

# Tiltak for å forbedre vannutskiftningen i terskelfjorder

Av Arve Thendrup og Svein E. Hansen.

Arve Thendrup er siv.ing. og Svein E. Hansen er cand.real., og begge er ansatt ved Oceanor A/S.

*Foredrag ved konferanse om terskelfjorder  
i Skjold bygdahus, 31. mai 1989.*

## 1. Innledning

En terskelfjord består i prinsippet av et fjordbasseng med en relativt grunn undersjøisk rygg — en terskel — ved munningen. Ved tersekelen er det ofte også en horizontal innsnevring av fjorden. Disse topografiske forhold fører til dårlig utskiftning av dypvannet og kombinert med en viss belastning med lett nedbrytbart organisk materiale oppstår ofte oksygenproblemer. Omfanget av oksygenproblemene kan være stort. For fjordene i Vest-Agder er til eksempel utstrekningen av råttent dypvann uten fisk beregnet til å være i størrelsesorden  $35 \text{ km}^2$ .

Slike forhold forsøker man vanligvis å utbedre ved å redusere utslippene av plantenæringsstoffer og organisk stoff til fjorden. I mange situasjoner vil man imidlertid finne at oksygenproblemene ikke er løst ved dette. Grunnen er at restbetalstningen på fjorden (f.eks. noe kommunalt avløpsvann, industrielt avløpsvann, avrenning fra jordbruksarealer, avrenning fra skog og utmark) er for stor. I slike situasjoner kan det være aktuelt med direkte tiltak i fjorden for å bedre vannutskiftningen og dermed dypvannet.

## 2. Fjordforbedring.

### Metoder og prinsipper

Vanligvis er det tre ulike metoder som vurderes benyttet ved fjordforbedring. Disse er:

- 1) Dykket utslipps av ferskvann.
- 2) Pumping av lettere vann ned på dypet.
- 3) Tilførsel av komprimert luft til vannmassene (bøblemetoden).

I terskelfjorder og poller utskiftes dypvannet med varierende mellomrom ved at det oppstår tyngre vann utenfor terseklokområdet som strømmer inn over tersekelen og fortrenger eksisterende dypvann. Hyppigheten av dypvannsutskiftninger er fra naturens side avhengig av faktorer som de topografiske forhold ved tersekelen, de hydrografiske forhold utenfor og innenfor tersekelen, varigheten av en gitt hydrografisk situasjon utenfor tersekelen med videre. I noen terskelfjorder er dypvannsutskifting en årlig foretakelse, i andre terskelfjorder går det flere år mellom hver gang. Forenklet illustrert kan årsaken til dypvannsutskifting sies å være todelt:

Siden forrige dypvannsutskifting er dypvannet i fjordbassengen blitt litt ferskere pga turbulente prosesser. Det er videre sesongvise variasjoner av

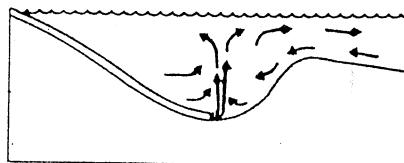
tyngden av kystvannet (utenforliggende vannmasser). I januar/mars er vannet utenfor terskelen tyngst, og når det er tyngre enn vannet i de dypereliggende vannmassene innenfor terskelen kommer en terskeloverskylling med påfølgende dypvannsutskifting.

Der terskeloverskyllinger foregår enten årvise eller sjeldnere er det ved fjordforbedringsmetoder mulig å øke hyppigheten. Fjordforbedring som metode blir dermed å utnytte naturens egen drivmekanisme ved utskifting av dypvannet, ved at forholdene i en terskelfjord med dårlig vannutskifting bringes over mot forholdene i en terskelfjord med tilfredsstillende vannutskifting.

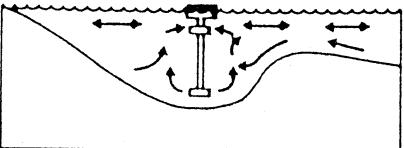
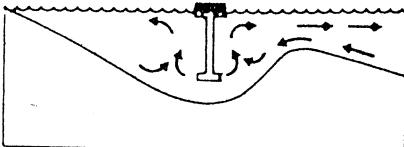
Det sentrale prinsipp for fjordforbedringsmetodene er å øke de turbulente prosessene. Dette vil si at ved å tilføre blandingsenergi til dypvannet vil «lekkasjen» av tungt vann bli større og tilstrekkelig til at det utenforliggende vann i terskelnivå periodevis blir tyngre enn det innenforliggende dypvannet. Det legges til rette for dypvannsutskifting. En påskynder dermed den naturlige prosessen for vannutskifting generert hovedsaklig av vind, tidevann og intermediær vannutskifting.

I Fig. 1 er vist prinsippskisser for ulike fjordforbedringstiltak. Øverst er vist et eksempel på strømningsmønster når ferskvann slippes ut på dypet. Avhengig av utformingen av utslippet og tetthetsgradienter over terskelnivå er det fullt mulig å få innlagret utslippet under overflaten. Dette kan være gunnstig for å hindre at næringsrikt bunnvann bringes opp mot overflaten.

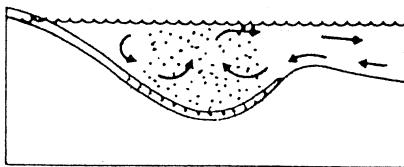
De to midterste figurene viser eksempler der overflatevann eller vann fra et mellomlag pumpes ned mot dypet. Effekten er mye den samme som



Dykket utslipp av ferskvann



Pumping av lettere vann ned på dypet



Tilførsel av komprimert luft til vannmassene

Figur 1. Prinsippskisse som illustrerer hvordan utslipp av ferskvann (avløpsvann), brakkvann eller komprimert luft skaper økt dypvannsutskifting i terskelfjorder.

med utslipp av ferskvann. Generelt gjelder det at mer vann må slippes ut på dypet jo større tetthet det er på vannet som føres ned. Under ellers like forhold er det mindre sjanse for at bunnvannet kommer helt opp i overflaten med disse tiltakene.

Det nederste figuren viser et eksempel på strømningsmønster når kompri-

mert luft slippes ut på dypet. Luft som stiger oppover vil trekke med seg vann mot overflaten. Den oppadstigende luft-/vannstrålen vil bestå av en kjerne av luft og vann med lav tetthet. Utenfor denne kjernen vil vann rives med pga friksjonskrefter. Disse vannmassene har en tetthet som er større enn tettheten i fjorden utenfor strålen. Laboratorieforsøk og teoretiske beregninger viser at medrevet vann fra utenfor kjernen vil innlagres i fjorden på flere nivåer.

### 3. Hvor er fjordforbedring foretatt?

OCEANOR har foretatt dimensjonering for følgende fjorder der fjordforbedringstiltak er gjennomført:

Bongstøvann i Vest-Agder

(pumping av overflatevann ned på dypet og utsipp av komprimert luft)

Rona i Vest-Agder

(utsipp av komprimert luft)

Vestre og Østre Skogsfjord i

Vest-Agder

(utsipp av komprimert luft)

Valsøyfjorden i Møre og Romsdal

(utsipp av ferskvann)

Åstfjorden i Sør-Trøndelag

(utsipp av ferskvann)

Erfaringene fra tiltakene i Vest-Agder er rapportert av OCEANOR, og resultatene er gjennomgått i innlegget til overing. Steene på denne konferansen.

Vi har foretatt dimensjonering av fjordforbedring for følgende fjordområder:

Bunnefjorden ved Oslo

(pumping av overflatevann ned på

dypet, utsipp av ferskvann og utsipp av komprimert luft)

Trystfjorden i Vest-Agder

(utsipp av ferskvann)

Snigsfjorden i Vest-Agder

(utsipp av komprimert luft)

Grisefjorden i Vest-Agder

(utsipp av komprimert luft)

Nordåsvatnet i Hordaland

(utsipp av ferskvann)

Ørstafjorden i Møre og Romsdal

(pumping av overflatevann ned på dypet, utsipp av ferskvann og utsipp av komprimert luft)

Sørgjerfjorden i Sør-Trøndelag

(utsipp av ferskvann)

Botnen i Sør-Trøndelag

(pumping av overflatevann ned på dypet, utsipp av ferskvann og utsipp av komprimert luft)

Lausnes i Nord-Trøndelag

(utsipp av ferskvann)

Rotvikvatnet i Nord-Trøndelag

(pumping av overflatevann ned på dypet, og utsipp av komprimert luft)

Horvereidvatnet i Nord-Trøndelag

(pumping av overflatevann ned på dypet, og utsipp av komprimert luft)

### 4. Dimensjoningskriterier med Bunnefjorden som eksempel.

#### 4.1 Topografi

I Fig. 2 er vist et batygrafisk kart over Oslofjorden innenfor Drøbak, og i Tabell 1 er vist arealfordelingen.

Terskelen ved Drøbalsundet er 19,5 m dyp, og fjordens overflateareal innenfor terskelen er 192,5 km<sup>2</sup>. Det første bassenget vi kommer til er Vestfjorden. Overflatearealet er omlag 125 km<sup>2</sup>, og største dyp er 164 m. Dette bassenget avgrenses mot Bærumsbassenget med en terskel på 15 m dyp og mot Bunnefjorden med en terskel på 54

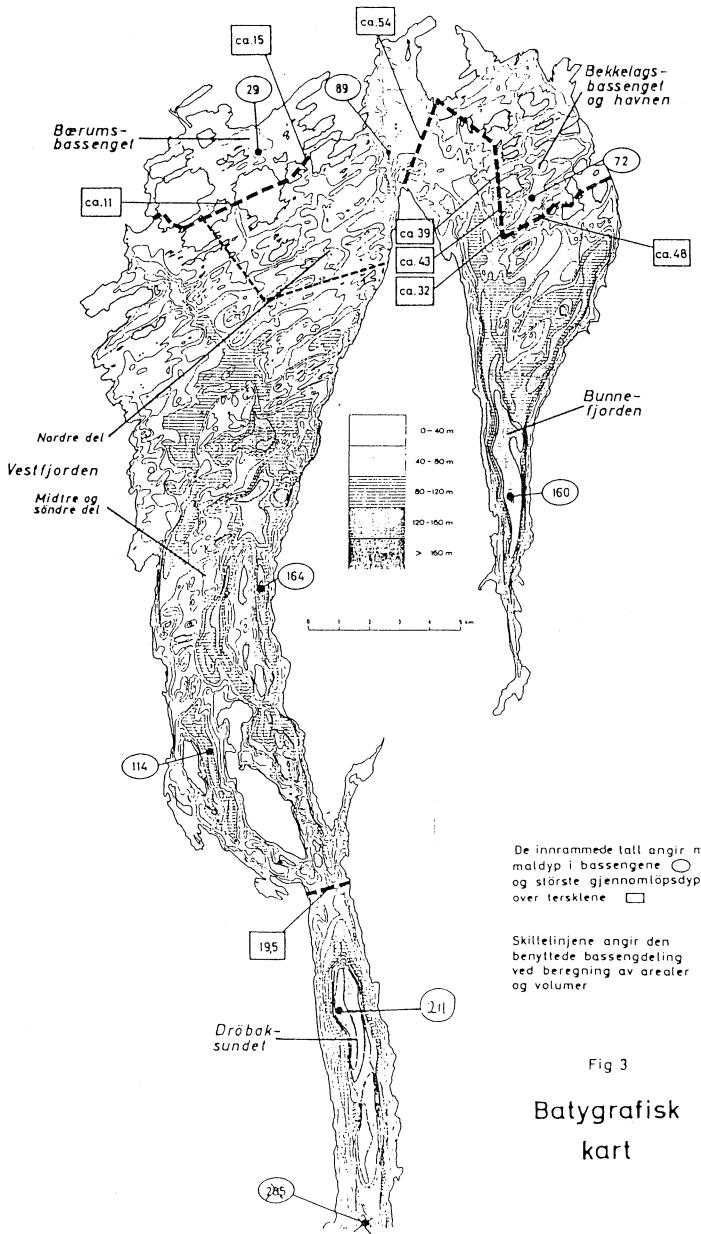


Fig 3

### Batygrafisk kart

Figur 2. Batygrafisk kart over Oslofjorden innenfor Drøbak (NIVA rapport 0-201/S, 1968).

Tabell 1. Arealfordelingen for Oslofjorden innenfor Drøbak og for noen enkelte bassenger.

I dyp meter	Fjorden innenfor Drøbak	Bunne-fjorden	Vest-fjorden	Bekkelags-bassengen og havnen	Bærumsbassengen	Drobak-sundet	Nordre Vest-fjord	Søndre og midtre Vestfjord
0	192.55	42.212	125.44	15.78	9.12	21.16	25.90	99.54
10	167.42	38.86	111.89	11.71	4.96	19.54	22.01	89.88
20	142.24	35.51	98.31	7.63	0.79	17.91	18.11	80.20
30	118.04	31.31	82.57	4.15	0.00	16.76	13.39	69.19
40	90.32	27.88	68.31	3.12	0.00	15.70	9.68	58.63
50	81.19	23.94	55.23	2.01	0.00	14.72	6.87	48.36
60	63.91	20.19	42.79	0.92	0.00	13.79	3.84	38.96
70	48.51	17.19	31.04	0.28	0.00	13.02	0.99	30.04
80	37.27	14.26	23.01	0.00	0.00	11.96	0.11	22.91
90	27.77	10.87	16.90	0.00	0.00	11.05	0.00	16.90
100	17.79	8.11	9.69	0.00	0.00	10.22	0.00	9.68
110	11.67	6.04	5.63	0.00	0.00	9.47	0.00	5.63
120	8.22	4.64	3.58	0.00	0.00	8.91	0.00	3.58
130	4.80	3.12	1.68	0.00	0.00	8.21	0.00	1.68
140	3.07	2.47	0.61	0.00	0.00	7.49	0.00	0.61
150	1.32	1.32	0.00	0.00	0.00	6.76	0.00	0.00
160	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.91	0.00	0.00
170	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.20	0.00	0.00
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.27	0.00	0.00
190	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.14	0.00	0.00
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.52	0.00	0.00
210	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

m dyp. Overflatearealet er 9 km<sup>2</sup> i Bærumsbassengen og 42 km<sup>2</sup> i Bunnefjorden, og største dyp er henholdsvis 29 og 160 m. Bunnefjorden avgrenses nord mot Bekkelagsbassengen og havnen ved et terskeldyp på 43 m. Overflatearealet her er 16 km<sup>2</sup> og største dyp er 72 m.

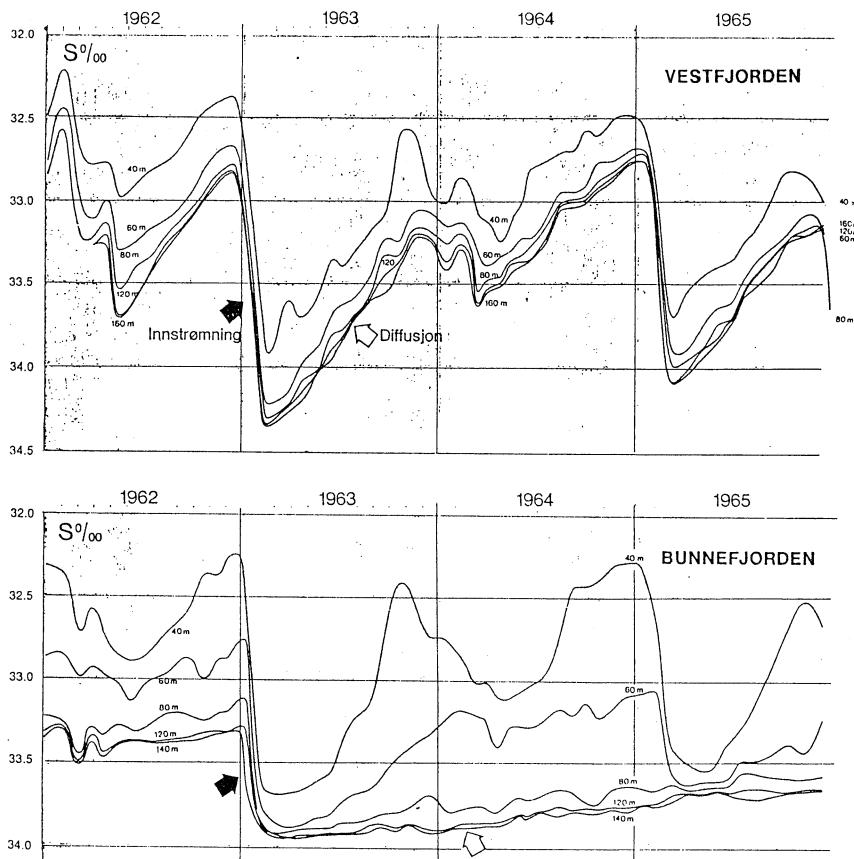
#### 4.2 Hydrografi

Fig. 3 viser saltholdighetsutviklingen i Vestfjorden og Bunnefjorden fra 1962 til 1965.

Med sort pil på figuren (januar 1963) er vist en situasjon der bunnvannet blir skiftet ut i både Vestfjorden og Bunnefjorden. Hendelsen skyldes at svært

tungt vann har kommet opp på terskelnivå (mindre enn 19 1/2 m dyp) i Drøbaksundet. Dette har trolig sammenheng med at kraftig vind fra nord har drevet brakkvannet ut fra ytre Oslofjord og demed løstet det tyngre vannet opp mot overflaten (upwelling). Det første vi kan legge merke til er at det tyngste vannet ikke når fram til Bunnefjorden. Bunnvannet i Bunnefjorden erstattes med vann fra Vestfjorden på nivå med terskelen mellom Vestfjorden og Bunnefjorden.

Utover året i 1963 blir vannet under terskelnivået stadig lettere i både Vestfjorden og Bunnefjorden. Dette



Figur 3. Saltholdighetsutviklingen i Vestfjorden og Bunnefjorden (NIVA rapp. 0-201/S, 1968).

skyldes at dypvannet gradvis fortynnes med brakkvann ovenfra ved turbulent blanding (diffusjon). Reduksjon i tettheten er imidlertid langt raskere i Vestfjorden. Siden saltholdigheten fra 60 m og opp er ganske lik i de to bassengene, må forskjellen i utviklingen av saltholdigheten i bunnvannet skyldes at mer blandingsenergi er tilgjengelig i Vestfjorden. Hovedkilden for den tur-

bulent energien er tidevannsgenererte indre bølger som dannes ved terskelen ved Drøbak. Amplituden for de indre bølger er svært avhengig av bredden ved terskelområdet, og Oslofjordens munning har slik sett en nær optimal bredde.

I Tabell 2 er gitt en oversikt over tidspunktet for utskifting av bunnvannet i Vestfjorden og Bunnefjorden i årene

Tabell 2. Tidspunkt for terskeloverskylninger i Vestfjorden og Bunnefjorden.

	Vestfjorden	Bunnefjorden
1973	mai	
1974	des-jan, mai-juni, nov-des	jan, mai
1975	mars-april	
1976	febr-april	mars-april
1977	mars	
1978	feb, des	mars
1979	feb-mars	
1980	mai	
1981	mai, des	
1982		
1983	april	
1984	feb-mai, okt-april	
1985		mars-april

1973 til 1985. Mens det er årlige terskeloverskyllinger i Vestfjorden, går det fra 2 til 6 år mellom hver utskifting av bunnvannet i Bunnefjorden.

#### 4.3 Beregning av endring i den potensielle energien

Når tyngre vann nær bunnen i et fjordbasseng blander seg med lettare vann fra overflatelaget gjennom turbulente prosesser, øker den potensielle energien til sjøvolumet. Dette er illustrert i Fig. 4, der det er vist hvordan

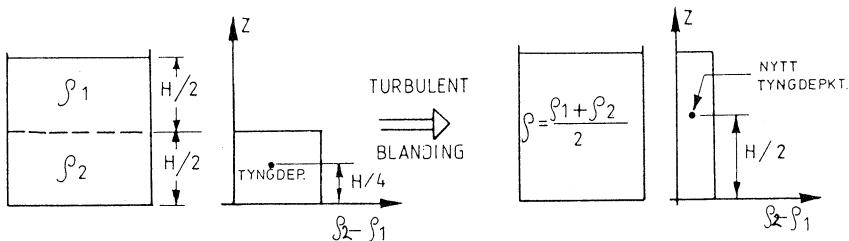
tyngdepunktet til et vannvolum (egentlig tyngdepunktet for tetthet utover en referansetetthet) flyttes oppover når to like vannvolumer blander.

I Fig. 5 er vist hvorledes vi prinsipielt kan tenke oss tetthetsprofilen i en terskelfjord før og etter et fjordforbedrings tiltak.

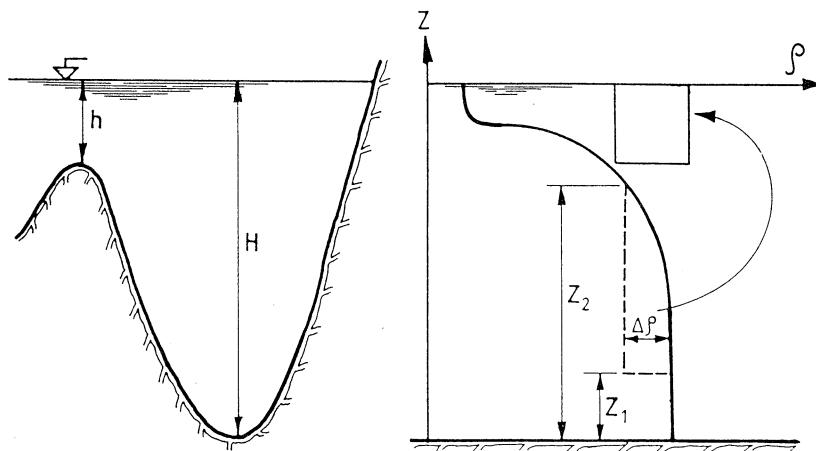
Vi har en terskelfjord med største dyp ved terskelen lik  $h$  og største dyp i bassenget lik  $H$ . Tetthetsforholdene før et fjordforbedringstiltak er utført er vist med heltrukken strek. Tetthetsforholdene etter at fjordforbedringstiltak er utført er vist med stiplet linje. Det er antatt at utslipps av lettare vann eller komprimert luft skjer i en avstand lik  $z_1$  over bunnen. Det er videre antatt at vannnuskniften fra overflaten og ned til et nivå rett under terskelnivå er såvidt god at fjordforbedringstiltaket ikke påvirker tetthetsforholdene her.

Ved beregning av økningen i den potensielle energien har vi tenkt oss at tyngre vann under terskelnivå flyttes opp til overflatelaget, og at overskuddstettheten fordeles jevnt over et lag fra overflaten og ned til terskeldyp.

Vi kan da sette opp denne ligningen for økningen i den potensielle energien.



Figur 4. Prinsippskisse som viser forflytning av tyngdepunktet oppover ved turbulent blanding.



Figur 5. Prinsippskisse for tetthetsforholdet i en terskelfjord.

$$\Delta E_p = (H - 1/2h) \cdot \int_{z_1}^{z_2} \Delta S \cdot A \cdot g \cdot dz - \int_{z_1}^{z_2} \Delta S \cdot A \cdot z \cdot g \cdot dz$$

der  $\Delta E_p$  = økningen i den potensielle energien

$\Delta S$  = tetthetsendringen i høyde  $z$  over datumlinjen

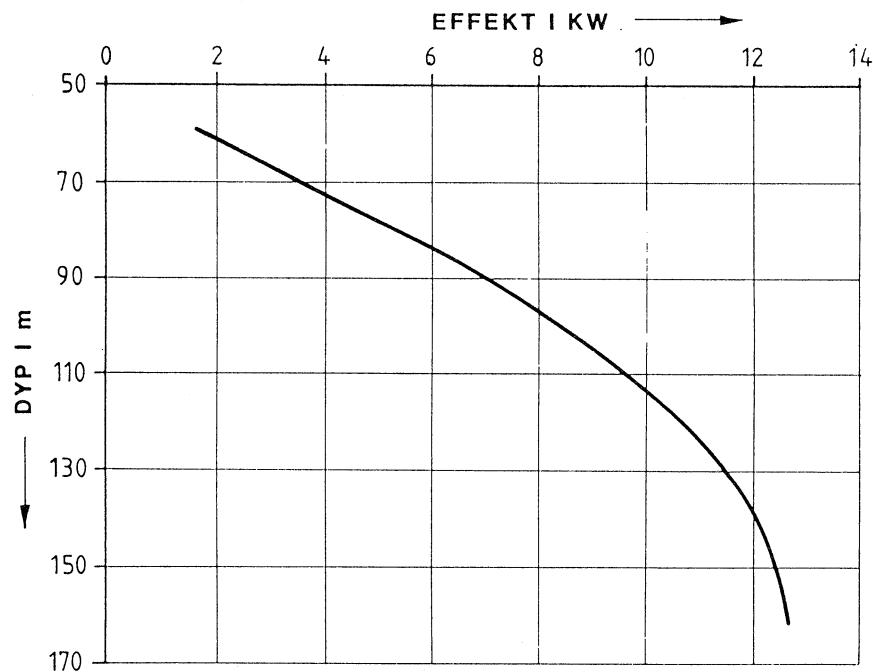
$A$  = tverrsnittsarealet i høyde  $z$  over datumlinjen

$g$  = tyngdens akselerasjon.

Det neste spørsmålet vi må svare på er hvor mye lettere vi må gjøre vannet i Bunnefjorden for å få til en utskifting av bunnvannet en gang pr. år. I Tabell 3 er vist reduksjon i saltholdigheten under 9 registrerte stagnasjonsperioder i Vestfjorden. Beregningsmessig vil vi

Tabell 3. Reduksjon i saltholdighet i Vestfjorden.

1962:	33,5	— 32,8	på 199 dager	= 0,35 %/100 dager
1963:	34,3	— 32,2	på 274 dager	= 0,40
1964:	33,65	— 33,8	på 299 dager	= 0,28
1965:	34,1	— 32,2	på 257 dager	= 0,35
1973:	32,8	— 33,3	på 150 dager	= 0,33
1975:	33,6	— 32,8	på 210 dager	= 0,38
1978:	33,7	— 33,1	på 240 dager	= 0,25
1979:	34,0	— 33,0	på 180 dager	= 0,56
1980:	33,6	— 33,0	på 205 dager	= 0,29
Middel = 0,35				



Figur 6. Nødvendig endring i potensiell energi pr. tidsenhet Bunnefjorden som funksjon av dyp for fjordforbedring.

gå ut fra at vi ønsker 75% av denne reduksjonen i Bunnefjorden. Vi får da en ønsket tetthetsreduksjon i Bunnefjorden under stagnasjonsperioder på  $0,26 \text{ kg/m}^3$  pr. 100 dager.

Ved å sette inn i den gitte formelen  $H=160 \text{ m}$ ,  $h=54 \text{ m}$  og  $z_2=55 \text{ m}$ , får vi dette anslag over nødvendig endring i vannsøylyens potensielle energi pr. tidsenhet som funksjon av hvor dypt i fjorden fjordforbedringstiltaket settes inn (se Fig. 6).

For å få til en økning i den potensielle energien i vannsøylyen må vi tilføre kinetisk energi som så går over til turbulente bevegelser. Det er vanlig å

regne med at 5% av den kinetiske energien som tilføres fjordene fra vind og tidevann går med til å heve den potensielle energien. 95% av tilført mekanisk energi dissiperes følgelig til varmeenergi. Når energien tilføres som tetthetsstrømmer, f.eks. ved utslipps av lettere vann på dypet, viser laboratorieforsøk og numeriske simuleringer at hele 45% av den tilførte energien kan gå over til økt potensiell energi. Det er da forutsatt at det densimetriske Froudetallet for utslipps av lettere vann på dypet er lik en — 1. Det densimetriske Froudetallet er definert ved ligningen

$$F_0 = \frac{u_0}{\frac{\Delta S}{S} \cdot g \cdot D}^{1/2}$$

der  $u_0$  = utslippshastigheten

$\Delta S$  = tethetsforskjellen mellom utslippsvann og sjøvann i utslippsdyp

$S$  = sjøvannets tethet i utslippsdyp

$D$  = utløpsrørets diameter.

Ved høyere densimetriske Froudetall avtar effektiviteten i overføringen til potensiell energi ned til 5% som er nevnt for naturlig forekommende energikilder.

På bakgrunn av de erfaringstall vi har funnet i litteraturen, har vi i de videre beregninger valgt å gå ut fra at 25% av den tilførte energien går over til heving av den potensielle energien ved utslipp av lettere vann på dypet, og at 15% av den tilførte energi blir tilgjengelig som potensiell energi ved utslipp av komprimert luft på dypet. Siden det er såvidt stor usikkerhet knyttet til effektiviteten av tiltakene er det ved gjennomføring nødvendig med oppfølgende registreringer i fjordbassengen.

#### 4.4 Utslipp av ferskvann på dypet

Ved utslipp av ferskvann på dypet vil fjorden få tilført en energi  $E$ :

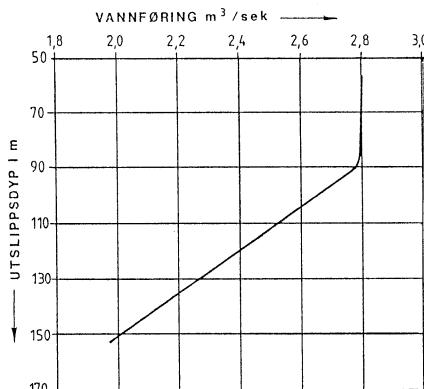
$$E = Q \cdot \Delta S \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot Q \cdot S \cdot u^2$$

der  $Q$  = volumfluks ferskvann

$\Delta p$  = midlere tethetsforskjell mellom ferskvannet og sjøvannet

$h$  = utslippsdypet

Insatt  $\Delta S = 26 \text{ kg/m}^3$  og  $u_0 = 0,5 \text{ m/s}$  får vi følgende nødvendige ferskvannsmengde som funksjon av utslippsdyp (se Fig. 7).



Figur 7. Nødvendig utslippsmengde av ferskvann.

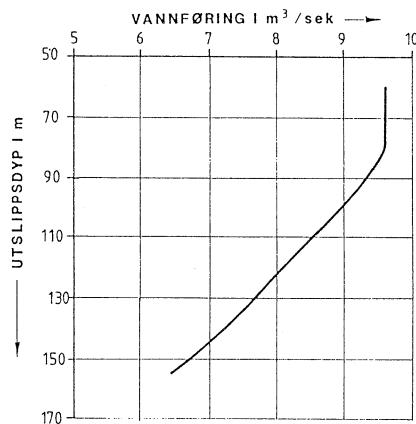
#### 4.5 Pumping av overflatevann ned på dypet

Energien som tilføres dypvannet ved pumping av overflatevann ned på dypet kan beregnes ved samme formel som for utslipp av ferskvann.  $\Delta S$  må imidlertid nå beregnes ut fra forskjellen mellom tetheten av overflatevann og dypvannet i bassenget.

Tetheten i overflatelaget varierer mellom  $1013 \text{ kg/m}^3$  og  $1024 \text{ kg/m}^3$  og vi benytter i beregningene en verdi for  $\Delta S$  på  $7,5 \text{ kg/m}^3$ . Vi får da at det er nødvendig å pumpe disse vannmengdene med overflatevann ned på dypet (se Fig. 8).

#### 4.6 Tilførsel av komprimert luft

Ved utslipp av komprimert luft på dypet ( $h$ ) blir denne energien tilført fjorden:

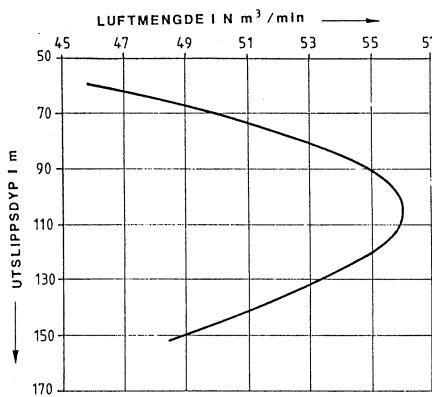


Figur 8. Nødvendig utslippsmengde av overflatevann.

$$E = q \cdot 10^5 \cdot \ln \frac{10^5 + S \cdot g \cdot h}{10^5}$$

der  $q$  = lufttilførsel i  $\text{Nm}^3/\text{s}$ .

Vi forutsetter at bare den energien som blir omsatt under terskelnivå er tilgjengelig for blanding, og vi får følgende nødvendig luftmangde som funksjon av dyptet (se Fig. 9).



Figur 9. Nødvendig tilførsel av komprimert luft.