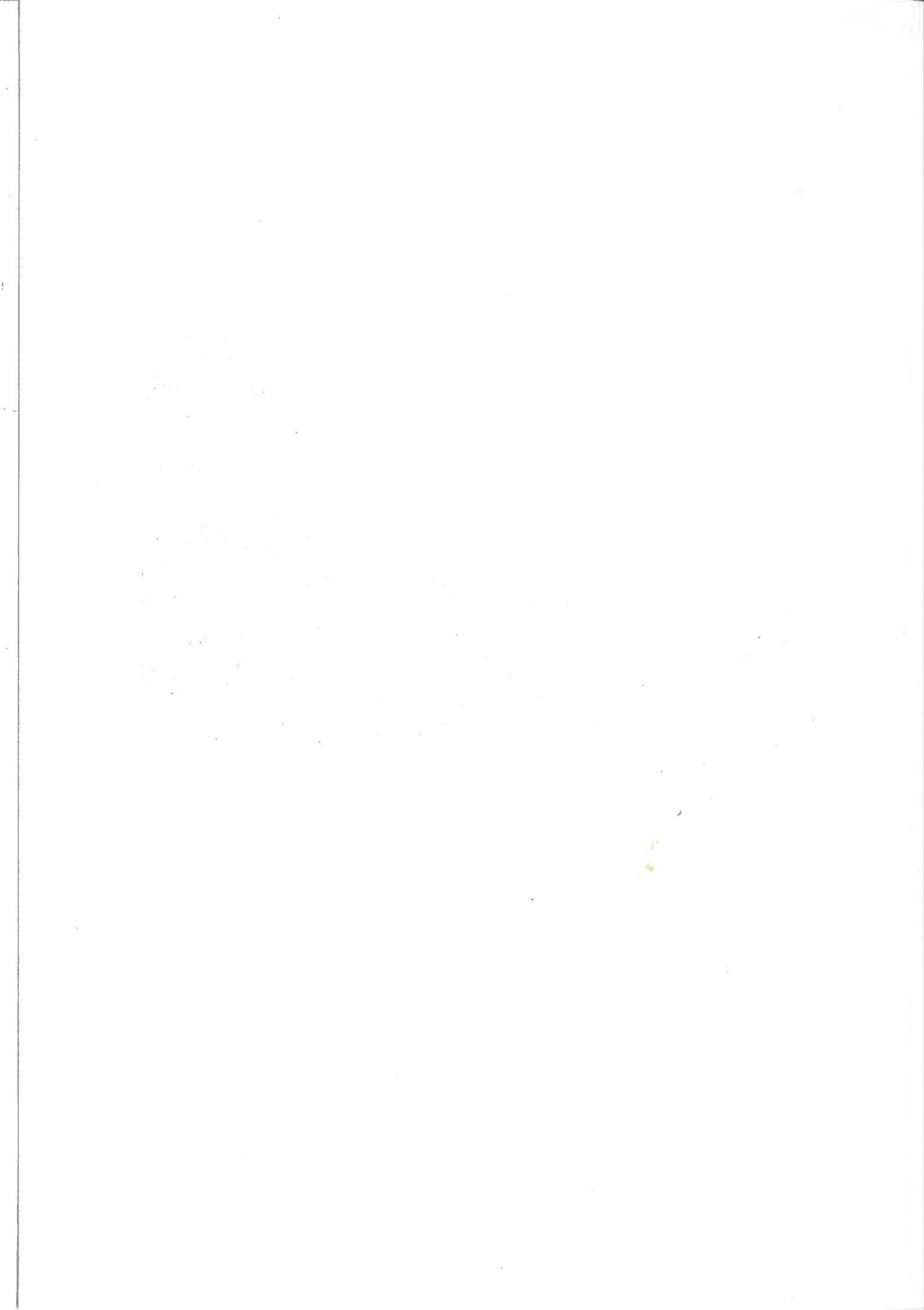




SPRIDNINGSSTUDIER I GLAN

Urban Svensson Ingemar Holmström



SPRIDNINGSSTUDIER I GLAN

Urban Svensson Ingemar Holmström

Innehållsförteckning

1. Inledning
- 1.1 Glans hydrografi
2. Allmänt om cirkulation i sjöar
- 2.1 Vindinducerad cirkulation
- 2.2 Inverkan av topografi, Corioliseffekten, densitetsskiktning, etc
3. Resultat från fältmätningarna
- 3.1 Uppläggning av mätningarna
- 3.2 Resultat
- 3.2.1 Meteorologiska förhållanden
- 3.2.2 Temperaturförhållanden
- 3.2.3 Strömförhållanden
- 3.2.4 Spårämnesundersökningen
4. Resultat från simuleringsmodellen
- 4.1 Kort beskrivning av modellen
- 4.2 Stationär cirkulation för fyra vindriktningar
- 4.2.1 Västlig vind
- 4.2.2 Sydlig vind
- 4.2.3 Ostlig vind
- 4.2.4 Nordlig vind
- 4.3 Simulering av fältmätningssperioden
5. Diskussion och slutsatser

1. Inledning

Under 1987 beskrevs det övergripande målet med detta projekt på följande sätt, "att ta fram metoder för prognosgivning för spridning av föroreningar vid ett katastrofutsläpp i sjöar". Meningen var att kommuner eller andra myndigheter skall få tillgång till en katalog som visar strömnings- och spridningsbilder för olika meteorologiska förhållanden för en aktuell sjö. Under arbetets gång med att testa spridningsmodellen på Glan fick SMHI ett uppdrag från Stockholm Vatten som gällde att ta fram ett system för spridningsberäkningar i östra Mälaren. Under de senaste åren har PC-utvecklingen gått mycket snabbt vilket medförde att SMHI föreslog Stockholm Vatten att ett beräkningssystem skulle sättas upp på en PC. Därmed skulle de själva kunna genomföra de beräkningar de önskade. Med andra ord, tanken om att ta fram en katalog med spridningsbilder har nu ersatts med idén att beräkningar genomförs på en PC. Resultatet på hur ett ämne sprids ritas ut på skärmen. Fördelen med detta system är att man får ett mycket flexibla system där olika parametrar kan varieras såsom utsläppsplats, typ av förorening, vindstyrka och vindriktning etc.

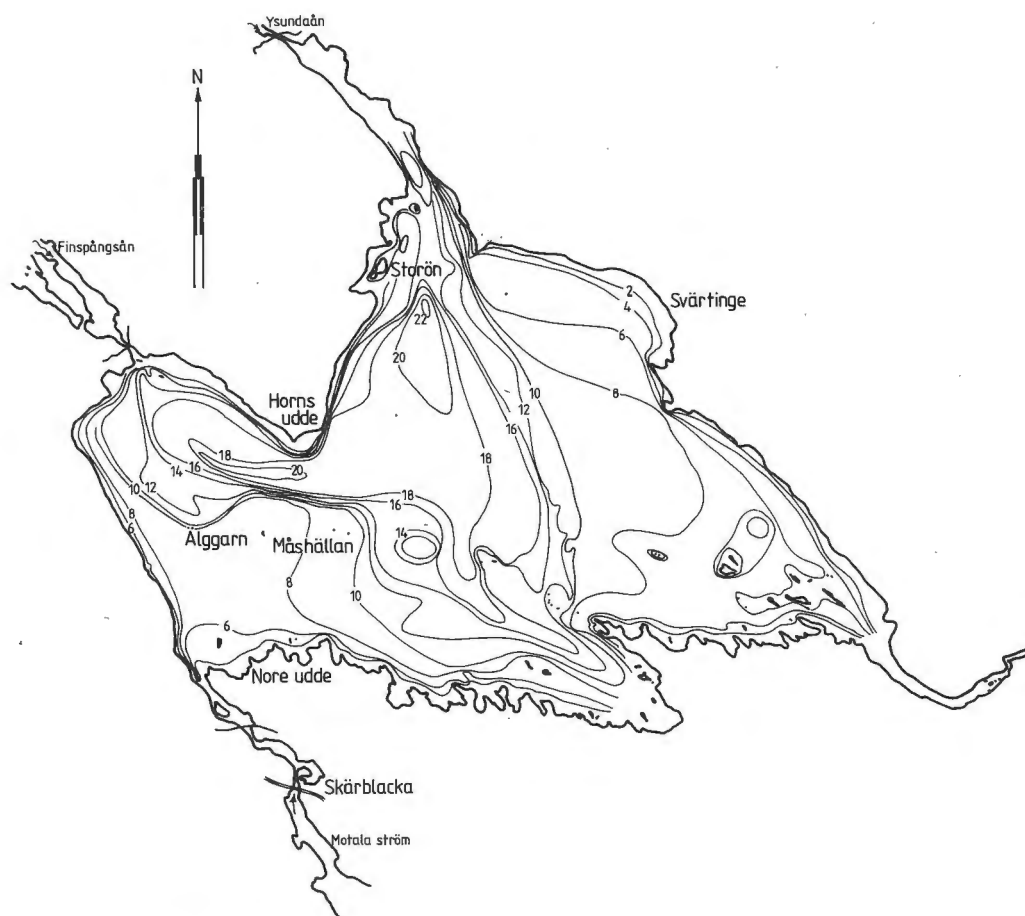
Trots att målsättningen idag med projektet "spridningsberäkningar i sjöar" är annorlunda än målsättningen från 1987 har Glanprojektet genomförts inom följande områden:

- en cirkulations- och en spridningsmodell har anpassats till Glan
- fältmätningar har genomförts vad gäller strömmätningar, med både registrerande mätare samt med strömkors, och kartläggning av ett spårämnesutsläpp i Motala Ströms inlopp i Glan
- modellerna har verifierats mot fältmätningarna

Denna rapport innehåller först en kort beskrivning av Glan med dess hydrografi därefter beskrivs allmänt cirkulationen i en sjö i kapitel 2. Kapitel 3 behandlar fältmätningar och de avslutande två kapitlen redogör för resultaten och slutsatser.

1.1 Glan hydrografi

Glan djupförhållanden framgår av kartan se figur 1. Stränderna i norr och nordväst är branta och djupet 18 m nås på sina ställen endast ett hundratal meter ut från land. Största djupet 22.5 m finns ca 1 km sydost Storön. Sjöns östra och sydvästra delar är relativt grunda med djup mindre än 10 m. Glans yta är 75.57 km² och dess volym är drygt 748 miljoner m³ vilket innebär att sjöns medeldjup är 9.9 m. Tillrinningen till Glan sker främst via Motala Ström, Finspångsån och Ysundaån. Karakteristiska vattenföringsvärden för dessa vattendrag visas i tabell 1.



Figur 1. Djupkarta över Glan

Tabell 1. Karakteristiska vattenföringar (m^3/s)

	Högsta högvatten- föring	Normal högvatten- föring	Normal medelvatten- föring	Normal lågsvatten- föring	Lägsta lågsvatten- föring
Motala ström pegel 67-172 Norsholm 1935-66	255	143	75.6	23	0
pegel 67-1735 Gryt-Drag 1935-66	357	198	91.2	11.9	4.8
Finspångsån	80	40	10	2.3	1.0
Ysundaån	30	13	2.9	0.5	0.15

Den text som följer nedan är till stor del tagen från en SMHI-rapport från 1969 som heter "Yttrande angående inverkan på de hydrologiska förhållandena i sjön Glan av planerade förändringar i avloppsutsläppen från Skärblacka Bruk."

De hydrologiska förhållanden, vilka är av speciellt intresse för bedömningen av Glans egenskaper som recipient, nämligen skikttnings- och strömningsförhållandena, dikteras i hög grad av meteorologiska faktorer. Skikttningsutvecklingen under uppvärmningsperioden är på ett komplicerat sätt beroende av instrålning, lufttemperatur och vind. Strömningsförhållandena domineras under ej islagd tid starkt av vinden; vintertid påverkas strömmarna indirekt av bl a lufttemperatur och vind, som påverkar temperatur och täthet på det tillrinnande vattnet och därigenom dess inlagringsnivå i sjön.

Vid en genomgång av gamla temperaturdata från Glan fann man att ett temperatursprångskikt har förekommit under fyra eller möjligen 6 år under sommrarna 1957-1967. Grovt sett verkar det vara så att Glan har ett tydligt språngskikt varannan sommar.

2. Allmänt om cirkulation i sjöar

Som en bakgrund till fältmättnings- och modellresultaten beskrivs nedan kortfattat de grundläggande cirkulationsmönster som skapas av vinden.

2.1 Vindinducerad cirkulation

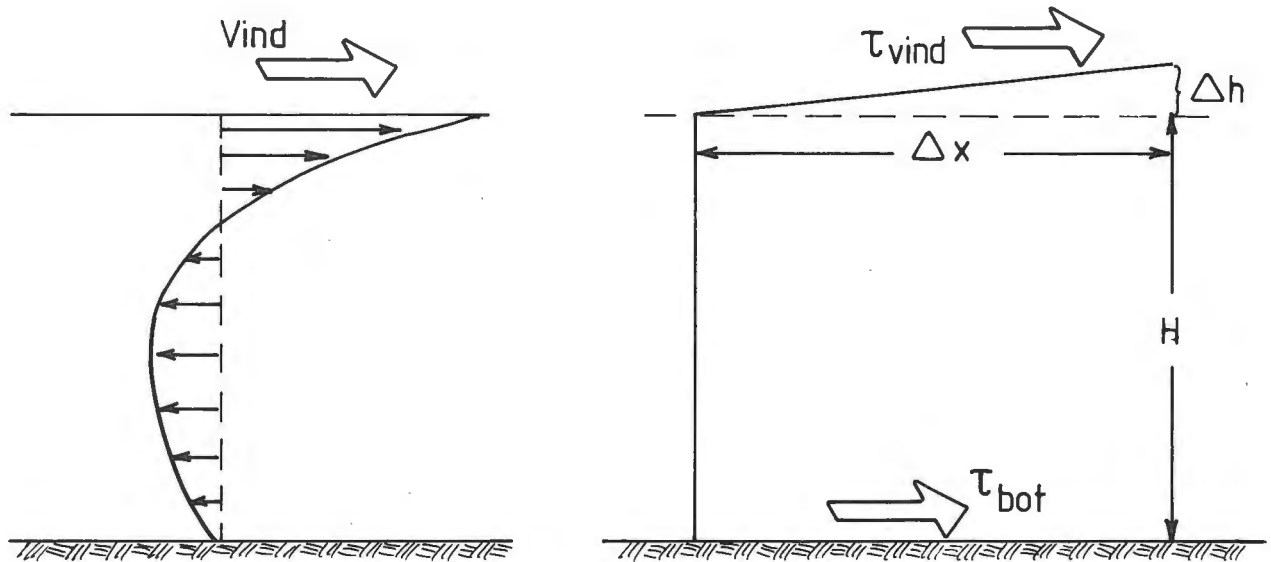
Vinden ger upphov till en skjuvspänning på vattenytan som driver ytvattnet i vindens riktning. Vattnet kan naturligtvis inte ansamlas i "ned-vindsändan" av sjön utan strömmar mot vindriktningen nära botten, se figur 2. Strömmen nära botten drivs av en tryckgradient som orsakas av att vattenytan i ned-vindsändan stiger vid vindpåverkan. Även detta illustreras i figur 2. Kraftbalansen för en vattenvolymen kan således matematiskt uttryckas som:

$$(\tau_{vind} + \tau_{bot}) \Delta x = \rho g \Delta h H \quad (2.1)$$

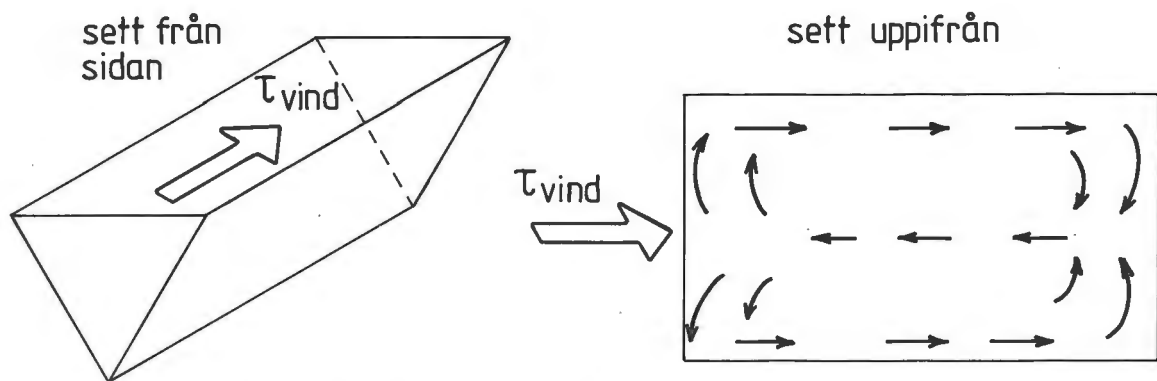
där τ_{vind} betecknar vindskjuvspänningen, τ_{bot} bottenskjuvspänningen, H djupet, ρ densiteten, g gravitationskonstanten, Δx längd på betraktade volymen och Δh vattenyttehöjningen. Bottenskjuvspänningen är normalt endast några procent av τ_{vind} och försummas för enkelhetens skull i det fortsatta resonemanget. Vi kan då skriva ekv. 2.1 som:

$$\frac{\tau_{vind}}{H} = \rho g \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (2.2)$$

För den fortsatta analysen skall vi notera att ett mindre djup, H , ger en större vattenytelutning h/x . Profilen i figur 2 erhålls i en rektangulär bassäng med konstant djup. Om vi har en variation i bottendjup blir kraftbalansen något annorlunda. Ett exempel visas i figur 3. Bassängen har en djuprädda i mitten. Enligt ekv 2.2 ökar vattenytelutningen större längs stränderna än i djupräddan för bassängen i figur 3. I ned-vindsändan kommer därför en tryckgradient att driva vattnet mot centrum av bassängen medan i upp-vindsändan medelströmmen blir riktad från centrum mot stränderna. Vertikala hastighetsprofilerna för djupräddan och stranden visas i figur 3. Slutsatsen från denna analys är att strömmen går i vindriktningen längs stränderna och att returströmmen huvudsakligen återfinns i djupräddor.



Figur 2. Hastighetsprofil och kraftbalans för vindinducerad strömning i en sjö



Figur 3. Vindinducerad strömning i en sjö med en djuprännan i vindriktningen.

2.2 Inverkan av topografi, Corioliseffekt, densitetsskiktning, etc

Den ovan skisserade bilden ger en viss förståelse för vindinducerad cirkulation men är starkt förenklad. Det ryms inte inom denna rapport att beskriva samtliga fysikaliska processer som påverkar cirkulationen. För fullständighetens skull skall dock några av de viktigaste faktorerna nämnas.

- En sjö är oftast densitetsskiktad med lättare vatten som överlagrar tyngre vatten, så kallad stabil skiktning. Sådan skiktning utgör en effektiv barriär för utbyte av vatten från botten till ytan.
- Jordrotationens inverkan, den så kallade corioliseffekten. För stora sjöar modifieras strömningsmönstret kraftigt av denna effekt.
- Komplicerad botten-topografi. Sjöar har normalt en komplicerad botten-topografi som speciellt i kombination med densitetsskiktning och corioliseffekten ger mycket komplicerade strömningsmönster.
- Meteorologiska drivningen (vind och värme) är svårbestämd och har ofta en variation över vattenytan.
- In och utflöden. Om tillflödet har en annan densitet än vattnet i sjön inlagras tillflödet på en viss nivå i sjön.

Detta är några av de viktigaste faktorerna som påverkar cirkulationen i en sjö.

3. Resultat från fältmätningarna

3.1 Uppläggning av mätningarna

För spårämnesundersökningen såväl som för det teoretiska beräkning-sarbetet med matematisk modell var de meteorologiska förutsättningarna viktiga att känna till. Det hade varit bäst att ha en registrerande vind-mätare nära undersökningsområdet. Det var emellertid svårt att hitta en lämplig plats, att placera en tillfällig vindmätare på. Vi utnyttjade därför de meteorologiska mätningar som löpande pågår vid Bråvalla flyg-flotilj, som inte ligger så långt från området.

Som doseringsplats hade vi valt en punkt i Motala ström cirka en km upp-ströms dess mynning i Glan, se figur 4. Doseringen gjordes på förmiddagen den 1 juni 1988, närmare bestämt mellan klockan 8.10 och 10.00. Färg-spårämnet rodamin Wt, släpptes ut till en sammanlagd mängd av 3.6 kg. Före doseringen hade rodaminet blandats ut med vatten, för att kunna pumpas ut på ett smidigt sätt och lätt blandas in med vattnet i Motala ström. Nedström doseringsplatsen finns en bra omblandningssträcka som gav en bra fördelning av färgämnet i strömmen.

Rodaminmolnets läge lokaliserades med hjälp av ett instrument, som direkt visade den relativa koncentrationen av ämnet. När detta var gjort togs ett stort antal vattenprover i och strax utanför molnet för att genom senare analys på laboratorium mera exakt, få färgämnets utbredning och utspädning kartlagd med vissa tidsmellanrum. På förhand hade lämpliga mätlinjer valt ut för att underlätta provtagningen.

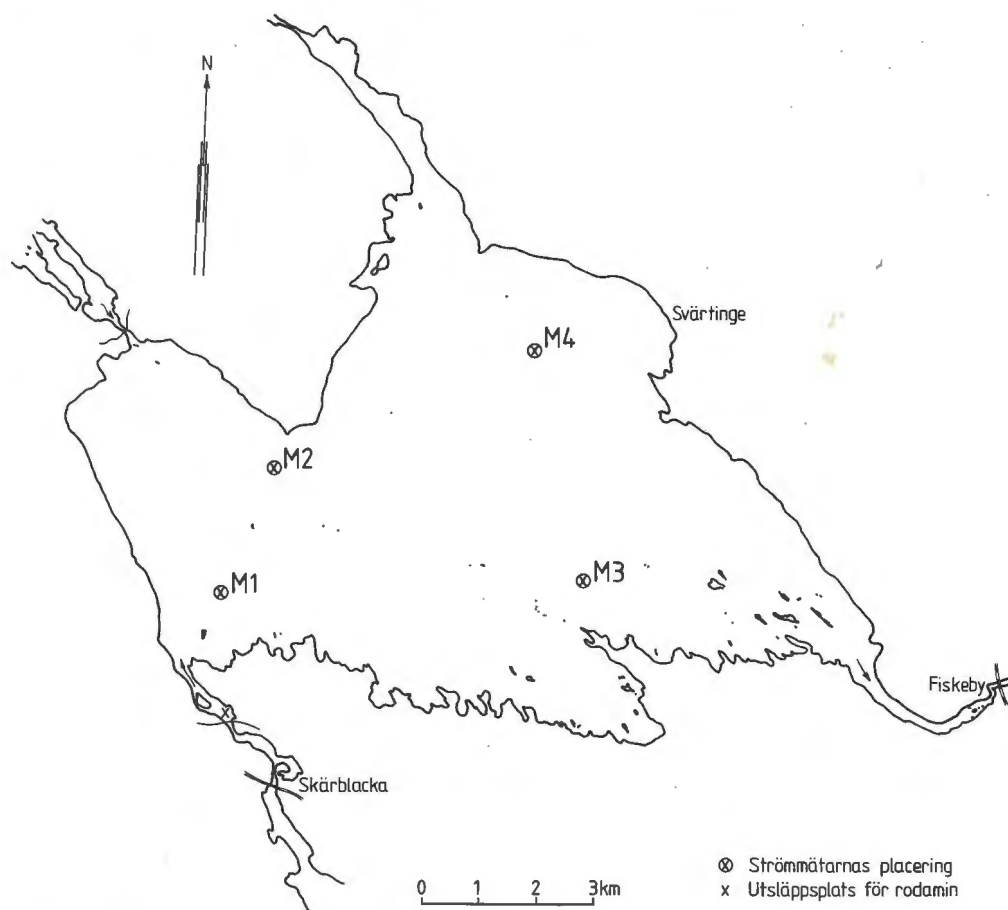
För att kartlägga strömförhållandena under spårämnesundersökningen gjordes mätningar dels med fritt drivande strömkors, dels med förankrade självregistrerande mätare. Strömkorsmätningar gjordes i huvudsak i och i närheten av rodaminmolnet. Strömkorsen består av korslagda dukar, cirka 1.5 x 1.5 m. I samtliga fall placerades strömkorsen ut i ytskiktet. Registrerande mätare var utlagda i punkterna M1, M2, M3 och M4, se figur 4. På alla fyra platserna mättes strömmen på 3 m djup. I M2 registrerades strömmen dessutom på 12 m djup. Mätningar med de förankrade strömmätarna pågick förutom under själva spårämnesundersökningen även en tid före och efter denna, nämligen under tiden 25 maj - 12 juni.

Då skiktningen i sjö är viktig för hur vattnet strömmar och ingående åvatten lagras in, mättes vattnets temperatur från ytan till botten vid några tillfällen, främst i närheten av rodaminmolnet. För att hinna med att göra positionsbestämningar och vattenprovtagningar utnyttjade vi två snabbgående båtar.

3.2 Resultat

3.2.1 Meteorologiska förhållanden

För att kunna göra en så bra verifiering som möjligt av modellsimuleringarna, var det en önskan att fätlmätningen skulle göras i samband med relativt kraftig och stabil vind. Vi gjorde därför alla förberedelser och avvaktade sedan ett lämpligt väderläge. Vi kunde emellertid inte vänta hur länge som helst på "rätt" väder, så när väderutsikterna var relativt goda bestämde vi oss för att starta undersökningen.



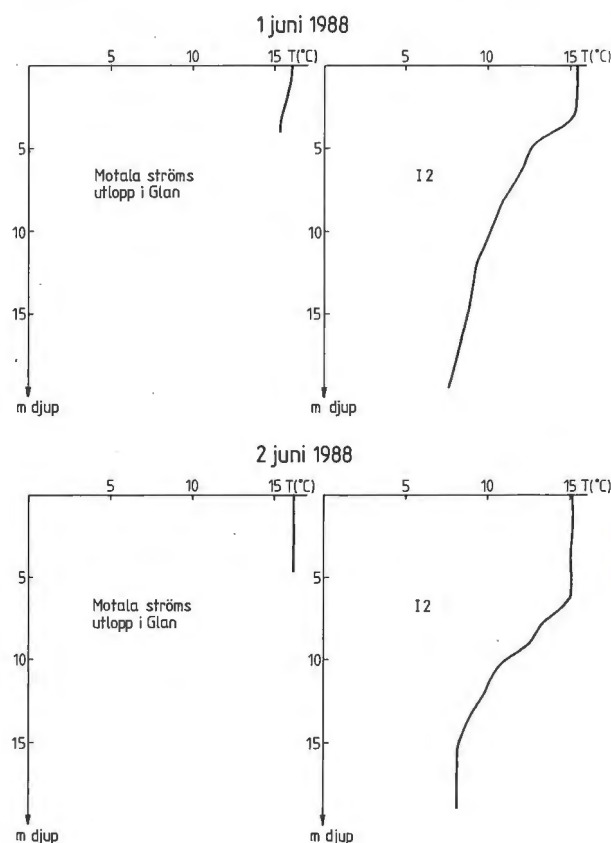
Figur 4. Karta som visar strömmätarnas placering samt utsläppsplatsen för rodaminet

Tyvärr blev de verkliga vindarna inte så kraftiga som de prognoserade. De blev också växlande vilket inte var så bra med tanke på verifieringsmöjligheterna. På morgonen doseringdagen var de västliga för att på eftermiddagen gå över till att bli ostliga. Vindförhållandena under själva spårämnesundersökningen blev således inte så bra som vore önskvärt. Mätningar med de registrerande strömmätarna pågick emellertid under längre tidsperiod. Under denna var det tillfällen då vinden var relativt bra för att möjliggöra simuleringar med matematisk modell.

3.2.2 Temperaturförhållanden

En vecka innan spårämnesundersökningen genomfördes mättes temperaturen i en vertikal i närheten av punkt M2. Det visade sig då att vattnet var relativt homogent från ytan ner till botten, cirka 15 m.

Fram till spårämnesundersökningen hade en viss uppvärmning skett av vattnet. De översta 5-6 metrarna hade en temperatur omkring 15 °C. Språngskiktet var inte så väl utvecklat men på platser med djup på 15 m och däröver var temperaturen under språngskiktet bara cirka 8 °C. Här nedan redovisas temperaturprofiler från några platser för den 1 och 2 juni.



Figur 5. Temperaturprofiler från 1 och 2 juni. Figurerna till vänster är från Motala ströms utloppsområde i Glan. Figurerna till höger visar temperaturprofilen från punkten M2 (se figur 4)

Det första område av Glan som Motala ströms vatten rinner ut i är relativt grunt. Då temperaturskiktningen låg på större djup, innebär det att det spårämnesmärkta vattnet från strömmen kunde inblandas från ytan till botten.

3.2.4. Spårämnesundersökningen

Den 1 juni mellan kl 08 och kl 10 hölls rodaminet i Motala ström. Utsläppet skedde från bron som ligger strax innan utloppet i Glan. Motala ströms vattenföring var ca 100 m³/s. Doseringshastighet och den totala mängd rodamin som släpptes ut hade valts för att kunna följa det märkta Motala strömsvattnet två till tre dagar i Glan.

I presentation nedan har rodaminkoncentrationerna omräknats så att procentsatserna motsvarar koncentration av det märkta Motala strömsvattnet.

Det visade sig att det var möjligt att följa rodaminet ungefär tre dygn, som planerat. Det är emellertid det första dygnet som tydligast visar rodaminmolnets väg och därmed vattnets från Motala ström utbredning i Glan.

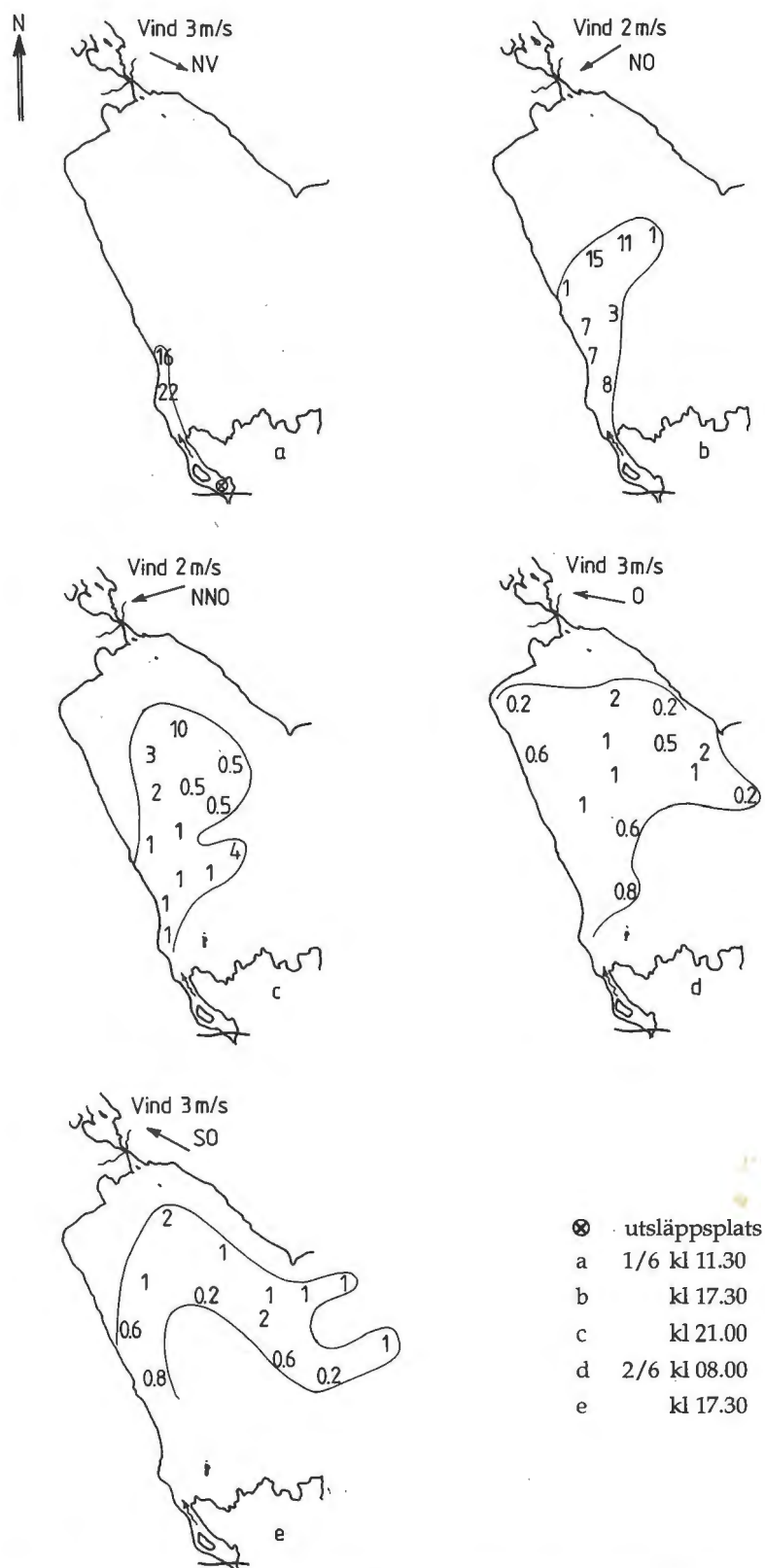
De första timmarna var molnet väl samlat. Det följde Glans västra strand, dvs den riktning det hade när det lämnade Motala ström. Koncentrationerna var fortfarande höga. Samma koncentration rådde från ytan till botten. Efter 10-15 timmar började molnet sprida sig och koncentrationen sjunka. Orsakerna till de erhållna spridningsbilderna är mer svårtolkade. Varierande vindförhållanden hade lett till varierande strömmar i området. Molnet låg så långt utanför Motala ströms mynning att riktning och hastighet på detta vatten hade förlorat sin inverkan på strömsättningen.

Från andra dagens mätning kan konstateras att molnet delvis förts in i de östra delarna av Glan, över grundområden omkring Älggarn och i rätt stor utsträckning genom det litet djupare området söder om Horns udde. Spridningen av rodaminmolnet under de två första dygnen visas i figur 7.

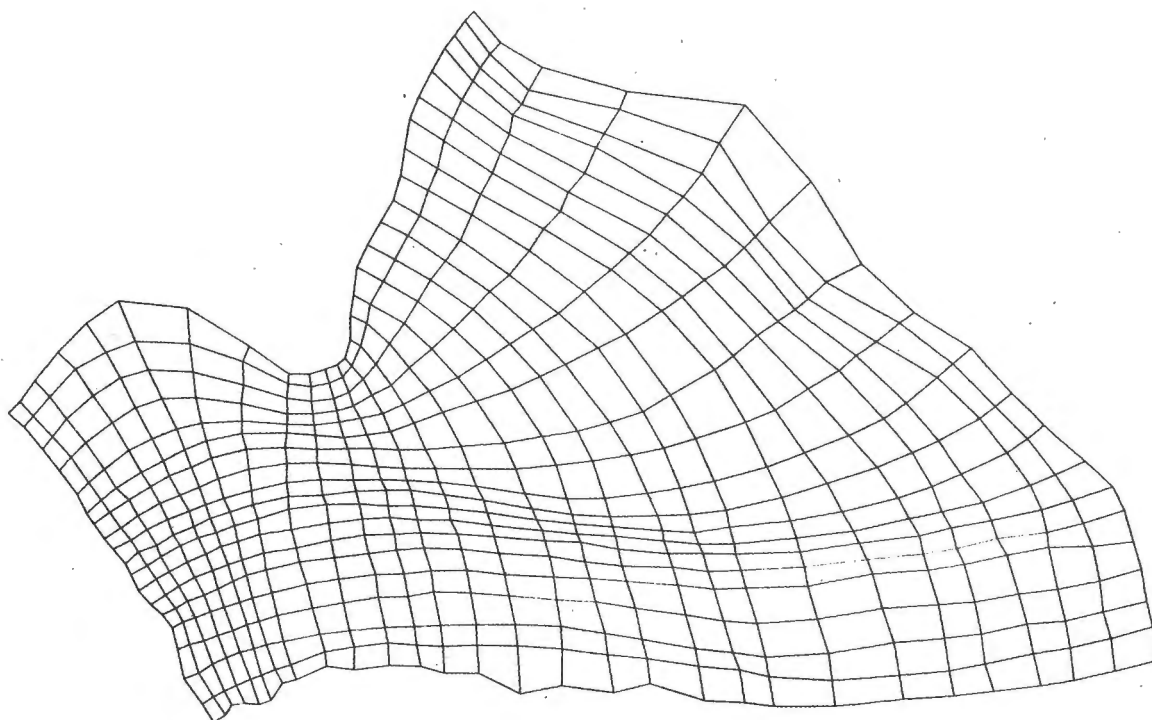
4. Resultat från simuleringsmodellen

4.1 Kort beskrivning av modellen

Kraftfulla datorer har gjort det möjligt att med hjälp av numeriska metoder lösa strömningslärans ekvationer också i komplicerade geometrier och med realistiska randvärden (t ex tidsberoende vind-drivning). Den här använda cirkulationsmodellen, som utgår från den generella ekvationslösaren PHOENICS, beräknar cirkulationsmönstret tredimensionellt och tidsberoende. Turbulensen beskrivs med en modell som bygger på att separata ekvationer löses för turbulensens energi och längskala, den sk K-E modellen. Totalt löses ett ekvationssystem bestående av sex (u, v, w, p, k, e) kopplade olinjära differentialekvationer. Beräkningarna tillgår så att sjön delas upp i ett antal delvolym (beräkningsceller) och balans-ekvationerna, vilka utgår från differentialekvationerna, uppställs för varje cell. Cellindelningen för Glan visas i figur 8. Totalt har 504 celler använts för att beskriva sjön i horisontalplanet. Vertikalt finns 10 celler vilket ger totalt 5040 celler. Spridning av ämnen simuleras genom att partikelbanor beräknas med hjälp av strömningsmönstret som bestämts från cirkulationsmodellen. Partikelbanorna påverkas även av en slumpmässig term, vilket är kopplad till turbulensstrukturen i sjön.



Figur 7. Spridning av rodaminmolnet vid olika tidpunkter.



Figur 8. Beräkningsnät för sjön Glan.

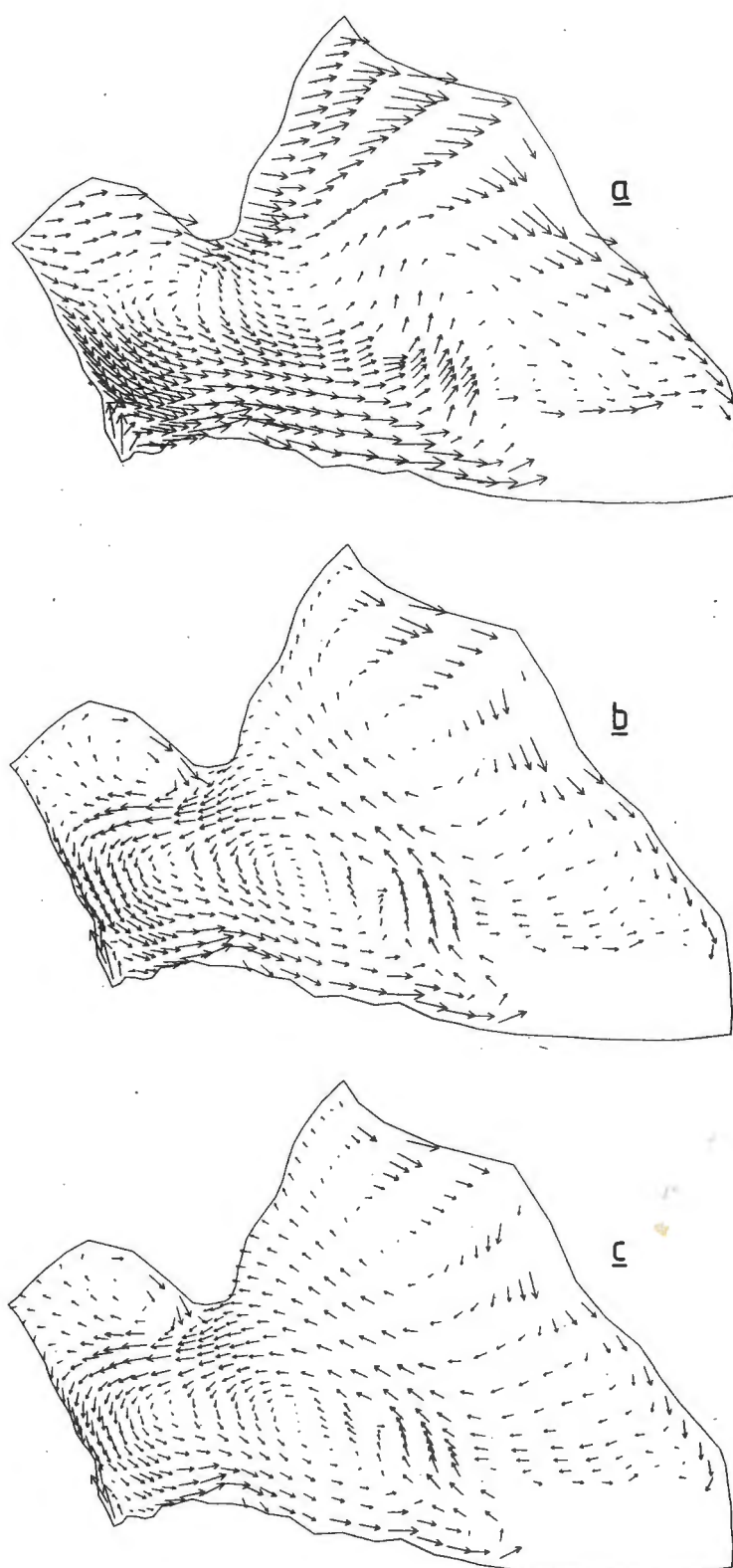
4.2 Stationär cirkulation för fyra vindriktningar

Nedan visas cirkulation och spridningsberäkningar för fyra olika vindriktningar (Väst, Syd, Ost och Nord) under antagandet att stationaritet råder, vilket skall tolkas som att vinden har varit konstant till styrka och riktning så länge att ett stabilt cirkulationsmönster utbildats. För samtliga beräkningar antas att vindstyrkan är 5 m/s.

4.2.1 Västlig vind

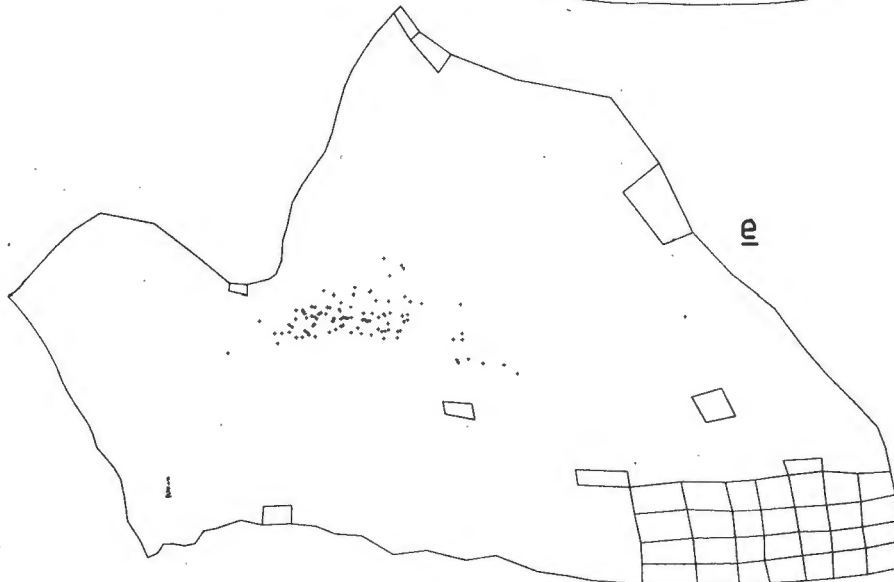
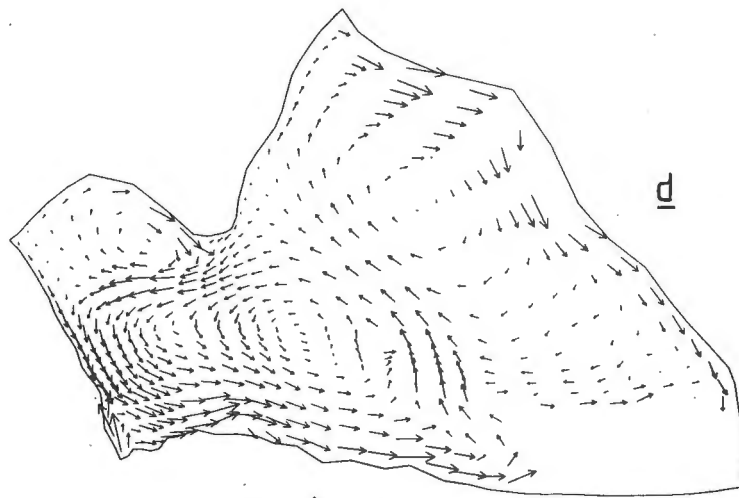
Cirkulationsmönstret för västlig vind visas i figur 9a-d. Det vertikaltintegrerade mönstret (9d), vilket visar medelhastigheten i varje vertikal, visar att den i kapitel 2 diskuterade medelcirkulationen är för handen. Således strömmar det i vindriktningen längs stränder och på grunda områden medan returströmmen återfinns på djupa delar av sjön. Figurerna 9a-c visar strömmen i ytan, på halva djupet och vid botten, respektive. De högsta hastigheterna återfinns, som väntat, i ytlagret vilket också i huvudsak rör sig i vindriktningen.

Beräknat spridningsmönster för ett ämne som släpps i Motals ström visas i figur 9e,f. Ett hundra partiklars positioner tre dygn efter utsläppet visas i figur 9e medan 9f visas trajektorierna för 10 slumpvis utvalda partiklar. Det är uppenbart att trajektorierna är starkt kopplade till den vertikaltintegrerade cirkulationen (9d).



Figur 9. Cirkulation och spridning för västlig vind 5 m/s.

Cirkulation i ytlagret (a), halva djupet (b), bottenlagret (c) och vertikal integrerad cirkulation (d). Hastighetsskala $\longrightarrow$ 0.3 m/s. 100 partiklars position efter 3 dygn (e) och trajektorier för 10 partiklar (f).



4.2.2 Sydlig vind

I nord-sydlig riktning finns inte någon utpräglad djupränna och det ovan diskuterade cirkulationsmönstret med returström i en djupränna är därför inte aktuellt. Beräkningarna, se figur 10a-d, visar dock att medelströmmen (10d) går i vindriktningen längs östra och västra stranden. Returströmmarna är dock separerade från varandra och två celler bildas därmed. Strömfälten på olika nivåer, figur 10a-c, visar att hastighetsfältet varierar starkt med djupet, det är endast längs östra stranden som en stark nordlig ström återfinns från botten till ytan. Partikelutsläppet i Motala ström visas i figur 10e-f. Det är uppenbart att partiklarna har fångats i den östra slutna cirkulationsceller (10d) och, enligt trajektorierna, cirkulerat flera varv utan att spridas till övriga delar av sjön.

4.2.3 Ostlig vind

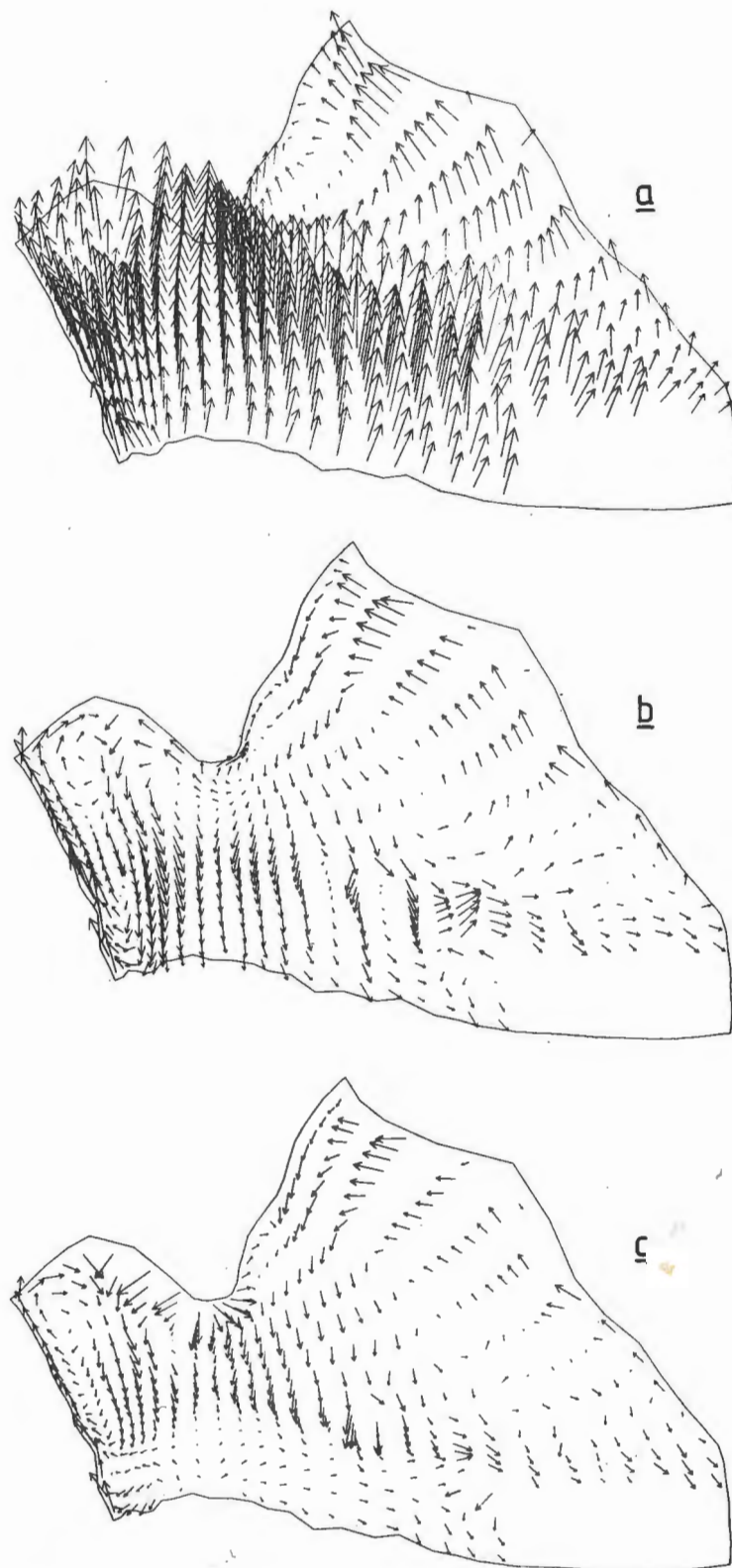
För ostlig vind har vi åter en djupränna i vindriktningen och följaktligen dominerar medelcirkulationsbilden (figur 11d) av strömning med vinden längs stränder och på grunda områden och returström i djuprännan. Djuprännan återfinns dock inte i syd-östra delen av Glan och här är också medelcirkulationen mer obestämd. Strömbilden på olika djupnivåer (11a-c) visar att medelcirkulation dominerar på alla nivåer. Det är intressant att notera att strömmen, på grund av den kraftiga returströmmen, går mot vinden även i ytskiktet söder om Horns udde (11a). Beräkningsresultat från partikelspridningen visas i figur 11e-f. För denna vindriktning sker en effektiv spridning i praktiskt taget hela sjön (11e). Trajektorierna visar att partiklarna snabbt når östra delen av Glan (mot vindriktningen) och där sprids horisontellt eftersom djuprännans koncentrerande inverkan försvinner här.

4.2.4 Nordlig vind

Som framgår av figurerna 12a-f skapas ett mycket komplicerat strömningsmönster vid nordlig vind. Den vertikalintegrerade cirkulation (12d) visar att strömmen vänder riktning 4-5 gånger längs en ost-västlig linje. Strömbilderna på olika nivåer (12a-c) visar att ytströmmen är stark och följer vinden och att bottenströmmen är motriktad vinden. Strömbilden på halva djupet (12b) är komplicerad och liknar i stort den vertikalintegrerade strömbilden. Det komplicerade cirkulationsmönstret återspeglas även i partikelspridningen som framgår av figurerna 12e-f. De flesta partiklarna roterar i komplicerade banor i den östra delen av Glan. Vissa partiklar lämnar dock östra delen genom den västliga strömmen i syd för att därefter transporteras i en nord-ostlig riktning. Detta framgår både av trajektorierna (12f) och positionerna efter 3 dygn (12e).

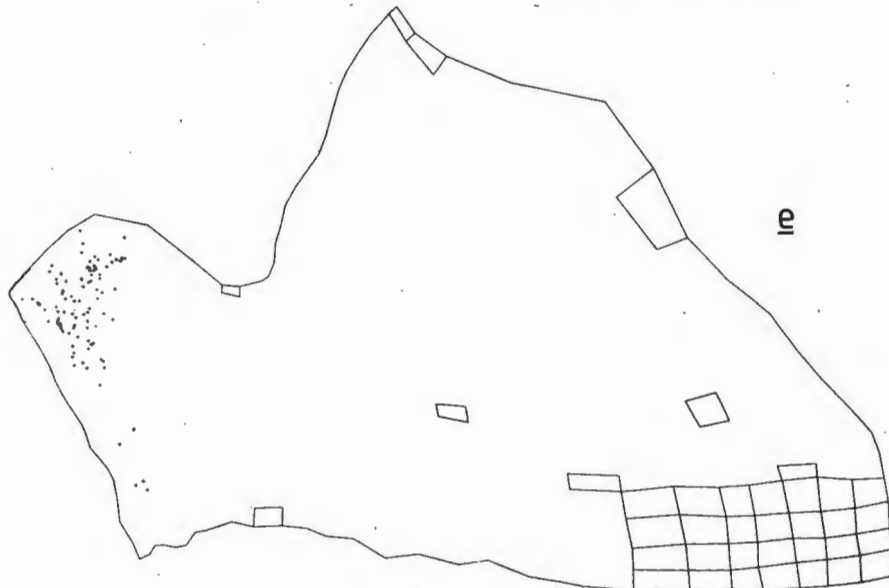
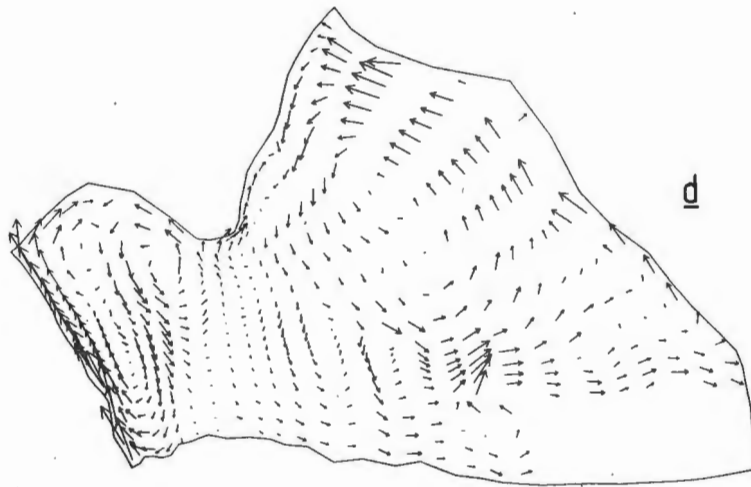
4.3 Simulering av fältmätningssperioden

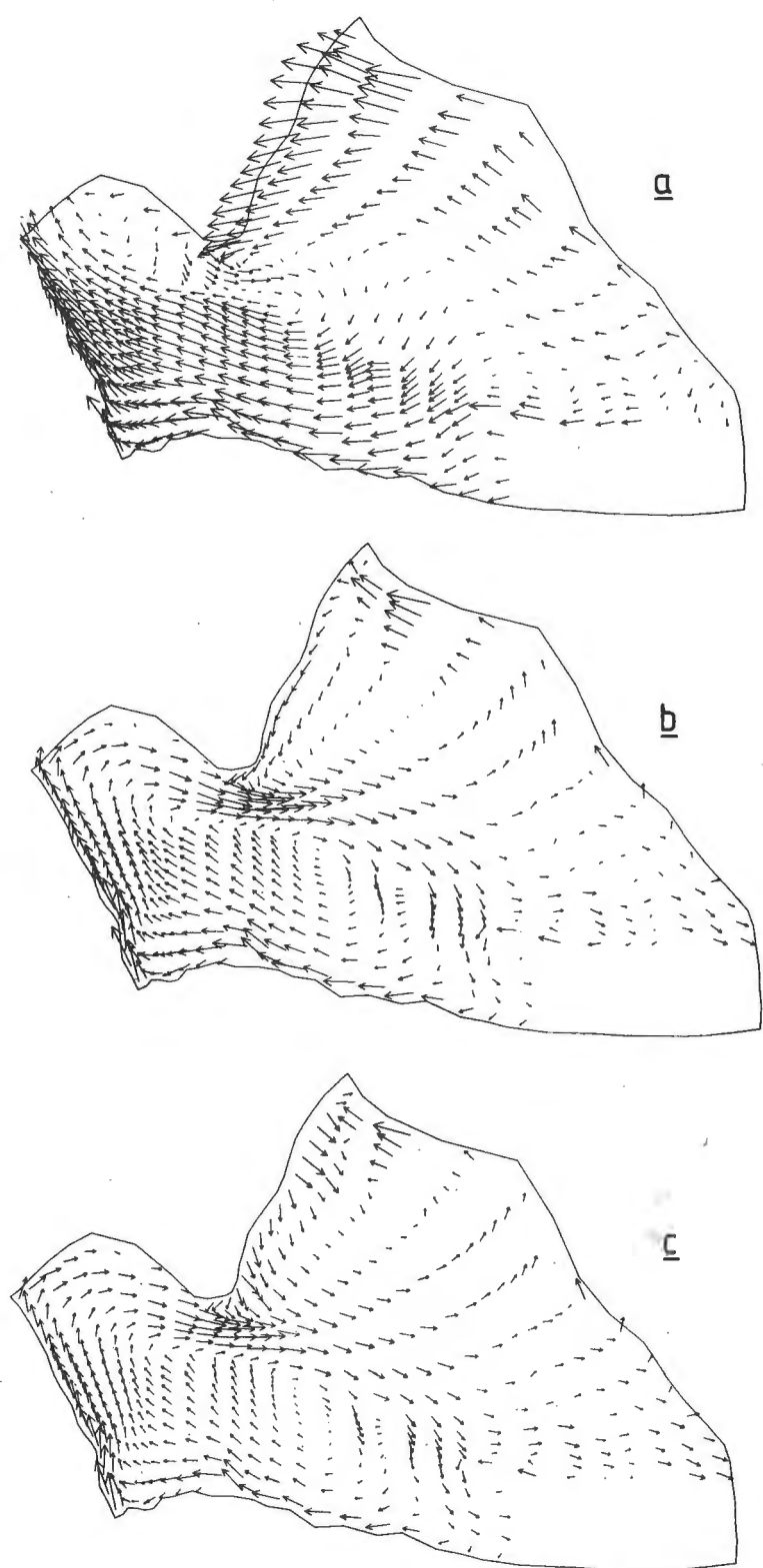
Med syftet att erhålla en verifiering av den numeriska modellen har jämförelser med fältmätningresultaten genomförts. Den aktuella perioden är 1988-06-08--1988-06-11. Vinddata för denna period visas i figur 13. Denna vindserie utgör drivning för simuleringssmodellen som nu beskriver ett transient förlopp omfattande tiden 1988-06-07, 21⁰⁰ - 1988-06-11, 12⁰⁰. Mätresultat redovisas från 1988-06-08, 00⁰⁰ vilket innebär att modellen får en igångkörningsperiod på 3 timmar.



Figur 10. Cirkulation och spridning för sydlig vind 5 m/s.

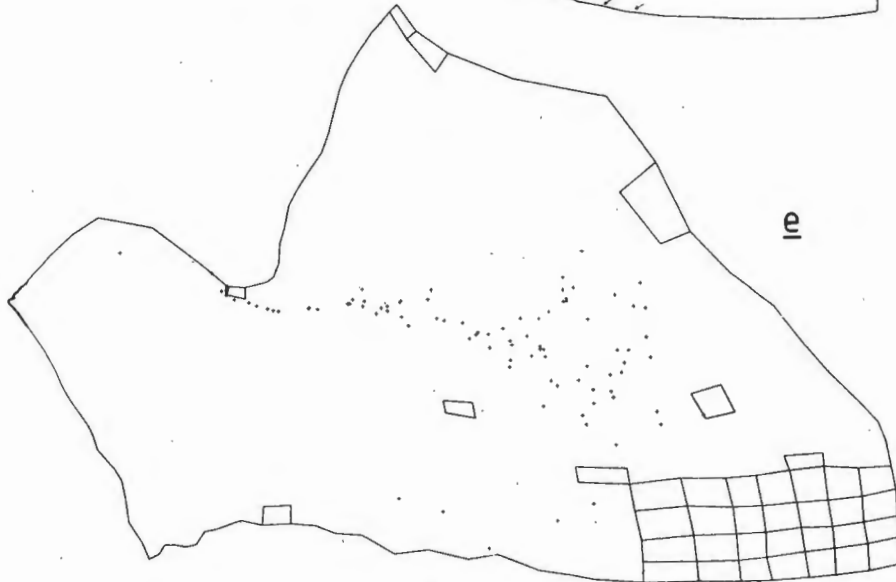
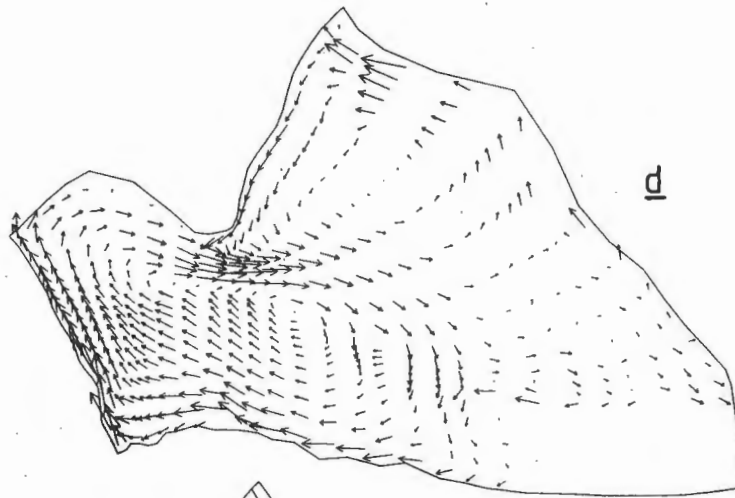
Cirkulation i ytlagret (a), halva djupet (b), bottenlagret (c) och vertikal integrerad cirkulation (d). Hastighetsskala $\longrightarrow$ 0.3 m/s. 100 partiklars position efter 3 dygn (e) och trajektorier för 10 partiklar (f).

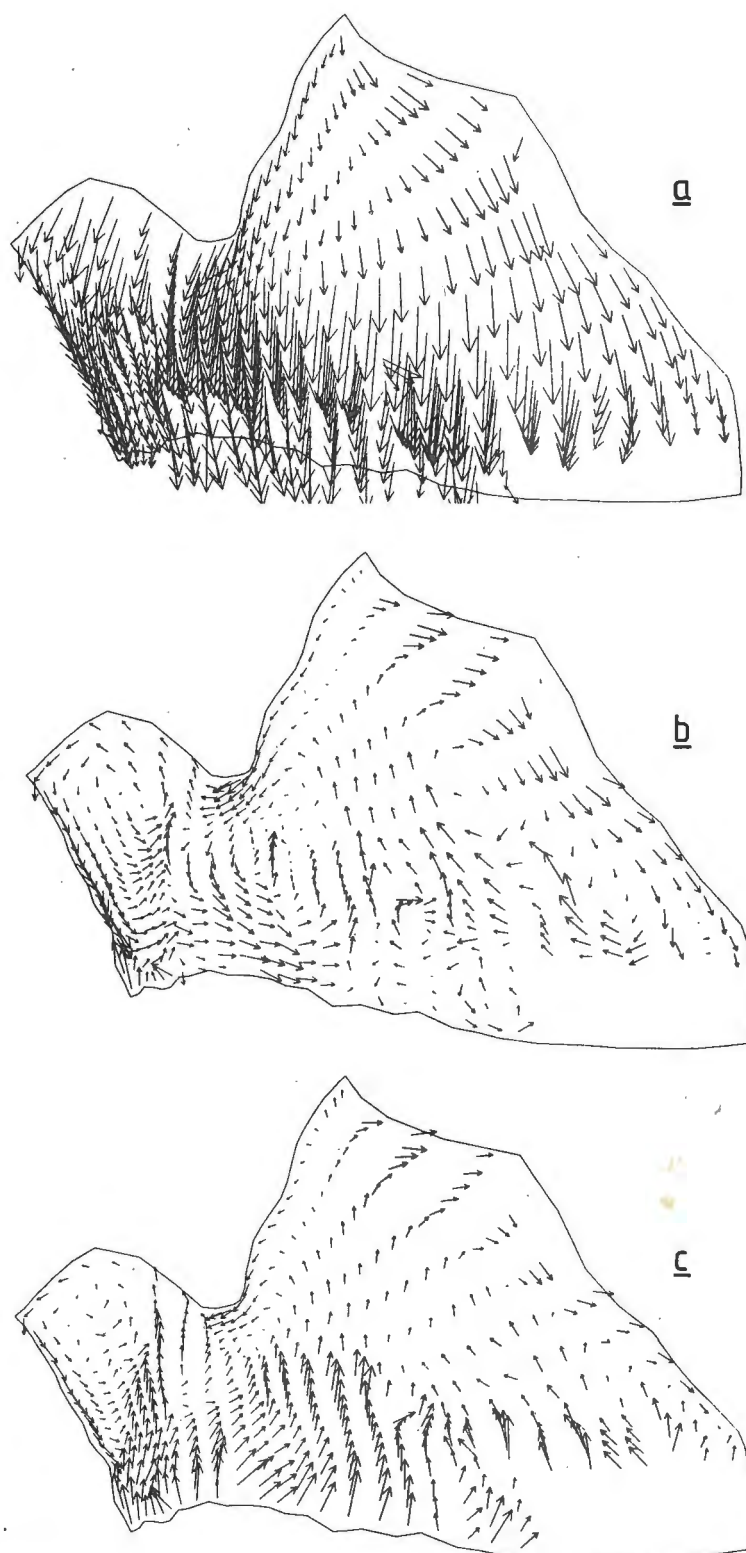




Figur 11. Cirkulation och spridning för östlig vid 5 m/s.

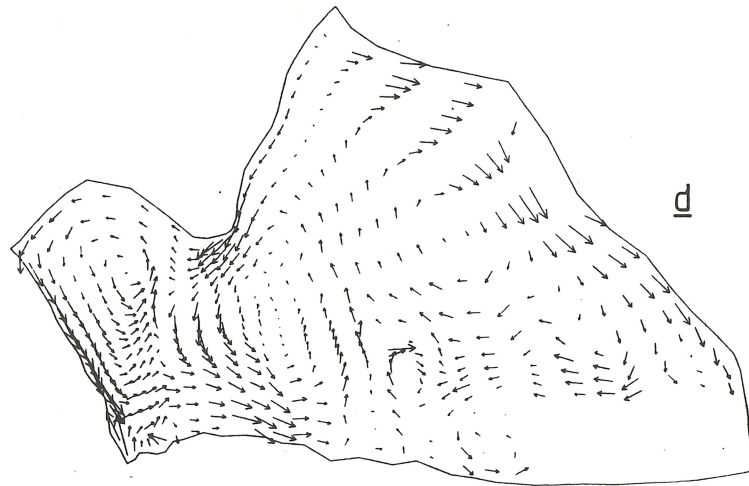
Cirkulation i ytlagret (a), halva djupet (b), bottenlagret (c) och vertikal integrerad cirkulation (d). Hastighetsskala 0.3 m/s. 100 partiklars position efter 3 dygn (e) och —→ trajektorier för 10 partiklar (f).

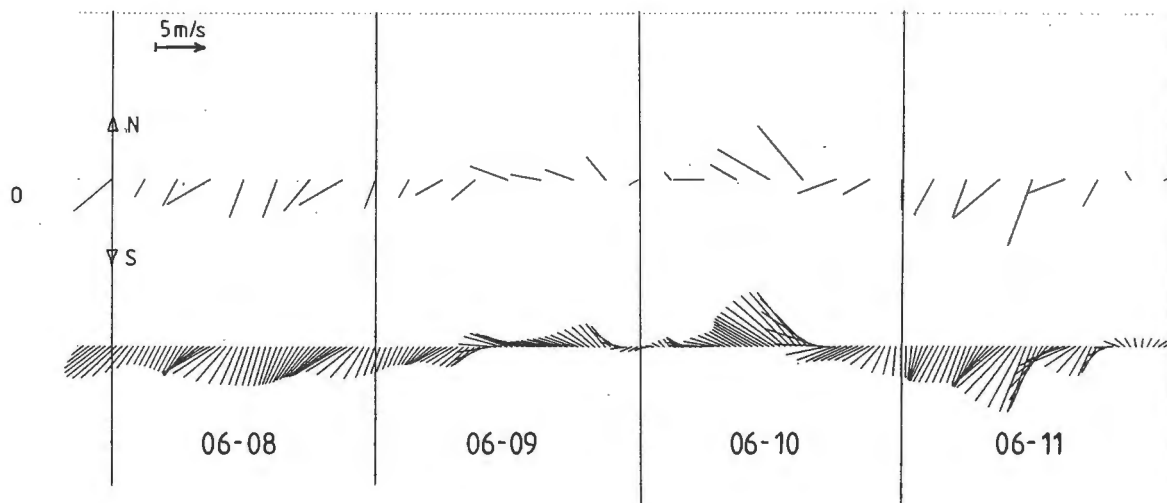




Figur 12. Cirkulation och spridning för nordlig vind 5 m/s.

Cirkulation i ytlagret (a), halva djupet (b), bottenlagret (c) och vertikal integrerad cirkulation (d). Hastighetsskala $\longrightarrow$ 0.3 m/s. 100 partiklars position efter 3 dygn (e) och trajektorier för 10 partiklar (f).

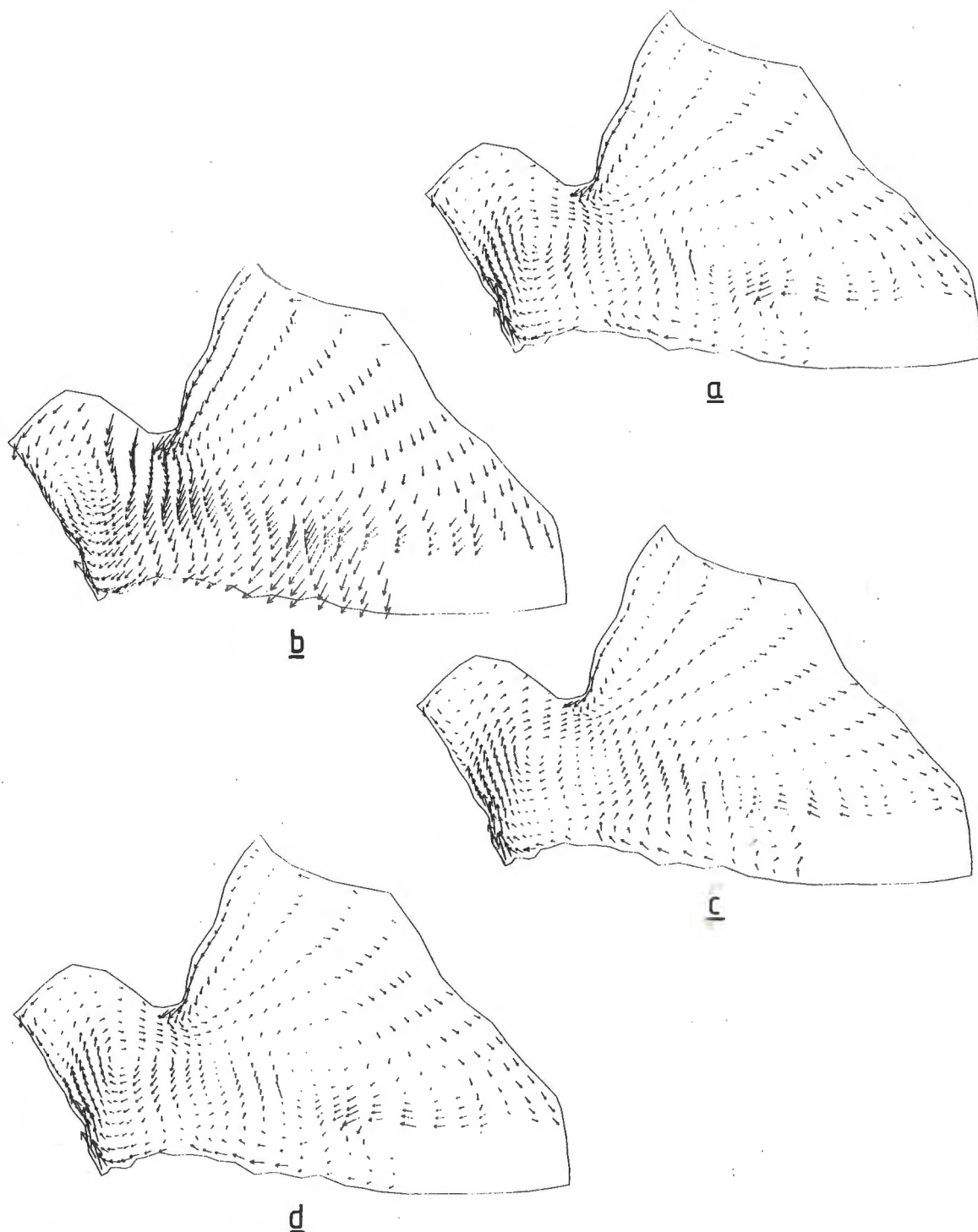




Figur 13. Vinddata för fältmätningssperioden.

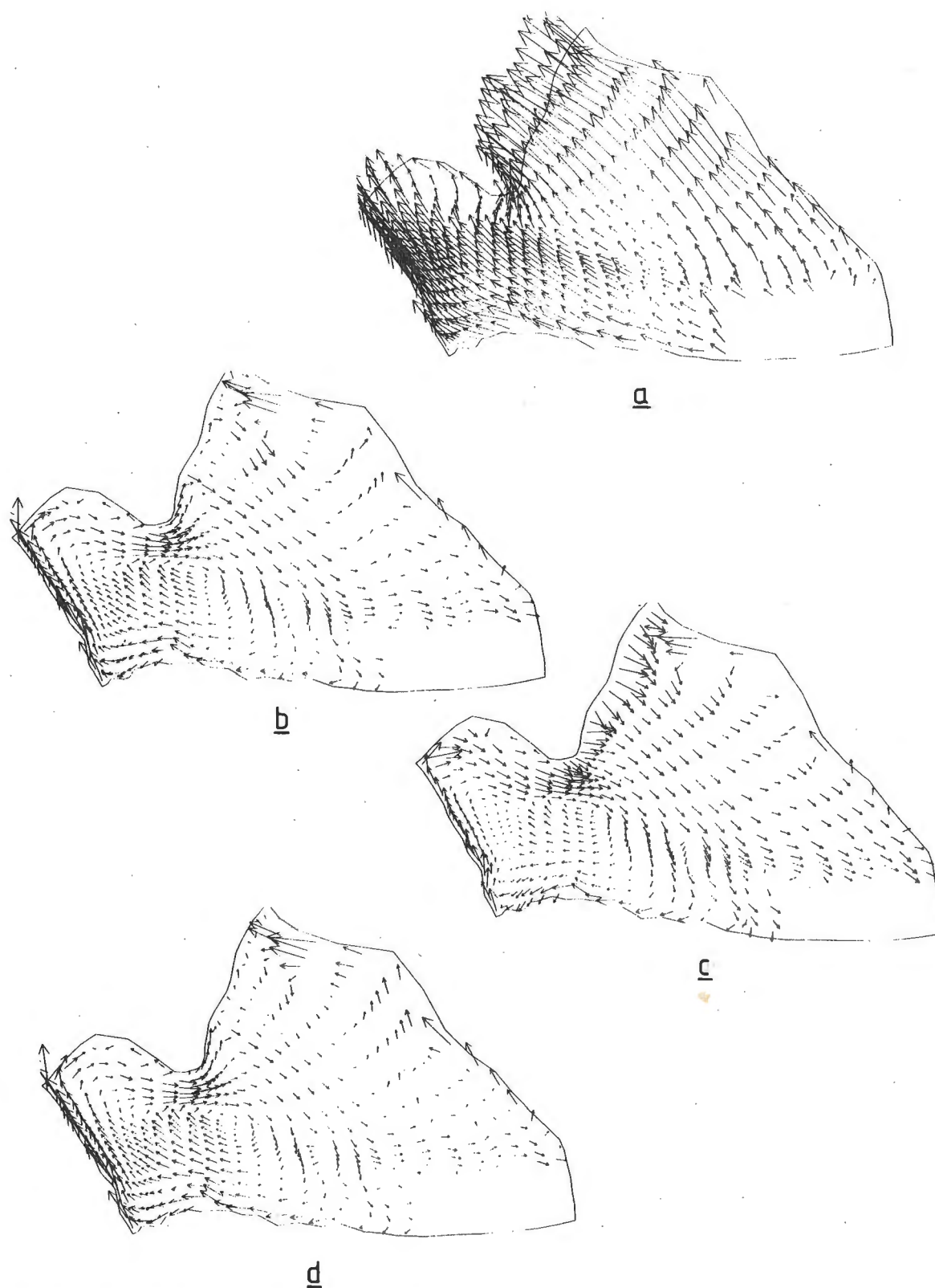
Som en bakgrund till jämförelserna med mätningarna visas cirkulationsbilderna vid tre tidpunkter 06-09, 00⁰⁰, 06-10, 15⁰⁰ och 06-11, 12⁰⁰, se figur 14, 15 och 16. Den första tidpunkten har föregåtts av mer än ett dygn av ganska konstant nord-ostlig vind. Vinden är svag och strömhastigheterna blir därför också svaga. Den andra utvalda tidpunkten kan vindmässigt karakteriseras, se figur 13, som "ett tillfälle med sydostlig vind under 6-8 timmar som föregåtts av en förhållandevis lugn period". Cirkulationsbilden uppvisar därför vissa drag som kan förväntas av motsvarande stationära bild, nämligen strömning i vindriktningen längs stränderna och på grunda områden och returström i djuprännor. Den tredje tidpunkten, 06-11, 12⁰⁰, föregås av en ihållande (ca 20 timmar) nordostlig vind som gradvis tilltar i styrka. Cirkulationsbilden visas i figur 16.

Uppmätt och beräknad tidsserie på hastigheten i punkt M1 (se figur 4) visas i figur 17. Mätningen gjordes på 3 m djup. Beräknad hastighetsserie på detta djup visas tillsammans med beräkningen för en punkt nära ytan och en nära botten. Mätningarna visar att strömhastigheten under perioden var svaga, typiskt 2-4 cm/s, och med en ostlig riktning, förutom under 06-10 då riktning var mer variabel. Beräknade strömhastigheter i samma punkt är av samma storleksordning medan riktningen inte överstämmer. Punkterna nära botten och ytan indikerar att strömmens riktning är konstant i djupet, varför avvikelser ej kan förklaras med en komplicerad hastighetsfördelning i vertikal led.



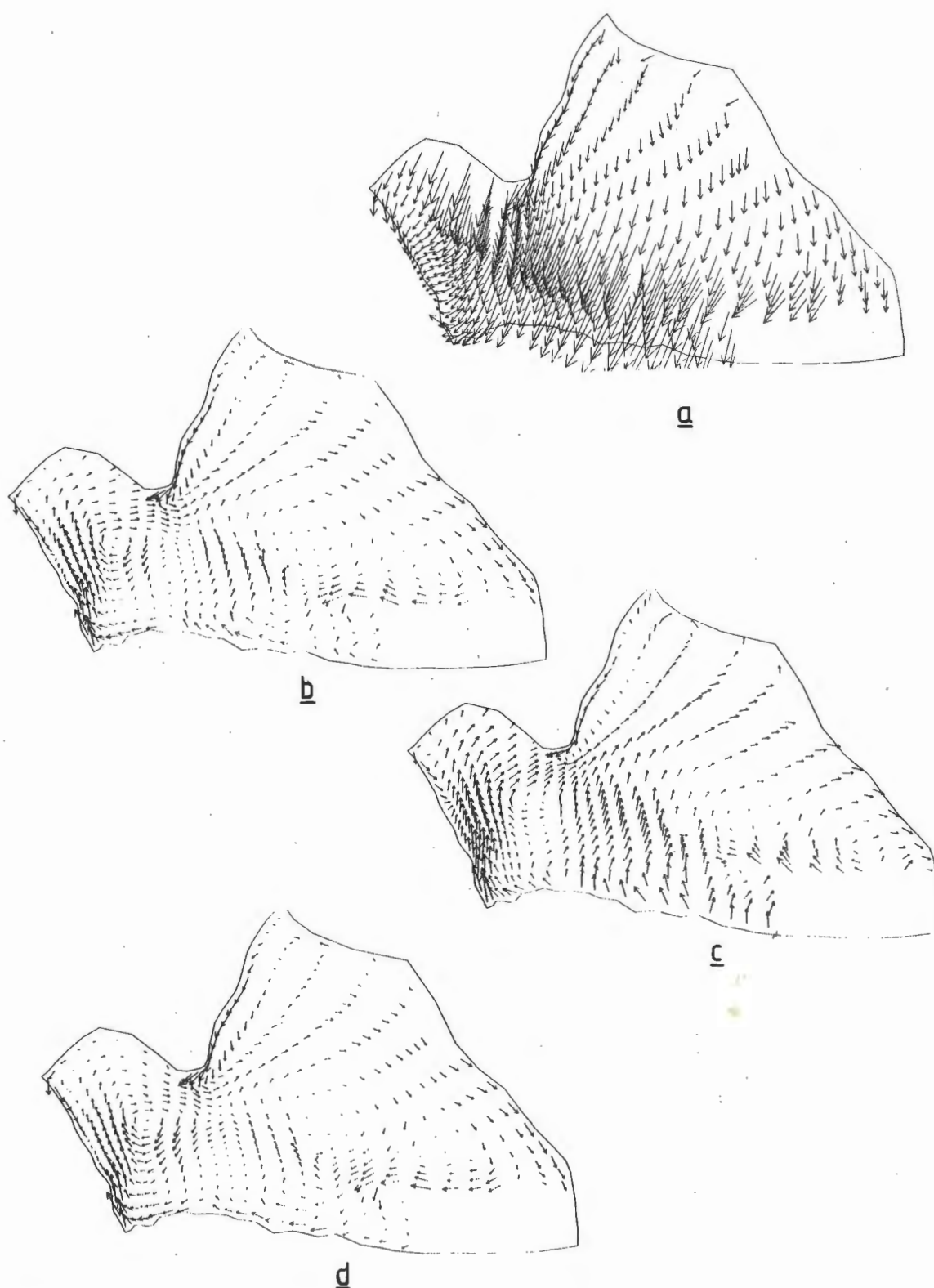
Figur 14. Cirkulationsbild 06-09, kl 00⁰⁰.

Ytlagret (a), halva djupet (b), bottenlagret (c) och vertikal integrerat (d). Hastighetsskala $\longrightarrow$ 0.3 m/s.



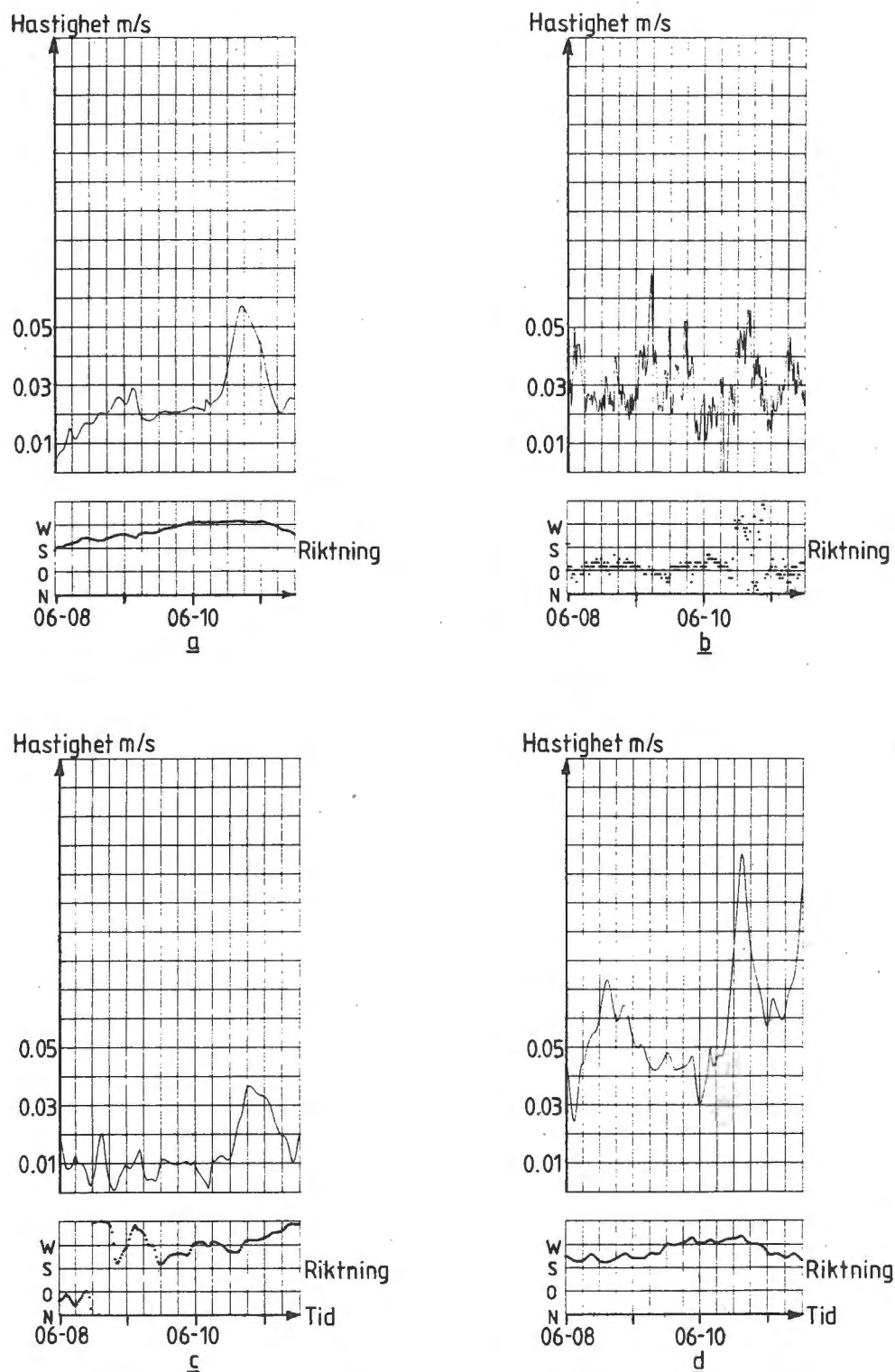
Figur 15. Cirkulationsbild 06-10, kl 15⁰⁰.

Ytlagret (a), halva djupet (b), bottenlagret (c) och vertikal integrerat (d). Hastighetsskala $\longrightarrow 0.3 \text{ m/s}$.



Figur 16. Cirkulationsbild 06-11, kl 12⁰⁰.

Ytlagret (a), halva djupet (b), bottenlagret (c) och vertikal integrerat (d). Hastighetsskala $\longrightarrow 0.3 \text{ m/s}$.



Figur 17. Jämförelse för punkt M1.

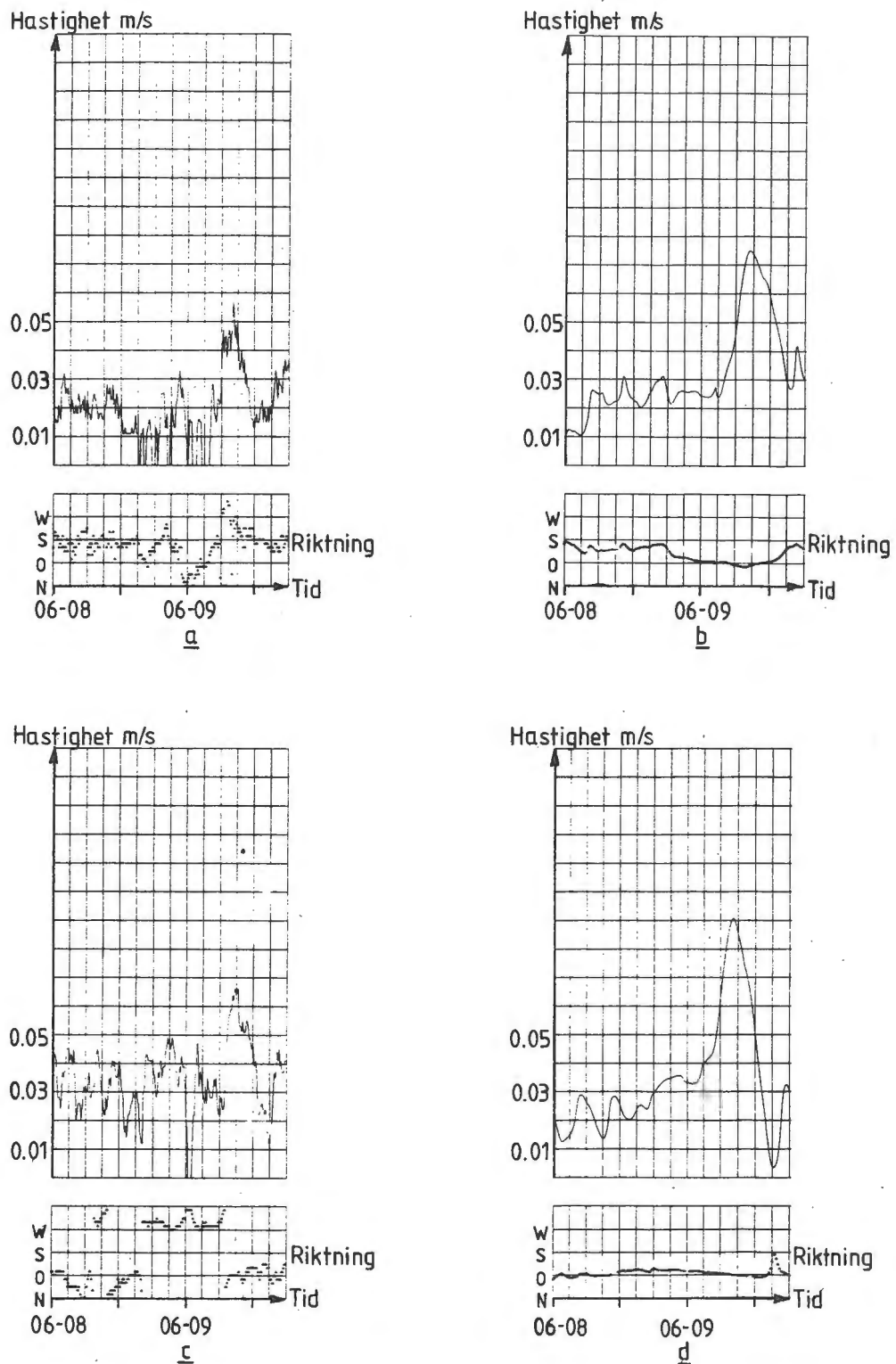
- a) Beräknat på 3 m djup
- b) Mätt på 3 m djup
- c) Beräknat bottlagret
- d) Beräknat ytlagret

Jämförelsen för punkt M2 visas i figur 18. För denna punkt gjordes mätningar på två djup, 3 m och 12 m. Dessa mätserier och motsvarande beräkningar visas i figuren. På 3 meters djup är strömhastigheten typiskt 1-4 cm/s under perioden med en sydlig riktning förutom under 06-10 då riktningen kraftigt varierade. Beräkningar ger en liknande bild både med avseende på riktning och styrka.

Mätningarna på 12 meters djup ger också en strömhastighet på 1-4 cm/s med en riktning som är ganska variabel i intervallet nordost till nordväst. Beräkningarna visar motsvarande strömstyrka medan riktningen i medel är ostlig.

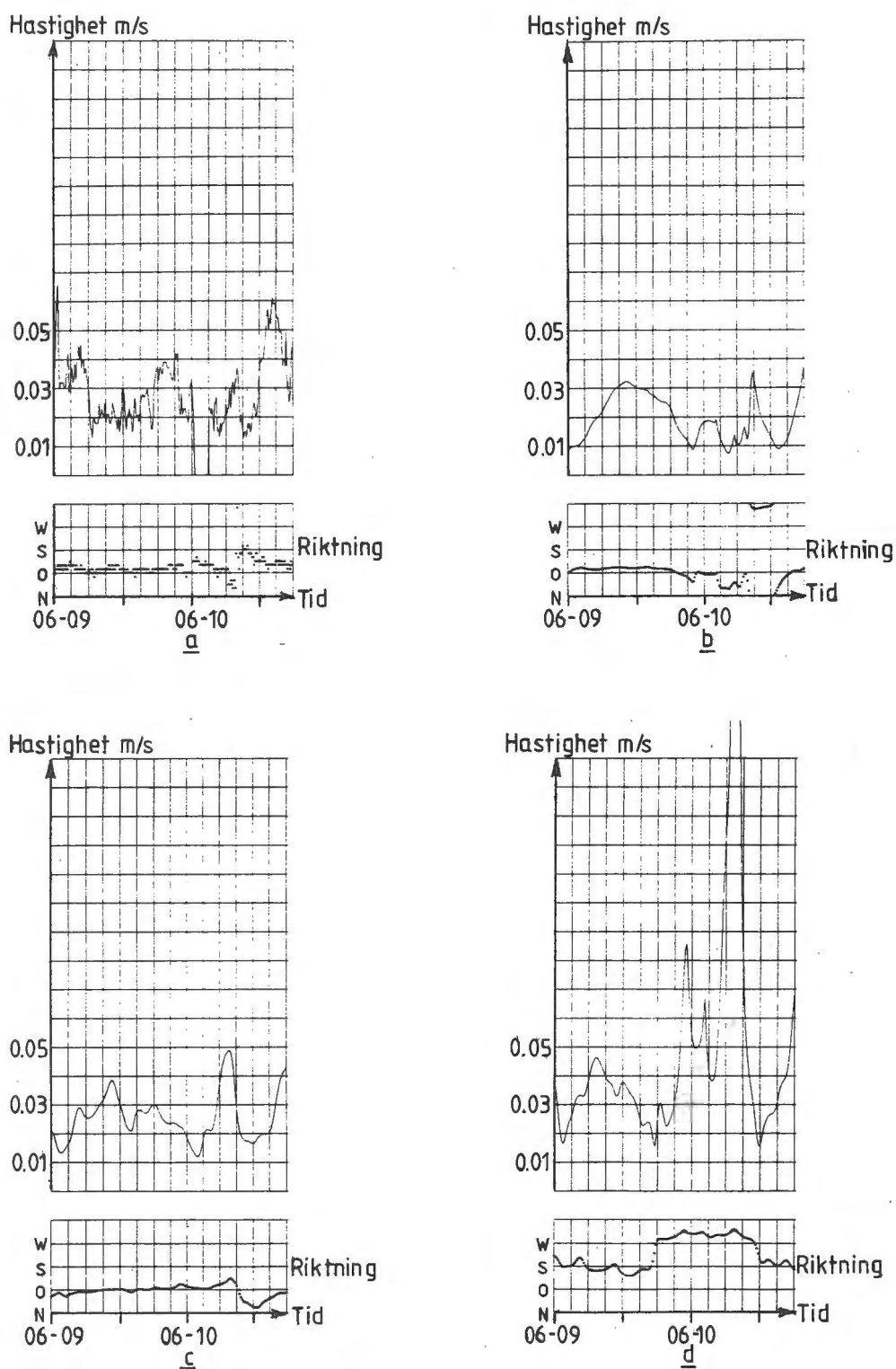
För punkt M3 gjordes mätningarna på 3 meters djup. Dessa redovisas i figur 19 tillsammans med beräkningar för detta djup och för botten och ytskikten. Mätningarna visar att strömhastigheten var av storleksordningen 2-5 cm/s på 3 meters djup med en i huvudsak ostlig riktning. Beräkningarna visar på något svagare hastigheter och en riktning som helt överensstämmer med mätningarna, dvs ostlig.

Spridningsmodellen har endast verifierats kvalitativt. Kan den beskriva den spridning som rodaminmolnet fick under dagarna 1 och 2 juni? Figur 7 visar rodaminmolnets spridning från 1 juni kl 11³⁰ till 2 juni kl 17³⁰. Vindhastigheten var låg mellan 2 och 3 m/s och riktningen vrider från WNW figur 7a till ESE, figur 7e. Grovt sett kan rodaminsmolnets spridning beskrivas på följande sätt. Molnet följer inledningsvis Glans västra strand. På eftermiddagen vrides vinden mot nord och nordost. Det resulterar i att molnet sprider sig ut i bassängen, figur 7b. Vinden fortsätter att vrida under natten och nästa dag mot slutläget ESE. Det som händer med molnet är att det sprids ut i Glans västra bassäng samtidigt som strömfältet håller på att ställa in sig. Figur 7d och e visar att molnet slutligen börjar sprida sig mellan Älggarn och Horns Udde ut mot Glans östra delar. De exempel på spridningsberäkningar som gjordes med modellen visas i figurerna 9-12. De stationära beräkningarna som tillhör vindriktning nord och ost visas i figur 11 och 12. Vi ser att nordvinden sprider partiklarna runt i Glans västra del, figur 12 e och f och att ostvinden sprider partiklarna så att de passerar området mellan Älggarn och Horns Udde ut mot Glans östra delar. Huvuddragen av hur Motala ströms vatten sprids ut i Glan beskrivs med andra ord väl av beräkningsmodellen.



Figur 18. Jämförelse för punkt M2.

- a) Mått på 3 m djup
- b) Beräknat på 3 m djup
- c) Mått på 12 m djup
- d) Beräknat på 12 m djup



Figur 19. Jämförelse för punkt M3.

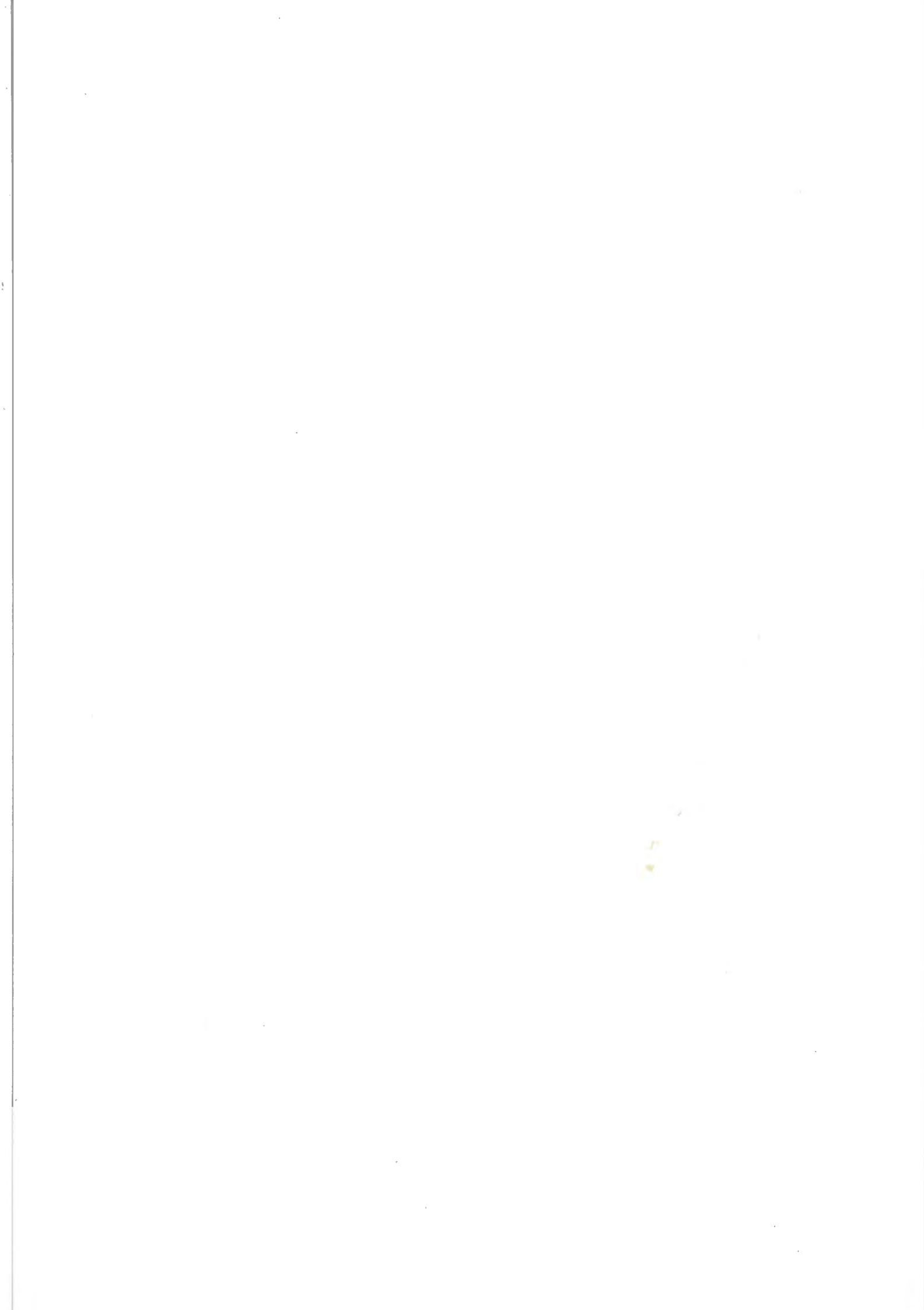
- a) Mätt på 3 m djup
- b) Beräknat på 3 m djup
- c) Beräknat bottenlagret
- d) Beräknat ytlagret

5. Diskussion och slutsatser

De beräknade stationära cirkulationsmönstren, figurerna 9 till 12, uppvisar de karakteristiska drag som man enligt teorin kan förvänta sig. För vindriktningar utan en dominant djupränna i vindriktningen blir lösningarna dock mycket komplicerade med en stort antal virvelliknande strukturer. Spridningsberäkningarna illustrerar denna komplexitet på ett mycket effektivt sätt. Sammanfattningsvis kan sägas att denna typ av beräkningar, cirkulations- och spridningsberäkning för ett antal vindriktningar, ger en god inblick i en sjös dynamik och spridningsmekanismer.

De transienta simuleringarna och jämförelserna med uppmätta tidsserier är svårare att utvärdera. Om man utgår ifrån att strömmätarna återger strömmens riktning och styrka korrekt, vilket naturligtvis inte alltid är självklart, är nästa fråga hur representativ punkten ifråga är. Som framgår av figur 2 och 3 kan en måttlig förändring i djupet innebära att strömriktningen ändras med 180° . I horisontalplanet kan likaledes en måttlig horisontell förflyttning innebära att strömmens riktning och styrka ändras radikalt. Nu är antagligen strömmätarens position känd med tillräcklig precision, men resonemanget kan överflyttas till att gälla vilken precision man kan förvänta sig hos simuleringsmodellen. Troligtvis får man acceptera att den vertikala hastighetsprofilen kan vara något felaktig vilket kan innebära att returströmmen startar några meter högre, eller djupare, än vad som är korrekt. Likaså kan en horisontell virvel säkerligen vara "felplacerad" några hundra meter utan att man för den skull bör betrakta modellen som opålitlig. För att illustrera diskussion studeras cirkulationsmönstret på medeldjupet, figurerna 14 till 16, i punkten M2, vilken inte stämde speciellt väl med mätningarna. Som synes finns en virvel ca 500 m sydväst om M2 för samtliga cirkulationsbilder. Det är tillräckligt om denna virvel, under en period, närmar sig punkt M2 för att erhålla den uppmätta tidserien. Slutsatsen av denna diskussion är att jämförelser med mätta tidsserier i en punkt är svåra att utvärdera och att mätpunkterna måste väljas på "snälla" områden som inte förväntas ha hög virvelintensitet. Punkt M3 verkar uppfylla detta krav. I vertikalled bör mätaren placeras så att området där strömriktningen vänder från vindriktningen till returström, se figur 2, undviks. Uppenbarligen är det svårt att uppfylla dessa krav eftersom strömningsmönstret inte är känt innan mätningarna börjar. Preliminära beräkningar med en simuleringsmodell kan härvid ge en viss vägledning. En vetenskapligt mer invändningsfri verifieringsmetod kräver antagligen dock en något annorlunda strategi. Ett förslag är att ett viss karaktäristiskt drag hos modellen studeras och att fältmätningar inriktas på att verifiera eller vederlägga detta drag i en slags hypotesprövningsstrategi. Till exempel visar modellen att för vindar i intervallet nord-ost till syd-ost skall en kraftig returström genereras söder om Horns udde. Fältmätningar görs då intensivt i detta område för att bekräfta eller vederlägga modellresultatet. Man bör vid en sådan fältmätningssats ha flera oberoende mätare och mätsystem för att helt säkert kunna bestämma aktuell strömstyrka och riktning.

Rodaminförsöket genomfördes tyvärr under en period med växlande och svaga vindar. Vindprognosen lovade en frisk vind från väst som skulle hålla sig konstant under något dygn. Det skulle ge Glan ett stationärt strömmönster och rodaminets spridningsmönster skulle fungera som verifieringsmaterial till spridningsmodellen. Efter det att rodaminet börjat sprida sig ut i Glans västra del avtog vinden och vred sig sakta 180° under ett dygn. Det innebar att förutsättningen för en god verifiering försvann! Trots detta kan man efter att ha analyserat både rodaminmolnets spridning under drygt ett dygn samt de teoretiska spridningsmönster som modellen räknade fram dra slutsatsen att huvuddragen i rodaminets spridning i Glan väl beskrivs av spridningsmodellen.





Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 Norrköping. Tel 011-158000. Telex 64400 smhi s.