas genomsnittliga värmetransporter under månaderna med högsta resp lägsta transport, vilka i regel inträffar under tiden maj-augusti resp januari-mars. Sommartransporterna kan vara mer än 1000 gånger större än vintervärdena. Förhållandena vintertid belyses också genom uppgifter om antalet dygn med värmetransport = 0 och mindre än 10 resp 100 MW. Som man kan vänta sig är antalet dygn med värmetransport = 0 störst vid den nordligaste stationen (Pajala), men också i Göta älv går värmetransporten (dvs vattentemperaturen) i regel ned till 0 flera dagar varje vinter. Värmetransporter mindre än 10 MW under längre tid har uppmätts vid stationerna i Torneälven och Klarälven.

TABELL 2.1 NÅGRA RESULTAT AV VÄRMETRANSPORTBERÄKNINGARNA

Vattendrag/ station	Års- medel- vatten- föring m <sup>3</sup> /s	VÄRMETRANSPORT (relativt 0° C)				Genomsnittligt antal dagar per år med värmetransport		
		Medel- effekt över året GW	Medel- energi TWh/år	Medeleffekt månad med max transp GW	min transp MW	= 0	<10 MW	<100 MW
Torneälven/ Pajala	133	4	35	17	2	35	167	210
Ängermanälven/ Sollefteå	462	11	96	32	27	9	11	129
Dalälven/ Trängslet	63	1,4	12	3,6	420	0	0	0
Svartån/ Boxholm	11	0,3	2,6	0,8	43	6	8	106
Lagan/ Ängabäck	62	1,7	15	3,6	58	1	26	73
Klarälven/ Edsforsen	125	3	26	9,0	6	1	106	155
Göta älv/ Trollhättan	520	12	105	30	690	7	7	29



Figur 2.10 Värmetransporter (dygnsvärden, MW) under vinterperioden 1978-1983 vid samtliga sju stationer

### 3 KONSEKVENSER AV VÄRMEUTTAG - BERÄKNINGAR MED NUMERISK MODELL

#### 3.1 Modellteknikens möjligheter i studier av avkylningsförlopp

För studier av de hydrodynamiska skeendena i rinnande vatten finns etablerad modellteknik. Modellsystemet PHOENICS representerar en internationellt välprövad teknik med många tillämpningar på simulering av strömnings- och värmeöverföringsproblem.

Vid SMHI har systemet tidigare utnyttjats bl a för simuleringar av problem med anknötning till storskalig strömning (sjöar eller havsområden), kanalströmning, byggnadsaerodynamik och atmosfäriska gränsskiktet.

Modellens flexibilitet (beskrives närmare i följande avsnitt) möjliggör studier också av temperaturförlopp i en flod. Här kan man studera både inverkan av värmeuttag och effekten av en introduktion av ispartiklar i ett vattendrag, dvs de typer av påverkan som kan bli aktuella vid ett värmepumpnyttjande.

Föreliggande studie är främst avsedd att testa beräkningsrutinerna och att visa vilka typer av resultat man kan få med modellen.

#### 3.2 Beskrivning av modellen (grundversion)

På grund av PHOENICS' stora flexibilitet är inga av de uppgifter som ges nedan på något sätt låsta; allmänt är det mycket lätt att variera geometrisk upplösning, rand- och initialvärden, lösningsmetodik, formulering av randvillkor och källtermer, etc.

Modellen är 2-dimensionell med fast upplösning i vertikal led och variabel  $d:0$  i horisontell led (strömningsriktning), sålunda en tänkt "strimla" av en flods centrala parti (se figur 3.1). Ekvationer löses för tryck, två hastighetskomponenter, turbulent kinetisk energi och dissipation, temperatur (rätteligen entalpi) samt (eventuellt) iskoncentration. Ekvationer löses paraboliskt, dvs situationen i en viss vertikal påverkas endast av det som hänt uppströms (inga influenser från nedströms belägna skeenden). Vattnets densitet varierar med temperaturen enligt en standardformel. Botten antages slät; friktion  $m$   $m$  simuleras med en standard-väggfunktion av logaritmisk typ. Vid vattenytan förekommer värmeutbyte proportionellt mot skillnaden mellan den lokala vattentemperaturen och en ansatt konstant lufttemperatur. Vid uppströmsranden beräknas en approximativ strömprofil ur ett givet värde på strömhastigheten vid ytan, jämte det härur resulterande inkommande massflödet (vattenföringen). Vattentemperaturen ansätts konstant över djupet (konstant  $=2,5$  m), som är upplöst i 20 beräkningsceller, ökande i storlek från botten mot ytan. I strömriktningen tillämpas i



början en celllängd av 10 m, som senare ökas med en given faktor till ett maximalt värde (100 m).

De första få beräkningscellerna används för att anpassa de approximativa initialprofilerna för hastighet och turbulens till "verkliga", beräknade profiler. Härefter börjar värmepumpregionen, som omfattar 20 celler à 10 m, totalt 200 m. Över denna region sker en värmeförlust; tre olika ansatser för formulering av randvillkoret har gjorts (se vidare nedan).

Värmeutbytet med atmosfären pågår från värmepumpregionens början till beräkningarnas slut (typiskt 6 à 8 km i nedströmsriktningen). På grundval av temperatur och eventuell iskoncentration vid värmepumpens nedströmsände beräknas en total värmeförlust. Denna används som referensvärde för att fastställa en "återhämtningslängd"  $L_{0,02}$ , som definierats som den distans i nedströmsriktningen där 98 procent av bortförd värmeenergi återförts till vattenmassan genom tillflödet från atmosfären vid vattenytan.

För värmepumpregionen har tre olika typer av randvillkor prövats:

- Fall 1) Konstant effektuttag (givet antal watt per  $m^2$ ).
- Fall 2) Konstant temperatur på värmepumpens yta ( $\langle T_{\text{vatten}} \rangle$ ). I detta fall beräknas även en värmeöverföringskoefficient ( $W/m^2/K$ ), som varierar svagt över värmepumpregionen, beroende på avkylningen av vattnet närmast botten.
- Fall 3) Utsläpp av ispartiklar. I grundversionen tänks detta (något orealistiskt) ske längs hela värmepumpregionen. (Kan lätt omformuleras till ett mera koncentrerat utsläpp av vatten med suspenderade ispartiklar). Ispartiklar av given storlek och med given stighastighet släpps ut med given koncentration i cellerna närmast botten. Ispartiklarna sprids sedan, dels pga strömmen, dels pga ispartiklarnas flytkraft, dels pga omblandning genom turbulens, allt under smältning med åtföljande avkylning av omgivande vatten.

Grundversionen av modellen har, på uppdrag av SMHI, formulerats och satts upp av CHAM Ltd, Wimbledon, England (det företag som står bakom utvecklingen av PHOENICS-systemet). En närmare beskrivning finns i en rapport: (Coon & Ludvig, 1984).

### 3.3 Resultat

I bifogade fem figurer ur CHAMs rapport visas några exempel på resultat. Kommentarer till figurerna:



- Figur 3.1 Skiss över beräkningsgeometrin, med några rand- och initialvärden angivna.
- Figur 3.2 Temperatur i olika beräkningsceller, som funktion av nedströmsdistansen  $Z$ . Cell 1 är belägen närmast botten, cell 20 vid ytan. Fall 1 med konstant effekt =  $30 \text{ W/m}^2$  över värmepumpen, som är belägen mellan  $Z = 40$  och  $240 \text{ m}$ . Initiell vattentemperatur  $1^\circ \text{ C}$ . Temperaturen sjunker, som väntat, snabbast vid botten. Efter värmepumpen sker en tämligen snabb vertikal omblandning och därefter en långsam uppvärmning pga värmeförlusten vid ytan.
- Figur 3.3 Samma, för fall 2 med konstant temperatur =  $0^\circ \text{ C}$  över värmepumpens yta. Värmeförlusten blir i detta fall ca 60 gånger större än i figur 3.2. (Observera de olika temperaturskalorna).
- Figur 3.4 Hastighetsprofil vid beräkningsområdets slut. Denna ansluter sig mycket väl till tidigare kända resultat.
- Figur 3.5 Iskoncentrationsprofiler. Värmepumpen sträcker sig över ytan mellan "slab" (= vertikal) 5 och 24. Kurvorna för slab 10 och 20 visar uppbyggnaden av iskoncentrationsprofilen, med höga värden närmast botten, och hur isen "sedimenterar uppåt". Vid slab 30, ca 65 m nedströms värmepumpen, har en betydande smältning skett; ytterligare ca 180 m nedströms, vid slab 40, har nästan all is smält. (Observera att initiella vattentemperaturen är så hög som  $1^\circ \text{ C}$ ).

I följande tabell sammanfattas några resultat från två kompletterande simuleringar.

Förklaringar:

$C_i$	Vid botten tillförd iskoncentration (fall 3)
$E$	$\text{W/m}^2$ Värmepumpens effekt
$H$	$\text{J/kg}$ Entalpi, initiell (= värmeinnehållet uppströms)
$\Delta H$	$\text{J/kg}$ Minskning av entalpi vid värmepumpens slut (vertikalmedelvärde)
$\Delta T$	$^\circ \text{C}$ Minskning av temperatur vid värmepumpens slut (vertikalmedelvärde)
$T_f$	$^\circ \text{C}$ Temperatur vid vattnets fryspunkt (= $-0,01$ )

$T_i$  °C Initiell vattentemperatur

$T_s$  °C Temperatur på värmepumpens yta (fall 2)

Några övriga värden för samtliga fall:

Lufttemperatur = 5 °C, värmeöverföring vid ytan  
= 2 W/m<sup>2</sup>/K

Vattenföring (per m bredd) = 2,19 m<sup>3</sup>/s

För fall 3: Isens stighastighet = 1 mm/s, isens densitet = 916,8 kg/m<sup>3</sup>

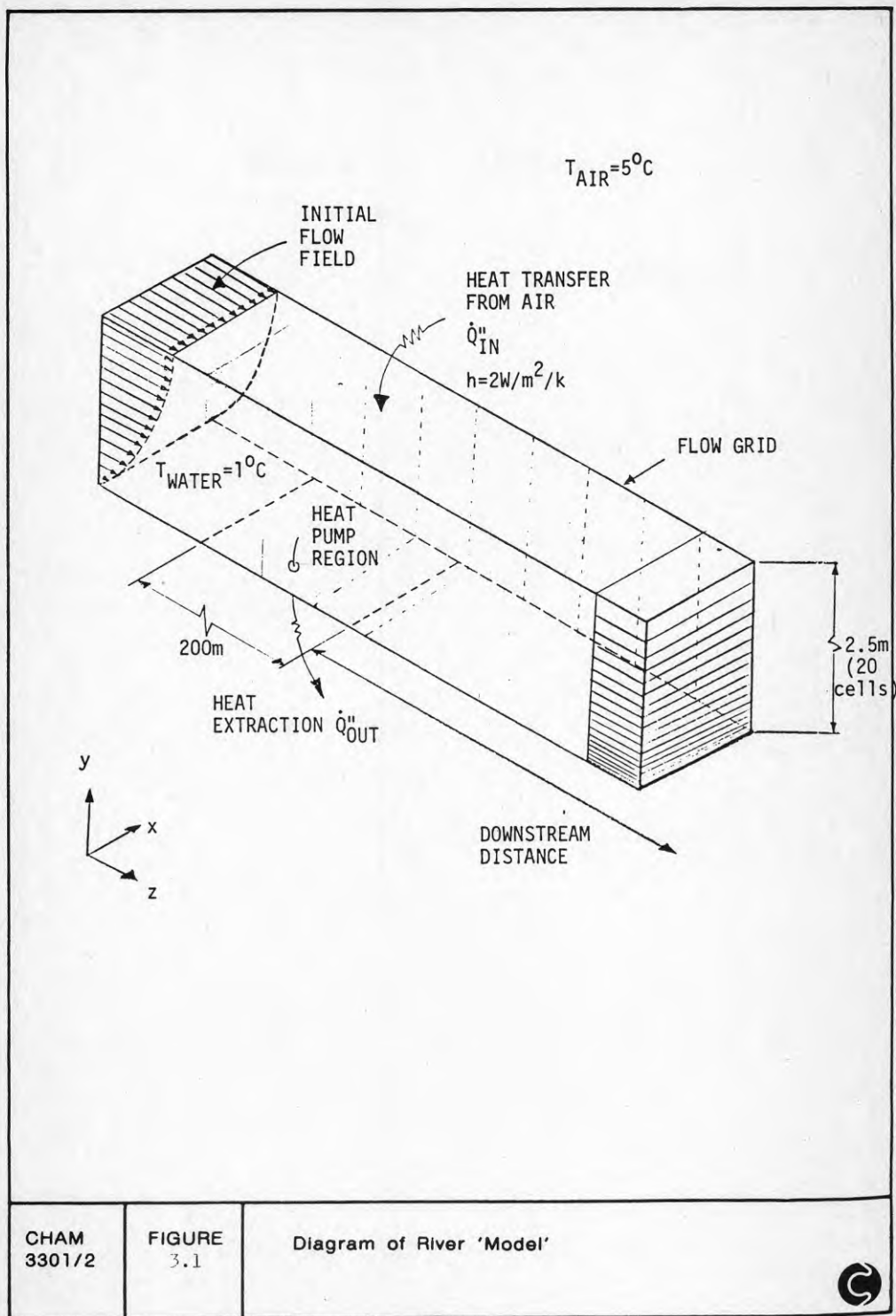
TABELL 3.1 RESULTAT FRÅN KOMPLETTERANDE SIMULERINGAR

Fall	1a	1b	2a	2b	3a	3b
$T_i$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$\Delta T$ (/10 <sup>-3</sup> )	0,22	0,66	1,3	2,9	3,6	7,5
$\frac{T}{T_i - T_f}$ (%)	0,2	0,6	1,2	2,6	3,3	6,8
$\Delta H/H$ (/10 <sup>-6</sup> )	0,8	2,4	4,9	11,0	13,0	27,0
$T_s$	-	-	0,05	0,00	-	-
$C_i$	-	-	-	-	0,0005	0,001
E	20,0	40,0	85,0	170,0	150,0	305,0
$L_{0,02}$ (m)	220,0	595,0	1220,0	2620,0	3120,0	6520,0

Anm: För fall 3 har  $\Delta H$  och  $\Delta T$  beräknats med förutsättningen att all befintlig is tänkts smält, varvid för smältningen erforderlig energi tagits från det omgivande vattnet.

Det bör påpekas att ovan redovisade siffror inte är avsedda att beskriva verkliga fall av praktisk betydelse; ingångsdata har valts mer eller mindre på måfå. Avsikten har endast varit att demonstrera att beräkningarna fungerar på avsett sätt och att belysa vilka typer av resultat som lätt kan erhållas.

Grundversionen av modellen innefattade endast smältning av eventuellt förekommande ispartiklar. Beräkningsschemat har senare kompletterats, så att numera även nybildning av is (vid avkylning till temperaturer strax under vattnets fryspunkt) finns medtagen. Detta torde göra det möjligt att simulera t ex fall med värmekollektor med så stort effektuttag, att isbildning sker på själva kollektorn.

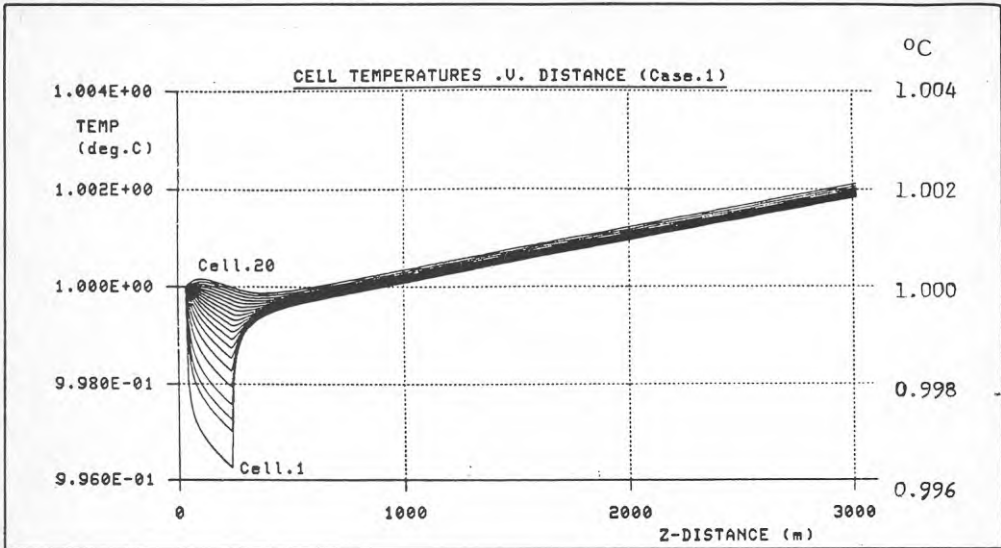


CHAM  
3301/2

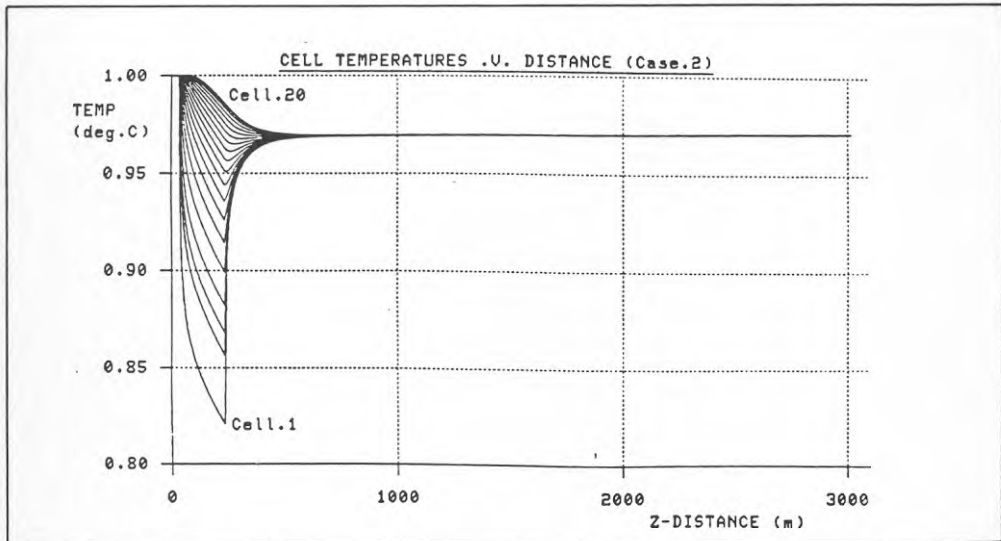
FIGURE  
3.1

Diagram of River 'Model'



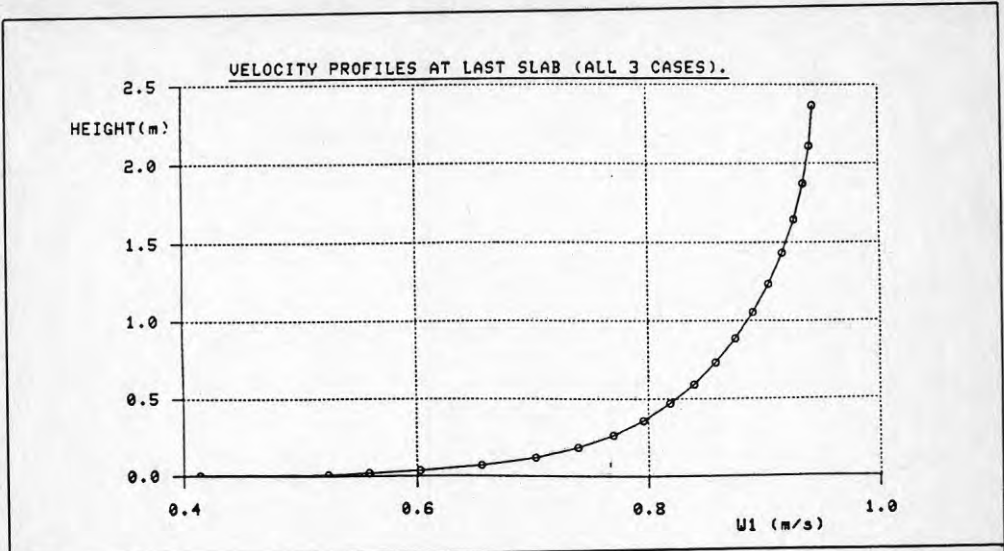


<p>CHAM 3301/2</p>	<p>FIGURE 3.2</p>	<p>Cell Temperature Traces (Case 1)</p>
------------------------	-----------------------	---

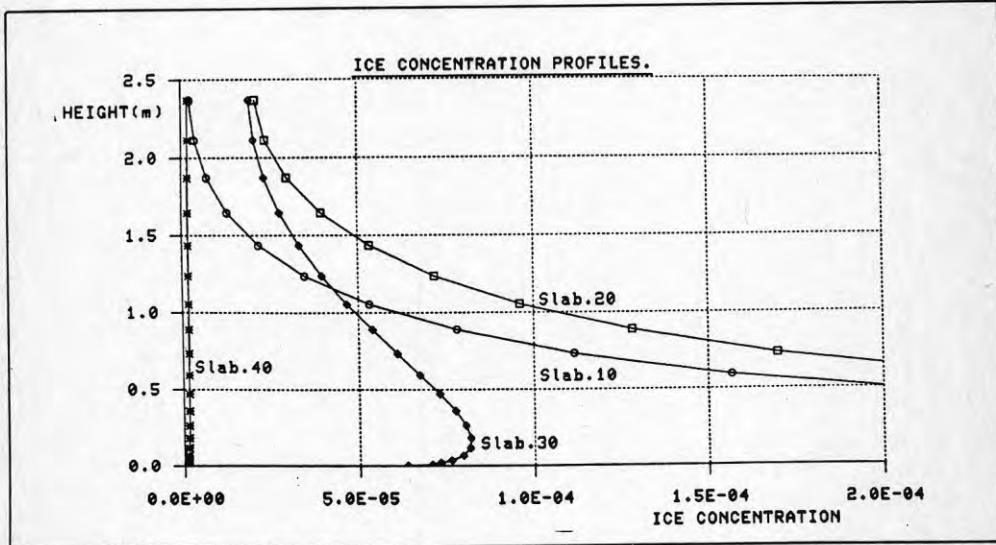


<p>CHAM 3301/2</p>	<p>FIGURE 3.3</p>	<p>Cell Temperature Traces (Case 2)</p>
------------------------	-----------------------	---





CHAM 3301/2	FIGURE 3.4	Velocity Profiles
----------------	---------------	-------------------



CHAM 3301/2	FIGURE 3.5	Ice-Concentration Profiles (Case 3)
----------------	---------------	-------------------------------------

De totala värmetransporterna i våra floder är betydande. Ett vattendrag som Göta älv eller Ångermanälven för årligen med sig en total energimängd av ca 100 TWh i genomsnitt.

Värmetransporterna i vattendragen visar, som framgått av det föregående, stora variationer både i tid och rum. I de flesta vattendrag sjunker vattentemperaturen vintertid någon gång till 0 eller nära 0° C. Detta gäller även många vattendrag i södra Sverige. Varaktigt höga vintertemperaturer finner man i första hand omedelbart nedanför större sjöar och regleringsmagasin (med avbördning av djupvatten). Vid Trängslet i Dalälven var värmetransporten vintertid (relativt 0° C) aldrig mindre än 100 MW.

Möjligheterna att vintertid utnyttja värmen i vattendragen beror i hög grad på värmepumpstekniken. Med öppna system och värmeväxling ned till några tiondels grader kan värmepumpen i de flesta fall inte köras under delar av vintern, de flesta vintrar. Med teknik som innebär utnyttjande av isbildningsvärmen blir ett mycket stort antal vattendrag intressanta för värmepumpsutnyttjande. Begränsande faktor i sådana fall är inverkan på vattentemperatur och isförhållanden och eventuell isdämning i vattendraget av den is som tillförs vattnet från slangar eller ismaskiner. För studier av sådan inverkan kommer numeriska modeller att vara till stor hjälp.

En enkel grundversion av en hydrodynamisk numerisk modell har satts upp, på grundval av programsystemet PHOENICS. Modellen beräknar vertikala temperatur- och strömprofiler, inkl turbulens, i ett flodavsnitt. Inverkan av värmeutbyte vid ytan och/eller botten kan studeras liksom effekter av smältning och nybildning av ispartiklar. Programsystemet är tidigare väl testat för dessa typer av beräkningar; resultaten bör därför kunna tolkas med stor tillförsikt. Sammanfattningsvis kan sägas att den numeriska modellen lämpar sig väl för studier av vattentemperaturens fördelning i tid och rum samt konsekvenserna av olika typer av värmeuttag i rinnande vatten. Modellen bör därför utgöra ett värdefullt verktyg i de fortsatta studierna av förutsättningarna för värmeuttag i rinnande vatten.



Förstudien har visat dels att värme i rinnande vatten kan representera en betydande energiresurs även vintertid, dels att den beräkningsmodell som testats rymmer goda möjligheter till studier av inverkan på vattentemperaturen av värmeuttag i rinnande vatten. De fortsatta studierna bör inriktas på att närmare belysa förutsättningarna för att utnyttja vattendragen för energiutvinning via värmepumpar. I samråd med användare och tillverkare formuleras konkreta kriterier för objekt (punkter i vattendrag) av intresse för värmepumpprojektering, t ex högst  $x$  dagar per år med 0-gradigt vatten, högst  $y$  dagar per år med värmetransport mindre än 10 MW, påverkan nedströms högst  $z$  km osv. Med utgångspunkt i användarintresset görs en mer heltäckande genomgång av SMHIs vattentemperaturdata, eventuellt kompletterade med material från annat håll, syftande till en närmare bedömning av möjliga energiuttag vintertid i olika vattendrag. Den numeriska modellen vidareutvecklas och testas ytterligare med inriktning på fall av praktiskt intresse.



## LITTERATUR

Cabelis, O & Moberg, A, 1978, Basnät för vattentemperatur. Stationsförteckning 1978-01-01. SMHI HB Rapport Nr 31 Norrköping.

Hydrologiska iakttagelser i Sverige, 1985, SMHI Årsbok Band 62 (1980) Del 3.1 Norrköping

Andersson, O & Linder, U, 1984, Värme ur Rönne å till fjärrvärmenät. Förstudie och allmän potentialanalys, BFR Rapport 104:1984

Coon, J & Ludwig, J, 1984, Modelling of heat pump in river bed, CHAM report 3301/2, London

Vattenföring i Sverige, 1979, SMHI (LiberFörlag) Stockholm

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840139-4  
från Statens råd för byggnadsforskning till SMHI  
Norrköping.**

**R9: 1987**

**ISBN 91-540-4688-2**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6707009**

**Abonnemangsgrupp:  
Ingår ej i abonnemang**

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

**Cirkapris: 30 kr exkl moms**