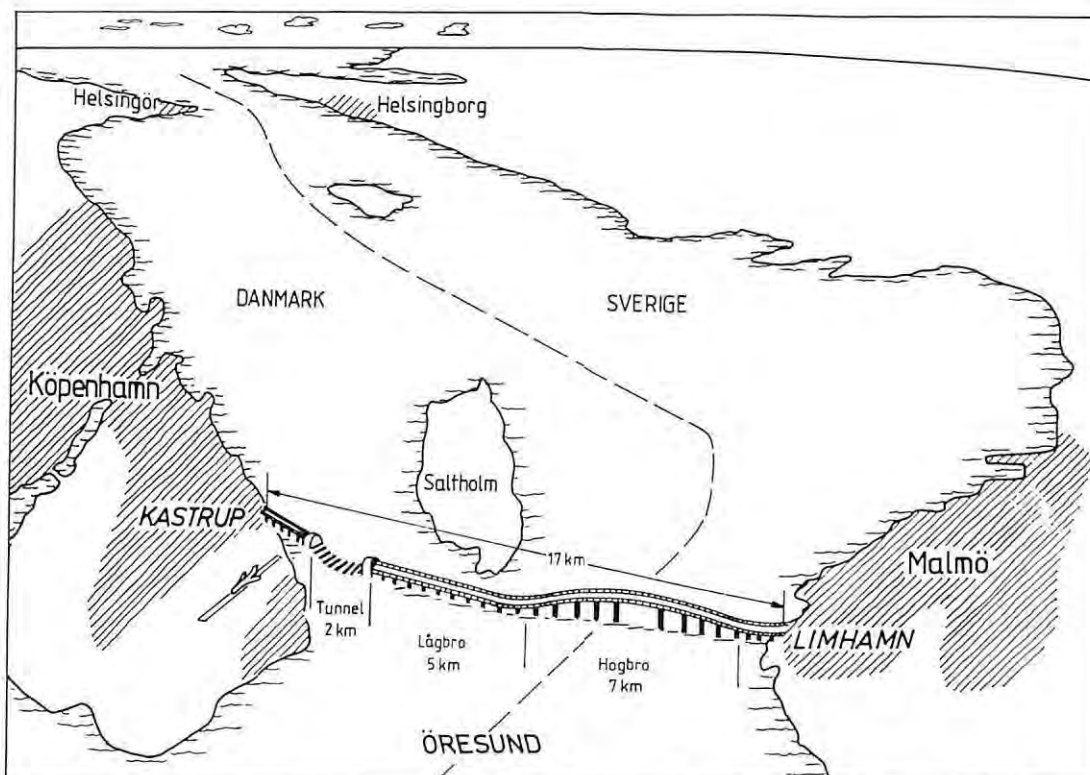




FASTA FÖRBINDELSER ÖVER ÖRESUND

Utredning av effekter på vattenmiljön i Östersjön

FASTA FÖRBINDELSER ÖVER ÖRESUND

Utredning av effekter på vattenmiljön i Östersjön

SMHI/Naturvårdsverket

FASTA FÖRBINDELSER ÖVER ÖRESUND

Utredning av effekter på vattenmiljön i Östersjön

SMHI/Naturvårdsverket

INNEHÅLL	sid
Inledning	1
Öresund	1
Den fasta förbindelsens utformning	2
Fältmätningarna	3
Modellen	3
Resultat	4
Östersjön	6
Ekologiska modellen för Östersjön	6
Hur förändras tunga bottenströmmen?	7
Resultat	8
Ekologiska slutsatser för Östersjön	9
Nollösning	12
Muddring för att ge oförändrad genomströmning	12

Bilaga 1 Fast förbindelse över Öresund – Alternativa nollösningar.

Bilaga 2 Modellsimulering av sedimentation i grävd fördjupning av Drogdenrännan.

FASTA FÖRBINDELSER ÖVER ÖRESUND – EFFEKTER PÅ VATTENMILJÖN I ÖSTERSJÖN

Inledning

Denna rapport sammanfattar resultaten av beräkningar av vilken inverkan en fast bro och tunnelförbindelse Malmö-Köpenhamn kan få för vattenutbytet mellan Östersjön och Västerhavet. Beräkningarna gäller eventuella förändringar av de relativt sällsynta men ändå ytterst viktiga inflödena av salt djupvatten till Östersjön. Den vanliga, mindre salthaltiga vattenutväxlingen har inte behandlats här utan tas med i helhetsbedömningen på annat sätt.

Arbetet har omfattat:

- a Intensivmätningar av ström och salthalt i Öresund med registrerande instrument. (SMHI)
- b Simulering i dator av ett typiskt saltvatteninbrott genom Öresund med och utan fast förbindelse enligt grundförslaget till en fast förbindelse. (SMHI)
- c Simulering i dator av oceanografisk/biologiska förhållanden i Östersjön. Beräkningarna omfattar 100 år. Resultat för två sådana perioder med och utan fast förbindelse enligt grundförslaget har tagits fram. (SNV)
- d Biologisk utvärdering av beräknad påverkan av fast förbindelse (grundförslaget) över Öresund. (SNV)
- e Simulering i dator av flera alternativa utformningar av bro/tunnel som inte påverkar Östersjöns salthalt eller syreförhållanden. (SMHI)

Öresund

De hydrografiska förhållandena i Öresund har beskrivits i många sammanhang bland annat i de tidigare rapporter som behandlat inverkan av en tunnel mellan Helsingborg och Helsingør på sundets vattenförhållanden. Här skall därför endast ges en kort beskrivning som bakgrund till de efterföljande avsnitten. Dessutom ges nedan en översiktlig beskrivning över Östersjöns oceanografi för att ge en bas för diskussionen om en eventuell påverkan på Östersjön beroende på en fast förbindelse mellan Malmö och Köpenhamn.

Flodvattentillförseln till Östersjön är ca $450 \text{ km}^3/\text{år}$. Flodvattnet blandas med havsvattnet och orsakar en utström av bräckt östersjövatten av storleksordningen $900 \text{ km}^3/\text{år}$ genom Bälten och Öresund. Av denna ström beräknas 20-30 % passera ut genom Öresund varvid uttransporten är störst i april och maj månader och minst i november.

Förutom nederbörden och inflödet av sötvatten från dräneringsområdet förses Östersjön med inströmmande saltvatten från Nordsjön. De stora intransporterna av vatten från Nordsjön är huvudsakligen momentana och intensiva med kort varaktighet. Salthalten varierar oftast mellan 15-25 enheter. Vatteninflödet varierar mycket tidsmässigt, både från en månad till en annan och från år till år. Inflödesserierna avslöjar också stora differenser mellan olika 20-årsperioder. Det årliga medelflödet för 20-årsperioden 1900-1919 var 10 % lägre än för de följande två decennierna.

Volymen och intensiteten på inflödet från Nordsjön beror på den aktuella vädersituationen, på salthalt och på vattenståndsdifferansen mellan Östersjön och Kattegatt. Saltvatteninflöde förekommer på två sätt: en ofta förekommande, långsam djupvattenström alstrad av den horisontella salthaltsgradienten mellan Östersjön och Nordsjön och ett tillfälligt, betydligt intensivare inflöde förbundet med ihållande västliga vindar. Den senare uppstår oftast under höst och vinter. Intervallet mellan stora inflöden av denna typ kan vara flera år. Dessa saltvatteninbrott är emellertid synnerligen viktiga för Östersjöns ekologiska balans.

Man har tidigare ansett att salttillförseln främst sker via det djupa Stora Bält. Senare undersökningar indikerar dock att Öresund med sin mera direkta, kortare transportväg är av lika stor betydelse för transporten av saltvatten. Ett i detta sammanhang rimligt antagande är därför att Öresund står för upp till 50% av transporten av extremt salt vatten till Östersjön.

Den fasta förbindelsens utformning (grundförslaget)

Förbindelsens sträckning visas i fig 1. (ref. Förbindelse København-Malmø, Vägverket och Vejdirektoratet, notat juni 1985 samt Öresundsförbindelser Rapport av 1984 års danska och svenska Öresundsdelegationer Ds K 1985:7 juni 1985)

Väg och järnväg dras på en 1800 m lång dämning och ramp från danska kusten ut mot Drogden till en 1600 m lång tunnel under farleden. Uppfarten sker på en 1200 m lång ramp till en 5000 m lång lågbro och en 7500 m lång högbro över Flint- och Trindelrännan.

Bropelarna för högbron reducerar den tillgängliga tvärsnittsarean med 8 %. Motsvarande siffra för lågbron är 9 %. Inga speciellt utrymmeskrävande påseglingsskydd har då anlagts. Det anses att de kraftiga pelarna (bredd 12 m) nära navigationslederna tål påsegling. Vid tunneln har dämning och ramper blockerats för genomströmning i beräkningarna.

Fältmätningarna

För att studera strömnings- och skiktningsmönstret i Öresund utsättes instrument i tre stationer i snittet mellan Helsingborg och Helsingör. Såväl ytström (5 meter) som bottenström (20 meter) registreras av instrumenten, som även mäter salthalt och temperatur på de här nivåerna. I en station mitt i sundet, nära Lous Flak, mäts vattentemperaturen kontinuerligt på 11 nivåer från ytan till botten.

Strax söder om Nordre Røse i, Drogdenrännan, mäts ström, salt- halt och temperatur på en nivå i två stationer mellan Kastrup och Saltholm.

I Flintrännan nyttjas data från den redan befintliga automatiskt registrerande mätaren vid Oskarsgrundet, där mätdata kontinuerligt samlas in och skickas via telenätet till SMHI.

Ström- och skiktningsmätningarna i det här området, på svenska sidan, kompletteras med ett instrument i Trindelrännan.

Undersökningarna i Öresund utföres under tiden 18 november 1986 - 10 januari 1987, med vissa smärre avvikelser. På grund av den extremt snabba isläggningen blir mätverksamheten i några av stationerna utsträckt till i början av februari samt i något fall till den månadens utgång.

Under perioden 25 november till 7 december 1986 är strömsättningen i sundet sydgående, med undantag för några kortare avbrott. Vatten från Skagerrak-Kattegatt strömmar igenom, och under fem dagar i december uppmätes en salthalt på drygt 25 enheter ($^0/00$) på 6 meters djup i Drogdenrännan. Vi har alltså registrerat ett saltvatteninbrott som kan användas som jämförelse för beräkningarna. Det inflödande saltvattnet medför att salthalten i djupvattnet V om Bornholm (Arkonabassängen) höjs från 13-14 enheter till 20-21 enheter (14 december).

I Öresund sjunker temperaturen snabbt efter nyårshelgerna och den 10e januari visar registreringarna på minustemperatur. Ett strömskifte från nordgående till sydgående den 22 januari ger några dagars höga strömhastigheter och inström av saltvatten på 22-23 enheter. Salthalten förblir sedan på nivån 18-19 enheter under tiden fram till upptagning av instrumenten, i början av februari. Här finns ånyo en längre sammanhängande period med sydgående ström.

Modellen

Strömningsförhållandena i Öresund har studerats med hjälp av en numerisk modell PHOENICS. Sundet har delats in i ett stort antal beräkningsvolymer

(se fig 2). Rörelseekvationerna har lösts för två faser; brackvatten och saltvatten, vilket innebär att sundet betraktats som ett tvålayersystem där ett av lagren helt kan försvinna i t ex den ena ändan av sundet. För en beskrivning av modellens uppbyggnad hänvisas till Funkqvist, L Gidhagen, L Svensson, U; The mathematical modelling of baroclinic waves and fronts in the ocean. Appl. math. modelling, 1987, vol. 11

Modellen har använts för att simulera ett saltvatteninbrott genom Öresund som är av samma karaktär som det som SMHI mätte upp i början av dec -86. Startsituationen efterliknar en situation med utflöde där brackvatten ner till 12 m djup är lagrat över saltvatten i hela Öresund. Inflöde av vatten genom sundet genereras av en i modellen pålagd vattenståndshöjning (+30 cm) i Kattegatt. Modellsimuleringen omfattar 6 dygn med konstant högvatten i Kattegatt utan bro/tunnel och samma 6 dygn med bro/tunnel.

Modellen har också använts till att simulera ett tiotal olika alternativa konstruktioner för tunneln/bro. Olika långa tunnlar har simulerats liksom varierande djup i tunnelöppningen och under bron (nollösningar).

Resultat

En minskning av tvärsnittsytan i bro/tunneltvärsnittet minskar inflödet av saltvatten på två sätt. Givetvis minskar strömningen på grund av friktion vilket innebär att salttransporten vid långvarig inström minskar. Den ökade friktionen medför också att det brackvatten som skall backa tillbaka genom Drogden och Flintrännan bromsas och försenar saltvattnets inträngande. Man kan tänka sig en situation där 100% av saltvatteninträngningen hindras av bro/tunnel. Om nämligen inströmmen är i naturligt tillstånd pulserande med perioden säg 2 dygn och om saltvatten utan tunnel/bro i slutet av det andra dygnet tränger in förbi Drogden kan saltflödet helt upphöra om tunnel/bro försenar saltvattnets transport så att inget saltvatten passerar Drogden innan stömmen vänder till nordgående igen. Situationer av detta slag är inte vanliga men kan tjäna som illustrativt exempel. Resultatet av modellkörningarna visar också att korta (2 dygn) inflöden påverkas mer än långa.

I figur 3 visas en ögonblicksbild över strömmen i det undre salta lagret efter 2 dygns inström utan bro/tunnel. Saltvattnet har just nått Drogden och Flintrännan medan brackvatten fortfarande ligger kvar i områden med svagare ström t ex i Lundåkrabukten och runt Saltholm. I figur 4 visas strömmen i det salta bottenvattnet efter 6 dygns inström. Den streckade delen av saltvattnet i figuren har passerat tröskeln in till Östersjön och kan inte återvända ut när strömmen vänder.

Den minskade tvärsnittsarea som grundförslaget till bro/tunneln innebär medför en minskning av saltvatteninbrotten genom Öresund. Om man anser att intransport med sydgående ström genom Öresund är varierande i tiden och har perioder på 4-6 dagar, blir reduktionen av intransporterat saltvatten i genomsnitt 17 %. För betydligt längre, mycket sällsynta perioder av inström blir reduktionen mindre.

På sin väg från Öresund och vidare ner i Arkonabassängen väster om Bornholm blandas det inträngande saltvattnet med Östersjövatten, salthalt 8 enheter. Resultatet blir i det studerade exemplet att det vatten som kommer in genom Öresund, salthalt 25 enheter, då det kommer ner i Arkonabassängen har blandats till lägre salthalt. Då en liten mängd saltvatten strömmar ned för slutningen i ett tunt lager över botten blir omblandningen mera märkbar och det inströmmande vattnet mera utsötat. Bro/tunnel-reduktionen av inflöde genom Sundet medför alltså också en något större utsötning på väg ner mot Östersjöns djupbassänger.

I tabellen nedan framgår vilka mängder saltvatten och vilka salthalter som enligt beräkningarna når ner i djuphålan väster om Bornholm (Arkonabassängen) under det studerade saltinbrottet.

Tabell

Vattenmängd till Arkonabassängen vid det studerade saltvatteninbrottet genom Öresund

	Öresund utan bro/tunnel		Öresund med bro/tunnel		
	Vatten mängd km ³ /d	Salth. Enh.	Vatten mängd km ³ /d	Salth. Enh.	Volymförändr. %
Dag 1	0	--	0	--	--
Dag 2	0.770	12.4	0.658	11.9	-15
Dag 3	2.008	16.9	1.857	16.4	-8
Dag 4	3.252	19.1	2.855	18.6	-12
Dag 5	4.543	20.5	3.924	19.9	-14
Dag 6	5.408	21.1	4.680	20.6	-14

Östersjön

Östersjön karakteriseras av ett unikt ekologiskt system som är ytterst känsligt för förändringar. Detta beror dels på naturliga faktorer som den låga salthalten, det begränsade vattenutbytet och den starka vertikala skiktningen och dels på föroreningar. Den ökade närsaltsbelastningen har inneburit en ökad biologisk produktion och sedimentation av organiskt material och en ökad syreförbrukning som gett upphov till syrebrist i djuphålorna. Även i kustområdena har förekomsten av syrefria bottenar och dessutom massproduktion av giftiga alger ökat. Östersjöns ekosystem består av ett fåtal, i huvudsak marina arter som lever på gränsen av sina utbredningsområden på grund av den låga salthalten. Den låga salthalten och skiktningen, med en permanent haloklin (salthaltssprångskikt) på ca 65 meters djup upprätthålles av en balans mellan inflöden av saltvatten genom de danska sunden och Öresund till djupvattnet och en sötvattens-tillförsel och omblandning av ytvattnet.

Det inströmmande salta och syrerika vattnet blandas med utströmmande ytvatten från Östersjön och skiktas in under haloklinen, men på olika djup beroende på dess salthalt. Endast vid sällsynta tillfällen är salthalten så hög att vattnet i Östersjöns djuphålor byts ut av nytt syrerikt och saltare vatten. Det sista större saltvattensinbrottet skedde 1977 och Östersjöns centrala djuphålor är idag syrefria från cirka 100 meters djup. Syrekonzentrationen påverkar inte bara djurens överlevnad utan också kritiska processer som styr närsaltsomsättningen i ekosystemet. En förändrad salthalt påverkar inte bara utbredningen av olika växter utan också transporterna av syre och närsalter i systemet.

EKOLOGISKA MODELLEN FÖR ÖSTERSJÖN

Modellen

En kopplad hydrodynamisk - biogeokemisk modell har utnyttjats för att studera effekterna av ändrade saltvattensinflöden. Modellen har utvecklats i ett samarbetsprojekt mellan Askölaboratoriet (Stockholms Universitet) och Oceanografiska institutionen (Göteborgs Universitet) och beskriver de fysiska transporterna och de biokemiska processer som styr syreförhållandena, samt produktion och nedbrytning av kväveföreningar. Kväve är det närsalt (ammonium, nitrat) som idag styr främst den biologiska produktionen i egentliga Östersjön. Modellen har en hög vertikal upplösning och beskriver fördelningen av salt, temperatur, syre, organiskt kväve (i vattenmassan och i sediment), nitrat och ammonium i 1-meters skikt från ytan till botten (0 - 250 meter). Modellen är endimensionell och beskriver medelvärden inom varje skikt och kan alltså ej upplösa skillnader mellan kust - utsjö eller mellan olika delområden av egentliga Östersjön.

Modellens egenskaper finns närmare beskrivna i Stigebrandt, A. & F. Wulff (1987): A model for the dynamics of nutrients and oxygen in the Baltic proper (Journal of Marine Research, under tryckning). Den statistiska drivningen av väder (vind, solinstrålning, temperatur) slumpas dagligen från fördelningar kring månadsmedelvärden. Inflödet av saltvatten (volymflöde, salthalt) slumpas var 5:e dag från en observerad fördelningsfunktion. Genom att simulera utvecklingen under mycket lång tid, 100 år, är det möjligt att studera effekterna av såväl långsiktiga förändringar som av olika slumpmässiga kombinationer av inflöden och väderbetingelser.

Hur förändras tunga bottenströmmens "initialtillstånd" i Arkonabäckenet av en bro i Öresund?

I östersjömodellen (Stigebrandt och Wulff, 1987) får den tunga bottenströmmen sina startvärden (volymflöden och salthalt) i Arkonabassängen. Det tunga vattnet i Arkona kommer dels från Öresund, dels från Bältsjön. SMHI har beräknat att den fasta förbindelsen reducerar inflödet genom Öresund med ca 17 % för höga salthalter (> 20 enheter). Under vägen ner till Arkonabassängen blandas det tunga vattnet med omgivande Östersjövatten, varvid salthalten sänks med ungefär 5 enheter. Med den fasta förbindelsen sänks salthalten med ytterligare 1/2 enhet, eftersom mindre flöden blandas mer än större.

Den tunga bottenströmmen i Östersjön får bidrag också från Bältsjön. Beräkningarna utnyttjade dagliga salthaltsmätningar för åren 1971 - 1973 från Drogden och Gedser Rev, samt beräknade vattenstånds- och densitetsdrivna strömmar och fig 5 visar att knappt 40 % av allt vatten med salthalter högre än 20 enheter kommer via Öresund, snedstreckade fält i fig 4. De skuggade fälten visar bidraget från undre skiktet i Bältsjön, medan de ofyllda visar bidraget från övre skiktet i Bältsjön. För lägre salthalter är Öresunds bidrag betydligt mindre (fig 5).

I modellen antas att volymflödena genom Öresund minskar med 20 % för höga salthalter (över 20 enheter). Eftersom Öresund (utan bro) bidrar med mindre än hälften av inflödet med höga salthalter, kommer volymflödena för höga salthalter att minska med högst 10 % av nuvarande flöde. Vatten med salthalten 20 enheter i Bälten/Öresund får, på grund av inblandning, sin salthalt reducerad till ungefär 15 enheter i Arkona. Alla volymflöden med salthalt över 15 enheter i Arkona reduceras alltså till 90 %. Volymflöden med salthalter i intervallet 15 - 20 (10 - 15 i Arkona reduceras till 95 %, vilket motsvarar ett 25 %-igt bidrag från Öresund i detta salthaltsintervall) detta är troligen en överskattning, se intervallet 15-20 enheter i fig 5.

SMHI har uppskattat att salthalten i det i Arkona inlagrade vattnet som kommer från Öresund kommer att minska med 1/2 enhet för salthalter i Arkona överstigande ca 15 enheter. Detta betyder ca 1/4 enhet minskning totalt, eftersom cirka hälften av vattnet kommer från Bälten. För salthalter i intervallet 10 – 15 enheter (i Arkona) reduceras salthalten i modellen med 1/8 enhet.

Resultat

Två modellsimuleringar har genomförts, dels ett standardfall där modellen drivs med väder, vattenutbyte och en närsaltsbelastning som motsvarar nuvarande förhållanden, dels ett fall där inflödesfunktionen ändrats för att motsvara den mest extrema situation som kan uppkomma med en bro – tunnel förbindelse i Öresund (beskriven ovan), medan alla övriga förutsättningar varit desamma som i standardfallet.

Det reducerade inflödet genom Öresund resulterar i en sänkning av djupvattnets salthalt inom några år (fig 6 A). De två kurvorna är parallellförskjutna och visar samma fluktuationer beroende på saltvatteninflöden till djupvattnet. Det vertikala vattenutbytet resulterar så småningom (efter ca 10 år) i en sänkning av ytvattensalthalten (fig 6 B). En långsiktig fluktuation beroende på djupvattnets salthalt syns tydligt. Den säsongsmässiga variationen i ytan beror på fluktuationer i sötvattenstillförsel och i det vertikala utbytet. Den vertikala salthaltsvariationen, baserad på månadsmedelvärden för januari under 100 år (fig 7 A) visar på en sänkning av salthalten med 0.3 enheter ovanför haloklinen och med 0.6 enheter i djupvattnet (fig 7 B). Den vertikala fördelningen av temperaturen (fig 8 A) visar en något lägre temperatur (0.1°C) i djupvattnet (fig 8 B).

Det maximala djupet för haloklinens (saltvattensprångskiktets) läge under året förskjuts neråt med ca 0.5 – 1 meter under de 100 åren, jämfört med referensfallet (fig 9). Den vertikala fördelningen av nitrat, baserad på månadsmedelvärden för januari (fig 10 A) visar på förhöjda halter kring haloklinen, maximalt ca 0.6 mmol m^{-3} (fig 10 B). Ytvattenkoncentrationen har dock ökat med mindre än 0.05 mmol m^{-3} . Syrekoncentrationen (fig 11 A, B) visar en svag ökning, maximalt ca 0.15 ml l^{-1} på 75 meters djup.

Primärproduktionen av organiskt material (fig 12 A) och sedimentationen genom haloklinen (fig 12 B) visar visserligen på skillnader under samma år för de två fallen men medelvärden för de 100 åren är identiska.

Förekomst av syrebrist och låga salthalter kan påverka utbredning och reproduktion av känsliga marina arter, t ex torsk. Tabellen nedan visar det antal månader i 100-årssimuleringarna, då salthalten är över 10 enheter och syrehalter över 2 respektive 3 ml l⁻¹ förekommer, baserat på observationer från var 25:e meter.

Salthalt ‰	Syre ml/l	Öresund utan bro/tunnel	Öresund med bro/tunnel
> 10	2	1 622	1 155
> 10	3	395	357

Ekologiska slutsatser för Östersjön

Modellens utformning och resultaten har diskuterats i en ekologisk referensgrupp med representanter från Fiskeristyrelsen och Askölaboratoriet, Stockholms Universitet. Modellen innehåller en på nuvarande kunskap baserad beskrivning av de komplexa hydrodynamiska och biogeo-kemiska processerna som styr Östersjöns salthalt, syre och kvävebalans. Modellen kan därför användas för en övergripande analys av de storskaliga förändringar som ett förändrat vattenutbyte kan innebära. Modellen kan i sin nuvarande formulering inte reproducera regionala skillnader och de tänkbara effekter på produktiviteten som en förändrad artsammansättning eller omsättning av fosfor kan föra med sig. Förändringarna i salt och vattenbalans kan därför förutses med större tillförlitlighet än de biologiska förändringarna.

Den sänkning av medelsalthalten i Östersjön som modellsimuleringarna som sett extremfall förutsäger, skulle innebära en ytterligare stress för många marina arter som redan nu lever på gränsen för sina utbredningsområden (fig 13). Östersjöns fauna och flora är sammansatt av dels marina arter som tål en låg salthalt, dels saltvattenstoleranta sötvattenarter, samt ett fåtal arter som är specifika för brackvattensmiljön. Artantalet förändras drastiskt även vid en liten förändring av salthalten. Detta förhållande illustreras schematiskt i fig 14 som också visar att det totala artantalet har ett minimum vid en salthalt av ca 16 - 8 ‰, vilket motsvarar ytsalthalten i större delen av egentliga Östersjön, söder om Ålands hav.

Ytsalthalten och den nordliga utbredningsgränsen för några viktiga marina arter illustreras i fig 13. Salthalten reduceras snabbt vid de trånga inloppen till Östersjön, från ca 20 ‰ Kattegatt till 8 ‰ i Arkona-

bassängen i södra Östersjön. Detta innebär att karaktäristiska marina arter som sjöstjärnor och krabbor ej kan etablera sig i Östersjön. Andra arter som tolererar lägre salthalter kan tränga längre norrut. Salthaltsskillnaderna inom Östersjön är mycket små. Detta innebär att en sänkning av ytsalthalten med enbart 5 ‰ (0.3 ‰/‰) innebär en förskjutning söderut av den högsta ytsalthalten med upp till 10 - 20 mil. Inom salthaltsgradienten från södra Östersjön till Bottenviken sker en gradvis reduktion av både artantal, storlek och biomassa (totala mängden organismer uttryckt i vikt- eller volymenhet) inom de olika ekologiska samhällena. Ökningen i artantal vid låga salthalter (enligt fig 14) sker enbart på grunda bottenar där betydelsen av olika insektslarver ökar. Östersjöns naturliga långsiktiga salthaltsvariation är i samma storleksordning som den ändring som Öresundsförbindelsen skulle innebära, men både medel- och extremvärdena är systematiskt lägre. Kunskapen om förändringar i ekosystemets struktur längs salthaltsgradienten och de förändringar som skett i samband med naturliga variationer kan utnyttjas för en bedömning av konsekvenserna av en systematisk salthaltssänkning. Denna bedömning måste dock ta hänsyn till att variationerna inte bara är beroende på salthalten utan också på skillnader i klimat och produktivitet. Den norra bassängen (Bottenviken) är ett näringsfattigt system med en vegetationsperiod på 4 - 5 månader, där främst tillgången på fosfor är begränsande för den biologiska produktionen, medan södra Östersjön är ett näringsrikare främst kvävebegränsat system med en dubbelt så lång vegetationsperiod.

Utbredningen av kommersiellt viktiga arter som rödspotta, skrubbskädda och piggvar skulle förskjutas söderut i egentliga Östersjön. Den lägre salthalten skulle kunna gynna viktiga sötvattenarter som siklöja vars utbredning nu är begränsad till norra Bottenviken, medan fisket av lax och öring ej skulle påverkas. Östersjöns fiske är dock helt dominerat av fångsten av tre marina arter; torsk, strömming och skarpsill. Strömmingen kan leka i nästan hela Östersjöområdet, från ca 3 ‰ salthalt i norra Bottenviken. Skarpsillen leker från Ålands hav och söderut eftesom äggen fordrar mer än 5 ‰ för att överleva. Torsken förekommer visserligen tidvis i Bottenhavet men leken lyckas bara i salthalter över ca 10 ‰ och kan därför bara ske i djupvattnet i Arkona-, Bornholm och Gotlandsbassängerna i södra Östersjön.

Modellsimuleringarna förutspår inga avgörande skillnader i Östersjöns produktivitet, syre eller kvävestatus. Effekterna av Öresundsförbindelsen på det vertikala utbytet och inflödet av närsalter och syre är små. En sänkning av salthalten innebär däremot en ytterligare begränsning av den

vattenvolym i Östersjön som uppvisar den kombination av hög salthalt och god syretillgång som krävs för torskens reproduktion. Denna volym är redan starkt begränsad av de låga syrehalterna i det salta djupvattnet. Modellsimuleringarna visar att möjligheterna för torskens reproduktion minskar. Torsken är, tillsammans med människan, den viktigaste predatoren (konsumenten) på strömming- och skarpsillbeståndet. En förändrad tillgång på torsk påverkar därför fisket på alla tre arterna. Den svenska fiskerinäringen är dock främst baserad på fisket efter torsk.

I Östersjöns näringsväv ingår dessutom många marina arter som födoorganismer, t ex små musslor, kräddjur och fiskar (sand- och lerstubb, tobis). En sänkt salthalt innebär förskjutningar i artsammansättning och konkurrensförhållanden. Ett minskat artantal, individstorlek och totalbiomassor kan innebära att födotillgången för kommersiellt viktiga arter förändras.

Blåstången bildar karakteristiska brunalgsbälten på grunda hårdbottnar i hela egentliga Östersjön, men förekommer endast som dvärgexemplar på större djup vid dess nordliga utbredningsgräns i Bottenhavet. Blåstångsbältet erbjuder skydd och föda för många organismer och är Östersjöns artrikaste miljö. Den nordliga gränsen för sammanhängande bälten av blåstång skulle förskjutas söderut något 10-tal mil om salthalten reduceras på det sätt som modellsimuleringen indikerar. Detta skulle exempelvis kunna innebära att de sammanhängande blåstångsbältena i Stockholms skärgård reduceras och därmed också det rika djurliv som är beroende av denna miljö. Det djupare liggande rödalgbältet med sin rika fiskfauna är ännu känsligare för en salthaltssänkning. Detta innebär att såväl kustfisket som kustzonens värde som rekreationsområde försämras.

De marina musslorna (blåmussla och östersjömussla) saknas redan nu i Bottenviken, där mikroskopiska bottendjur som har en liten betydelse som fiskföda dominerar. De flesta musslor är vattenfilterare och omsätter effektivt det organiska materialet till potentiell fiskföda och närsalter. Sjöfågel som ejder och alfågel är helt beroende av de rika blåmusslebankarna i egentliga Östersjön. Musslorna blir som de flesta andra marina arter mindre i Östersjöns utsötade vatten jämfört med en marin miljö, men finns utbredda på alla lämpliga bottnar i stort antal eftersom deras Kattegatt och Skagerrak viktigaste predatorer saknas i Östersjön. Deras ytterligare förskjutning söderut skulle således innebära en minskning av Östersjöns produktionskapacitet.

Kvalitativa förändringar i planktonsamhällena (i vattnet fritt svävande mikroorganismer) kan inte heller uteslutas. Visserligen kommer utbred-

ningen av maneter att minska, men sannolikheten för blomningar av giftiga blågröna alger i södra Östersjön ökar på grund av den lägre salthalten.

Modellsimuleringarna har inte tagit hänsyn till de förändrade vatten-transporter som planerade fasta förbindelser genom de danska bältsunden kan innebära. En slutlig bedömning av de ekologiska konsekvenserna av en fast förbindelse över Öresund bör därför även innefatta en uppskattning av den sammanlagda effekten av samtliga fasta förbindelser som planeras. Sammanfattningsvis kan sägas att den i grundförslaget (fig 1) planerade utformningen av den fasta förbindelsen i Öresund inger farhågor om betydande förändringar, huvudsakligen av negativ art, i Östersjöns ekologiska system. Endast en sk nollösning, som innebär att vattenutbytet inte förändras, är acceptabel.

Nollösning

En tunnel/broförbindelse som inte rubbar den ekologiska balansen i Östersjön kan konstrueras. Kriterierna för en sådan lösning (nollösning) är att mängderna och fördelningen av salt och syre i Östersjön skall vara oförändrade. Detta innebär att storleken och fördelningen av vatten- och saltgenomströmningen skall vara opåverkad av fasta trafikförbindelser.

En nollösning kan åstadkommas genom att man kompensationsmuddrar över tunneln och under bron för att ersätta förlorad genomströmningsarea. Om bropelarna är kraftiga och försedda med stora påseglingsskydd och om långa dämningar görs i anslutning till tunneln, blir de nödvändiga kompensationsmuddringarna omfattande. Mindre kompensationsmuddringar behövs om tunneln läggs under botten och uppfartsrampen på grunt vatten i strömlä om Saltholm. SMHI har studerat ett stort antal alternativa sådana nollösningar i den numeriska modellen. Ett exempel på en sådan körning visas i fig 15 A,B där man kan jämföra strömfält och vattenstånd i opåverkat tillstånd med samma parametrar då bro/tunnel har lagts in i modellen. Transporten söderut genom Öresund är i de båda fallen densamma. Detta har åstadkommits genom att man i modellen har fördjupat området över tunneln och under bron. I bilaga finns exempel på andra nollösningar.

Muddring för att ge oförändrad genomströmning

Effektiviteten hos en fördjupning över tunneln eller under bron hänger samman med vattnets möjligheter att strömma oförhindrat genom denna extra tvärsnittsytta. Om fördjupningen i botten göres alltför tvär strömmar vattnet förbi över fördjupningen. Tång och sand ansamlas i gropen och den fyller inte sitt syfte. SMHI har därför i en modellstudie

testat olika utformningar på kompensationsmuddringen för att komma till klarhet om t.ex. hur brant en sådan grav bör vara för att vattnet skall effektivt utnyttja den. Om vattnet effektivt tränger ner i graven fyller den sin funktion som extra genomströmningssyta och behovet av underhållsmuddring bortfaller. I bilaga 2 diskuteras resultaten av beräkningarna.

Om sluttningarna ner mot gropen är för branta t ex 1:2 bildas en virvel i gropen och man får relativt svag ström nära botten. Om sluttningarna är mindre branta t ex 1:12 bildas ingen virvel utan vattenströmmen tränger ner i gropen. Gropen måste göras så lång att sluttningarna kan göras omkring 1:10 för att hastigheterna vid botten skall bli så höga att de får ungefär samma belopp som bottenhastigheterna utanför gropen. Om så blir fallet behöver man inte befara allvarlig sedimentation i gropen.

FAST FÖRBINDELSE ÖVER ÖRESUND ALTERNATIVA NOLLÖSNINGAR

För att studera olika utformning av bro/tunnel över Öresund har SMHI satt upp en numerisk modell över Drogden-Flintrännan.

Den först studerade alternativet 1 är identiskt med Liconsults förslag på ritning 112 dvs en tunnel i Drogden som är 1600 m lång och där vattendjupet över tunneln har muddrats till 15 m. Uppfartsrampen är omkring 2 km lång. Under bron kompenseras för bropelare genom att man muddrar på svenska sidan och fördjupar $5000 \times 200 \text{ m}^2$ med 1/2 m.

Alt. 1 jämförs med strömsituationen som gäller under "naturliga" förhållanden utan fast förbindelse. Transporten av vatten är utan bro/tunnel i exemplet $45.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Om vi lägger in enbart bron i modellen och fördjupar 1/2 m blir den beräknade vattentransporten $45.9 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Detta broalternativ är alltså en nollösning. Samma broalternativ är använt i alla nedanstående alternativ. Muddermängden är $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Om vi också lägger in tunnel med uppfartsramper blir strömmönstret och vattenståndet som figur 6a och 6b. Vattengenomströmningen blir enligt beräkningarna $45.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Alternativ 1 är alltså en nollösning. Muddermängden över tunneln blir $9.9 \times 10^6 \text{ m}^3$. Totalt muddras i alternativ 1 $10.4 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Alternativ 2 innebär att tunneln förlängs till 2100 m så att uppfartsrampen hamnar på relativt grunt vatten och lämnar de djupare delarna av drogdenrännan fria för genomströmning. Utfyllnaden på danska sidan går 100 m längre ut i sundet. Uppfartsrampens längd är densamma (omkring 2 km). Vi muddrar över tunneln så att djupet blir 13 m. Vattengenomströmningen genom Sundet blir i exemplet $46.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Alternativ 2 är alltså en nollösning. Totalt muddras i alternativ 2 $7.4 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Alternativ 3 innebär att tunneln startar på samma ställe som i alternativ 2 men har en något nordligare sträckning. Tunneln går på så vis nästan vinkelrätt över drogdenrännan i ett snitt där rännan är djupare än i originalläget. Om tunneln läggs så att vattendjupet kan göras 12 m behöver inte så stora muddermängder avlägsnas eftersom de naturliga djupen i en

del av tvärsnittet redan är 12 m. Tunneln görs 2000 m lång. Uppfartsrampen förläggs därmed på grunt vatten. Vattengenomströmningen blir i exemplet $45.7 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Alternativ 3 är alltså en nollösning. Totalt muddras i alternativ 3 $3.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

De beräknade muddermängderna är uträknade utgående från djupuppgifter i sjökort med hänsyn tagen till att djupuppgifterna ibland hänför sig till enstaka, små grunda områden. Muddermängderna är därför en realistiskt uppskattad kvantitet.

Modellsimulering av sedimentation i grävd fördjupning av Drogdenrännan

Bakgrund

En fast Öresunds-förbindelse minskar Öresunds tvärsnittsytan genom byggandet av vägbankar, uppfartsramper för tunnel, bropelare etc. Genom att lokalt fördjupa vissa områden kan sundets barotropa transportkapacitet (dvs transportkapaciteten oberoende av salthalt) bibehållas. Ett av de skollösningarna innebär muddring av ett område i Drogdenrännan, ovanför en projekterad tunnel. Teoretiskt går det att beräkna hur mycket som måste grävas genom att kräva bibehållen tvärsnittsytan tvärs huvudströmriktningen. För att inte riskera att den grävda gropen direkt börjar att fyllas med sediment och dess kanter eroderas, bör gropens kanter utformas på ett speciellt sätt. Största sedimentationsrisken gäller för uppströmskanten, men eftersom strömmen pendlar mellan två huvudriktningar, bör gropens kanter utformas symmetriskt. Denna studie utgör ett första försök till beskrivning av hur olika lutningar på den grävda gropens uppströmskant (och därmed olika längder på gropen) påverkar strömning och sedimentationsförlopp.

Modellscenario

Drogdenrännan liknas vid en 10 meters djup och 1.5 km lång kanal, där en 350 meter lång sträcka muddrats till 15 meters djup. Fyra lutningar analyseras: lutning 1:2, 1:4, 1:8 samt 1:12. Fördjupningen på 5 meter förutsätts alltså ske på 10, 20, 40 respektive 60 meter i horisontell ledd.

Uppströms gropen etableras en kanalströmningsprofil, med den högsta hastigheten i ytan och en svag minskning ner till ett djup nära botten. I bottengränsskiktet går hastigheten snabbt ner mot noll. En mjuk övergång till djupare vatten gör att hastigheten sjunker i proportion till tvärsnittsytans ökning, men profilen bibehålles. Om lutningen är stor kan en virvel bildas i lä av uppströmskanten (se fig 2/1). Kraftig turbulens genereras vid kanten och sprider sig nedströms. I gropens senare del återgår strömningen till kanalströmning, förutsatt att gropen är tillräckligt lång.

Observera att simuleringen av strömhastigheterna sker under antagandet att bredden på kanalen hålls konstant, detta för att underlätta tolkningen av data. Om bredden minskas samtidigt med att djupet ökas, undviks hastighetsreduktion, men virvel- och turbulensgenerering kvarstår naturligtvis.

Botten antas bestå av hårda och släta material, typ kalksten eller glaciallera. Valet av suspenderat material som ska transporteras in över gropen är inte självklart. Eftersom strömhastigheterna är så höga i området är det rimligt att tänka sig relativt stora partiklar i suspension, t ex finsand med en diameter på 0.1 mm. Dess sjunkhastighet är ca 1 cm/s (Bagnold, 1966).

Det suspenderade materialet simuleras som ett antal partiklar släppta jämnt fördelade i en vattenpelare uppströms gropen. Efter en kort sträcka har partiklarna anpassat sig till rådande hastighets- och turbulensförhållanden. Höga hastigheter och hög turbulens innebär att partiklarna virvlar upp i hela vattenpelaren, medan låga strömhastigheter och liten turbulens gör att de transporteras längs botten. Är hastigheten närmast botten tillräckligt liten, sedimenterar materialet. Beräkningarna har utförts med fyra olika ytströmhastigheter: 0.5, 0.8, 1.1 samt 1.4 m/s.

Ett strömomslag har simulerats genom att låta en ström på 0.8 m/s men med motsatt riktning verka på de partiklar som fastnat i gropen.

Modellbeskrivning

Simuleringen av sedimentationsförloppet sker i två steg: Först beräknas de hydrodynamiska storheterna som strömhastighet och turbulensparametrar med hjälp av PHOENICS. PHOENICS används på SMHI för alla typer av strömningssproblem och är för det aktuella fallet (ingen skiktning, konstant drivning) väl utprovad. För fler detaljer, se tabell 1.

Därefter får ett antal partiklar spridas med hjälp av den beräknade strömmen och influeras av turbulens och sjunkhastighet. Modellen har utvecklats på SMHI och finns beskriven bl a i Rahm-Svensson (1987). De aktuella partiklarna har möjlighet att sedimentera ut om friktionshastigheten underskrider 1 cm/s (Dyer, 1986). För fler detaljer, se tabell 1.

Resultat och diskussion

Ett utsnitt av två simulerade strömfält finns återgivna i fig 1. En virvel utbildas i gropens uppströmssida om lutningen uppgår till 1:2.

Fig 2/2 visar trajektorier av 5 partiklar. Den övre figuren visar hur låg strömhastighet gör att partiklarna transporteras utmed botten och fastnar i gropen. Med högre strömhastighet (undre figuren) genereras mer turbulens och partiklarna har chans att bibehållas i suspension. Några partiklar undviker på detta sätt att fastna i gropen.

Figur 2/3 visar en tidserie av en modellsimulering. Det kritiska området där sedimentation är möjlig är här koncentrerat till uppströmskantens nedre hörn.

Figur 2/4 utgör ett försök till sammanfattning av sedimentationsrisken vid olika strömhastigheter och lutningar. Det kan anses ganska säkert att ytterligare körningar med låg (0.5 m/s) strömhastighet för lutningarna 1:4 och 1:8 skulle ha gett 100 %-ig sedimentation. Anmärkningsvärt är att för hastigheter runt 0.8 m/s så ger lutningarna 1:4 och 1:8 högre sedimentationsbenägenhet än vad lutningen 1:2 ger. Uppenbarligen genereras så kraftig turbulens vid gropkanten att många partiklar håller sig svävande förbi det kritiska området. För den svagaste lutningen (1:12) upphör sedimentationen att ske redan vid 0.8 m/s.

Utgående från de sedimentationsfördelningar som uppstod vid 0.8 m/s har försök gjorts genom att vända på strömmen, med bibehållen styrka. Virvel- och turbulensgenerering vid nedströmsändan av en grop är mindre än vid uppströmskanten. Resultatet visar att för lutningen 1:2 minskade antalet sedimenterade partiklar från 23 till 18 %, dvs ett strömomslag ger upphov till en mycket liten grad av resuspension. Effekten blir större för lutningen 1:4, då större delen resuspenderas (från 71 till 4 %). För lutningen 1:8 resuspenderas allt sedimenterat material.

Det är frestande att från figur 2/4 dra slutsatsen att en mycket stor lutning som 1:2 (typ dike) skulle innebära en relativt liten risk för sedimentationsproblem. Risken är dock att erosion och den sedimentation som trots allt förekommer (se t ex längst upp till vänster i figur 2/4) förändrar lutningen mot t ex 1:4, varvid förhållandena snabbt förvärras. För så stora lutningsvinklar som 1:2 ger strömomslag inte heller upphov till resuspension av redan sedimenterat material.

Strömhastigheten i området är - enligt SMHI:s mätningar från förvintern 1986 - typiskt av storleksordningen 0.5-1.0 m/s, med kortare perioder där hastigheten går upp till 1.5 m/s. För att förhindra att suspenderat material ska sedimentera i gropen, bör gropens kanter således utformas med en lutning som ligger omkring 1:12.

Denna studie bör ses som en pilotstudie. När utformningen av den fasta förbindelsen tagit form, är det möjligt att noggrannare studera sedimentationsriskerna i ett tre-dimensionellt perspektiv. Likaså bör en eventuell framtida studie inkludera strömmens variabilitet i tiden.

Referenser

- Bagnold, R.A. (1966) "Mechanics of marine sedimentation"
The Sea, ed. Hill, M N John Wiley and Sons, New York
- Dyer, K.R. (1986) "Coastal and estuarine sediment dynamics"
John Wiley and Sons
- Rahm, L. and Svensson, U. (1987) "Dispersion of marked fluid elements
from a bottom source within a turbulent channel
flow"
Submitted to J. of Coastal Eng.

TABELL 1

Hydrodynamisk modell

Beräknade storheter:	* v, w hastighetskomponenter i y- respektive z-led, * k kinetisk energi, * energidissipation, (utbytes- koefficient för momentum beräknas från k, ϵ).
Beräkningsnät:	* kanal med längd = 1 540 m, djup = 10-15 m * 750 beräkningspunkter, med minsta upp- lösning 1 m i y-led (vid gropen) och 5 cm i z-led (vid botten)
Drivning:	* given (konstant i tiden) hastighetsprofil uppströms med ytström i intervallet $0.5-1.4 \text{ m s}^{-1}$
Randvärde vid botten:	* logaritmiskt vägg-gränsskikt

Spridningsmodell

Partikelrörelser:	* Markovkedja: $w'_n = a_n w'_n + b_n w_n + c_n$ där n = tidssteg, w'_n = turbulent (vertikal) hastighet, w_n = hastighetsvarians a_n, b_n, c_n = tids- och rumsberoende amplifunktioner: a_n styr "minnet" b_n innehåller en stokastisk variabel c_n inkluderar en korrektionsterm för icke-homogen turbulens
-------------------	---

Partikelegenskaper:

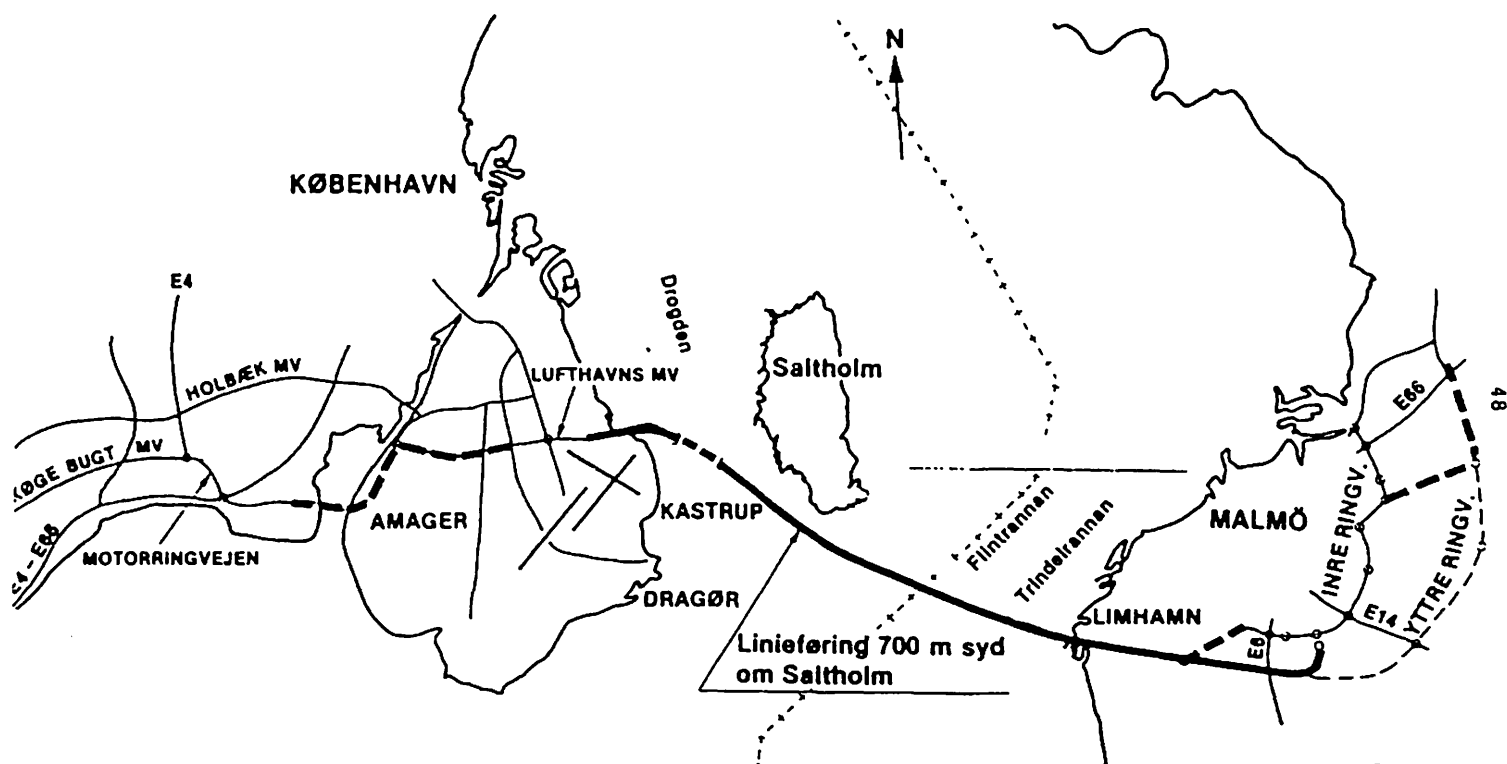
- * diameter (d) = 0.1 mm
- * fallhastighet = 1 cm s^{-1}
- * partikel-Reynolds-tal: $u_* \times d < 2$, där
 u_* = friktionshastighet
 = kinematisk viskositet
- * resuspensionskriterium: $u_* > 1 \text{ cm s}^{-1}$

Tidsteg:

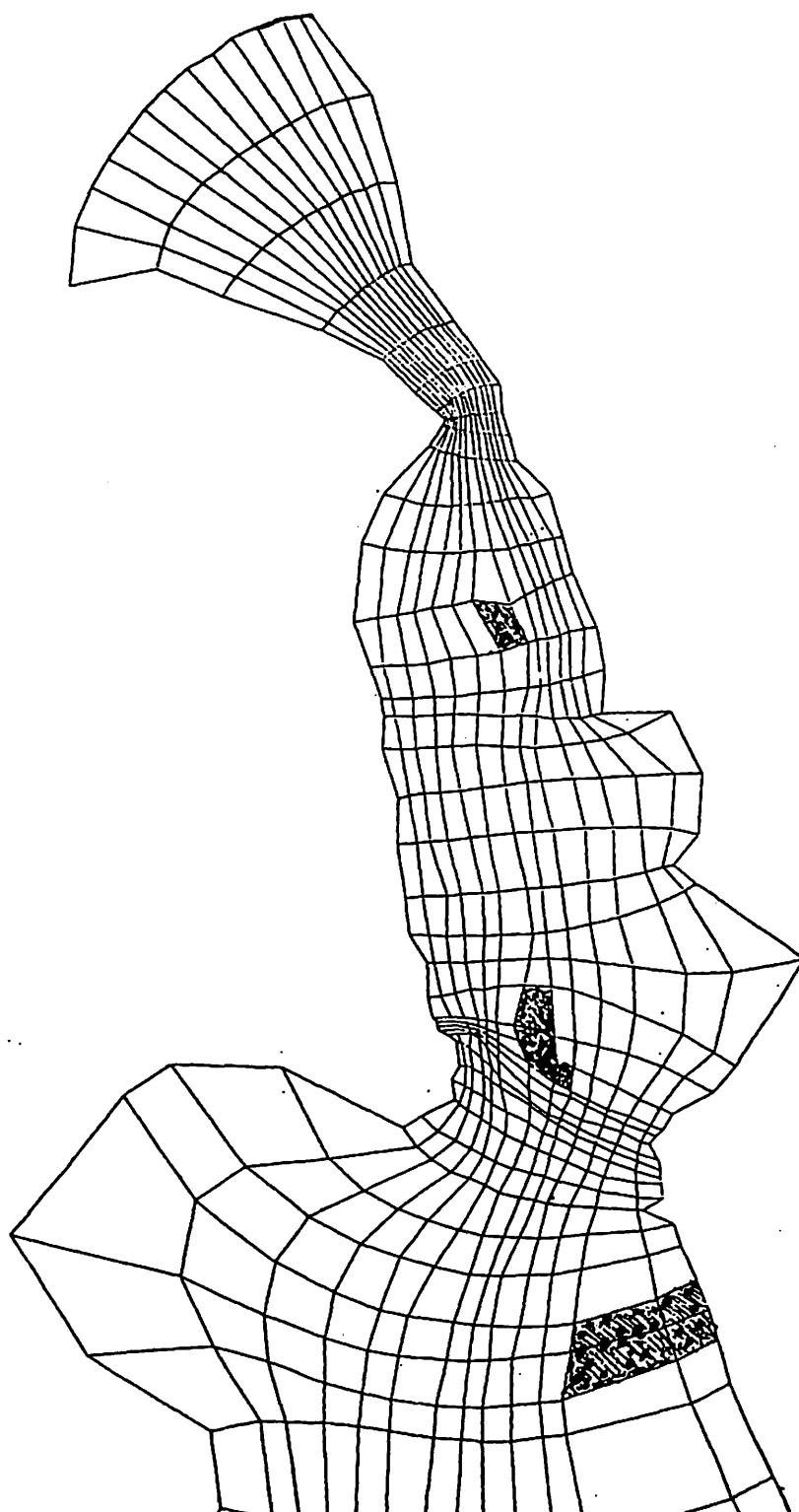
1 sekund

Antal partiklar:

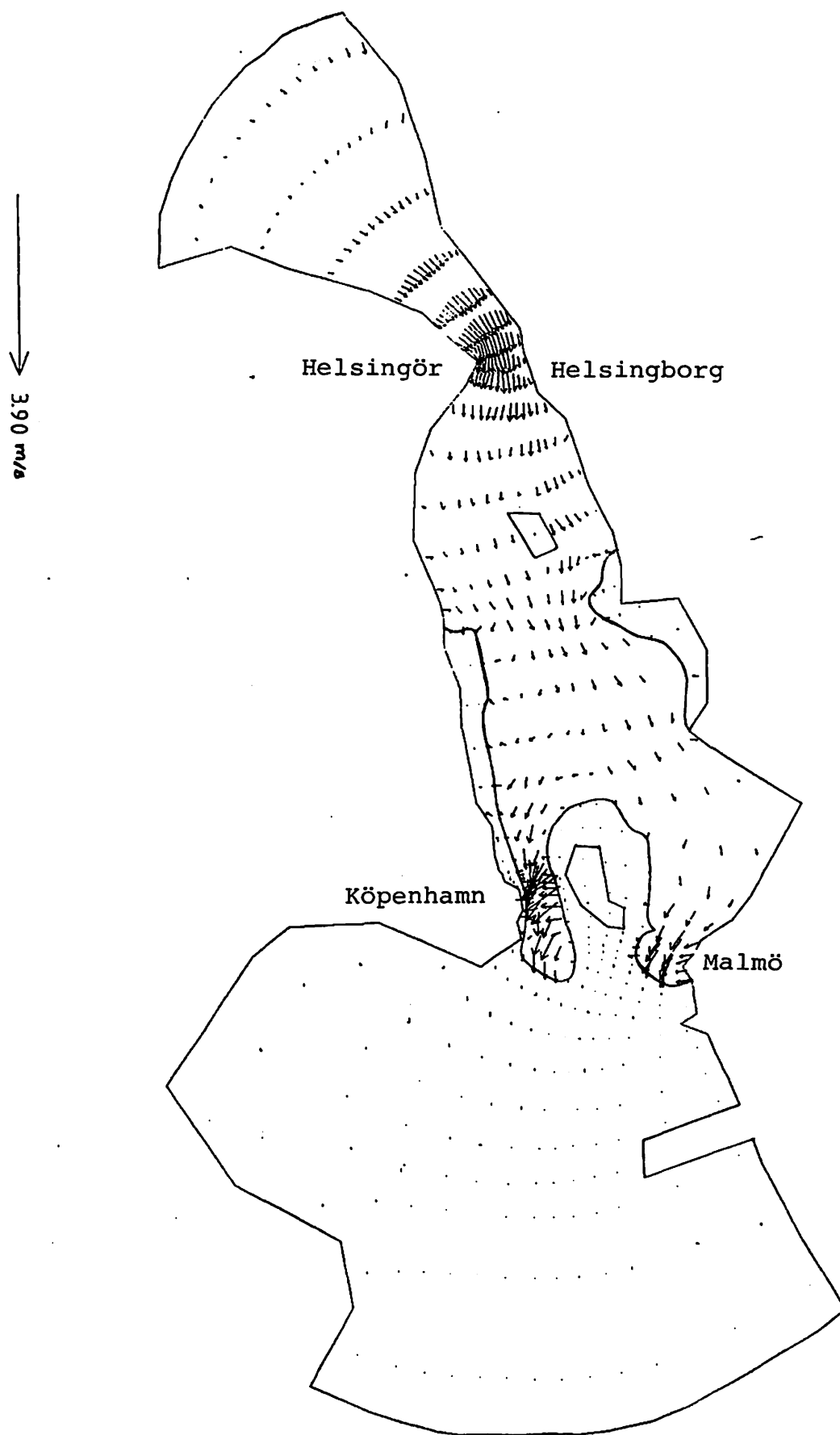
100



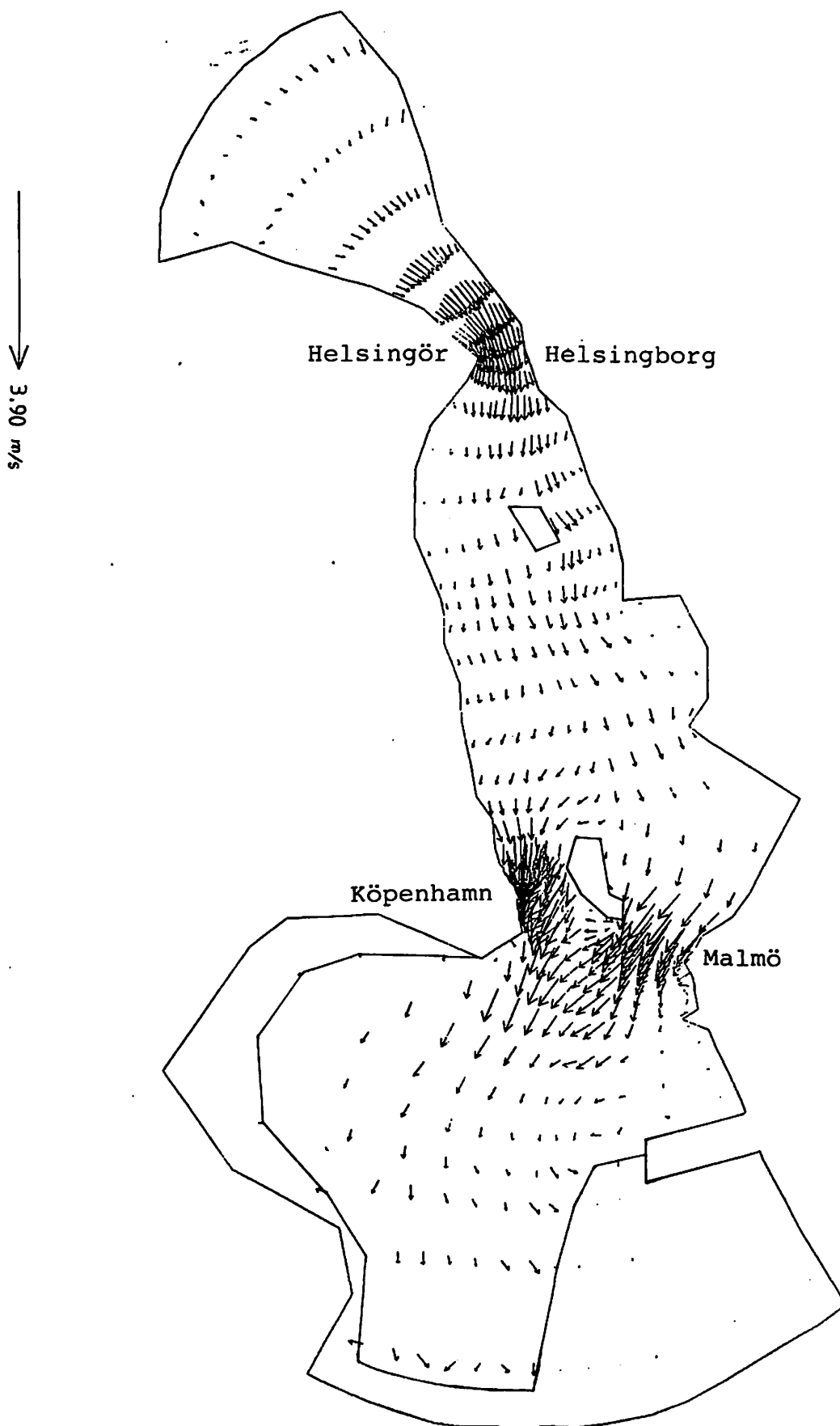
Figur 1. Bro-,tunnelförbindningens sträckning



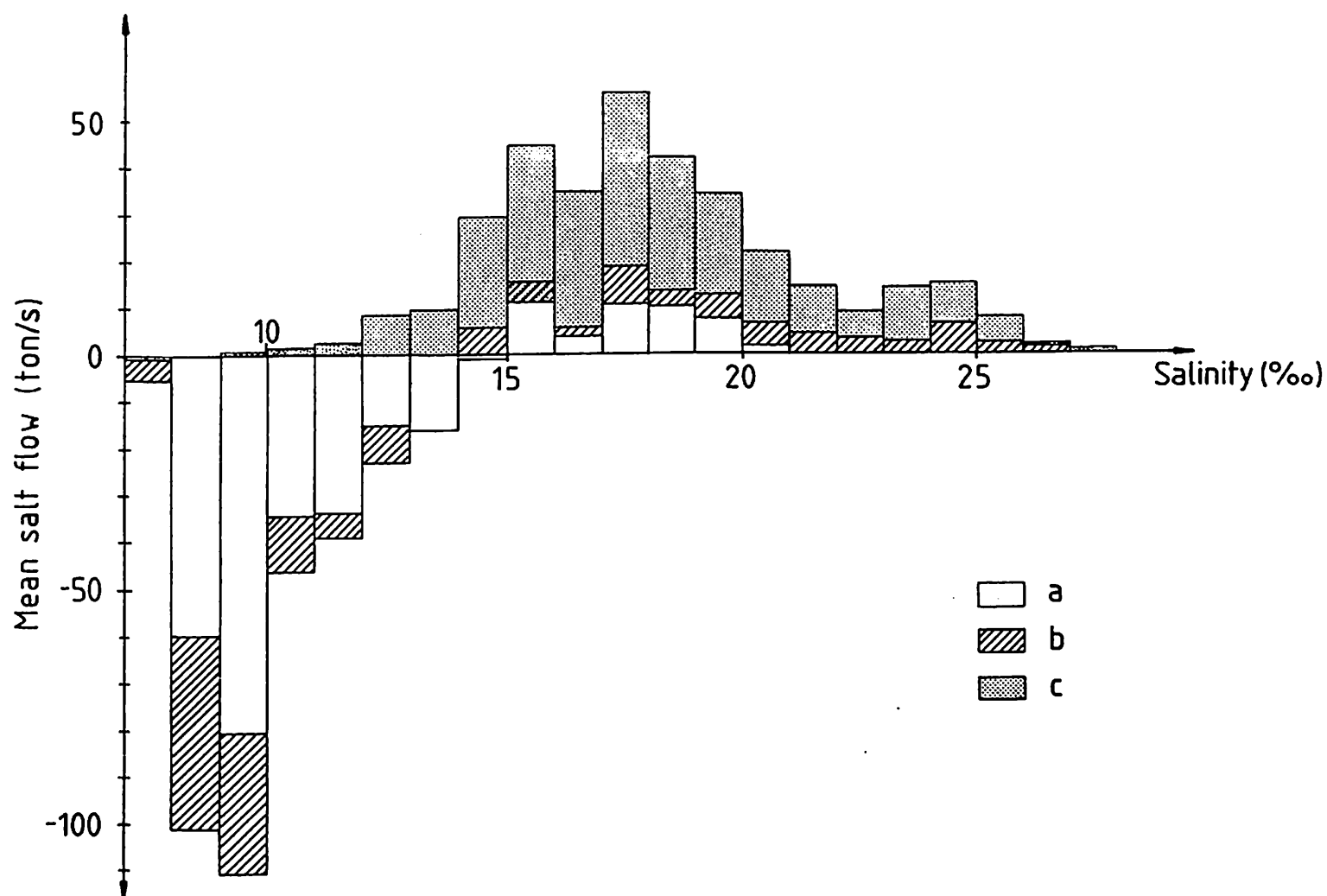
Figur 2. Uppdelning i beräkningsvolym
för studier av strömningsför-
hållandena i Öresund
(PHOENICS-modellen)



Figur 3. Ögonblicksbild över strömmen
i det undre salta lagret i
Öresund efter två dygns in-
ström utan bro/tunnel



Figur 4. Ögonblicksbild över strömmen i det undre salta lagret i Öresund efter sex dygns inström utan bro/tunnel



Figur 5. Tillförsel av saltvatten till egentliga Östersjön, uppdelat i olika salthaltsintervall (a=övre skiktet i Bältsjön, b=via Öresund, c=undre skiktet i Bältsjön).

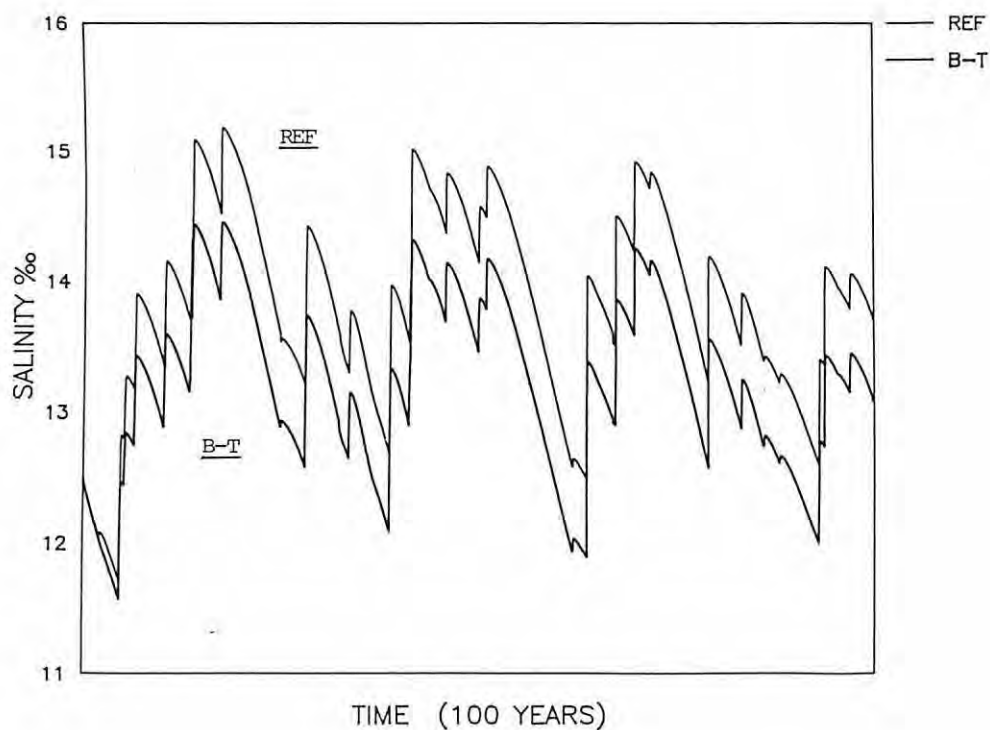


Fig 6A Salthaltsvariationer under 100 år på 250 meters djup från modelsimuleringar utan (REF) och med Öresundsförbindelse (B-T).

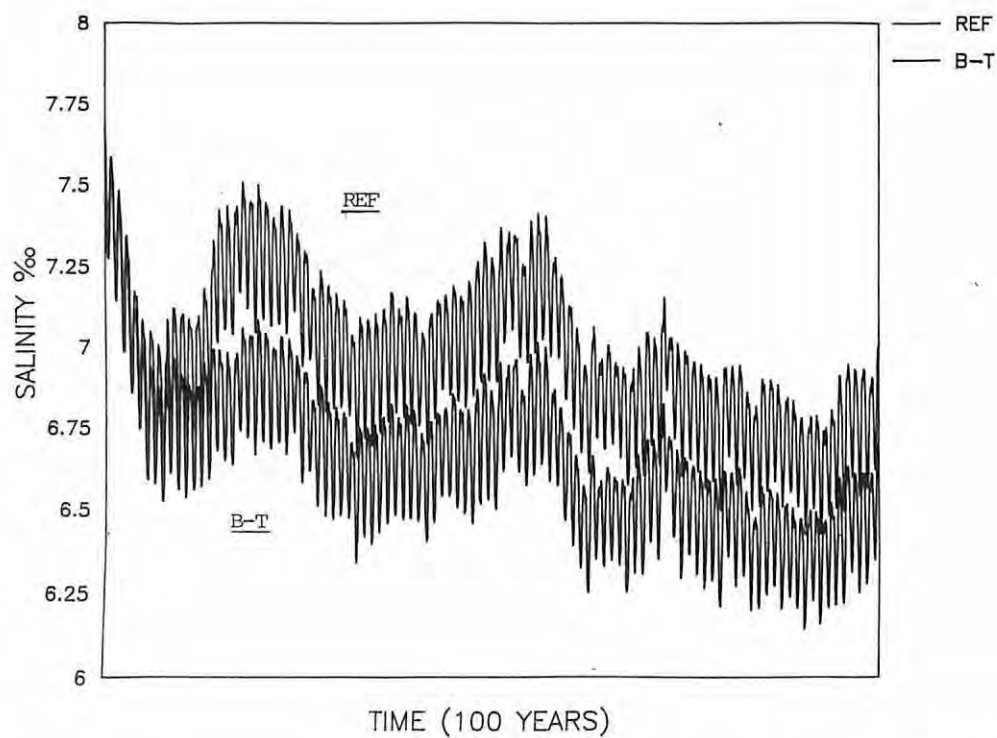


Fig 6B Salthaltsvariationer under 100 år på 1 meters djup från modelsimuleringar utan (REF) och med Öresundsförbindelse (B-T).

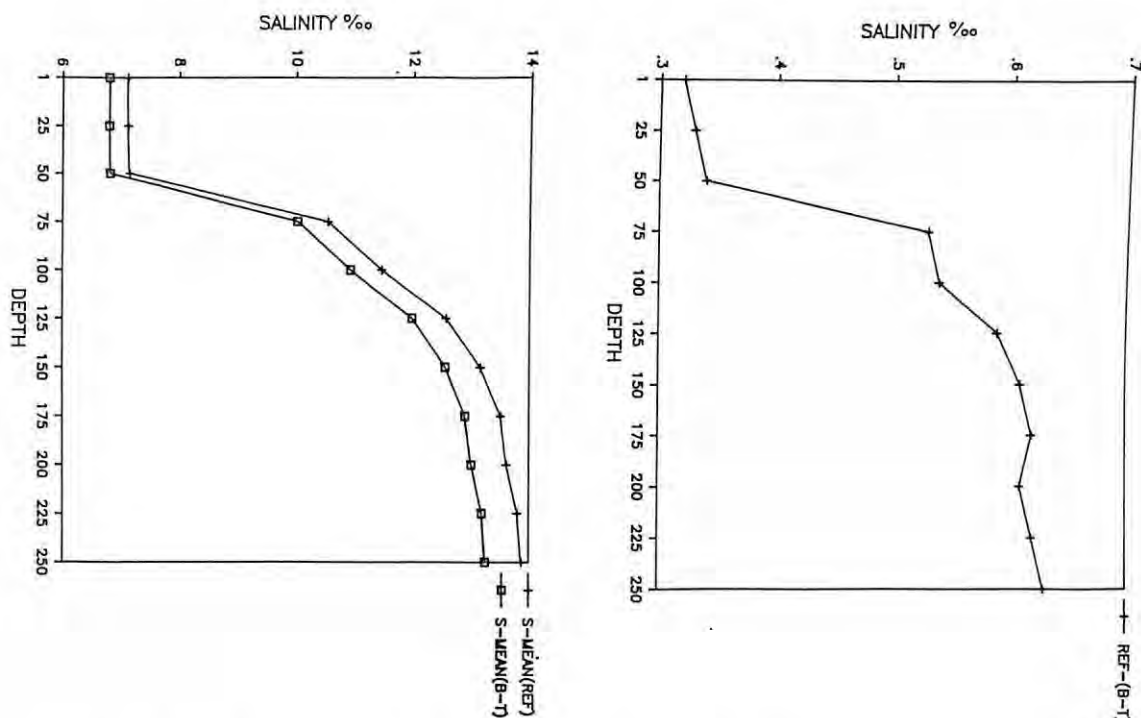


Fig 7A Den vertikala salthaltsfördelningen, baserad på månadsmedelvärden för januari från 100-års simuleringar, utan (S-MEAN (REF)) och med Öresundsförbindelse (S-MEAN (B-T)).

Fig 7B Skillnader i salthalt mellan observationerna plottade i Fig 7A (REF - (B-T)).

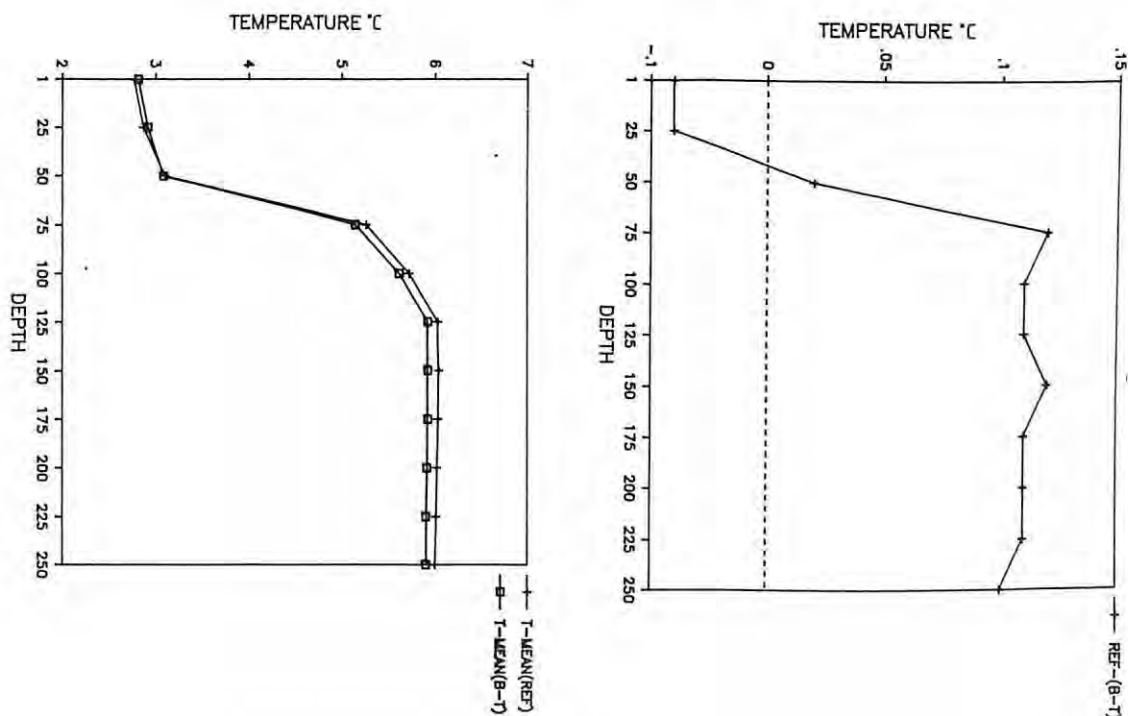


Fig 8A Den vertikala temperaturfördelningen, baserad på månadsmedelvärden för januari från 100-års simuleringar, utan (T-MEAN (REF)) och med Öresundsförbindelse (T-MEAN (B-T)).

Fig 8B Skillnader i temperatur mellan observationerna plottade i Fig 8A (REF - (B-T)).

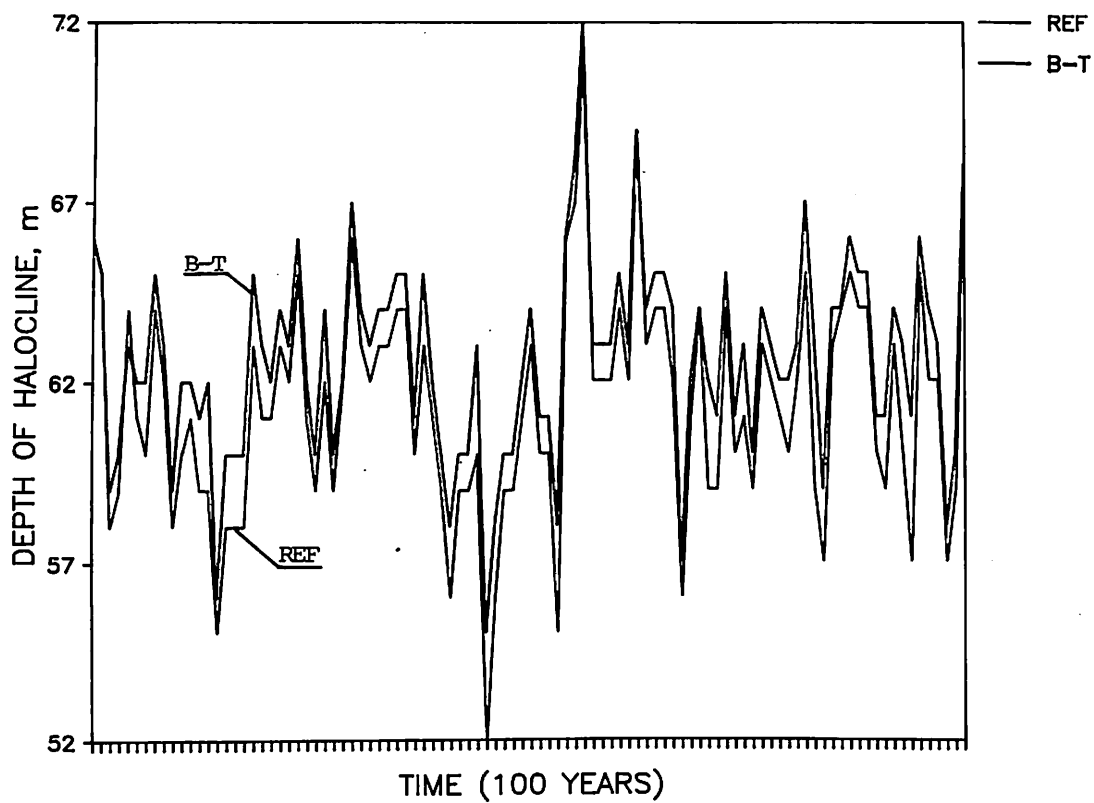


Fig 9 Det maximala djupet till haloklinen under året. Från 100-års simuleringarna utan (REF) och med Öresunds-förbindelse (B-T).

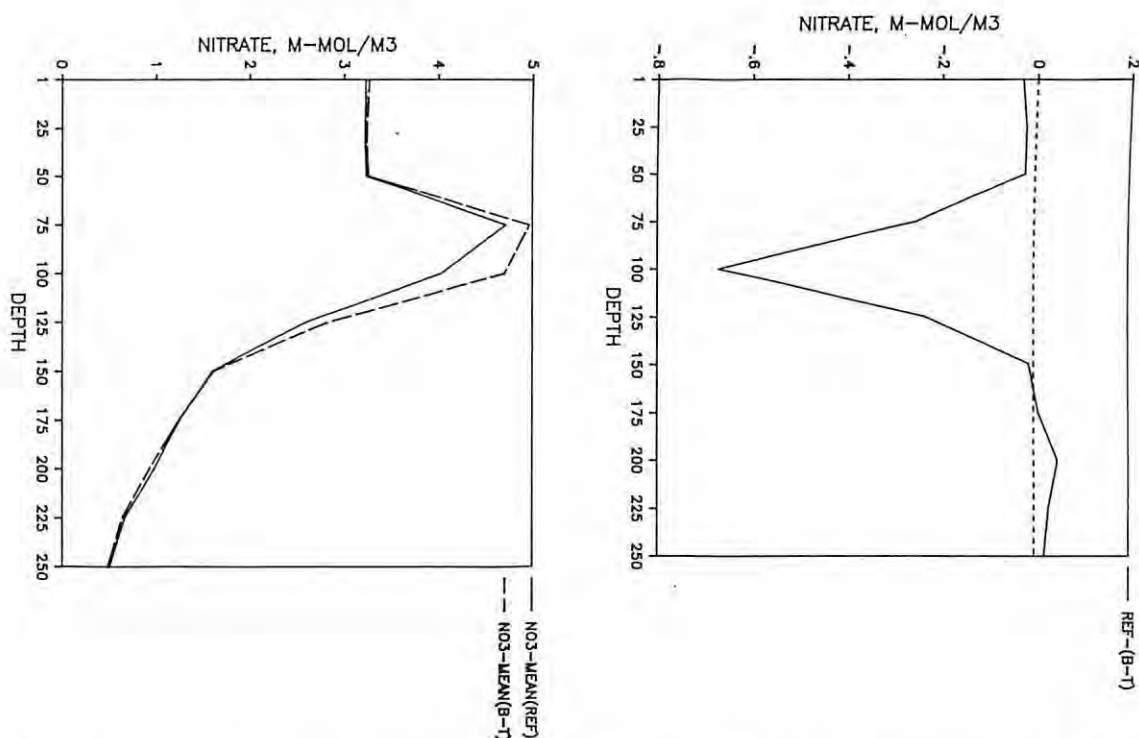


Fig 10A Den vertikala fördelningen av nitrat, baserad på månadsmedelvärden för januari från 100-års simuleringar, utan (NO3 - MEAN (REF)) och med Öresundsförbindelse (NO3 - MEAN (B-T)).

Fig 10B Skillnader i nitratkoncentrationer mellan observationerna plottade i Fig 10A (REF - (B-T)).

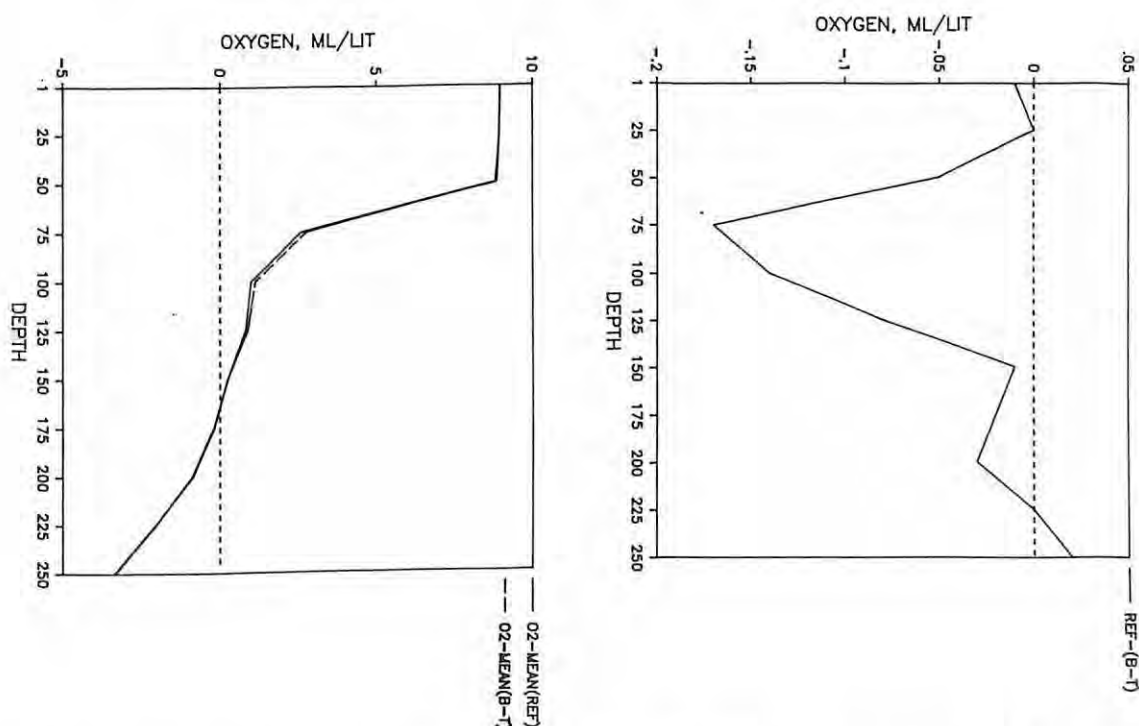


Fig 11A Den vertikala fördelningen av syre, baserad på månadsmedelvärden för januari från 100-års simuleringar, utan (O2 - MEAN (REF)) och med Öresundsförbindelse (O2 - MEAN (B-T)).

Fig 11B Skillnader i syrekoncentrationer mellan observationerna plottade i Fig 11A (REF - (B-T)).

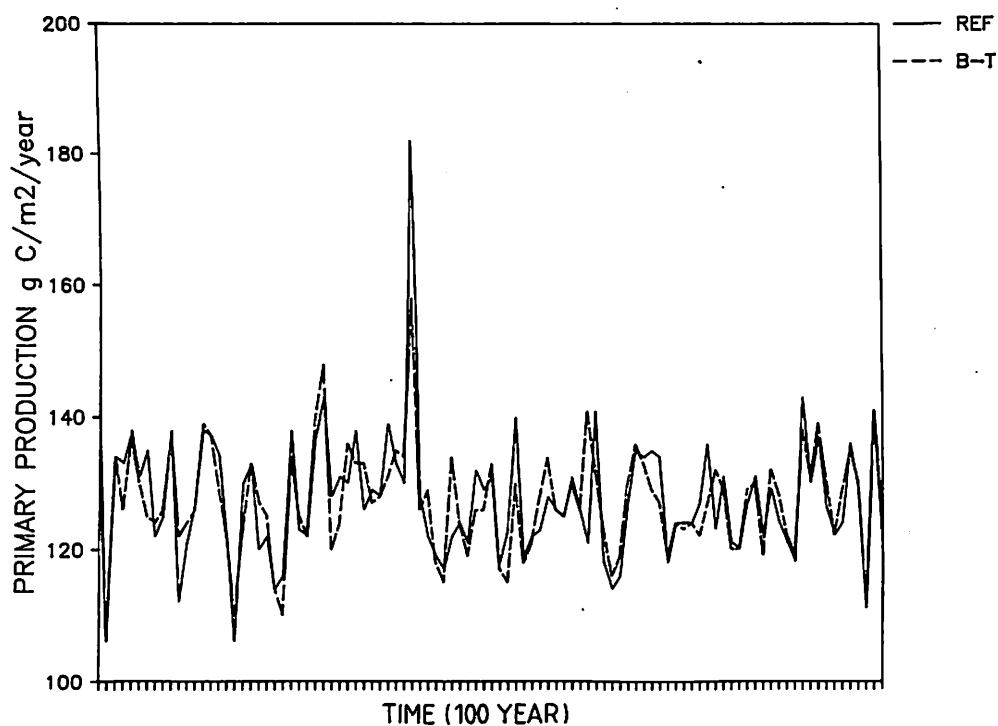


Fig 12A Variationer i årsprimärproduktionen i simuleringar utan (REF) och med Öresundsförbindelse (B-T).

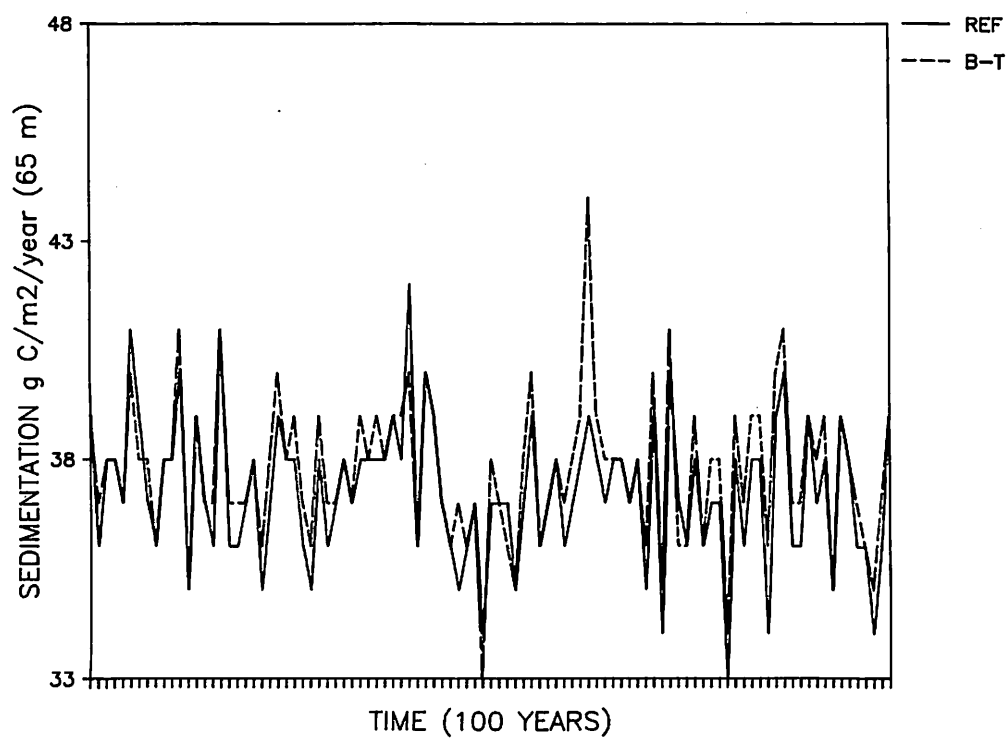


Fig 12B Variationer i sedimentationen genom haloklinen (65 meter) i simuleringar utan (REF) och med Öresundsförbindelse (B-T).

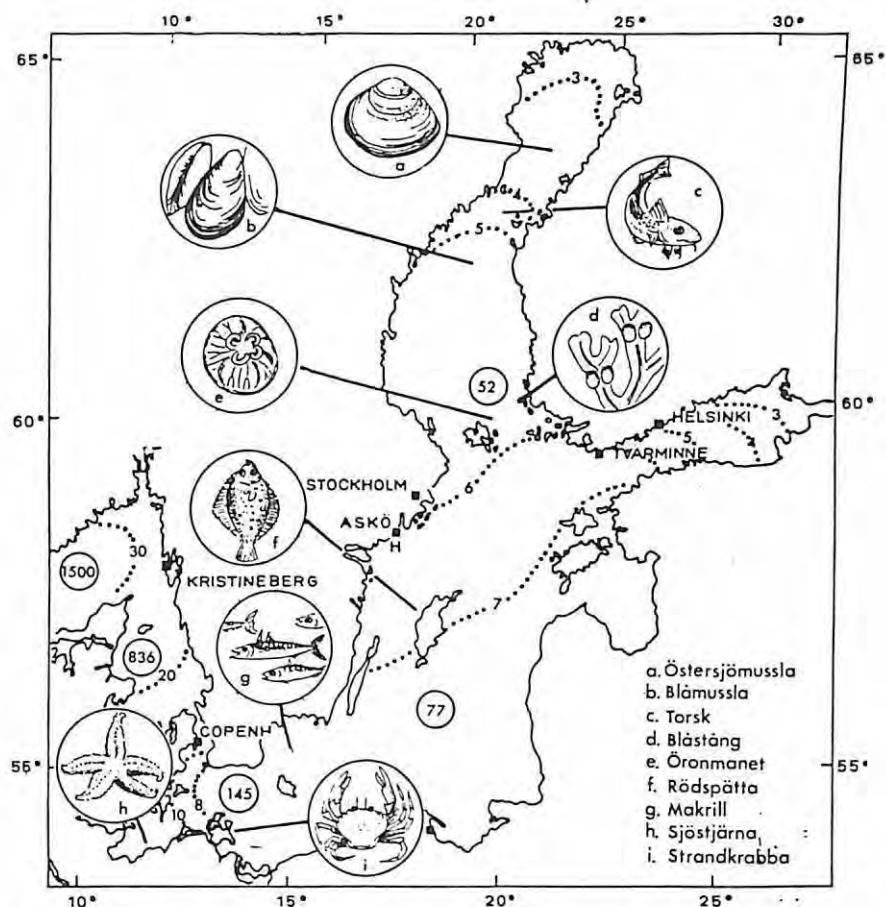


Fig 13. Salthalten avtar mot Östersjöns innersta delar, samtidigt som de marina djuren och växterna upphör. Bilden visar ytsalthalten och ungefär innersta utbredningsgränsen för några karaktäristiska arter samt antal makroskopiska djurarter. a) Östersjömussla, b) blåmussla, c) torsk, d) blåstång, e) Öronmanet, f) rödspotta, g) makrill, h) sjömanet, i) strandkrabba

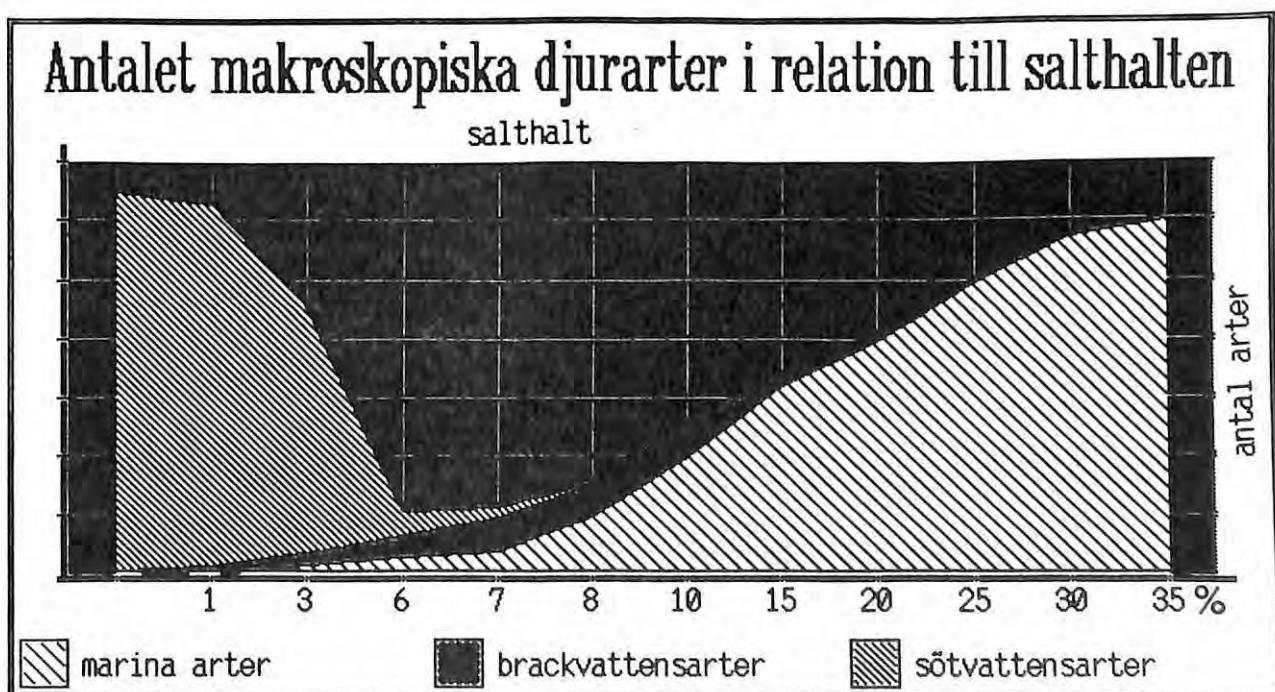
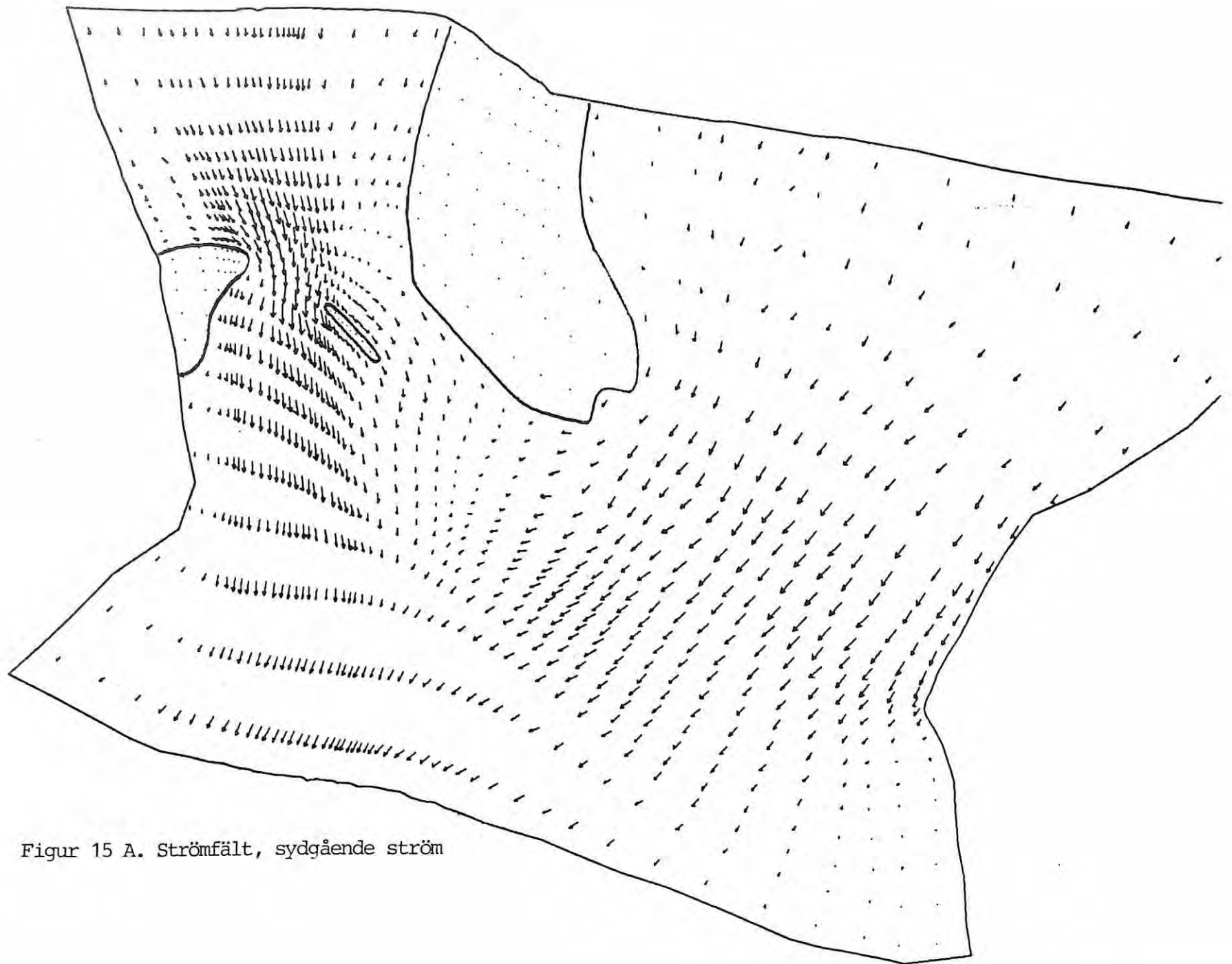
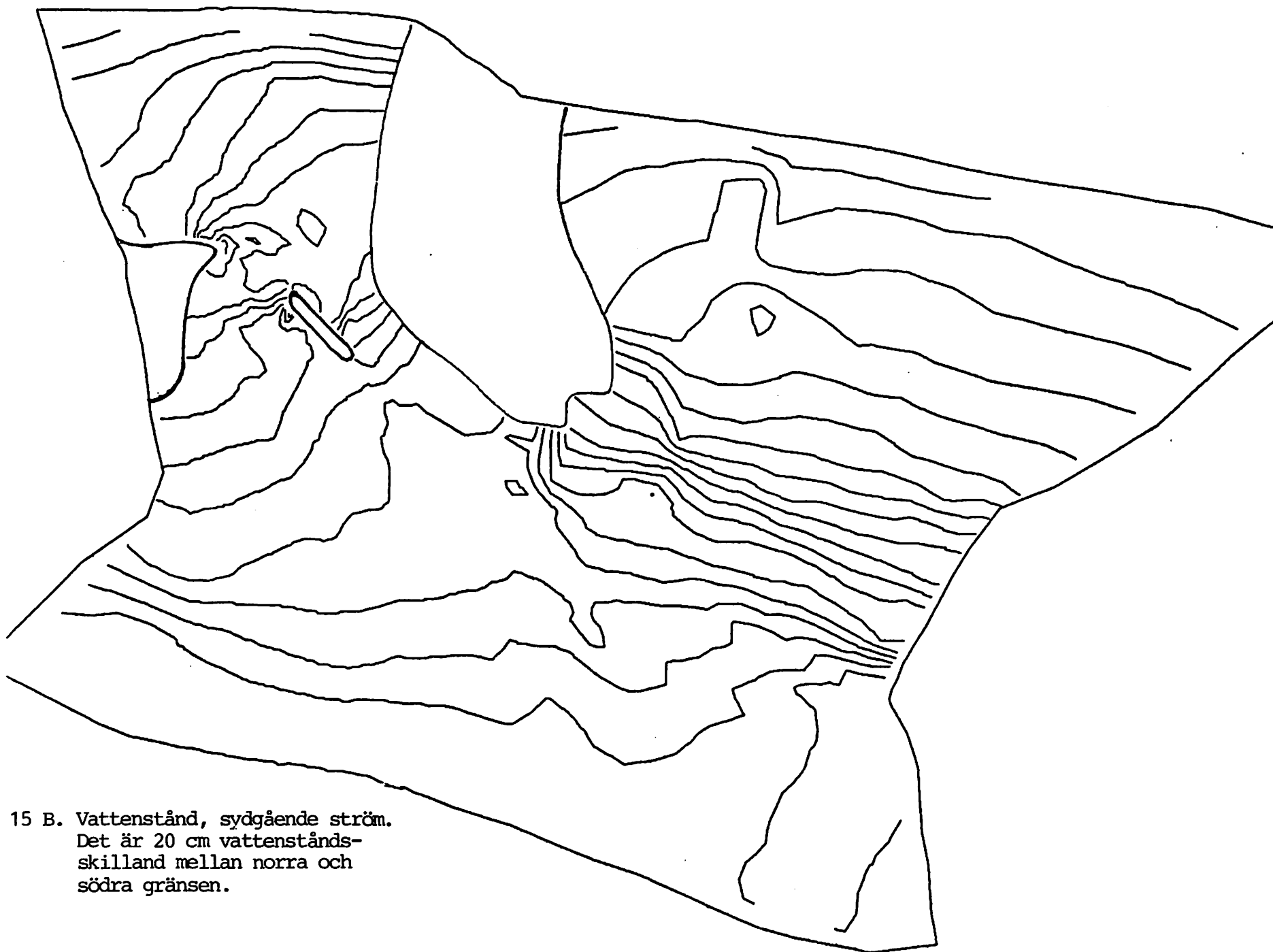


Fig 14. Antalet makroskopiska djurarter i förhållandet till vattnets salthalt.



Figur 15 A. Strömfält, sydgående ström



Figur 15 B. Vattenstånd, sydgående ström.
Det är 20 cm vattenstånds-
skillnad mellan norra och
södra gränsen.



Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 Norrköping. Tel 011-15 8000. Telex 64400 smhi s.