

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING
BLINDERN

O-113/75

VURDERING AV PLANLAGT BRO TIL ULVØYA
VED BEKKELAGET, FOR OSLO KOMMUNE

10.november 1975

Siv.ing. Birger Bjerkeng

Instituttssjef Kjell Baalsrud

FORORD

Oslo kommunes Vegvesen har 1.10.1975 bedt Norsk institutt for vannforskning (NIVA) om å vurdere planene for ny bro til Ulvøya ved Bekkelaget med hensyn til vannutskiftningen i Paddehavet.

Man har ønsket en uttalelse relativt raskt, og instituttet har derfor gjort en teoretisk vurdering basert på det man fra før vet om forurensningsproblemer generelt, og forholdene i Oslofjorden spesielt. Resultatene av en tidligere NIVA-undersøkelse i Paddehavet (NIVA 1970) er også trukket inn i vurderingen.

Det er begrenset hva man kan si på det gitte grunnlaget, men visse praktiske konklusjoner har man kommet frem til. For å kunne gå videre ville det kreves nye målinger, og en mye grundigere bearbeidelse av data enn det man har kunnet gjøre i denne vurderingen.

- Rapporten har vært gjennomlest av fil.kand. Jan Magnusson og instituttsjef Kjell Baalsrud før trykking.

Birger Bjerken

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
FORORD	2
TABELLFORTEGNELSE	4
FIGURFORTEGNELSE	4
1. INNLEDNING	5
2. BESKRIVELSE AV OMRÅDET	5
3. GENERELT OM HYDROGRAFI OG VANNUTSKIFTNING	9
3.1 Oslofjorden	9
3.2 Gruntvannsområdene	10
3.3 Paddehavet	11
4. RESULTATER AV EN TIDLIGERE UNDERSØKELSE	13
4.1 Innledning	13
4.2 Resultatet av målingene	13
4.2.1 Ormsund	13
4.2.2 Malmøysund	14
4.2.3 Ulvøysund	15
4.3 Bearbeiding og tolkning av resultatene	15
4.3.1 Ormsund og Malmøysund	15
4.3.2 Ulvøysund	18
4.4 Samlet vurdering	21
5. VIRKNINGEN AV BRO/VEIFYLLING I DE SØRLIGE SUNDENE	22
5.1 Sundet Malmøya/Ulvøya	22
5.2 Ulvøysund	25
6. SAMMENDRAG OG KONKLUSJON	27
LITTERATURLISTE	29

TABELLFORTEGNELSE

	Side
Tabell 1 Areal som funksjon av dyp for Paddehavet	7
Tabell 2 Volum nedenfor gitt dyp, Paddehavet	8
Tabell 3 Anslått tidevannstransport i overflatelaget gjennom de nordlige sund i Paddehavet for perioden 3.-15.10.1969	17
Tabell 4 Mulig transportbilde for sundene til Paddehavet 15.12.1969 ved fallende tidevann, basert på målinger i Ulvøysund	20

FIGURFORTEGNELSE

Fig. 1 Oversiktskart over Paddehavet	30
Fig. 2 Typiske strømmingstverrsnitt for sundene til Paddehavet	31

1. INNLEDNING

Ulvøya tilhører øygruppa rundt Paddehavet, området er vist på vedlagt kart (fig. 1). Bro til Ulvøya går idag direkte fra fastlandet, over Ulvøysund på østsiden av øya. Broen må skiftes, og det finnes to reelle alternativer for ny bro. Den kan legges parallellt med den gamle over Ulvøysund (alt. 5), eller den kan legges fra Malmøya i vest, som har fastlandsforbindelse over Ormøya (alt. 4). De foreslåtte brotraséene er vist i fig. 1.

For alternativ 5 er flere plasseringer mulige, det nordligste alternativet, 5C, er antydnet i fig. 1. I alle tilfelle ønskes en kombinasjon av veifylling og bro, og spørsmålet er hvordan en innsnevring i ett av sundene kan tenkes å påvirke vannutskiftningen i Paddehavet.

NIVA (1970) har før vurdert vannutskiftningen i Paddehavet i forbindelse med en planlagt innsnevring av sundene i nord.

2. BESKRIVELSE AV OMRÅDET

Figur 1 viser også dybdeforholdene i Paddehavet. Kartet er basert på målinger utført av Norges Sjøkartverk 1936-37. Det avviker delvis noe fra det dybdekart som er gitt av NIVA (1970). Som en ser kan området naturlig deles i to bassenger.

Øst for Padda ligger et område med største dyp 15 meter¹⁾. Dette bassenget har kontakt med hovedvannmassene i Bunnefjorden sørover gjennom Ulvøysund, som er ca. 17 meter dypt, 120 meter bredt på det smaleste, og anslagsvis 3-400 meter langt.

1) Maks dyp 24 meter som oppgitt av NIVA(1970) stemmer ikke med Norges sjøkartverk, og må være feil, det skal antagelig stå 14 meter.

Det vestre området har største dyp 14.5 meter. I nord har området kontakt med Bekkelagsbassenget gjennom to sund, Ormsund som er 40 m bredt og 2 m dypt i minste tverrsnitt, og Malmøysund som er 100-140 m bredt og har et terskeldyp på 7-8 meter. Begge sundene har en lengde på ca. 200 m. I sør har bassenget kontakt med hovedvannmassene i Bunnefjorden gjennom sundet som går mellom Malmøya og Ulvøya. Dette sundet har minste bredde ca. 230 meter, er 10 m dypt og ca. 600 m langt. På 6 meters dyp er sundet ca. 150-200 m bredt, men med en innsnevring til 100 meters bredde vest for Galteskjær. Gjennomsnittlig bredde er 300 meter.

Noen typiske strømmingstverrsnitt for de fire sundene er vist i figur 2.

De to delene av Paddehavet har kontakt med hverandre bare i de øverste metrene, tersklene nord og sør for Padda er henholdsvis ca. 5 og 8 meter dype.

Paddehavet vil altså ha et overflatelag med kontakt både nordover og sørover, og dermed muligheter for gjennomstrømming, mens det på større dyp (under 8 meter) er to helt adskilte bassenger som bare har kontakt sørover.

Tabell 1 nedenfor gir areal som funksjon av dyp for de to bassengene i Paddehavet. Oppdelingen er vist på figur 1. For det østre området er det tatt hensyn til veifylling med helning 1:1.5 som angitt av Vegvesenet (tegning 286-10), enten fylling langs gammel trasé, eller ca. 130 m lenger nord etter alternativ 5.C.

I tabell 2 er volumene bestemt ved grafisk integrasjon av arealkurvene.

TABELL 1 Areal som funksjon av dyp for Paddehavet

Dyp (m)	A r e a l		
	Vestre område (m ²)	Østre område med fylling langs gammel brotrasé (m ²)	Østre område med fylling etter alternativ 5.C (m ²)
0	485 000	195 000	176 000
3	400 000	175 000	133 000
6	300 000	105 000	88 000
8	230 000	65 000	50 000
10	165 000	30 000	16 000
12	110 000	15 000	2 500
14	30 000	2 500	
Maks. dyp	14.5 m	15 m	13 m

TABELL 2 Volum nedenfor gitt dyp, Paddehavet

Dyp (m)	Volum fra bunn til gitt dyp		
	Vestre del (10^6 m^3)	Østre del Fylling langs gammel trasé (10^6 m^3)	Østre del Fylling etter alternativ 5.C (10^6 m^3)
0	3.48	1.24	1.01
3	2.45	0.74	0.58
6	1.38	0.33	0.22
8	0.86	0.17	0.10
10	0.43	0.061	0.017
12	0.16	0.017	0.0012
14	0.007	0.0012	-
Maks. dyp	14.5	15	13

De presenterte data viser at vestre basseng har et relativt stort vannvolum under 10 meter som er helt avstengt av terskler. Fra 10 opp til 7-8 meters dyp gir sundet Malmøya/Ulvøya den eneste horisontale forbindelse med andre vannmasser for dette bassenget.

Den østre delen av bassenget er derimot åpent helt ned til maksimaldyp (15 m) idag, og det er relativt sett mye mindre vannvolumer under 10 meters dyp.

3. GENERELT OM HYDROGRAFI OG VANNUTSKIFTNING

3.1 Oslofjorden

I Oslofjorden har man hele året igjennom en lagdeling av vannmassene. Dypvannet har saliniteter omkring 31-34 ‰. Ferskvannspåvirkninger i overflaten gir et mindre salt og derfor lettere brakkvann-sjikt, ca. 5-10 meter tykt, og med saliniteter i området 15-30 ‰. Mellom dypvannet og brakkvannet ligger et sprangsjikt, omkring 5-10 meter tykt, hvor salinitet og tetthet øker raskt med dypet. (En kan også ha svakere sprangsjikt lengre ned). En slik sjiktning er stabil, og vil dempe vertikal blanding mellom lagene. Sjiktningen er sterkest om sommeren, svakere om vinteren.

Indre Oslofjord er nokså sterkt påvirket av forurensninger. Hovedproblemet er for stor algevekst i overflaten på grunn av kloakktilførsler, slik at overflatevannet blir grumset og stygt. Dødt organisk materiale som synker ned gjennom sprangsjiktet nedbrytes og bruker fritt oksygen. Hvis det er store kloakktilførsler og dårlig vannutskiftning kan dette gi så lave oksygen-konsentrasjoner i dypere lag at dyre- og planteliv ikke kan eksistere. Brukes det frie oksygenet helt opp vil det utvikle giftig hydrogensulfid (H_2S), og en får helt livløse og råtne vannmasser.

Dypvannet i Oslofjorden fornyes ved innstrømming av friskt vann over terskelen ved Drøbak. Dette skjer stort sett hvert år i Vestfjorden, men bare hvert tredje år i Bunnefjorden på grunn av terskelen ved Bygdøy. Samtidig er Bunnefjorden det sterkest **belastede** område. Oksygensvikt i dypvannet har man i begge hovedbassenger, men H₂S-utvikling i vannmassene finnes stort sett bare i Bunnefjorden.

3.2 Gruntvannsområdene

I grunne områder vil oksygenkonsentrasjonen synke mye raskere enn for hovedvannmassene på gitt dyp, fordi det er mindre oksygen å ta av og fordi nedbrytningen er konsentrert høyere opp. Slike områder er derfor avhengig av god horisontal utveksling med hovedvannmassene for å opprettholde brukbare oksygenforhold under sprangsjiktet. Dette gjelder ennå mer hvis produksjonen i overflatelaget er sterkere i de grunne områdene enn ellers i fjorden p.g.a. store lokale forurensningstilførsler.

Fra Oslofjord-undersøkelsen vet vi at det er i avstengte, relativt grunne områder (Bærumsbassenget, Bekkelagsbassenget) at forholdene er verst. Utskiftning av vannmassene i slike områder skjer ved flere prosesser.

Tidevannsvariasjoner gir en periodisk heving og senking av vannspeilet, totalt ca.40 cm i Oslofjorden, med tilsvarende inn og utstrøm av vannmasser. Tidevannsbølgen kan også sette opp svingninger i sprangsjiktet. Siden tetthetsforskjellen mellom vannlagene er mye mindre enn mellom vann og luft, vil disse svingningene kunne bli mye større enn tidevannsvariasjonen selv om energien er lavere, og den tidevannsgenererte utskiftningen i hvert lag vil derfor kunne bli mye større enn det vannspeilets svingninger skulle tilsi.

Mer regelmessige vannstandsendringer kan skapes av lufttrykksvariasjoner og vindpåvirkning og vil komme som et tillegg til tidevannsutskiftningen. Sterk og vedvarende vind vil i hovedsak helle overflaten oppover med vindretningen, og sprangsjiktet nedover. Dessuten settes det opp et sirkulasjonsmønster, slik at en kan få en gjennomstrømming av grunne områder som er åpne til flere kanter. Når vinden opphører eller snur svinger grenseflatene tilbake, og en kan få interne svingninger som dempes med tiden. Lokalt vil disse svingningene gi utskiftning på samme måte som tidevannsvariasjoner.

3.3 Paddehavet

Paddehavet ligger i Bunnefjorden, like ved Bekkelagsbassenget som er et av de mest påvirkede områder i indre Oslofjord. Den direkte tilførselen til Paddehavet er ikke så stor, men overflatevannet er antagelig sterkt påvirket av Bekkelagsbassenget. Det må derfor antas at man kan få de samme problemer her som i andre grunnvannsområder, selv om vi ikke har data for vannkvaliteten i Paddehavet. En god vannutskiftning er derfor viktig.

Overflatelaget i Paddehavet vil skiftes ut ved alle de mekanismene som er nevnt ovenfor, med tidevannet som den antagelig viktigste. De sørlige sundene er relativt brede, og tåler antagelig en merkbar innsnevring uten at gjennomstrømming i overflatelaget hindres vesentlig.

Den vestre delen av Paddehavet har imidlertid, som før nevnt, et relativt stort avstengt volum under 10 meter. Sprangsjiktet vil normalt ligge omkring 10 meter, som er terskeldyp for det dypeste sundet (Malmøya/Ulvøya).

Hvis det er små vertikale svingninger av sprangsjiktet vil tettheten i de avstengte vannmassene avta ved en langsom vertikal blanding med vannmassene lenger opp. Periodevis vil dypvannet da fornyes ved innstrømming av tyngre vann over terskelen, f.eks. i forbindelse med en vindoppstuvning, og det gamle vannet presses opp og ut over terskelen.

Hvis det er regelmessige, vertikale svingninger av sprangsjiktet i hovedbassenget vil det forplante seg til Paddehavet og gi en strøm frem- og tilbake over terskelen. Vannet innenfor terskelen vil da kunne bli nokså homogent under terskeldypet, og av omtrent samme tetthet som vannet utenfor omkring terskeldypet. En slik strøm vil derfor kunne skifte ut de avstengte vannmassene nokså effektivt, selv om den direkte utskiftningen er konsentrert omkring terskeldypet.

Begge disse prosessene vil kunne bidra til vannutskiftningen under 10 meter i Paddehavets vestre del. Felles for dem er at en kan få nokså konsentrert strøm langs bunnen av sundet mellom Malmøya og Ulvøya. Sundets dyp og bredde kan derfor være begrensende for utskiftningen i det vestre området.

Det østre området har idag god kontakt med hovedvannmassene helt ned til største dyp. Det er dessuten relativt små volumer under 10 meters dyp. Med en svingning på 1 meter av et sprangsjikt rundt 10 meter vil inn/ut-strøm pr. periode representere ca. 45% av maksimalt volum under sprangsjiktet innenfor den gamle brotraséen, og ca. 70% innenfor en trasé etter alternativ 5C. Det tilsvarende tallet for det vestre området er ca. 30%. Dessuten vil en slik utskiftning foregå fritt i hele vannmassen for det østre området, mens det i det vestre er konsentrert til terskeldypet.

Ulvøysund og sundet Malmøya/Ulvøya har omtrent samme tverrsnittsareal mellom 8 og 10 meter, ca. 200 m², mens volumet mellom 8 og 10 meter er ca. 4 ganger større for det vestre området enn for det østre.

Det er altså naturlig å anta at dypvannet i det østre området har en mye bedre utskiftning enn i det vestre, og at Ulvøysundets bredde og dybde er mindre begrensede enn for sundet Malmøya/Ulvøya.

4. RESULTATER AV EN TIDLIGERE UNDERSØKELSE

4.1. Innledning

I NIVAs tidligere undersøkelse av Paddehavet (1970) ble det foretatt målinger i tre av de fire sundene for å anslå vannutskiftningen. I Ormsund og Malmøysund ble det gjort nokså kontinuerlige målinger av strøm, vind og vannstand over flere tidevannsperioder. I Ulvøysund ble det gjort noen få målinger i løpet av en 3/4 tidevannsperiode. I det følgende skal resultatene refereres og bearbeides. Tolkningen av dem avviker noe fra den som ble gjort i 1970, men rokker ikke ved de praktiske hovedkonklusjoner som ble trukket dengang.

4.2. Resultatet av målingene

4.2.1. Ormsund

Målingene i Ormsund ble utført i tidsrommet 3.- 8.10.1969. Strømmen var her nokså godt korrelert med tidevannet. Ved stigende tidevann var det en nettotransport sørover på ca. 30 000 m³, og en tilsvarende transport nordover ved fallende tidevann. Avvikene herfra var ca. 10%. Bruttotransporten i begge retninger var ca. 20% større, ca. 40 000 m³, fordi strømhastighet og vannstandsending ikke var helt i fase. Det siste tallet må brukes for å finne vannutskiftningen gjennom sundet. Tidevannsvariasjonene var regelmessige, med tidevannsamplitude 20 cm i middel, avtagende til ned mot 10 cm mot slutten av perioden.

Netto tidevannsprisme (dvs. vannvolumet mellom høyvanns- og lavvannsnivå) var ca. 280 000 m³.

4.2.2. Malmøysund

I den etterfølgende perioden, 8-15.10.1969 ble tilsvarende målinger gjort i Malmøysund. I denne perioden var tidevanns- amplituden mindre, ca. 12 cm i middel, og svingningene mer uregelmessige, med to maksimumspunkter for vannstanden pr. tidevannsperiode.¹⁾ Sammenhengen mellom strøm og vannstandsending var mye dårligere i denne perioden. Netto-transport sørover ved stigende tidevann var ca. 180 000 m³ og ved fallende tidevann ca. 200 000 m³ nordover, mens bruttotransporten i begge retninger var 80-100% større, ca. 360 000 m³ pr. tidevannsperiode. Netto tidevannsprisme i denne perioden var ca. 170 000 m³. Det er av NIVA (1970) ikke angitt noe som tydet på tolags-strøm gjennom sundet, sprangsjiktet har derfor antagelig ligget under 7-8 meter.

Den første del av perioden viser sterk påvirkning fra en todagers periode med sørlig vind av styrke 4 m/s, med bare nordgående strøm i en hel tidevannsperiode. Vannføringskurvene antyder en vind-generert transport nordover på 30 m³/s, eller ca. 1300 000 m³ over denne tidevannsperioden. Hele neste døgn, etter at vinden har lagt seg, gikk en tilsvarende transport sørover, idet de oppstuede overflatevannmassene har strømmet tilbake. Den dårlige sammenhengen strøm/tidevann kan delvis komme av denne sterke vindsvingningen, men skyldes nok hovedsakelig at det var et så komplisert tidevannsbilde i denne perioden.

1) Dette må skyldes interferens mellom de forskjellige komponentene i tidevannet. Faseforskyvning mellom komponentene vil endres i tid, og en får et ulikt bilde til ulike tidspunkter.

Bruttotransporten er derfor sannsynligvis det riktige å bruke for å anslå effektiv vannutskiftning på grunn av tidevannet også i denne perioden.

4.2.3. Ulvøysund

For de sørlige sundene er det ikke gjort tilsvarende målinger som i de nordlige, men to måneder senere, 15.12.1969, ble det i Ulvøysund tatt noen få strøm og salinitetsprofiler i løpet av en trekvart tidevannsperiode. Resultatene viser et brakkvannssjikt med salinitet 29%, ned til 4-5 meters dyp. Mellom 5 og 11 meter var saliniteten konstant, omtrent 32.7 o/oo. I 11 meters dyp var det et sekundært sprangsjikt, og under dette et tredje homogent lag med salinitet ca. 33.2 o/oo. Strømprofilene tyder på at sprangsjiktene har svingt vertikalt. Ved fallende tidevann var det nordgående strøm i overflatelaget og det nederste laget, og sørgående strøm i midtre lag. Ved stigende tidevann var strømmene motsatt rettet, så langt en kan se av det spinkle datamaterialet.

4.3. Bearbeiding og tolkning av resultatene

Vi skal i det følgende bearbeide resultatene fra 1969 litt videre, og se hvilke konklusjoner man kan trekke om vannutskiftningen i Paddehavet, spesielt m.h.t. transporten i de sørlige sundene.

4.3.1. Ormsund og Malmøysund

Resultatene av målingene i de to nordlige sundene kan ikke direkte kobles sammen, siden forholdene var så forskjellige i de to måleperiodene. For å få et mer fullstendig bilde skal vi forsøke å beregne forholdet mellom transportene i de to sundene teoretisk.

Vi bruker Mannings formel for enveis kanalstrøm:

$$\Delta h = \frac{Q^2 \cdot L}{M^2 \cdot R^{4/3} \cdot F^2} \quad (1)$$

hvor Δh = vannstands differanse langs sundet

Q = vanntransport

L = sundets lengde

M = Mannings tall (≈ 40 for naturlige kanaler)

R = hydraulisk radius = F/P

F = vått tverssnitt

P = våt omkrets

(Engelund 1969)

Vi antar at Δh er den samme for begge sund, og får

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{1/2} \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{2/3} \quad (2)$$

For brede kanaler er $R \approx$ midlere dyp.

For Malmøysund er verdiene $F_1 \approx 600 \text{ m}^2$, $L_1 \approx 200 \text{ m}$, $R_1 \approx 4.5 \text{ m}$,
for Ormsund $F_2 \approx 50 \text{ m}^2$, $L_2 \approx 200 \text{ m}$, $R_2 \approx 1.2 \text{ m}$.

Dette gir

$$\frac{Q_1}{Q_2} = 29$$

Det er grunn til å anta at strømmen alltid drives av omtrent samme Δh gjennom de to sundene¹⁾. Dette forholdstallet vil derfor antagelig gjelde både nettotransport (sørover med stigende, nordover med fallende tidevann), og bruttotransport, dvs. total transport i hver retning i løpet av en tidevannsperiode. Anvendt på måleresultatene gir det:

1) Små interne forskjeller i Bekkelagsbassenget og Paddehavet.

Anvendt på måleresultatene gir det:

TABELL 3 Anslått tidevannstransport i overflatelaget gjennom de nordlige sund i Paddehavet for perioden 3. - 15.10.1969.

	Ormsund	Malmøysund	Sum
<u>3.- 8.10.1969:</u>			
Tidevannspriseme			280 000 m ³
Nettotransport	30 000 m ³	(870 000 m ³)	900 000 m ³
Bruttotransport	40 000 m ³	(1 160 000 m ³)	1 200 000 m ³
<u>8.10.-15.10.1969:</u>			
Tidevannspriseme			170 000 m ³
Nettotransport	(7 000 m ³)	190 000 m ³	197 000 m ³
Bruttotransport	(12 000 m ³)	360 000 m ³	372 000 m ³

Tallene i parentes er anslått ut fra ligning 2 foran.

I den første perioden ser det derfor ut som om transporten gjennom de nordlige sundene har vært godt korrelert med tidevannet. Den var ca. 3-4 ganger større enn tidevannsprismet. Ser vi bort fra svingninger av sprangsjiktet tyder det på at transporten gjennom de sørlige sundene gikk sør- over ved stigende, nordover ved fallende tidevann, og var større enn tidevannsprismet i Paddehavet. Det ser altså ut til at en del av tidevannstransporten til og fra Bunnefjordens hovedbasseng går gjennom Paddehavet.

I den andre perioden var nettotransporten mye lavere, ca. 115% av tidevannsprismet, dvs. at netto-transporten i de sørlige sundene pr. tidevannsperiode var ca. 15% av tidevannsprismet. Brutto-transporten var imidlertid fortsatt mer enn 2 ganger større enn tidevannsprismet. Dette antyder en vesentlig gjennomstrømning av området også i denne perioden, bare dårligere korrelert med tidevannet.

Vi har ovenfor forutsatt liten svingning av sprangsjiktet, for å kunne anslå transporten gjennom sundene i sør. Egentlig burde man ha målt svingningen av sjiktningen i Paddehavet parallelt med strømmen. Hvis det har vært slike svingninger har transporten i de sørlige sundene kunnet være vesentlig større eller mindre enn anslått her, ettersom svingningene har vært i medfase eller motfase med vannstands- endringene.

4.3.2. Ulvøysund

De målingene som ble gjort fra Ulvøysund kan likevel brukes til å antydde transporten gjennom de sørligste sundene. Det strømbildet målingene antyder, med motsatt rettet strøm i hvert lag, og skiftende med tidevannet, tyder på tidevannsdrevet vertikal svingning av grenseflatene mellom lagene.

En full hastighetsprofil tatt kl. 18.00, under fallende vannstand, og midt mellom høyvann og lavvann, antyder nordgående strøm på $5.9 \text{ m}^3/\text{s}$ i øverste lag, sørgående strøm på $13.9 \text{ m}^3/\text{s}$ i midtre lag, og nordgående strøm $3.9 \text{ m}^3/\text{s}$ i nedre lag. Vi har da antatt lik strøm over hele tverrsnittet. Hvis dette var maksimalverdier, noe datamaterialet tyder på, og transportene følger sinus-funksjoner med periode = tidevannsperioden, blir total-transportene ved fallende tidevann $85\,000 \text{ m}^3$ nordover i øvre lag, $200\,000 \text{ m}^3$ sørover i midtre lag og $55\,000 \text{ m}^3$ nordover i nedre lag. Dette tilsvarer en svingning på $\pm 1.4 \text{ m}$ for nedre sprangsjikt i motfase med overflatesvingningen, og $\pm 0.5 \text{ m}$ for det øverste sprangsjiktet i medfase med overflatesvingningene, hvis de beregnede transporter bare berører det østre området for de to nederste lagenes vedkommende. Tidevannsamplituden var i denne perioden ca. 25 cm , slik at tidevannsprismet blir $350\,000 \text{ m}^3$.

Antar vi at de samme svingningene har skjedd i hele bassenget blir volumendringen i øvre lag + 100 000 m³ ved fallende tidevann, og ca. -450 000 m³ netto i de to nederste lagene. For den vestre delen er det rimelig å se bort fra det nederste spangsjiktet, siden terskelen er på 10 meters dyp. Hvis vi dessuten antar at det er de samme drivende krefter gjennom de to sørligste sundene, kan vi anslå transporten i sundet Malmøya/Ulvøya ut fra forholdet mellom tverrsnittene, som er omtrent 1:2.5 ovenfor 10-11 meters dyp.

For det øverste laget er friksjonen omtrent lik i begge sund, vi antar derfor samme hastighet, det gir en transport nordover ved fallende tidevann på 215 000 m³ i sundet Malmøya/Ulvøya. For det midtre laget vil friksjonen bli størst i sundet Malmøya/Ulvøya (bunnfriksjon), og transporten her vil derfor bli en del lavere enn 500 000 m³, og gå sørover ved fallende tidevann. Den anslåtte totale volumendring på + 450 000 m³ antyder en sørgående strøm i sundet Malmøya/Ulvøya på ca. 300 000 m³ mellom 5 og 10 meter ved fallende tidevann i tillegg til netto sørgående strøm 150 000 m³ i de to nederste lagene i Ulvøysund.

Eventuell strøm under 5 meter i Malmøysund er da neglisjert.

For overflatelaget har vi totalt ca. 300 000 m³ inn gjennom de sørligste sundene ved fallende vannstand og en volumøkning på 100 000 m³, det gir en transport nordover på ca. 200 000 m³ i de nordlige sundene.

Også i dette tilfelle ser det derfor ut som om vi har hatt en nokså stor strøm gjennom Paddehavet i overflaten nordover ved fallende, sørover ved stigende vannstand. Fordi sprangsjiktet svinger sterkere enn overflaten er strømmene nå større i de sørligste sundene enn i de nordlige. Resultatene er oppsummert i tabell 4. Det må presiseres at dette bare er et grovt anslag, basert på lite data, og med mange usikre antagelser. Tabellene antyder derfor bare hvordan strømbildet kan ha sett ut i hovedtrekk.

TABELL 4 Mulig transportbilde for sundene til Paddehavet 15.12.1969 ved fallende tidevann, basert på målinger i Ulvøysund

Vannlag	Volum- endring m ³	Nordlige sund m ³	Sundet Malmøya/ Ulvøya m ³	Ulvøy- sund m ³	Brutto inn/ut alle ₃ sund m ³
0-5 meter	+100 000	200 000 N	215 000 N	85 000 N	500 000
5-11 ")) 11 meter) - 6 bunn)	-450 000	0	300 000 S	200 000S 55 000N	500 000 55 000
Samlet bruttotransport inn/ut i alle lag					≈1 050 000

N : Nordover S : Sørøver

Den totale transporten gjennom alle sund var ifølge beregningene 3 ganger større enn det vannstandsvariasjonen skulle tilsi, på grunn av gjennomstrømning i overflatelaget, og på grunn av at sprangsjiktet svinger vertikalt. I overflatelaget var gjennomstrømningen ca. 2-3 ganger større enn det volumendringen skulle tilsi, brutto inn/ut-transport 5 ganger større.

Ved målingene i de nordlige sundene to måneder tidligere har sannsynligvis sjiktningen vært noe sterkere, og svingningene av sprangsjiktet derfor svakere. En svingning av sprangsjiktet i fase med vannstandsvariasjonene på samme måte som antydnet av målingen 15.12. ville likevel bety at transportene gjennom de sørlige sundene var mye større enn det som ble anslått i avsnitt 4.3.1. Dessuten har sprangsjiktet sannsynligvis ligget dypere, ned mot 10 meter, slik at en kan ha hatt nokså sterk inn/utstrøm langs bunnen av sundene i sør.

4.4. Samlet vurdering

Hovedkonklusjonen av dette blir at vannutskiftningen i Paddehavet stort sett er en funksjon av tidevannet. I overflatelaget går det en strøm sørover ved stigende vannstand, nordover ved fallende vannstand. Dessuten kan en ha vertikale svingninger av sprangsjiktet korrelert med tidevannet, som spesielt bidrar til utskiftningen av de dypere lagene. Den totale utskiftningen som følge av dette er ca. 3-6 ganger det en parallell inn/utstrøm i alle sund og på alle dyp ville gi. Ved en stengning av sundene i nord- eller sørenden ville gjennomstrømningen opphøre, og utskiftningen i overflatelaget minske sterkt, ned til 20-30% av hva den er i dag¹⁾.

Alle sund er vesentlige for vannutskiftningen i overflaten. De to østlige sundene, Ormsund og Ulvøysund, har mye mindre transporter enn de vestlige, men er av viktighet for å gi god utskiftning i de nordlige og østlige områder av Paddehavet. De nordligste sundene er smalest, og derfor antagelig begrensende. Konklusjonen til NIVA (1970) om å holde disse sund åpne er derfor riktig.

Med hensyn til overflatelaget skulle en viss innsnevring av de sørlige sund kunne tåles. De sørlige sundene er imidlertid vesentlige for utskiftningen av de dypere vannmasser i Paddehavet, og det er hensynet til disse vannmassene som blir avgjørende for hvor stor innsnevring som kan tåles.

- 1) Konklusjonen avviker noe fra den som ble trukket i 1970. Dengang ble det anslått en utskiftning ca. 1.5 ganger større enn en ren tidevannsutskiftning, og et forhold 4:1 mellom samlede transporter i nordlige og særlige sund. Dette skyldes at en ikke tok hensyn til forskjellig tidevannsamplitude i måleperiodene, og at lagdelingen ikke ble tatt med i betraktning. Det resultat en har kommet frem til nå forsterker imidlertid bare rapportens hovedkonklusjon, nemlig at en stenging eller innsnevring av de nordlige sundene ville være uheldig.

De beregninger som er utført her gir bare grove og omtrentlige overslag, og er dessuten basert på et antagelig lite representativt datamateriale. Helst skulle en ha gjort flere og mer fullstendige målinger, med måleperioder til forskjellige tider av året. Spesielt sommerperioden burde vært representert. Det er likevel ikke grunn til å tro at slike målinger ville rokke ved de kvalitative konklusjoner som er trukket.

5. VIRKNINGEN AV BRO/VEIFYLLING I DE SØRLIGE SUNDENE

5.1 Sundet Malmøya/Ulvøya

Det fremgår av det foregående at sundet Malmøya/Ulvøya er vesentlig for utskiftningen av dypvannet i den vestre delen av Paddehavet, og at denne utskiftningen kan tenkes å foregå som konsentrerte strømmer langs bunnen av sundet.

En slik strøm under et relativt stagnant overflatelag vil bli drevet av en horisontal trykkgradient satt opp av en helling av sprangsjiktet gjennom sundet. Fordi tetthetsforskjellen over sprangsjiktet er liten kreves relativt store nivåforskjeller for å drive en gitt strøm. Ved gitt potensiell energi (gitt nivåforskjell) vil strømmen reguleres av friksjonen, og eventuelt av sundets tverrsnitt. Den maksimale strøm som kan drives med gitt energi gjennom et sund under et stillestående lag er bestemt av

$$F^2 = \frac{u^2}{g \frac{\Delta \rho}{\rho} D} = 1 \quad (3)$$

hvor F = Froudes densimetrisk talls er definert av hastighet u , lagets tykkelse D , relativ tetthetsforskjell $\Delta \rho / \rho$ mellom lagene og tyngdens akselerasjon g . Dette kalles også kritisk strøm. Det tilsvarer en situasjon med sprangsjiktet i høyde $1.5 \cdot D$ over terskelen på en side av sundet,

under terskelen på den andre siden, og med neglisjerbar friksjon. Tilgjengelig potensiell energi er da $\frac{3}{2}g\Delta\rho D$ pr. volumenhet. Dette kan lett utledes ved å anvende Bernoullis ligning, kfr. Streeter (1961), s.26-7, 26-8.

Hvis det er friksjon (langt sund) eller det er mindre nivåforskjell vil strømmen bli mindre. Friksjonen kan anslagsvis beregnes til 1.43x(vanlig kanalfriksjon ved ettlags strøm) ifølge Streeter (1961), s.26-4.5. Benytter vi Mannings formel (Engelund 1969) for redusert tetthetsforskjell $\Delta\rho/\rho$ får vi en nødvendig nivåforskjell p.g.a. friksjon:

$$\Delta h_f = 1.43 \frac{\rho}{\Delta\rho} \cdot \frac{u^2}{M^2 \cdot R^{4/3}} \cdot L \quad (4)$$

hvor M = Mannings tall (=40 for naturlige kanaler)
 R = Hydraulisk radius
= middeldyp for brede kanaler
 L = kanalens lengde.

Som tenkt eksempel ser vi på en strøm i midlere tykkelse $D=1$ meter langs bunnen av sundet Malmøya/Ulvøya. Kritisk transport er gitt av

$$q_c = B \cdot D \cdot u_c = B \cdot \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^{1/2} \cdot D^{3/2} \quad (5)$$

og med en bredde som idag på $B = 100$ meter og en tetthetsforskjell $\Delta\rho/\rho = 0.003$ ($\Delta S = 4^0/00$) får vi

$$q_c = 17 \text{ m}^3/\text{s}.$$

En slik strøm vil i løpet av 6 timer (1/2 tidevannsperiode) kunne fylle opp et sjikt av tykkelse 1.8 meter i den vestre delen av Paddehavet. Det krever imidlertid en nivåforskjell på 1.5 meter innenfor og utenfor terskelen. Mindre nivåforskjell gir mindre strøm.

Beregner vi imidlertid friksjonen med denne strømmen, får vi $\Delta h_f = 3.7$ meter.

Dette viser at friksjonen ikke kan neglisjeres, og reell strøm vil derfor bli mye lavere enn q_c selv med maksimal nivåforskjell. For at det skulle være sikkert at en vertikal-svingning av sprangsjiktet ikke skulle dempes, dvs. at nivåforskjellen over sundet skulle være liten, måtte q_c kunne fylle opp et sjikt mye større enn det som tilsvarende maksimal nivåforskjell og friksjonen burde være neglisjerbar. En svingning av et sprangsjikt omkring terskeldypet kan derfor godt tenkes å dempes sterkt av dette sundet.

En svingning av et sprangsjikt omkring terskeldypet kan derfor godt tenkes å dempes sterkt av dette sundet.

Enhver innskrenkning av bredde eller dyp i sundet Malmøya/Ulvøya kan øke en slik demping, og må derfor frarådes uten at mer grundige undersøkelser gjøres. Det er store sjanser for at også mer nøyaktige undersøkelser vil gi det samme resultat.

En bro må bygges i omtrent full bredde over sundet for at den med sikkerhet ikke skal ha noen virkning. Ifølge meddelelse fra Vegvesenet må en også for en bro legge 3 meter høye fyllinger ved søylene av hensyn til fundamenteringen. Fyllingene må være 10 meter brede øverst, og med helning 1:1.5. En avstand mellom søylene på 25 meter som oppgitt, vil gi en innsnevring av det frie tverrsnitt på 50% mellom 10 og 7 meters dyp i sundet. En avstand mellom søylene på 100 meter, vil gi innsnevring 12%. Broen måtte derfor bygges med bare ett eller to brospenn.

5.2 Ulvøysund

Dette sundet synes idag ikke å utgjøre noen begrensning for vannutskiftningen i Paddehavet på samme måte som det vestre sundet. Ulvøysund har betydning for mye mindre vannmasser enn sundet Malmøya/Ulvøya, og er derfor mindre viktig for området som helhet, samtidig er de topografiske forholdene mye bedre. Dette betyr at Ulvøysund tåler innsnevringene mye bedre enn sundet Malmøya/Ulvøya. Hvor stor innsnevring som kan tåles er vanskelig å si bestemt uten grundigere undersøkelser. For å få et grovt anslag går vi ut fra at de topografiske forhold i Ulvøysund fremdeles skal være bedre enn i det vestre sundet idag.

En innsnevring til 10 meters dyp, og ca. 60 meter fri bredde i 0 meters nivå skulle ut fra dette være en grense for hva som kan aksepteres. En vil da få samme forhold mellom strømningstverrsnitt og vannvolum mellom 8 og 10 meter som for det vestre området, men det avstengte vannvolumet under 10 meter vil bli relativt mye mindre enn for det vestre området.

Strømmene i overflatelaget vil sannsynligvis ikke hemmes vesentlig i forhold til idag.

Ser vi på et 10 meter tykt overflatelag, og antar samme nivåforskjell Δh over begge de sørlige sundene, kan vi bruke ligning 1, og sette

$$\Delta h = \frac{Q_1^2 \cdot L_1}{M^2 \cdot R_1^{4/3} \cdot F_1^2} \quad (6)$$

for strømmen Q_1 gjennom sundet Malmøya/Ulvøya, og

$$\Delta h = Q_2^2 \left(k + \frac{L_2}{M^2 \cdot R_2^{4/3} \cdot F_2^2} \right) \quad (7)$$

for strømmen Q_2 gjennom Ulvøysund.

I ligning 7 representerer k friksjonen før innsnevring, det andre leddet er friksjonsøkning som følge av innsnevringen. Vi antar $R_1=R_2=R$ og setter $F_1/F_2 = 300/60=50$ (tverrsnitt proporsjonalt med bredden) og $L_1 = 600$ meter, $L_2 = 40$ meter (gj.snittlig lengde tvers over fyllingen). Forholdet mellom Q_1 og Q_2 blir:

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = \left[k^1 + \frac{L_2}{L_1} \cdot \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2 \right] \quad (8)$$

eller

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = (k^1 + 1.7)$$

hvor $k^1 = k \cdot \frac{M^2 \cdot R^{4/3} \cdot F_1^2}{L_1}$ er dimensjonsløs og av ukjent

verdi. Forholdet mellom transporten idag vil være gitt av

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 = k^1 \quad (9)$$

Hvis det er like stor gjennomstrømning i begge områder idag, dvs. $Q_1/Q_2=2.5$ (=forholdet mellom arealene), vil innsnevringen i Ulvøysund øke dette forholdet til 2.8. Hvis Q_1+Q_2 skal være forandret vil det si en minskning på 8% av Q_2 gjennom Ulvøysund og en økning på 3% av Q_1 gjennom sundet Malmøya/Ulvøya. Dette er små endringer.

Hvis forholdstallet Q_1/Q_2 er lavere enn 2.5 før innsnevring av Ulvøysund vil de prosentvise endringer bli større, men det østre området har da best forhold fra før, og innsnevringen vil bare gi jevnere forhold. Er forholdstallet større enn 2.5 er det østre området allerede dårligere utskiftet enn det vestre. Det vil da forsterkes av innsnevringen i Ulvøysund, men endringene i % vil bli mindre enn det som er beregnet for forholdstallet 2.5.

Alt i alt ser det ikke ut til at den nevnte innsnevringen skal kunne påvirke utskiftningsforholdene i ugunstig retning, uansett hvordan forholdene er fra før.

Ved oppfylling til 10 meter i dette sundet trengs ingen ytterligere fundamentering av søylene, og det stilles derfor ingen krav til søyleavstand.

Det nordligste plasseringsalternativ, alt. 5.C, gir minst avstengte vannvolum, og er derfor det gunstigste.

6. SAMMENDRAG OG KONKLUSJON

De målinger som tidligere er gjort i Paddehavet tyder på at alle sund er vesentlig for vannutskiftningen i området. Totalt sett er antagelig Malmøysund og sundet Malmøya/Ulvøya viktigst, men de to mindre sundene, Ormsund og Ulvøysund, er vesentlige for utskiftningen i de østre og nordlige områder. For utskiftningen av de dypeste vannvolumene (under 8 meter) har bare de sørligste sundene betydning. De planlagte bro-alternativer vil kunne innvirke på en slik utskiftning.

I sundet Malmøya-Ulvøya er det allerede en terskel på ca. 10 meter som avstenger et relativt stort volum ned til 14.5 meters dyp. Utskiftningen av disse vannmassene kan skje ved konsentrerte strømminger langs bunnen, og sundets tverrsnitt og dybde kan være bestemmende for de transporterte vannmengder. En innsnevring av dette sundet bør unngås.

Ulvøysund har ingen terskler, og har bare betydning for et relativt lite dypområde, med maksimaldyp 15 meter. Sundet er relativt bredt i forhold til de innenforliggende vannvolumer. En innsnevring her kan derfor bedre tolereres.

En bro over sundet Malmøya/Ulvøya må bygges i full bredde, og med bare ett eller to brospenn over sundet.

I Ulvøysund kan veifylling med bro brukes. For at man ikke skal få dårligere forhold i Paddehavets østre del enn i den vestre bør en bro i Ulvøysund bygges med et fritt strømningsstversnitt som er minst 60 meter bredt i 0 meters nivå, og 10 meter dypt over minst ca. 30-40 meters bredde. Det er ikke nødvendig å stille spesielle krav til avstanden mellom søylene. Det nordligst mulige plasserings-alternativ (5.C) bør velges.

LITTERATURLISTE

- ENGELUND 1969: Lærebog i hydraulikk,
Danmarks tekniske højskole
- NIVA 1970 : Vurdering av vannutskiftningen i Paddehavet.
NIVA-rapport O-35/69 ved Stene Johansen og
Kveisengen.
- STREETER, V.L. (ed.) 1961:
Handbook of fluid dynamics.
McGraw-Hill Book Company.

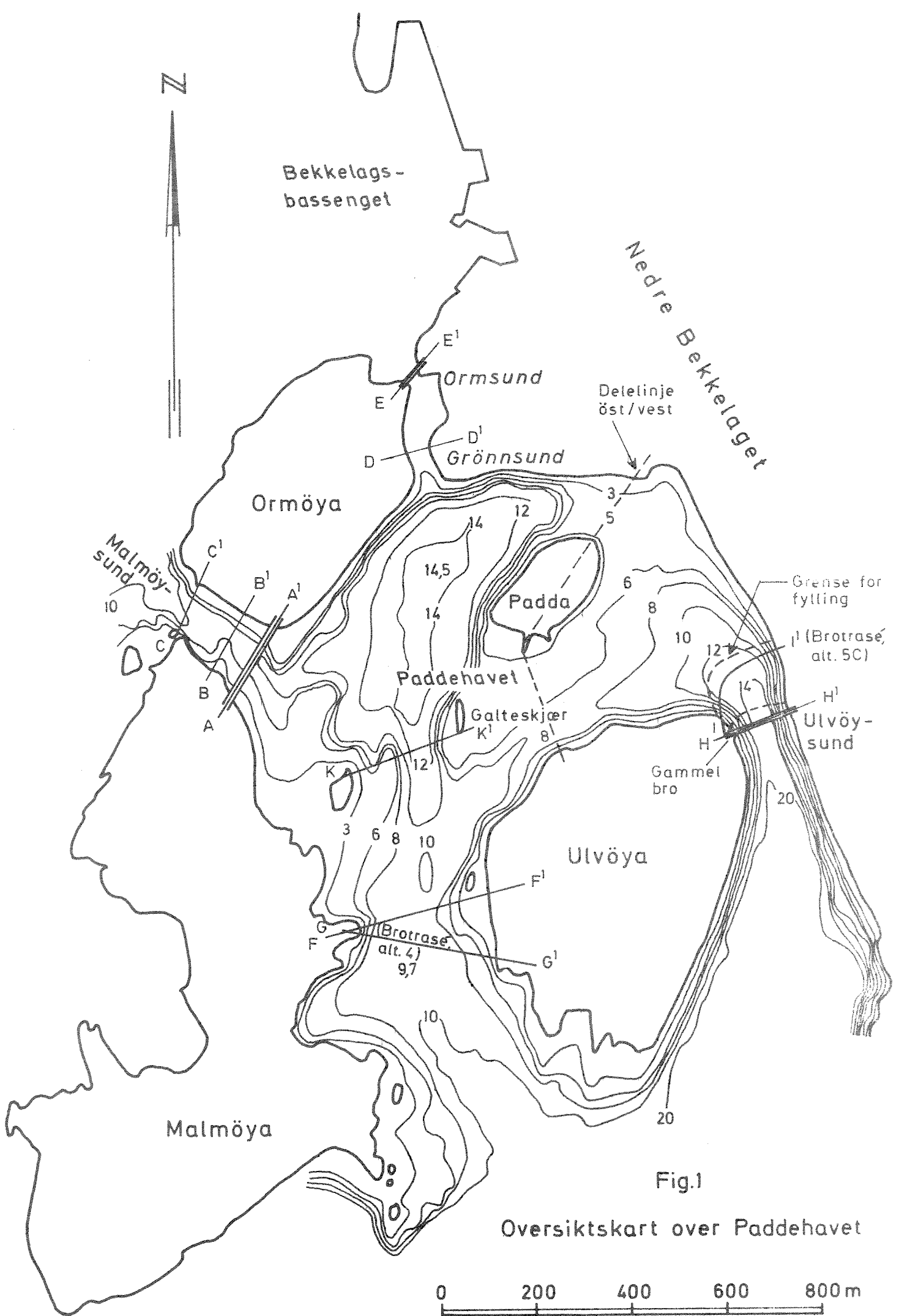


Fig.1

Oversiktskart over Paddehavet

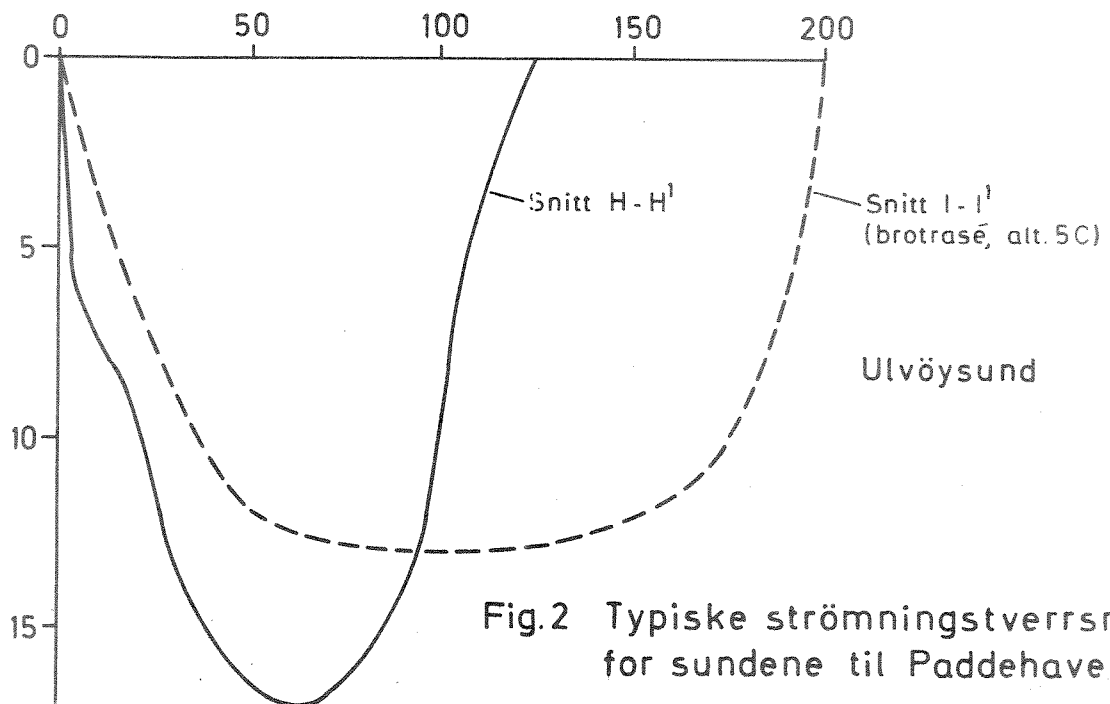
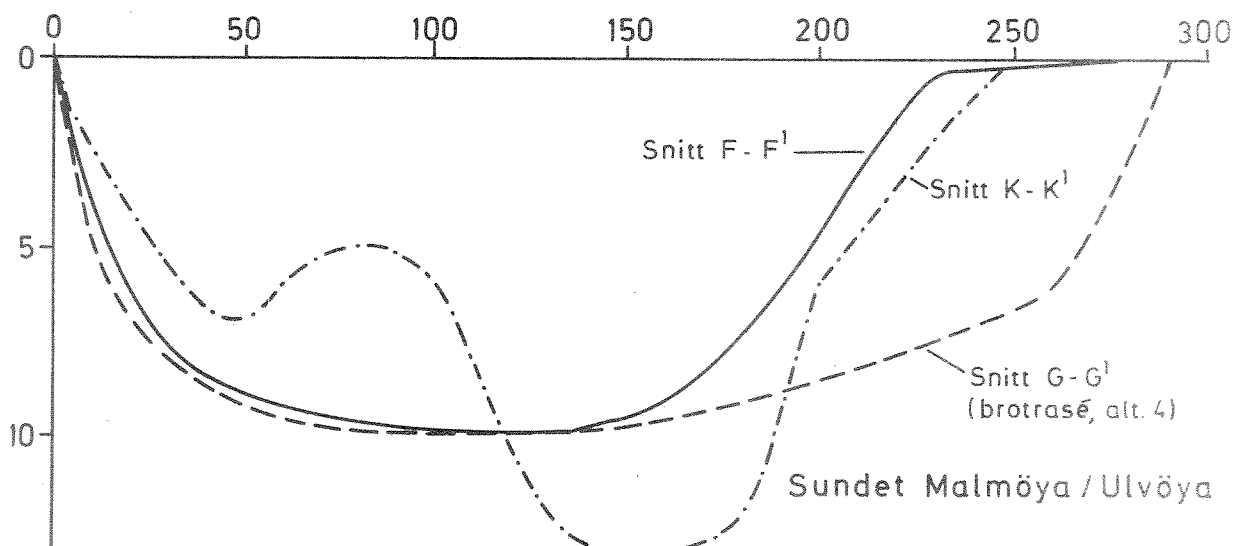
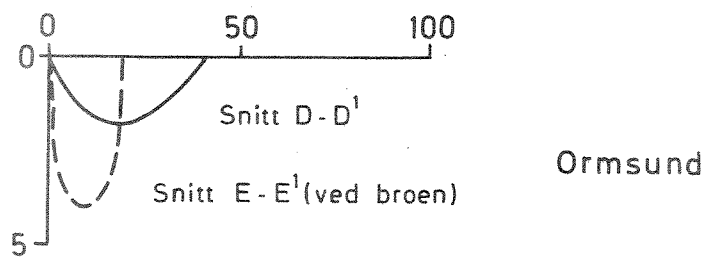
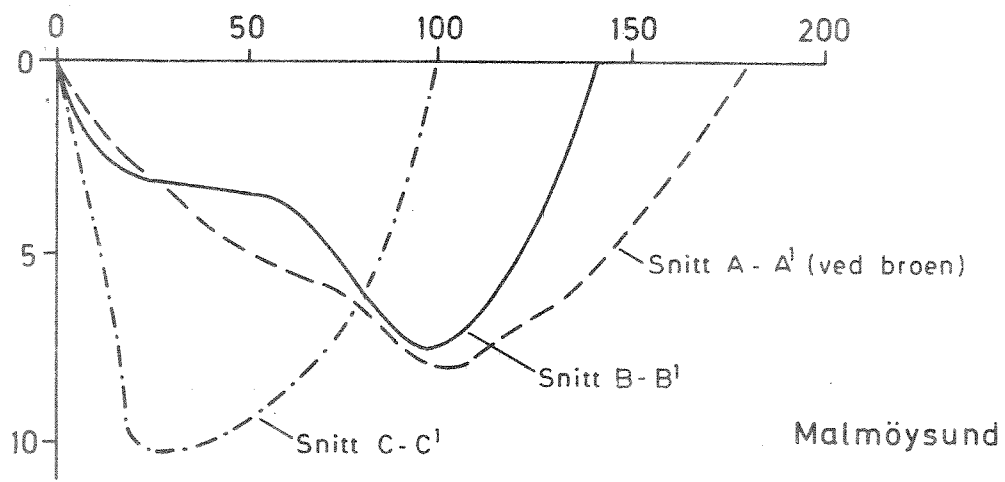


Fig.2 Typiske strömningstverrsnitt for sundene til Paddehavet