

EN INLEDANDE STUDIE I VÄTTERN
DYNAMIK

THE DYNAMICS OF LAKE VÄTTERN,
PRELIMINARY RESULTS

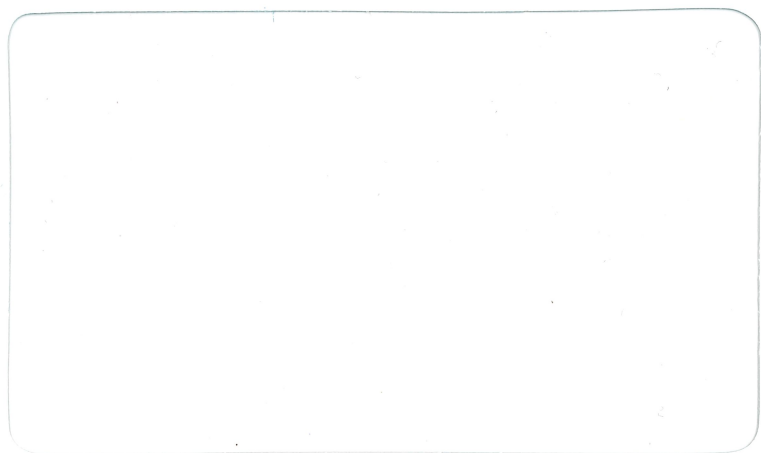
By Lennart Funkquist

SMHI Rapporter

HYDROLOGI OCH OCEANOGRAPHI
Nr RHO 16 (1979)

SMHI

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut



EN INLEDANDE STUDIE I VÄTTERN
DYNAMIK

THE DYNAMICS OF LAKE VÄTTERN,
PRELIMINARY RESULTS

By Lennart Funkquist

SMHI Rapporter

HYDROLOGI OCH OCEANOGRAPHI
Nr RHO 16 (1979)

ESSN 0347-7827

SVERIGES METEOROLOGISKA OCH HYDROLOGISKA INSTITUT
Norrköping 1979



Foton: Lennart Funkquist, Mona Englund och Kjell Wickström.
Utskrift och bildframställning: Mona Englund

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
Kapitel 1. Inledning	1
- " - 2. Mätprogram	3
- " - 3. Numerisk modell	5
- " - 4. Jämförelser mellan beräknade och observerade strömmar och temperaturer	8
- " - 5. Analys och diskussion av mätningarna 1977	23

FIGURFÖRTECKNING

1. Karta över Vättern med mätstationer och djupkurvor.
2. Mätprogram 1977. Typ av mätning samt varaktighet.
3. Uppmätt temperaturprofil den 9.8 1977 i en punkt strax nordväst om Omberg.
- 4a. Registrerade vindar vid Visingsö under tiden 10.8 - 29.8 1977.
- 4b. Registrerade vindar vid Visingsö under tiden 5.9 - 14.9 1977.
5. Registrerad och beräknad ström i vertikal V under tiden 10.8 - 29.8 1977.
6. Registrerad och beräknad ström i vertikal V under tiden 10.8 - 29.8 1977.
7. Beräknad ström i vertikal V för lager 3 (27 - 50 m) under tiden 10.8 - 29.8 1977.
8. Registrerad och beräknad temperatur i vertikal V under tiden 10.8 - 30.8 1977.
9. Registrerad och beräknad ström i vertikal V under tiden 5.9 - 14.9 1977.
10. Beräknad ström i vertikal V för lager 3 (27 - 50 m) under tiden 5.9 - 14.9 1977.
11. Registrerad och beräknad temperatur i vertikal V under tiden 5.9 - 14.9 1977.
- 12a. Karta över beräknad medelströmning för lager 1 och 2 i Vättern under tiden 10.8 - 19.8 1977.
- 12b. Karta över beräknad medelströmning för lager 3 och 4 i Vättern under tiden 10.8 - 19.8 1977.
13. En våglängd, λ , av en Kelvinvåg som går längs ena sidan A-B av en bred kanal (endast ena kanalsidan visas). Kanalen har konstant djup och roterar moturs mot en vertikal axel. De utritade strömpilarna ger strömmen i det undre lagret. Vågamplituden och strömmen avtar exponentiellt i en riktning vinkelrätt mot AB (från Mortimer, 1974).

Figurförteckn. forts

14. Registrerad temperatur i vertikalerna O och N under tiden 27.7 - 10.8 1977.
15. Registrerad temperatur i vertikal V under tiden 27.7 - 12.8 1977.
16. Registrerad längsgående ström i vertikal V under tiden 27.7 - 20.9 1977.
17. Våglängder tvärs sjön och motsvarande period för Poincarévågor.
18. Rotationsspektra för strömmen i vertikal V.

LIST OF FIGURES

1. Topographic map of Lake Vättern showing the locations of the measuring-stations. The depth are in meters.
2. Measurement-program.
3. Observed temperature close to Omberg.
- 4a. Winds recorded on Visingsö during 10.8 - 29.8 1977.
- 4b. Winds recorded on Visingsö during 5.9 - 14.9 1977.
5. Recorded and computed current at Station V during 10.8 - 29.8 1977.
6. Recorded and computed current at Station V during 10.8 - 29.8 1977.
7. Computed current at Station V for layer 3 (27 - 50 m) during 10.8 - 29.8 1977.
8. Recorded and computed temperature at Station V during 10.8 - 30.8 1977.
9. Recorded and computed current at Station V during 5.9 - 14.9 1977.
10. Computed current at Station V for layer 3 (27 - 50 m) during 5.9 - 14.9 1977.
11. Recorded and computed temperature at Station V during 5.9 - 14.9 1977.
- 12a. Computed mean-current for layer 1 and 2 in Lake Vättern during 10.8 - 19.8 1977.
- 12b. Computed mean-current for layer 3 and 4 in Lake Vättern during 10.8 - 19.8 1977.
13. A long Kelvin-wave (from Mortimer 1974).
14. Recorded temperature in Stations O and N during 27.7 - 10.8 1977.
15. Recorded temperature in Station V during 27.7 - 12.8 1977.
16. Recorded longshore current in Station V during 27.7 - 20.9 1977.
17. Relationship between cross basin wavelength and Poincaré-wave period.
18. Rotary spectra for current in Station V.

ABSTRACT

Continuous current and temperature data were taken from one station in Lake Vättern during the 1977 summer. Further temperature data were collected from two stations by continuous recordings at eleven depths during a fortnight period.

A three-dimensional hydrodynamic model has been applied to the lake. Observations of current and temperature show a good agreement with corresponding model results.

Wave-like motions have been studied through a method of rotary spectral analysis. It is suggested that observed waves can be related to different modes of Poincaré waves. Motions with a period of several days were observed and have been interpreted in terms of internal Kelvin-waves. There also is evidence of motions with a frequency lower than the inertial value pointing towards nonlinear interactions between inertial motions and lower frequency currents.

SMHI

SMHI RAPPORT NR RHO 16

1. INLEDNING

Föroreningssituationen i Vättern har sedan början på 60-talet mer i detalj kunnat följas genom mätningar av biologiska och kemiska parametrar. Främst är det Vätterns växande betydelse som vattentäkt som föranlett en kontinuerlig provtagning. Även förändringar i fisket har aktualiserat en fortlöpande kontroll av föroreningssituationen.

I en vattenvårdsplan (Kommittén för Vätterns vattenvård, 1970) beskrivs utförda mätningar såväl före 1962 som under den mer intensiva perioden 1962-67. I vattenvårdsplanen påpekas också behovet av en noggrann kartläggning av strömningsförhållandena i sjön. Därigenom skulle möjligheterna ökas att bestämma spridningen och utspädningen av avloppsvatten från industrier. Samtidigt skulle detta underlätta en övergripande och långsiktig planering av Vätterns utnyttjande som vattenresurs.

De enstaka mätningar av skiktningsförhållanden och strömhastigheter som tidigare utförts har indikerat komplicerade strömningsmönster. I denna rapport redovisas kontinuerliga mätningar av ström och temperatur, vilka också jämförs med genererade strömmar och skiktningsförhållanden från en hydrodynamisk modell.

Verksamheten har finansierats med medel från Statens Naturvårdsverks forskningsnämnd.

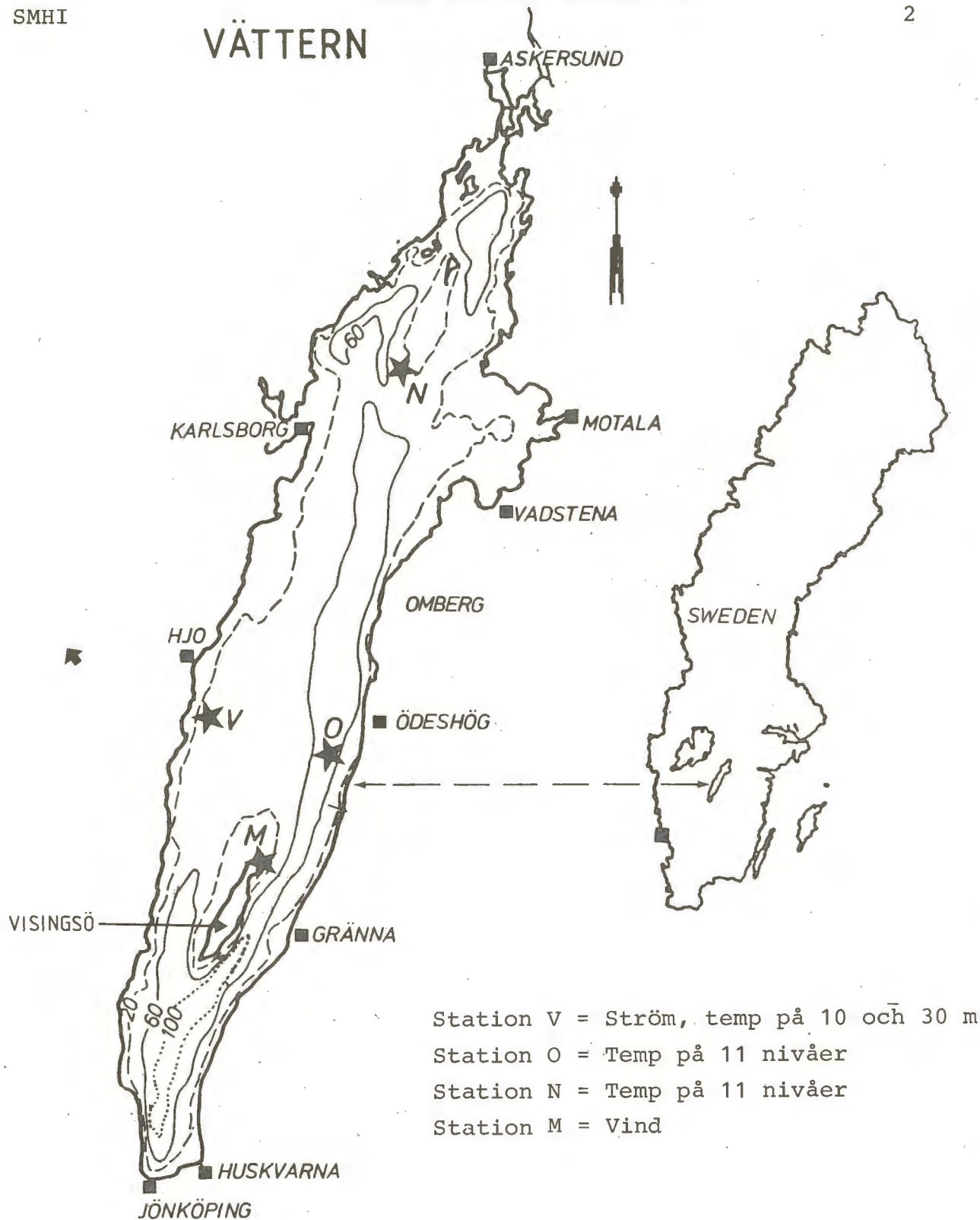


Fig 1. Karta över Vättern med mätstationer och djupkurvor.

Topographic map of Lake Vättern showing the locations of the measuring-stations. The depth are in meters.

2. MÄTPROGRAM 1977

I ett försök att närmare belysa de karakteristiska strömningsmönstrena i Vättern genomfördes under perioden juli-september 1977 en begränsad strömundersökning. Dess utformning bestämdes i första hand av att strömregistreringarna skulle tjäna som ett hjälpmedel och verifieringsinstrument i samband med datakörningar av en hydrodynamisk modell. Mätningarna utgör emellertid också ett underlag för specialiserade studier av exempelvis karakteristiska vågrörelser i sjön.

I figur 1 framgår hur de olika mätinstrumenten var placerade. Registreringarnas varaktighet samt typ av mätvärden kan utläsas av figur 2. Strömmens riktning och hastighet samt temperatur registrerades var 20:e minut på 10 och 30 m djup i station V.

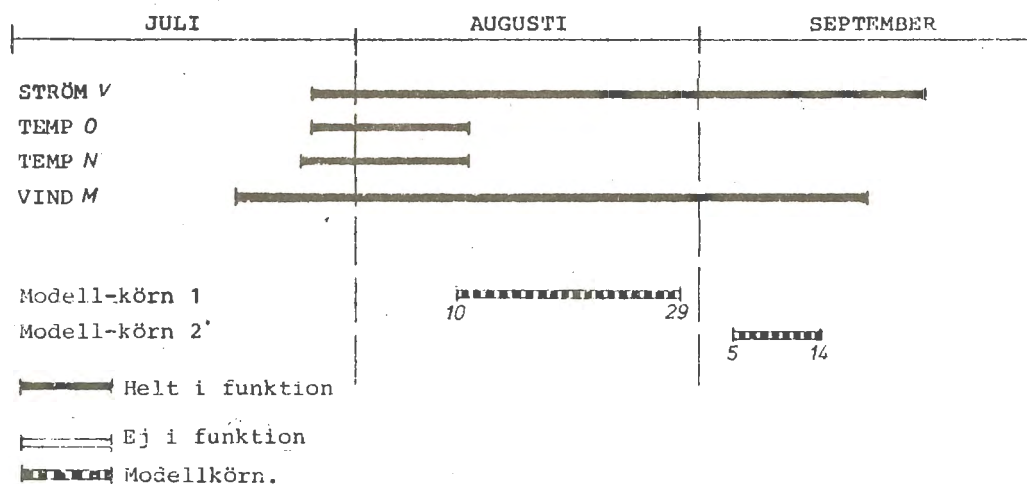


Fig 2. Mätprogram 1977. Typ av mätning samt varaktighet.
Measurement-program.

Termistorkedjorna i station E och N registrerade var 10:e minut på djupen: 5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30 och 35 m.

Vinddata erhöles endast från norra Visingsö, där registreringarna utfördes var 10:e minut från en vindmätare på 5 m höjd.

Även andra meteorologiska parametrar - strålning och lufttemperatur - registrerades av denna mätare, vars data ställdes till SMHI:s förfogande genom samarbete med Naturvårdsverkets limnologiska undersökning (NLU). Samtliga registrerande mätare var av Aanderaa-fabrikat.

I samband med utläggningen och intagningen av mätinstrumenten gjordes översiktliga temperaturkartläggningar den 28 juli och 9 augusti 1977. Samtidigt mättes även konduktivitet och syrehalt.

3. NUMERISK MODELL

Matematiska modeller som numeriskt löser de hydrodynamiska ekvationerna för strömning i sjöar har under senare år varit föremål för stort intresse, främst i samband med studier i de stora sjöarna i USA. En typ av modell vilken tidigare tillämpats på bl a Vänern (Simons, T.J., Funkquist, L., Svensson, J., 1977) och Lake Ontario (Simons, T.J.) finns utförligt beskriven av Simons, T.J. (1974). Modellen är tidsberoende och tredimensionell i den mening att sjön indelas i ett antal lager. I varje lager varierar hastighet och temperatur endast i horisontell led. Vertikala hastigheter i sjön beräknas i gränstorna mellan lagren, där också värmeutbytet mellan lagren bestäms.

I de modellkörningar som presenteras i följande kapitel, har hastigheterna initialt varit lika med noll och temperaturen konstant inom varje lager. En lämplig lagerindelning av Vättern har bedömts vara att låta större delen av sjön beskrivas genom tre lager, där det mellersta lagret är tänkt att innehålla termoklinens variationer. Områden med större djup än 50 m representeras av ett fjärde lager och består i huvudsak av djupbassängerna i södra och norra Vättern samt den långa rännan längs östra delen av sjön. En temperatursondering utförd den 9 augusti 1977 (fig 3) visar en uppmätt temperaturfördelning vilken har legat till grund för de olika lagrens begynnelse-temperatur (tab 1).

Tabell 1

Begynnelsestemperatur i modellens olika lager.		
Lager	Djup (m)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
1	0-12	14.5
2	12-27	12.0
3	27-50	8.0
4	50-115	5.0

Ett tidsberoende men i rummet homogent vindfält har fungerat som den drivande kraften i modellkörningarna.

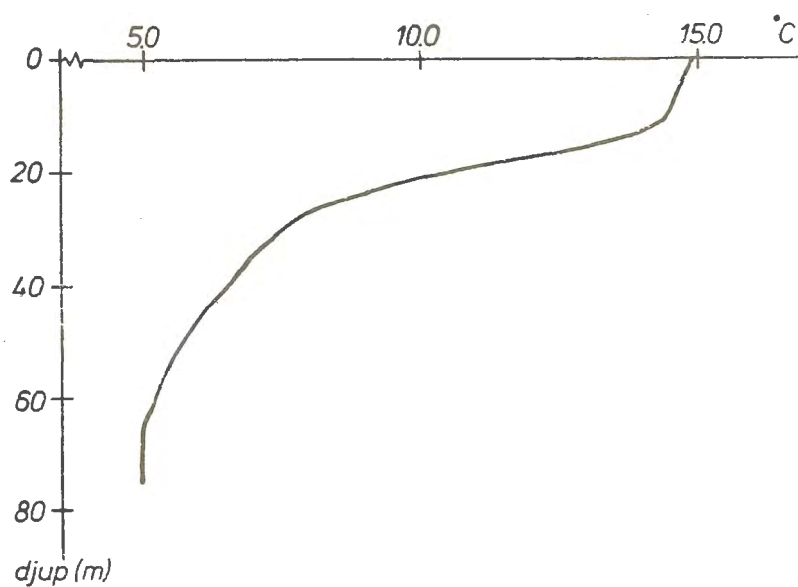


Fig 3. Uppmätt temperaturprofil den 9.8 1977 i en punkt strax nordväst om Ömberg.

Observed temperature close to Ömberg.

Ingen hänsyn har således tagits till lufttrycksvariationer och värmeutbyte mellan atmosfär och vattenyta. Eftersom den registrerande vindmätaren var placerad på 5 m höjd har en för den höjden gällande släpkraftskoefficient beräknats från motsvarande värde på samma koefficient för vinden på 10 m ($2.5 \cdot 10^{-3}$). Under antagandet om neutral skiktning i det aktuella luftlagret har värdet $3.0 \cdot 10^{-3}$ erhållits, vilket möjligen kan vara en underskattning eftersom vindmätaren var placerad en bra bit från stranden. En viss avvikelse på storleken av vindstressen är emellertid inte av avgörande betydelse i denna studie som främst är av kvalitativ art. Antagandet om ett vindfält som är oberoende av rummet är istället en större och mer svårkontrollerbar felkälla.

I tabell 2 är de använda värdena på vissa modellkoefficienter, gridavstånd och tidssteg angivna.

Tabell 2

Horisontell virvelviskositet	100 000	cm^2/s
Vertikal - " -	25	cm^2/s
Horisontell diffusivitet	100 000	cm^2/s
Vertikal - " -	0.1	cm^2/s
Gridavstånd	2.5	km
Tidssteg	30 - 60	sek

4. JÄMFÖRELSER MELLAN BERÄKNADE OCH OBSERVERADE STRÖMMAR OCH TEMPERATURER.

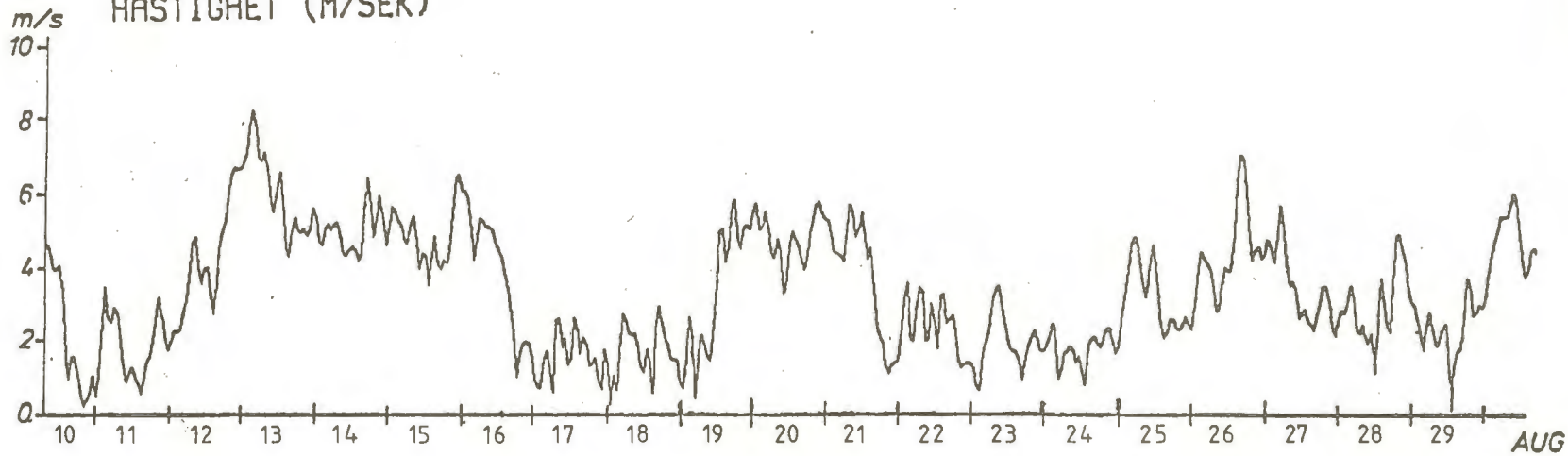
För att jämföra modellens resultat med observerade värden på ström och temperatur har två perioder med 20 (770810 - 0829) resp 10 dygn (770905 - 0914) valts ut. Vid båda tillfällena var sjön väl skiktad.

Vindstyrkor över 10 m/s registrerades endast under den senare av de två utvalda perioderna. I fig 4 a, b visas vindens hastighet och riktning med de mest högfrekventa (period mindre än 3 timmar) svängningarna bortfiltrerade.

Den första perioden på 20 dygn karakteriserades av ett långvarigt högtryck med centrum över norra Skandinavien. Ur vinddiagrammet kan i grova drag tre större vindimpulser utläsas. I den första med en varaktighet på ca fyra dygn är vinden nordostlig, ca 6 m/s, och i den andra är vinden mer ostlig och kopplad till en norrifrån passerande kallfront. Den tredje kraftiga vindimpulsen är till största delen resultatet av två västerifrån passerande fronter, den 25 - 26.8 och 29.8.

Relativt stora vindhastigheter uppmättes under den andra studerade perioden. Vädret karakteriserades av flera passerande fronter, vilka kan relateras till de markanta pikarna i vindhastighetsdiagrammet (den 5, 7, 9, 12 och 14.9). Vindhastigheter över 15 m/s registrerades den 12.9 i samband med ett lågtryck vars centrum passerade rakt över Vättern.

HASTIGHET (M/SEK)



RIKTNING (GRADER)

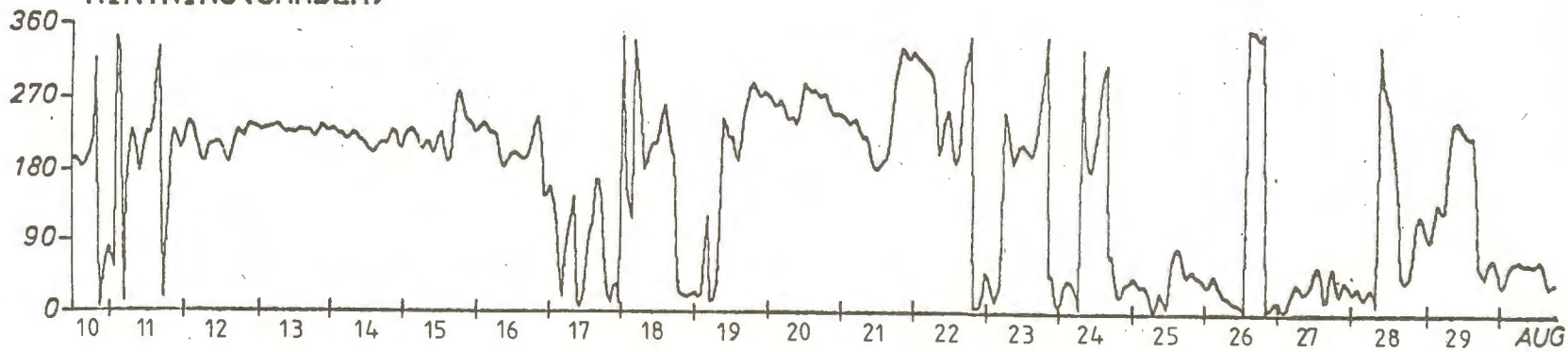


Fig 4 a. Registrerade vindar på Visingö under tiden 10.8 - 29.8 1977.
Winds recorded on Visingö during 10. 8 - 29.8 1977,

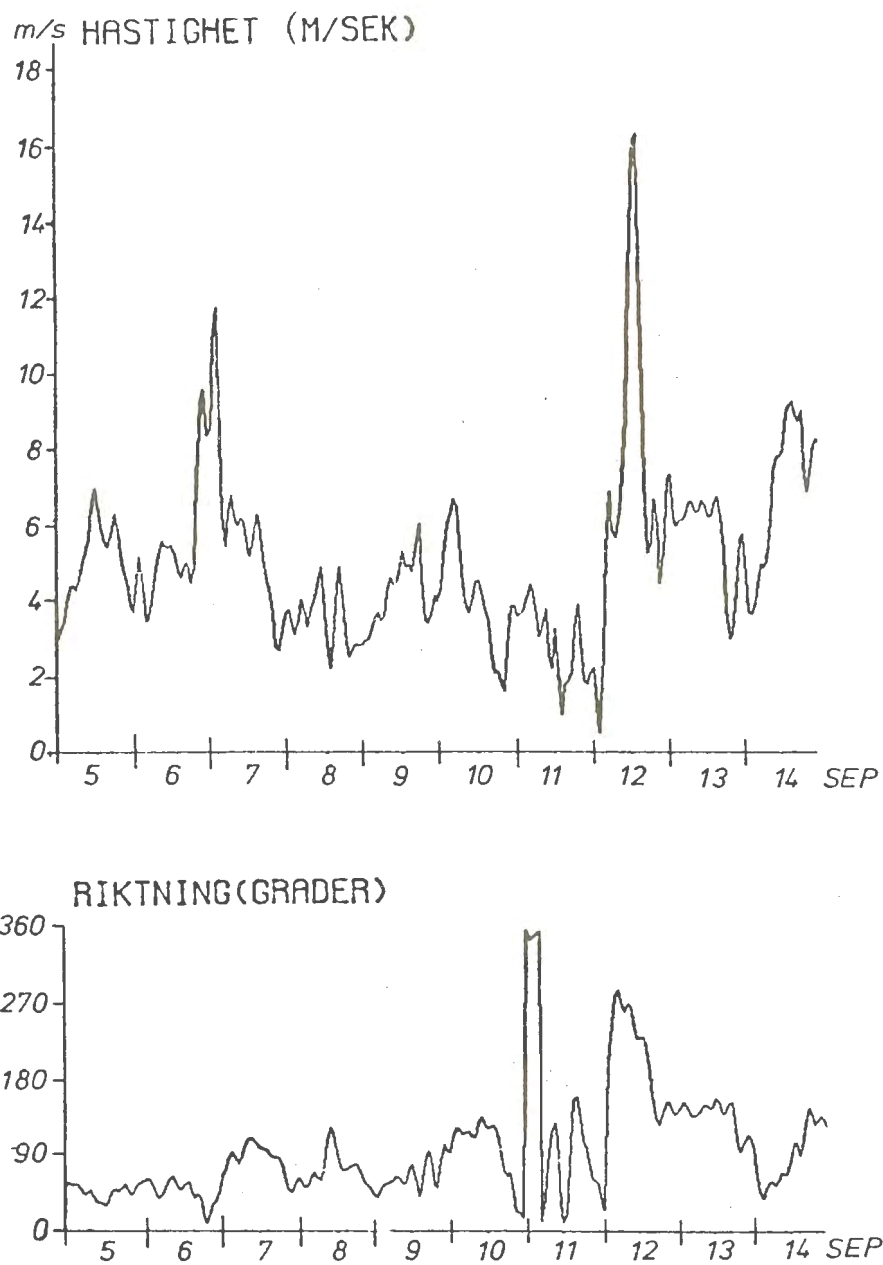


Fig 4b. Registrerade vindar på Visingsö under tiden 5.9 - 14.9 1977.

Winds recorded on Visingsö during 5.9 - 14.9 1977.

De nedan presenterade jämförelserna mellan modellberäkningar och observerade värden på ström och temperatur är uteslutande baserade på registreringar från vertikal V. Termistorkedjorna i vertikal O och N togs upp redan den 10.8.

De observerade strömmarna på 10 och 30 m djup för perioden 10.8 - 29.8 finns återgivna i figur 5 och 6 i form av timvärden vilka erhållits som medelvärde av 3 st värden med 20 minuters intervall. Motsvarande värden från modellen framgår av samma figurer. De senare värdena är filtrerade så att svängningar av samma och högre frekvens än tröghetssvängningar till största delen är borttagna. Motsvarande filtrering har genomförts för temperaturerna. I figur 5 och 6 kan för första perioden tre stycken markanta strömimpulser utläsas vilka är tydligt kopplade till motsvarande vindimpulser i figur 4a.

I modellen är med undantag av tiden för den andra vindimpulsen strömmens hastighet och riktning i översta lagret väl i överensstämmelse med den observerade på 10 m djup. Orsaken till den i modellen svagt utbildade strömmen under dygnet 18 - 20.8 är antagligen att vindens styrka och riktning var mycket ojämnt fördelad över sjön. Exempelvis rapporterades åskbyar i samband med den passerande kallfronten.

Registreringar från 30 m visar på en svag ström i huvudsak bestående av svängningar nära tröghetsperioden under de första två tredjedelarna av perioden. Dygnet 21 - 26.8 är däremot intressantare, då de visar en väl utbildad returströmning på 30 m djup. I modellen kan detta återfinnas i dess tredje lager (fig 7), där emellertid amplituden på strömmen är underskattad. I slutet av perioden finns tendens till en i vertikal led mer homogen strömning söderut, något som också antyds i modellen.

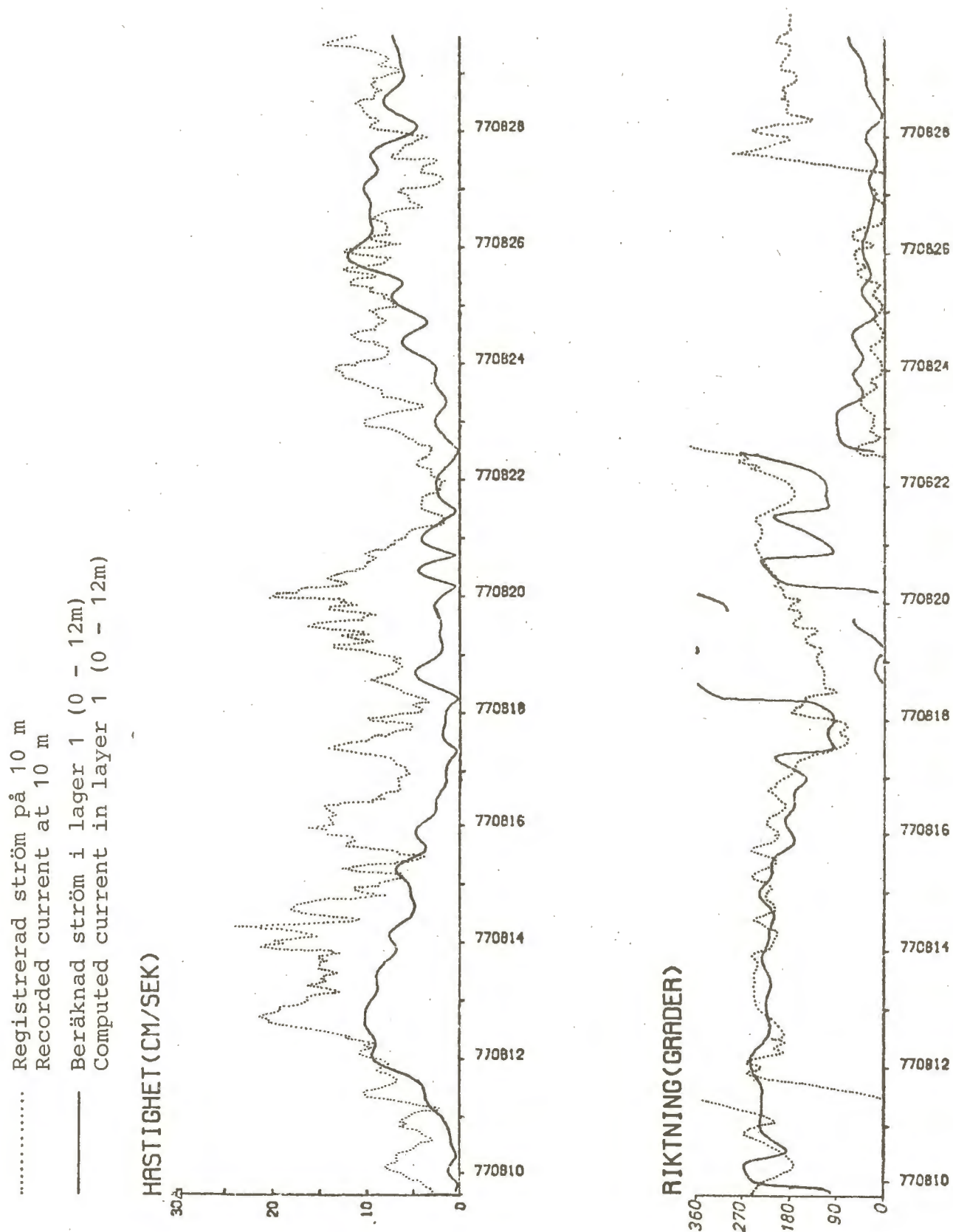
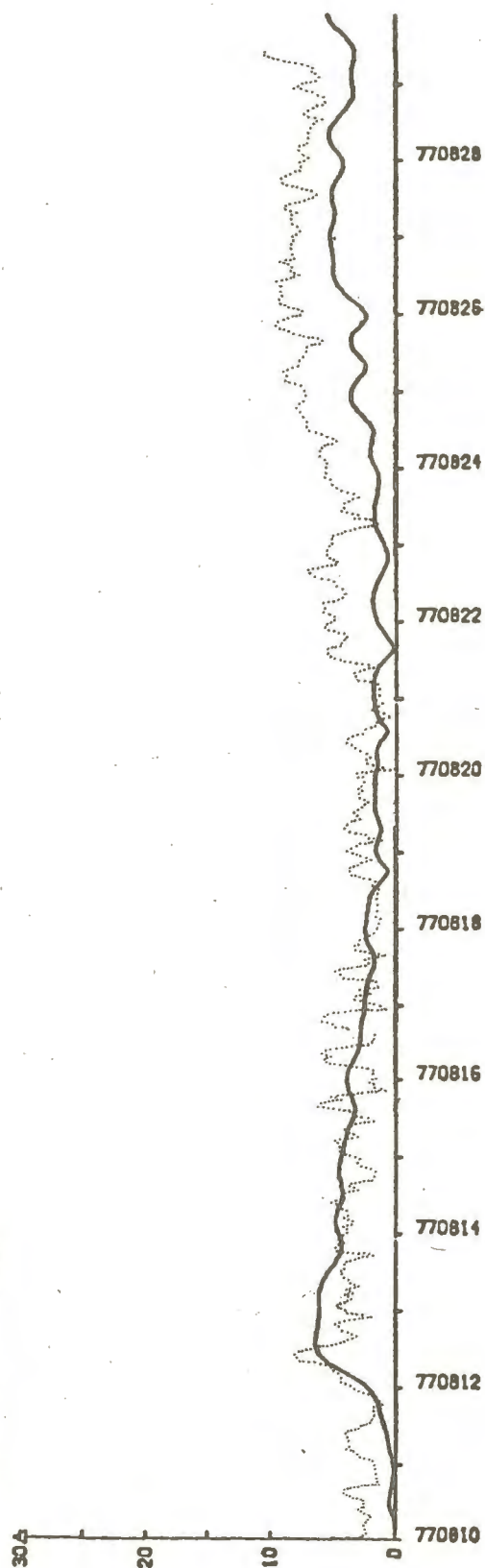


Fig 5. Registrerad och beräknad ström i vertikal V under tiden 10.8 - 29.8 1977.

Recorded and computed current at station V during 10.8 - 29.8 1977.

..... Registrerad ström på 30 m
 Recorded current at 30 m
 — Beräknad ström i lager 2 (12 - 27 m)
 Computed current in layer 2 (12 - 27 m)

HASTIGHET (CM/SEK)



RIKTNING (GRADER)

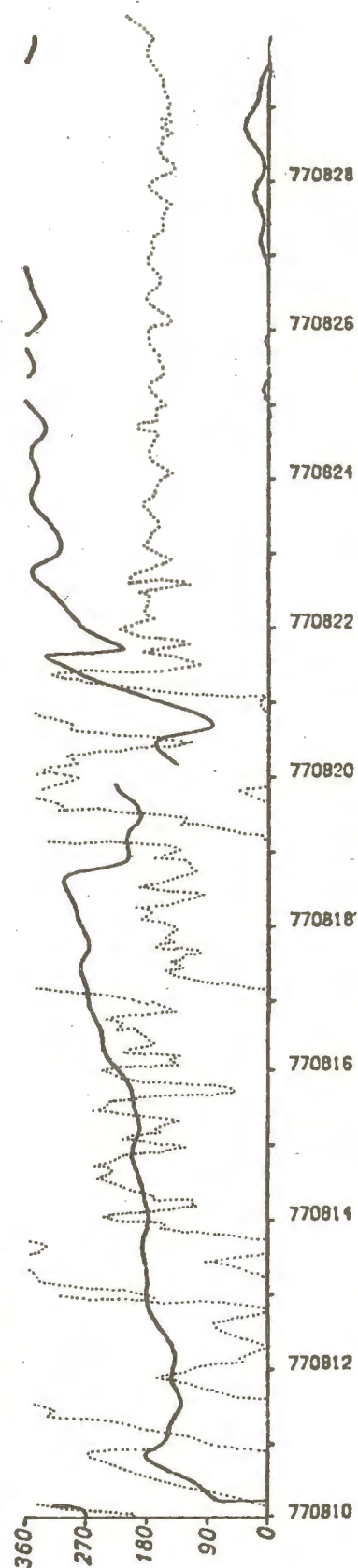


Fig 6. Registrerad och beräknad ström i vertikal V under tiden 10.8 - 29.8 1977.

Recorded and computed current at station V during 10.8 - 29.8 1977.

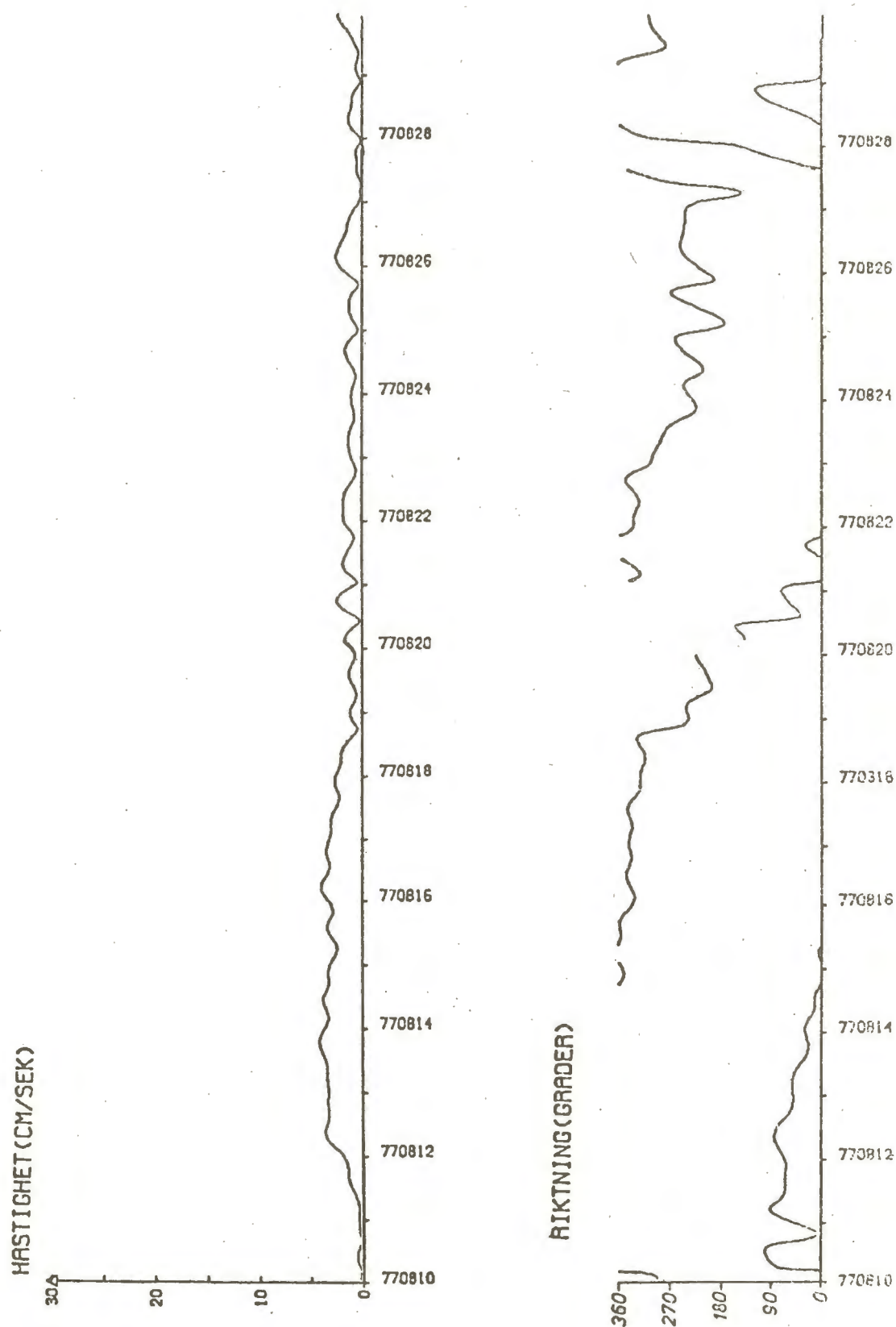


Fig 7. Beräknad ström i vertikal V för lager 3 (27 - 50 m) under tiden 10.8 - 29.8 1977.

Computed current at station V for layer 3 (27 - 50 m) during 10.8 - 29.8 1977.

Jämförelser mellan beräknad och observerad temperatur (fig 8) visar på samma svårigheter för modellen att tillräckligt beskriva förhållandena i samband med den andra vindimpulsen. Nedvällningen under den första perioden är däremot markant och väl simulerad i modellen om än något kraftigare än den observerade. Under senare delen av perioden då vinden vridit till syd fås en motsatt effekt och vattnet blir kallare, främst i ytlagret. Detta framgår också klart från modellberäkningarna.

De många och kraftiga svängningarna i vinden under perioden 5.9 - 14.9 1977 återspeglas också i strömregistreringarna, se figur 9. Strömmarna på 10 och 30 m djup följer varandra väl, speciellt under tiden för de kraftigaste vindarna. En tydlig tvålagersströmning kan dock utläsas under dygnet 5 - 6.9, 9 - 11.9 samt 14.9, vilket också framgår av temperaturregistreringarna.

I modellen är de verkliga förhållandena förvånansvärt väl simulerade. Den 12.9 har den beräknade strömmen en avvikande riktning, vilket säkert sammanhänger med det synnerligen inhomogena vindfältet över sjön som förekom i samband med det djupa lågtrycket vars centrum passerade rätt över Vättern. Modellen beskriver även den tidigare omtalade tvålagersströmningen, om än med en underskattning av returströmningen i modellens tredje lager (fig 10). I temperaturmätningarna (fig 11) kan en kraftig uppvällning märkas under dygnet 7 - 8.9, liksom en nedtransport av varmare vatten under de tre sista dygnet i perioden. Uppvällningen har en något längre varaktighet i modellen, men i övrigt tycks sjöns termiska variationer återges väl.

I fig 12a,b visas den beräknade medelströmningen under de första 10 dygnet av den först studerade perioden. Den stabila vindriktningen mellan N och NO under de

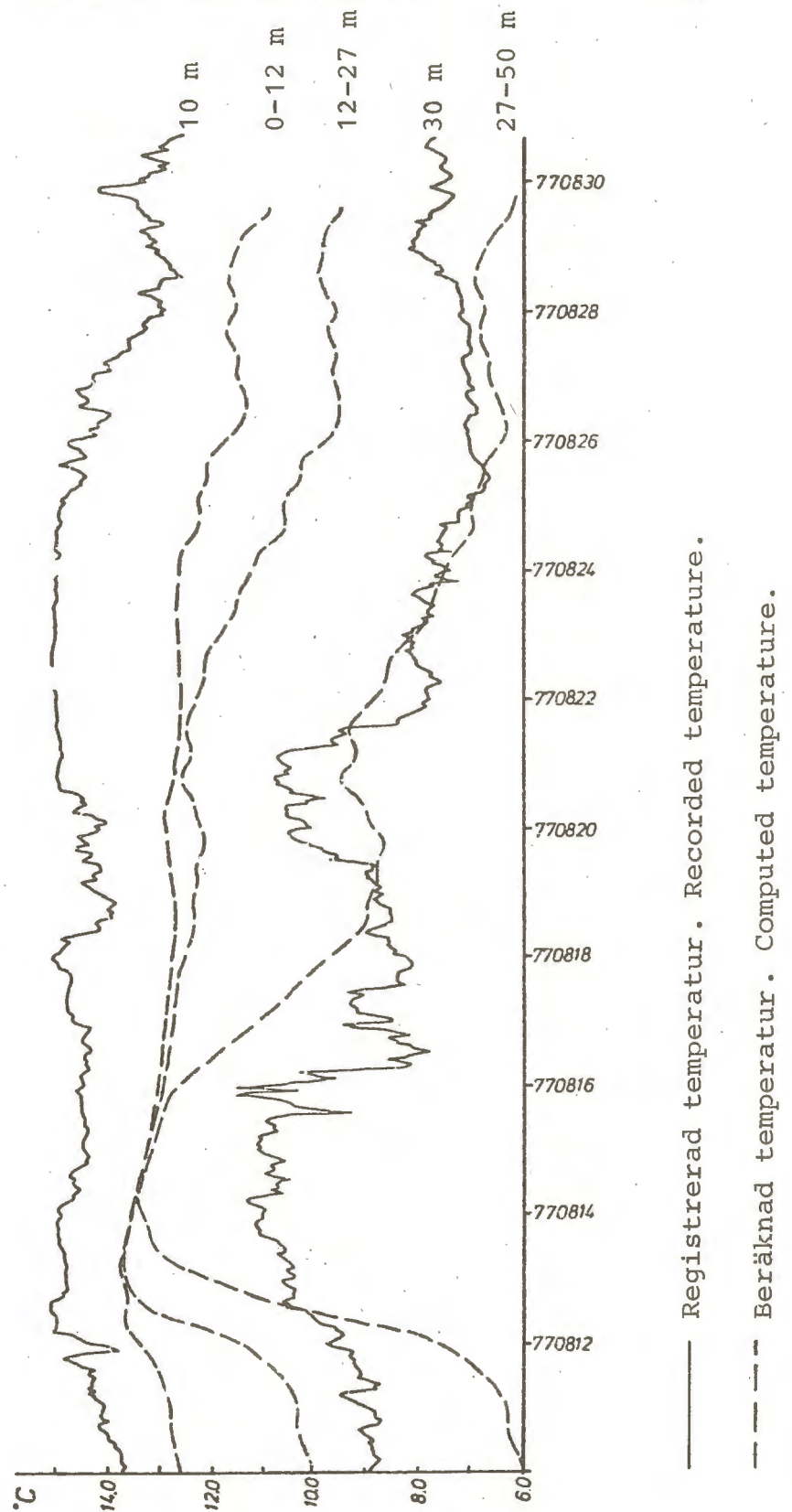


Fig 8. Registrerad och beräknad temperatur i vertikal V under tiden 10.8 - 30.8 1977.

Recorded and computed temperature at station V during 10.8 - 30.8 1977.

..... Registrerad ström på 10 m
 Recorded current at 10 m
 — Beräknad ström i lager 1 (0 - 12 m)
 Computed current in layer 1 (0 - 17 m)

..... Registrerad ström på 30 m
 Recorded current at 30 m
 — Beräknad ström i lager 2 (12 - 27m)
 Computed current i layer 2 (12-27m)

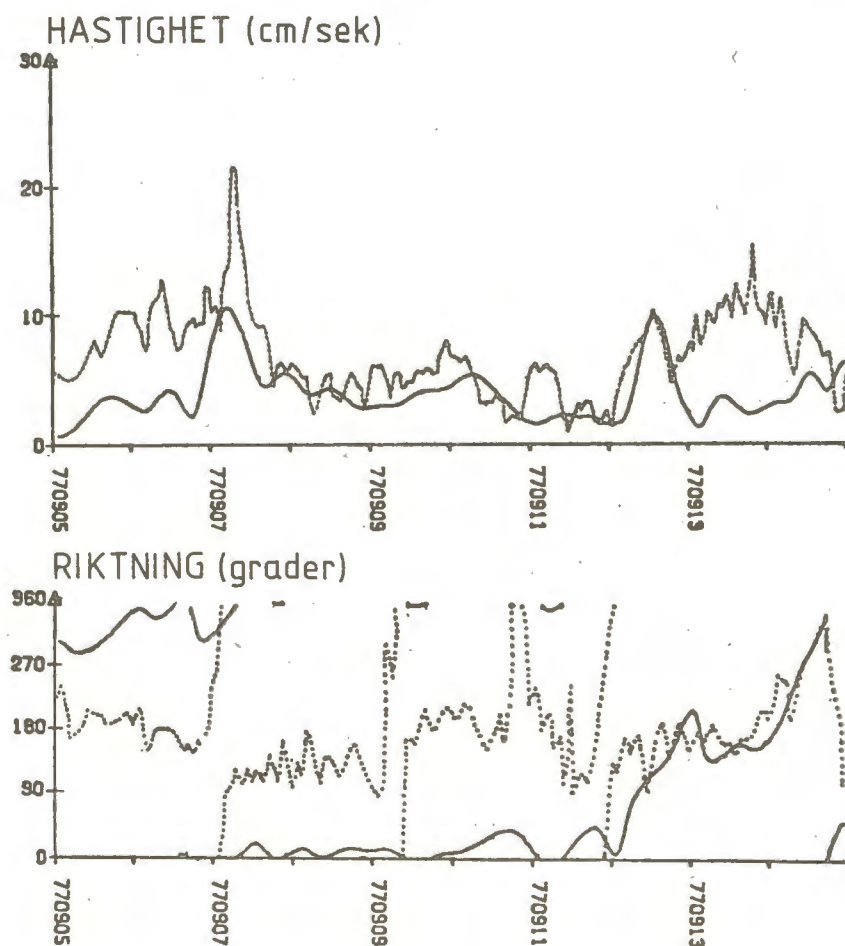
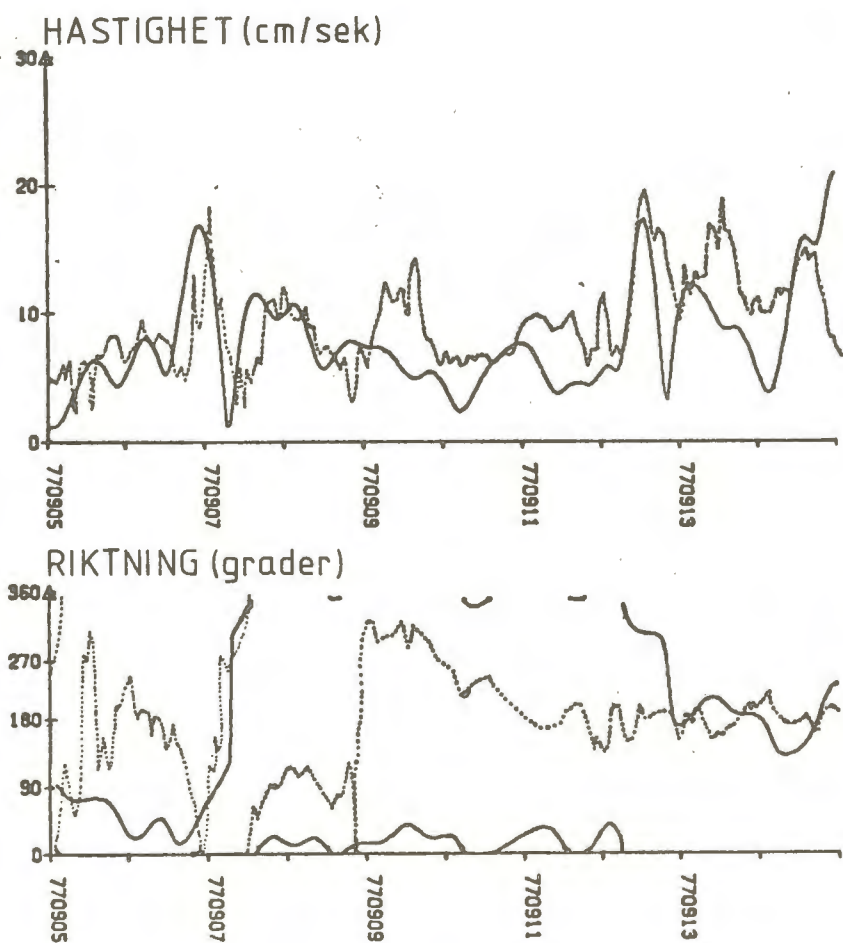


Fig 9. Registrerad och beräknad ström i vertikal V under tiden 5.9 - 14.9 1977.
Recorded and computed current at station V during 5.9 - 14.9 1977.

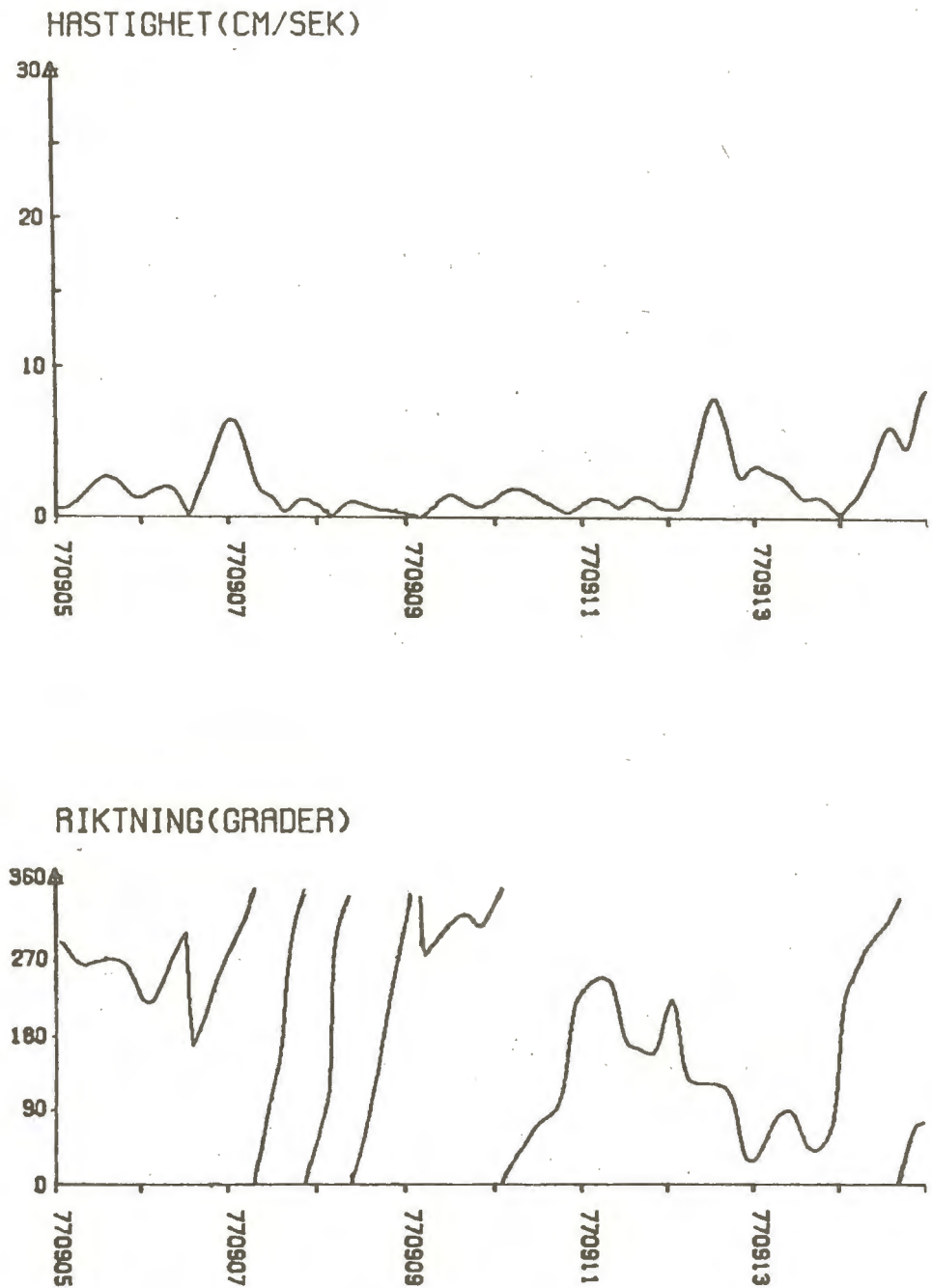


Fig 10. Beräknad ström i vertikal V för lager 3 (27 - 50 m) under tiden 5.9 - 14.9 1977.

Computed current at station V for layer 3 (27 - 50 m) during 5.9 - 14.9 1977.

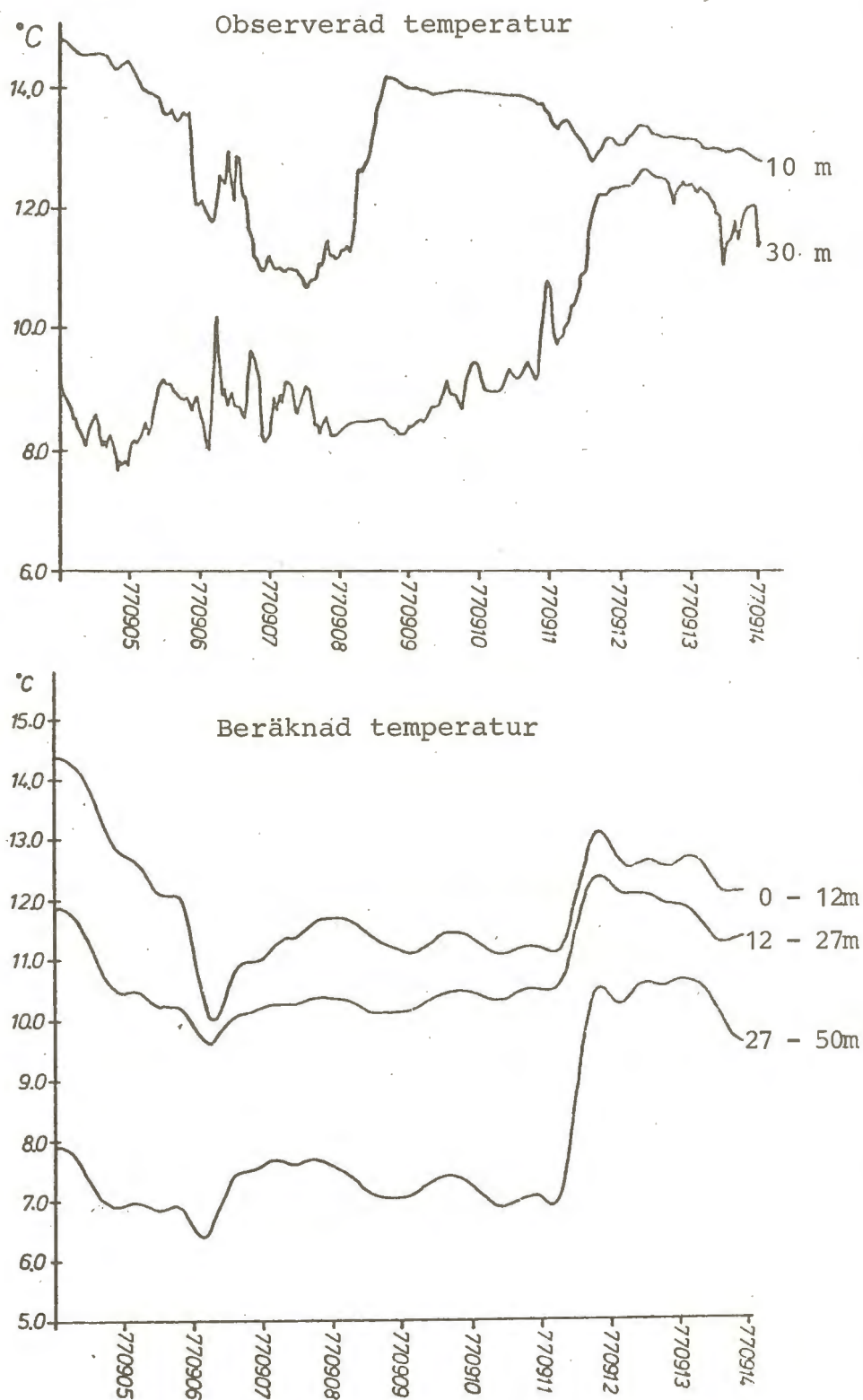


Fig 11. Registrerad och beräknad temperatur i vertikal V under tiden 5.9 - 14.9 1977.

Recorded and computed temperature at Station V during 5.9 - 14.9 1977.

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.

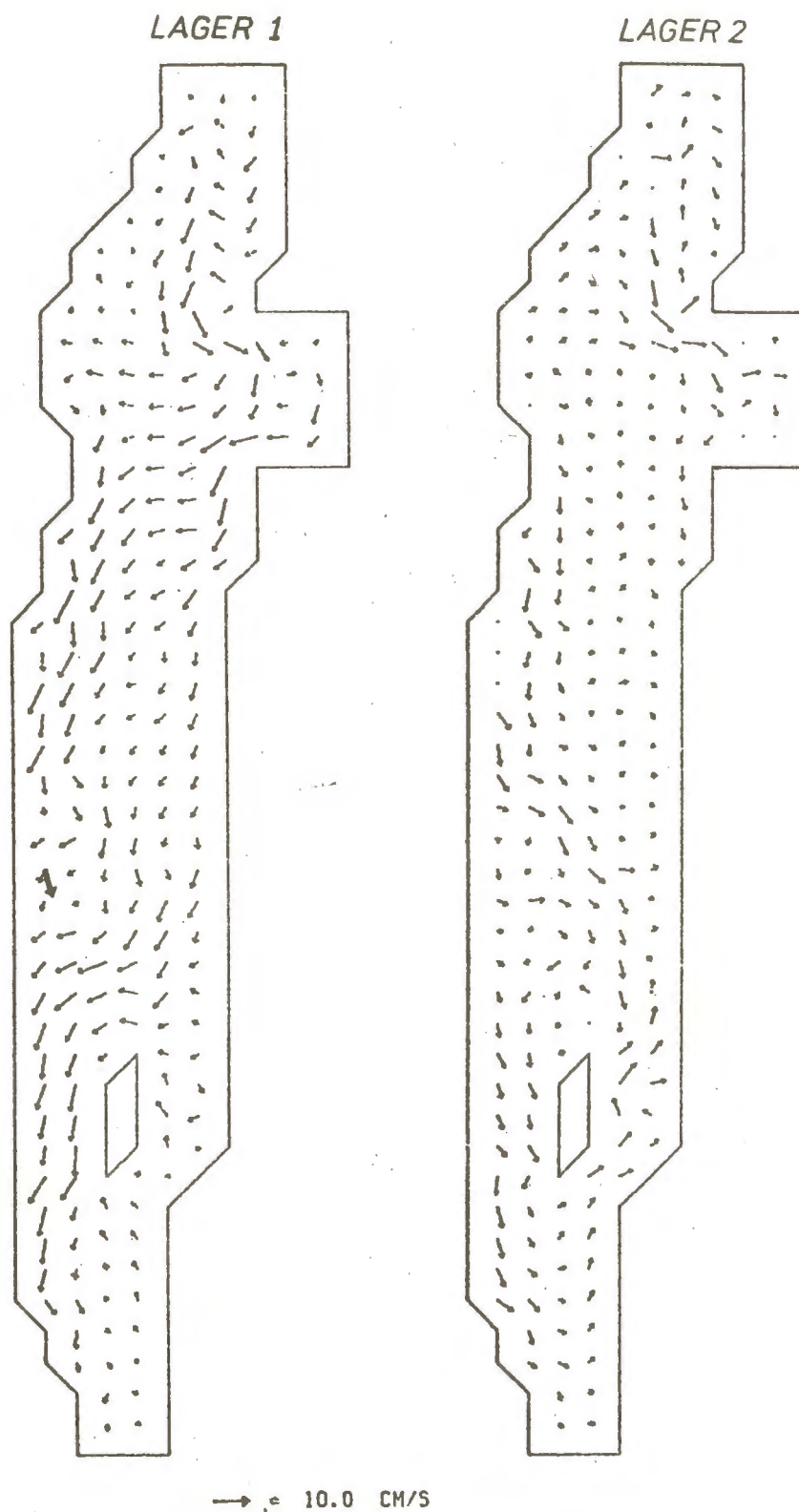


Fig 12 a. Karta över beräknad medelströmning för lager 1 och 2 i Vättern under tiden 10.8 - 19.8 1977.

Computed mean-current for layer 1 and 2 in Lake Vättern during 10.8 - 19.8 1977.

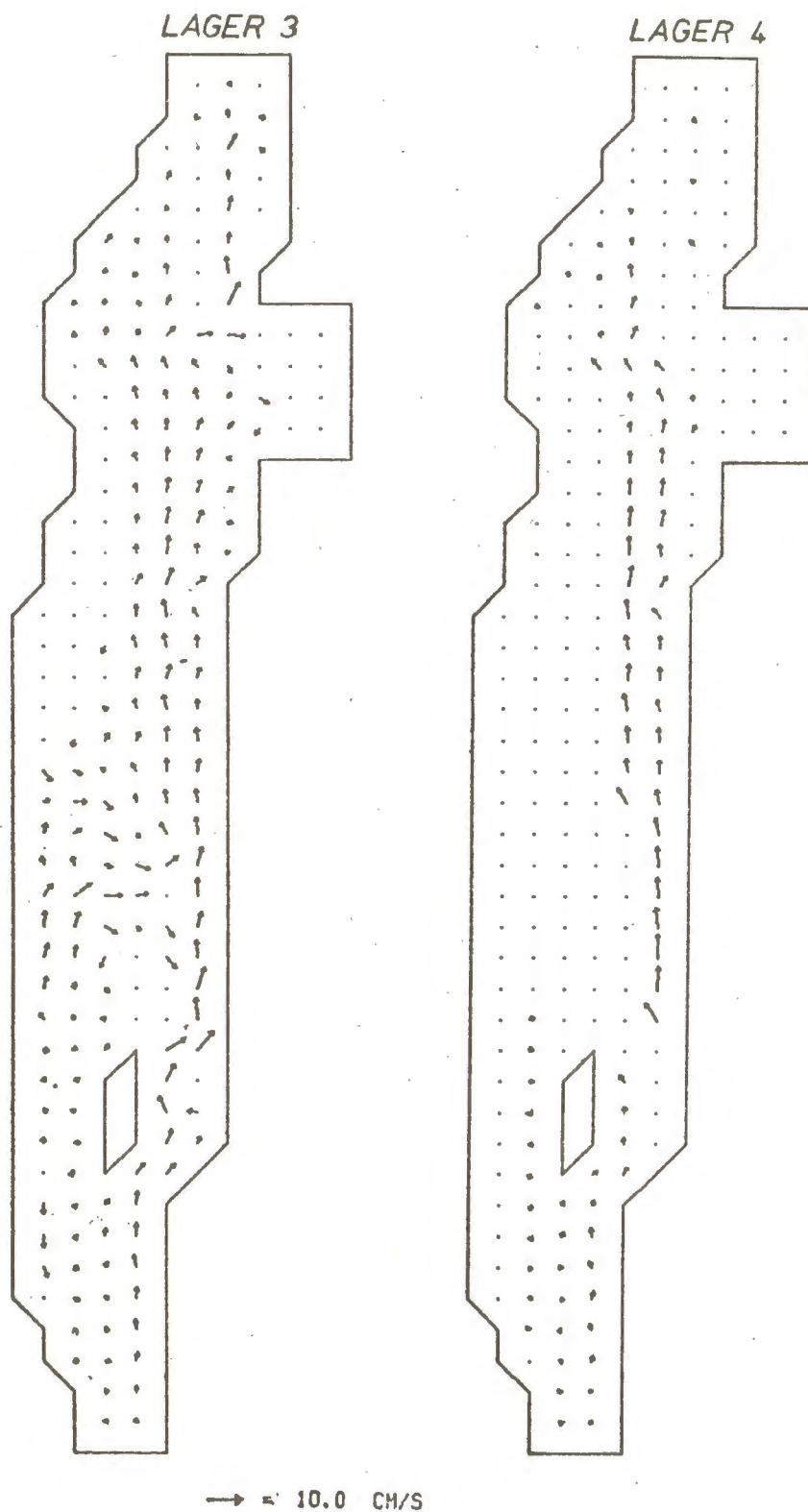


Fig 12 b. Karta över beräknad medelströmning för lager 3 och 4 i Vättern under tiden 10.8 - 19.8 1977.

Computed mean-current for layer 3 and 4 in Lake Vättern during 10.8 - 19.8 1977.

tio dyggen har framkallat karakteristiska cirkulationsmönster i modellen. Speciellt intressant är strömningen runt Visingsö, där den cyklonala cirkulationen betyder att in- och uttransporten till den södra bassängen sker relativt homogent genom sunden V resp O om ön. Denna grova bild av transporterarna förbi Visingsö har också en förankring i pendelströmmätningar utförda av NLU under aug-sept 1977 (muntlig information). Det finns dock skäl att antaga en mer differentierad strömning då modellen inte är helt idealisk för den kustnära strömningen och endast har två beräkningspunkter tvärs sunden längs Visingsö. En ytterligare moturs cirkulationscell i höjd med Omberg är emellertid mer tveksam, och motsägs till stor del av den registrerade medelströmmen på 10 m djup vertikalen öster om Hjo (utmärkt med en fetare pil i fig 12 a).

5. ANALYS OCH DISKUSSION AV MÄTNINGARNA 1977.

Det begränsade underlaget i form av ström- och temperaturregistreringar som för närvarande finns tillgängligt från Vättern är naturligtvis en otillräcklig grund för en utförlig beskrivning av cirkulationen i sjön. Det finns emellertid ett par omständigheter som bör underlätta en sådan beskrivning. Sjöns kanalliknande utseende och relativt jämna bottenpografi stämmer väl överens med antaganden som görs för att nå resultat genom studier av analytiska modeller. Dessutom är sjön i många delar lik Lake Ontario, i detalj studerat genom ett utförligt mätprogram, och variationer från flera resultat bör kunna överföras till Vättern.

En jämförelse med resultat från teoretiska studier av kanalliknande bassänger underlättas av att sektorerna kring sjöns längdaxel innehåller de förhärskande vindriktningarna (tabell 3). Mätningarna är från Karlsborg och det är sannolikt att vindriktningar i sjöns längdriktning är ännu mer dominerande över vattenytan.

Tabell 3.

Karlsborg. Frekvensfördelning av vindriktningar för juli-augusti 1961-75 i procent.									
	Lungt	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
Juli	4.4	7.9	8.3	8.2	16.2	20.4	21.0	8.2	5.5
Aug	7.7	7.8	8.4	6.8	15.8	20.0	18.7	9.5	5.2

Beträffande ytvågor (seicher) erhöll Bergsten, F. 1926, en anmärkningsvärt god överensstämmelse för frekvens och amplitud mellan observationer och beräknade värden. För interna vågor, dvs vågor i språngskikt, är det lämpligt att låta en approximation i form av en oändligt lång kanalliknande bassäng innehålla två var för sig homogena lager, men med avvikande tätheter. I det fallet ger förenklingar av de hydro-

dynamiska ekvationerna en typ av lösningar i form av s k Kelvin-vågor. Om bassängen stängs i båda ändarna kan dessa vågor ändå existera, men modifieras i samverkan med andra vågtyper. För en mer detaljerad beskrivning hänvisas till Mortimer, C. 1974, varifrån fig 13 är hämtad och visar hur vågen är koncentrerad till kustzonen och med en amplitud som avtar exponentiellt med avståndet till kusten. Normalt observeras endast den första moden, vilken med hastigheten c_1 (definieras senare) rör sig moturs längs kusten. I längdriktningen är denna mod av sinusform med halva våglängden lika med bassängens längd. Observationer av denna typ av vågor har bl a gjorts i Lake Ontario (Csanady, G. T. och Scott, J. T., 1974), där emellertid närvaron av ytterligare en våg (topografisk våg) försvårar tolkningen. Den i naturen mest modifierande faktorn för vågor av Kelvin-typ är annars den varierande bottentopografin.

I Vättern är en Kelvin-liknande vågs rörelse tydligt återgiven i temperaturförloppet från vertikaler 0 och N under en tvåveckorsperiod i månadsskiftet juli-augusti 1977 (figur 14). I station 0 och i periodens senare del även i station N kan en långperiodisk (längre än 1-2 dygn) höjning och sänkning av termoklinen spåras. Perioden uppskattas till ca 136 timmar, vilket med Vätterns längd, lika med 120 km, skulle betyda en fortplantningshastighet av ca 49 cm/s. Ungefär samma hastighet fås då avståndet mellan stationerna 0 och N divideras med tidsskilladen mellan vågens passage genom respektive station. Även temperatur- och strömregistreringarna i station V stöder teorin om existensen av interna vågor av Kelvin-typ. Sålunda framgår av fig 14 och fig 15 att högt liggande språngskikt i station 0 motsvaras av ett lågt liggande språngskikt i station V. Samtidigt som vågtoppen passerar station V märks en topp i den sydgående strömmen i samma station medan strömmen vänder mot norr då vågdalen passerar (fig 16).

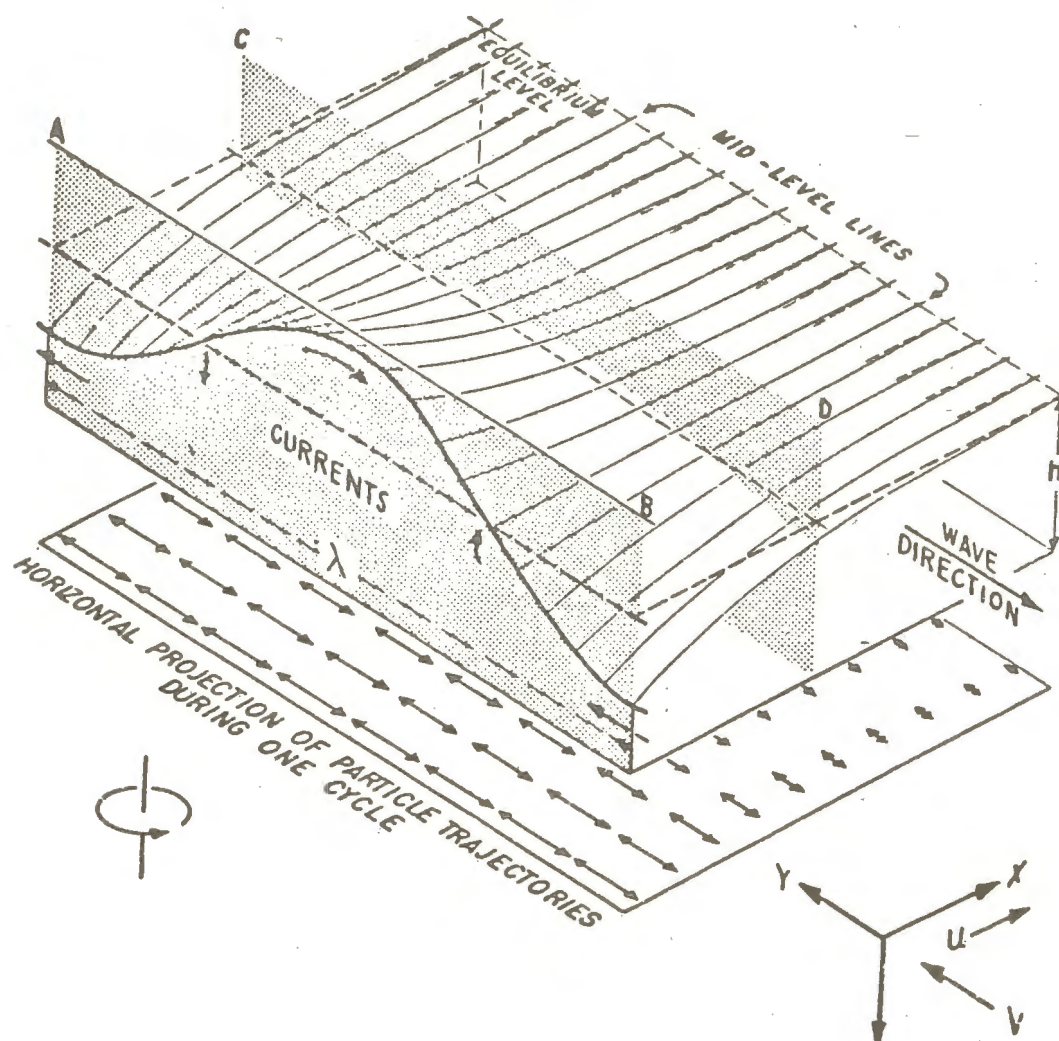
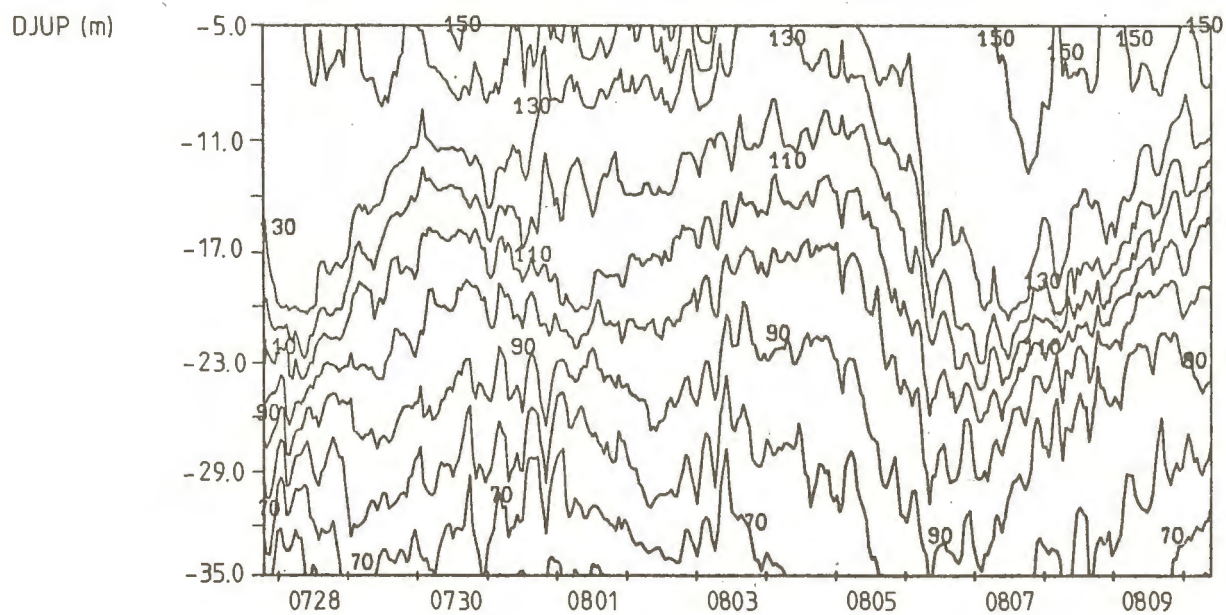


Fig 13. En våglängd, λ , av en Kelvinvåg som går längs ena sidan A-B av en bred kanal (endast ena kanalsidan visas). Kanalen har konstant djup och roterar moturs mot en vertikal axel. De utritade strömpilarna ger strömmen i det undre lagret. Vågamplituden och strömmen avtar exponentiellt i en riktning vinkelrätt mot AB (från Mortimer, 1974).

A long Kelvin-wave (from Mortimer, 1974).

VERTIKAL O



VERTIKAL N

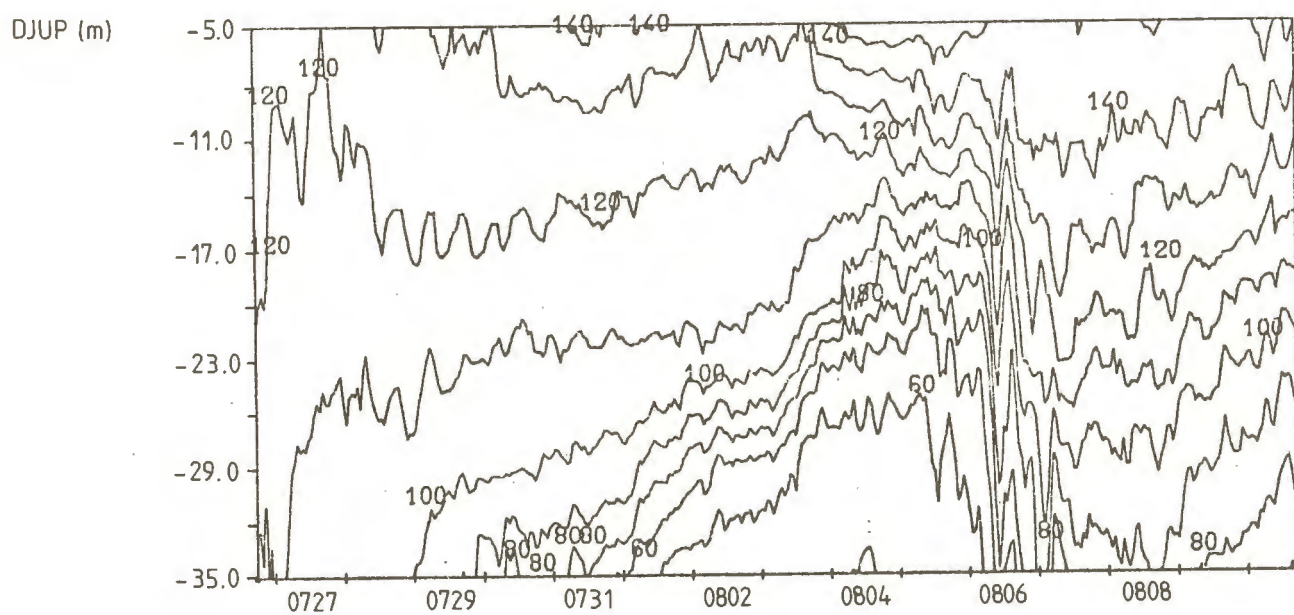


Fig 14. Registrerad temperatur i vertikalerna O och N under tiden 27.7 - 10.8 1977.

Recorded temperature in stations O and N during 27.7 - 10.8 1977.

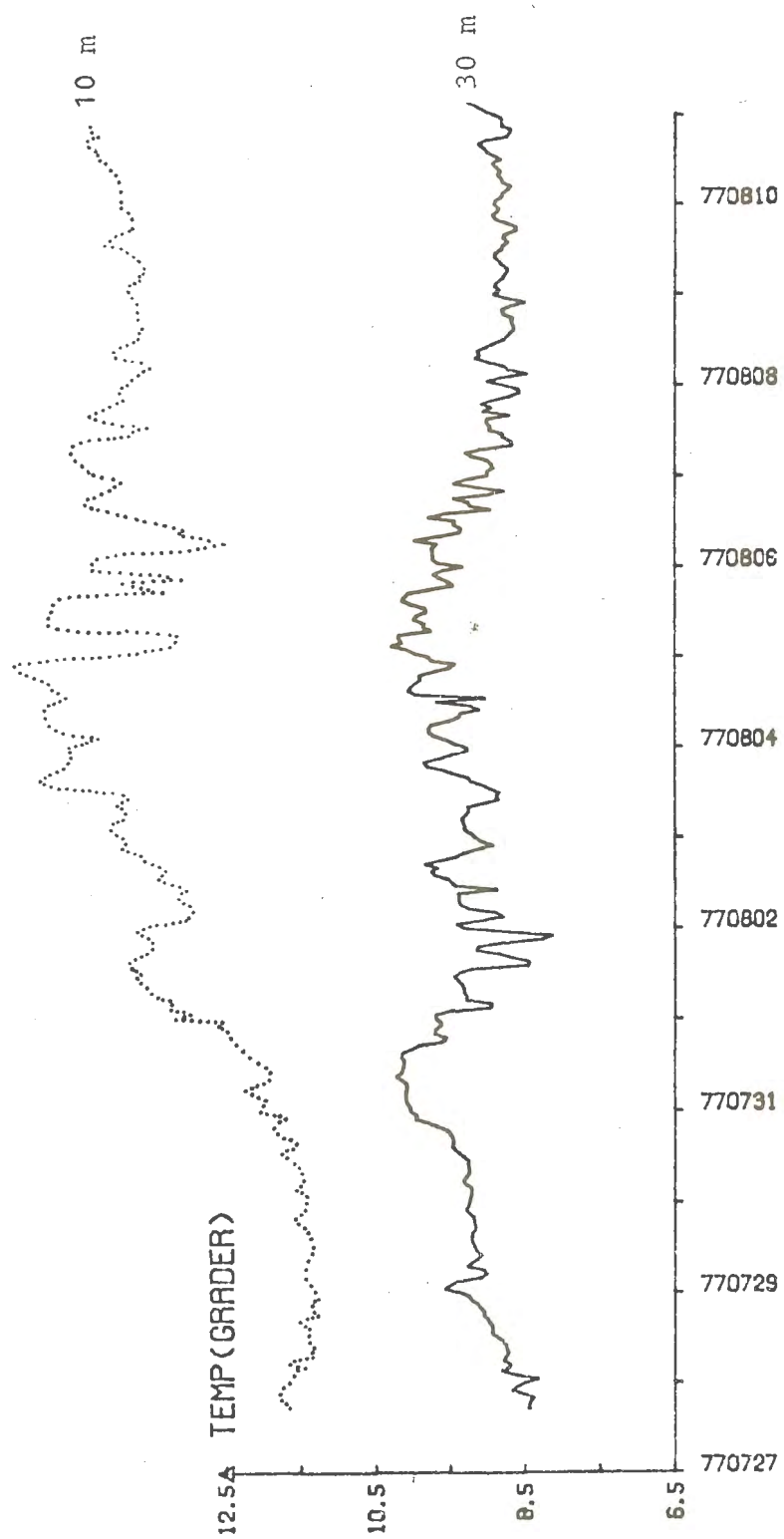


Fig 15. Registrerad temperatur i vertikal V under tiden 27.7 - 12.8 1977.

Recorded temperature in station V during 27.7 - 12.8 1977.

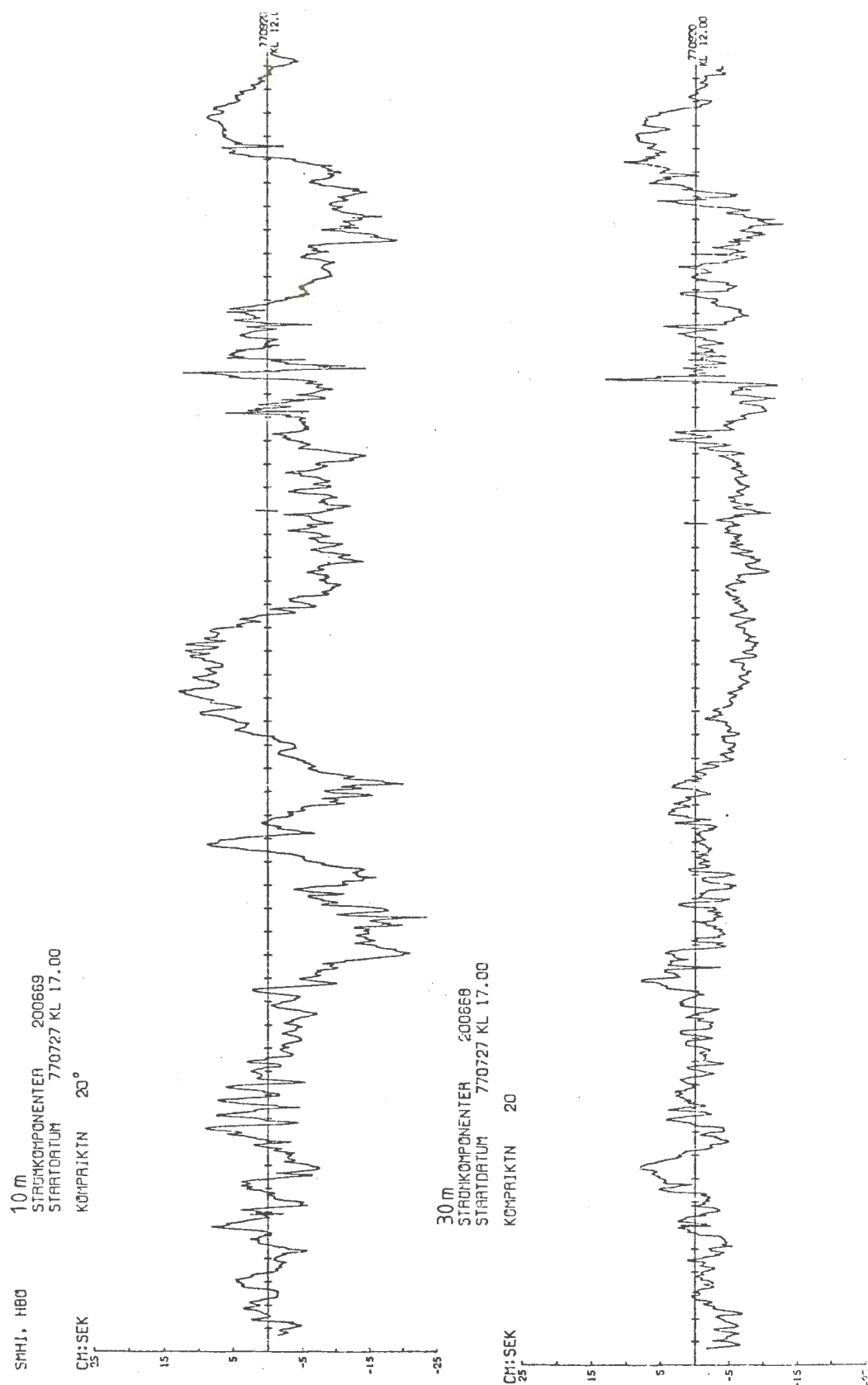


Fig 16. Registrerad längsgående ström i vertikal V under tiden 27.7 - 20.9 1977.

Recorded longshore current in station V during 27.7 - 20.9 1977.

En bidragande orsak till att ovan nämnda vågrörelser är så tydligt utvecklade i Vättern är förutom att sjön saknar skärgårdsområden, att bottentopografin är relativt jämn. Detta minskar strömmarnas friktion mot botten och är av störst betydelse i kustområdena, där strömmen också är starkast. Kustströmmar i form av Kelvinvågor har då möjlighet att existera i flera cykler genom att nedbrytningen av deras energi sker relativt långsamt. Kraftiga vindimpulser bryter emellertid snabbt ner etablerade vågor och det är också vanligt att Kelvinvågor observeras under perioder med svaga vindar.

Det har visat sig både genom teoretiska studier och observationer i fält (Mortimer, C. 1974) att övriga svängningar av betydelse i språngskiktet har en frekvens av storleksordningen strax över tröghetsfrekvensen. Dessa svängningar kan då förekomma i form av s k Poincaré-vågor och är mest framträdande i det inre av bassängen. Perioden för de lägsta moderna har beräknats i fig 17.

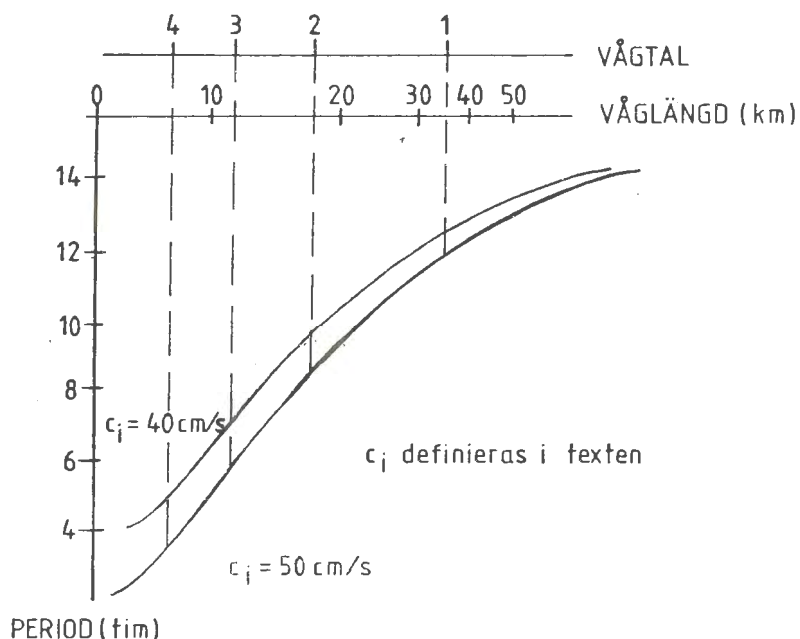


Fig 17. Våglängder tvärs sjön och motsvarande period för Poincarévågor.

Relationship between cross basin wavelength and Poincaré-wave period.

Spektralanalys har utförts på de registrerande strömmarna i vertikal V med en metod som särskiljer de olika rotationskomponenterna i strömmen (fig 18). En utförlig beskrivning av metoden finns bl a i Gonella, J. 1972, där också tillämpningar behandlas.

Fördelen med att särskilja de olika rotationskomponenterna, medurs och moturs vridning av strömmen i en fix punkt, är att Poincaré-vågor är sammankopplat med en medurs rotation av strömmen. Det är emellertid inte säkert att alla svängningar med medurs rotation av strömmen är associerade med Poincaré-vågor. Av rotationsspektrat framgår att medurskomponenten dominerar moturskomponenten både på 10m och 30m djup över nästan hela frekvensbandet. Någon egentlig topp vid tröghetsfrekvensen (1.714 cykler/dygn) existerar inte, och för högre frekvenser är det tydligt att rotationsspektrat från 10m djup har ett par toppar vid 2.243 (10.7 tim) och 4.503 cykler/dygn (5.3 tim). Registreringarna från 30m djup innehåller flera toppar i medurskomponenten, varav 2.069 (11.6 tim), 2.637 (9.1 tim), 3.000 (8.0 tim) och 3.582 cykler/dygn (6.7 tim) är de mest signifikanta. Ett försök att relatera dessa svängningar till Poincaré-vågor genom att jämföra med de teoretiska beräkningarna i fig 17 resulterar i att 11.6-timmarssvängningen på 30m djup motsvarar en uninodal våg. 6.7-timmarssvängningen från samma djup skulle motsvara en trinodal våg, medan 5.3-timmarssvängningen från 10m djup kan kopplas till en fyrnodal våg.

I rotationsspektrat från 10m djup syns en tydlig topp vid frekvensen 1.500 cykler/dygn (16 tim). Toppen är något mindre framträdande i spektrat gällande 30m djup. Även om denna topp bara ligger ett steg i frekvensbandet från tröghetssvängningen, är det troligt att den existerar i verkligheten,

vilket också framgår av en studie av registreringarna i fig 16. Liknande svängningar med en frekvens strax under tröghetsfrekvensen har även observerats i Lake Ontario (Rao, S.T., Czapski, U. och Sedefian, L., 1977). Där förklaras svängningen som ett troligt resultat av en icke-linjär samverkan mellan lågfrekventa kustbundna vågor (Kelvin-vågor) och vågor med tröghetsfrekvensen.

Merparten av energin i strömmarna vid vertikal V ligger ändå i lågfrekventa svängningar. Det är också dessa långperiodiska förändringar av strömmen som är av betydelse för den storskaliga horisontella transporten i sjön, och i hög grad beror av meteorologiska aktiviteter såsom passerande lågtryck och stagnanta högtryckssituationer. Däremot är de ovan beskrivna interna vågrörelserna av stor betydelse för den vertikala omblandningen under perioder med skiktade förhållanden.

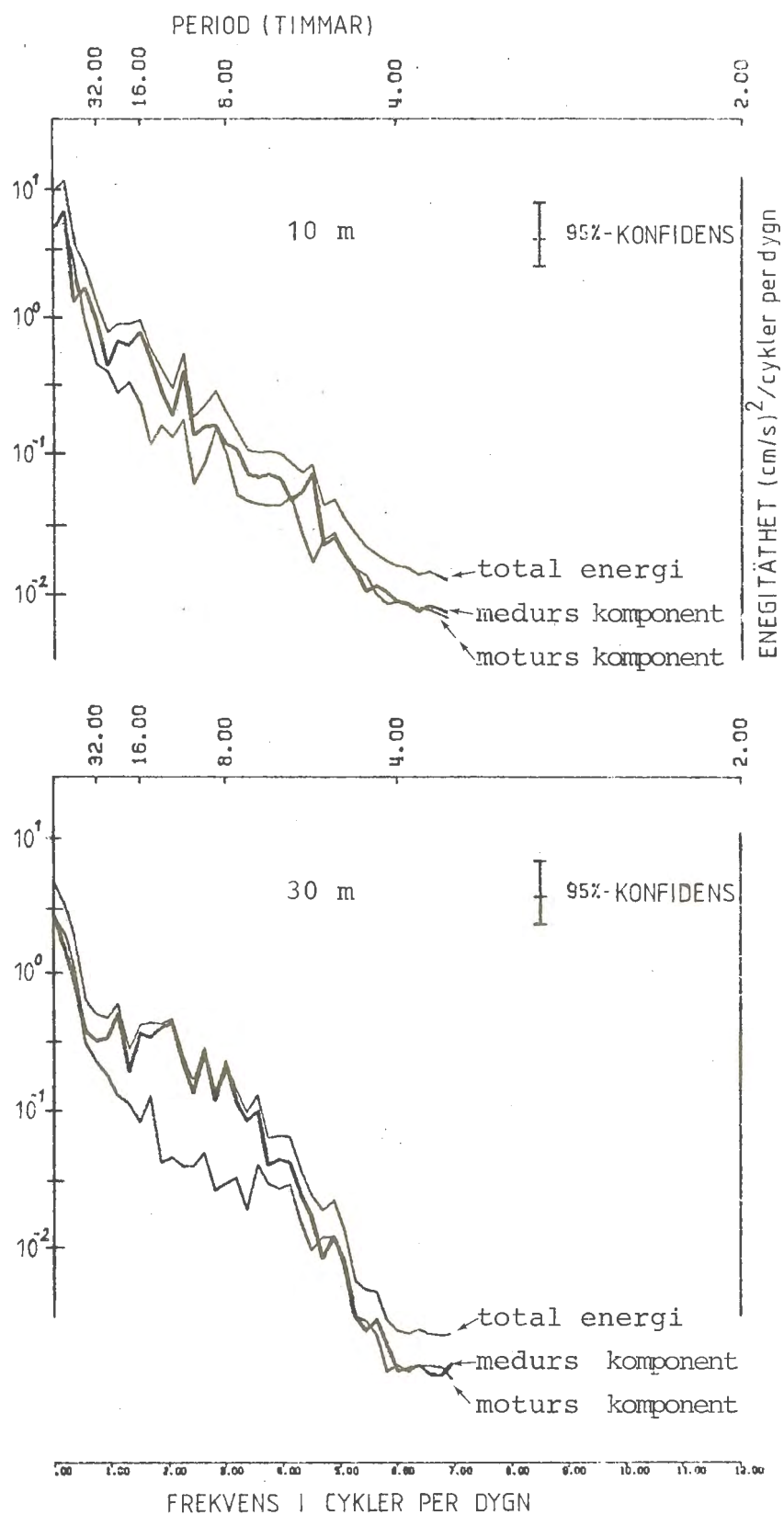


Fig 18. Rotationsspektra för strömmen i vertikal V
Rotary spectra for current in Station V.

Strömningsförhållandena i en större sjös inre del och i området närmast kusten är ofta av så skild natur att det är befogat att tala om två olika zoner, en inre zon och en kustzon. Därvid är det vanligt att Rossbys interna deformationsradie, c_i/f används som ett mått på kustzonens bredd. Här betyder f Coriolisparametern ($\text{ca } 1.25 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) och c_i definieras som $(g \epsilon H_1 H_2 / (H_1 + H_2))^{\frac{1}{2}}$, där $\epsilon = (\rho_1 - \rho_2) / \rho_2$, ett relativt mått på densitetsskillnaden mellan två var för sig homogena lager i sjön, samt H_1 och H_2 anger respektive lagrets tjocklek. Med $\epsilon = 1.2 \cdot 10^{-3}$, $H_1 = 20 \text{ m}$ och $H_2 = 40 \text{ m}$ fås $c_i = 40 \text{ cm/s}$ och bredden på kustzonen uppskattas till ca 3-4 km. Där djupet i kustområdet understiger det övre lagrets tjocklek och förhållandena är mer homogena är det i första hand bottendjupet som avgör kustzonens bredd. I Vättern upptar kustzonen en relativt stor del av sjöns yta och sjöns dynamik bör starkt präglas av processer i kustområdena. Mätningar i Lake Ontario (Blanton, J.O., 1974) visar att energiinnehållet i strömmarna avtar med avståndet till kusten. Strömmar med perioder längre än tröghetsperioden (ca 14 timmar i Vättern) har också sitt största energiinnehåll nära kusten. För Vättern skulle detta betyda att långperiodig strömning svarar för en jämförelsevis stor procent av den totala kinetiska energin.

Medelvärdesberäkningar av cirkulationen har presenterats för Lake Ontario (Pickett, R.L., Richards, F.P., 1975) avseende juli 1972 samt för Värmlandssjön (Carlsson, B., Holmström, I., 1978) avseende augusti 1971-72. Under perioden med skiktade förhållanden är den genomsnittliga cirkulationen moturs. Orsaken till detta generella mönster är inte helt utrett och det är därför svårt att dra några slutsatser om förutsättningarna för en liknande en-cells cirkulation i Vättern. Mätningarna i station V (fig 12 a, b) och den beräknade medelcirkulationen för en 10-dagarsperiod antyder inte någon förekomst av ett sådant strömningsmönster.

SMHI

REFERENSER

- Bergsten, F., 1926. The seiches of Lake Vetter, Geogr.Anm., Stockholm, 1-73.
- Blanton, J.O., 1974. Some characteristics of near-shore currents along the north shore of Lake Ontario. J.Phys.Oceanogr. 4, 415-424.
- Carlsson, B., Holmström, I., 1978. Vänern - en naturresurs. Statens naturvårdsverk, Stockholm.
- Csanady, G.T., Scott, J.T., 1974. Barocline coastal jets in Lake Ontario during IFYGL. J.Phys. Oceanogr. 4, 524-541.
- Gonella, J., 1972. A rotary component for analysing meteorological and oceanographic vector time series. Deep-Sea Res., 19, 833-846.
- Kommittén för Vätterns vattenvård, 1970. Vattenvårdsplan för Vättern. Motala.
- Mortimer, C., 1974. Lake hydrodynamics. Mitt. Internat. Verein. Limnol. 20, 124-197.
- Pickett, R. L., Richards, F. P., 1975. Lake Ontario mean temperature and currents in July 1972. J. Phys. Oceanogr., 5, 775-781.
- Rao, S.T., Czapski, U., Sedefian, L., 1977. Characteristics of internal oscillations in Lake Ontario. J. Geophys. Res., 82, 1725-1734.
- Simons, T. J., 1973. Development of three-dimensional numerical models of the Great Lakes. Environment Canada, Ottawa. I.W.O.Scientific Series No 12.
- Simons, T. J., 1974. Verification of numerical models of Lake Ontario: Part I. Circulation in spring and early summer. J.Phys. Oceanogr., 4, 507-523.
- Simons, T. J., 1975. Verificaiton of numerical models of Lake Ontario: Part II. Stratified circulations and temperature changes. J.Phys. Oceanogr., 5, 98-110.
- Simons, T. J., Funkquist, L., Svensson, J., 1977. Application of a numerical model to Lake Vänern. SMHI Rapporter nr RHO 9.

Notiser och preliminära rapporter

Serie HYDROLOGI

- Nr 1 Sundberg-Falkenmark M
Om isbärighet. Stockholm 1963
- Nr 2 Forsman, A
Snösmältning och avrinning. Stockholm 1963
- Nr 3 Karström, U
Infrarödteknik i hydrologisk tillämpning: Värmebilder som hjälpmedel i recipientundersökningar. Stockholm 1966
- Nr 4 Moberg, A
Svenska sjöisars isläggnings- och islossningstidpunkter 1911/12-1960/61. Del 1. Redovisning av observationsmaterial. Stockholm 1967
- Nr 5 Ehlin, U & Nyberg, L
Hydrografiska undersökningar i Nordmalingsfjärden. Stockholm 1968
- Nr 6 Milanov, T
Avkylningsproblem i recipienter vid utsläpp av kylvatten. Stockholm 1969
- Nr 7 Ehlin, U & Zachrisson, G
Spridningen i Väterns nordvästra del av suspenderat materiel från skredet i Norsälven i april 1969. Stockholm 1969
- Nr 8 Ehlert, K
Mälarens hydrologi och inverkan på denna av alternativa vattenavledningar från Mälaren. Stockholm 1970
- Nr 9 Ehlin, U & Carlsson, B
Hydrologiska observationer i Vätern 1959-1968 jämte sammanfattande synpunkter. Stockholm 1970
- Nr 10 Ehlin, U & Carlsson, B
Hydrologiska observationerna i Vätern 17-21 mars 1969. Stockholm 1970
- Nr 11 Milanov, T
Termisk spridning av kylvattenutsläpp från Karlshamnsverket. Stockholm 1971
- Nr 12 Persson, M
Hydrologiska undersökningar i Lappträskets representativa område. Rapport I. Stockholm 1971
- Nr 13 Persson, M
Hydrologiska undersökningar i Lappträskets representativa område. Rapport II. Snömätningar med snörör och snökuddar. Stockholm 1971
- Nr 14 Hedin, L
Hydrologiska undersökningar i Velens representativa område. Beskrivning av området, utförda mätningar samt preliminära resultat. Rapport I. Stockholm 1971

- Nr 15 Forsman, A & Milanov, T
Hydrologiska undersökningar i Velens representativa område.
Markvattenstudier i Velenområdet. Rapport II. Stockholm 1971
- Nr 16 Hedin, L
Hydrologiska undersökningar i Kassjöans representativa område.
Nederbördens höjdberoende samt kortfattad beskrivning av om-
rådet. Rapport I. Stockholm 1971
- Nr 17 Bergström, S & Ehlert, K
Stochastic Streamflow Syntheses at the Velen representative
Basin. Stockholm 1971
- Nr 18 Bergström, S
Snösmältningen i Lappträskets representativa område som
funktion av lufttemperaturen. Stockholm 1972
- Nr 19 Holmström, H
Test of two automatic water quality monitors under field
conditions. Stockholm 1972
- Nr 20 Wennerberg, G
Yttertemperaturkartering med strålningstermometer från flyg-
plan över Vänern under 1971. Stockholm 1972
- Nr 21 Prych, A
A warm water effluent analyzed as a bouyant surface jet.
Stockholm 1972
- Nr 22 Bergström, S
Utveckling och tillämpning av en digital avrinningsmodell.
Stockholm 1972
- Nr 23 Melander, O
Beskrivning till jordartskarta över Lappträskets representa-
tiva område. Stockholm 1972
- Nr 24 Persson, M
Hydrologiska undersökningar i Lappträskets representativa
område. Rapport III. Avdunstning och vattenomsättning.
Stockholm 1972
- Nr 25 Häggström, M
Hydrologiska undersökningar i Velens representativa område.
Rapport III. Undersökning av torrperioderna under IHD-åren
fram t o m 1971. Stockholm 1972
- Nr 26 Bergström, S
The application of a simple rainfall-runoff model to a catch-
ment with incomplete data coverage. Stockholm 1972
- Nr 27 Wändahl, T & Bergstrand, E
Oceanografiska förhållanden i svenska kustvatten.
Stockholm 1973
- Nr 28 Ehlin, U
Kylvattenutsläpp i sjöar och hav. Stockholm 1973
- Nr 29 Andersson, U-M & Waldenström, A
Mark- och grundvattenstudier i Kassjöans representativa
område. Stockholm 1973
- Nr 30 Milanov, T
Hydrologiska undersökningar i Kassjöans representativa område.
Markvattenstudier i Kassjöans område. Rapport II. Stockholm 1973

SMHI Rapporter

HYDROLOGI OCH OCEANOGRAFI

- Nr RHO 1 Weil, J G
Verification of heated water jet numerical model.
Stockholm 1974
- Nr RHO 2 Svensson, J
Calculation of poison concentrations from a hypothetical
accident off the Swedish coast.
Stockholm 1974
- Nr RHO 3 Vasseur, B
Temperaturförhållanden i svenska kustvatten.
Stockholm 1975
- Nr RHO 4 Svensson, J
Beräkning av effektiv vattentransport genom Sunninge sund.
Stockholm 1975
- Nr RHO 5 Bergström, S & Jönsson, S
The application of the HBV runoff model to the Filefjell
research basin.
Norrköping 1976
- Nr RHO 6 Wilmot, W
A numerical model of the effects of reactor cooling water
on fjord circulation.
Norrköping 1976
- Nr RHO 7 Bergström, S
Development and Appl. of a Conceptual Runoff Model.
Norrköping 1976
- Nr RHO 8 Svensson, J
Seminars at SMHI 1976-03-29—04-01 on Numerical Models
of the Spreading of Cooling-water.
Norrköping 1976
- Nr RHO 9 Simons, J & Funkquist, L & Svensson, J
Application of a numerical model to Lake Vänern.
Norrköping 1977
- Nr RHO 10 Svensson, J
A statistical study for automatic calibration of a conceptual
runoff model.
Norrköping 1977
- Nr RHO 11 Bork, I
Model studies of dispersion of pollutants in Lake Vänern.
Norrköping 1977
- Nr RHO 12 Fremling, S
Sjöisars beroende av väder och vind, snö och vatten.
Norrköping 1977

SMHI Rapporter

HYDROLOGI OCH OCEANOGRAFI

- Nr RHO 13 Fremling, S
Sjöisars bärighet vid trafik.
Norrköping 1977
- Nr RHO 14 Bork, I
Preliminary model studies of sinking plumes.
Norrköping 1978
- Nr RHO 15 Svensson, J & Wilmot, W
A numerical model of the circulation in Öresund. Evaluation
of the effect of a tunnel between Helsingborg and Helsingör.
Norrköping 1978
- Nr RHO 16 Funkquist, L
En inledande studie i Vätterns dynamik.
Norrköping 1979

