

Fagrådet for vann-og avløpsteknisk samarbeid i indre
Oslofjord

Dypvannsfornyelse i Bunnefjorden

Forprosjekt
Flytende pumpestasjon ved Svartskog

November 2002
Revidert mars 2003

Utgivelsesdato	:08.11. 2002 /revidert 21.03.03
Saksbehandler	:Finn B. Christensen/Sean Sweeney
Kontrollert av	:Finn B. Christensen <i>FBC</i>
Godkjent av	:Sigurd Grande

FORORD

Fagrådet for vann- og avløpsteknisk samarbeid i indre Oslofjord har benyttet NIVA til å utrede og beregne effekter av en tenkt nedpumping av overflatevann til de dypere vannmasser i Bunnefjorden. En nedpumping av lettere overflatevann forventes å øke hyppigheten av dypvannsfornyelser og derved bedre oksygenforholdene i fjorden.

Fjordgruppen i Fagrådet inviterte i mars 2001 fem konsulentfirmaer til å presentere en mulig skisseløsning med kostnadsoverslag for ett eller to pumpeanlegg plassert enten ved Svartskog eller ved Svartskog og Gjersjøelva. Hjellnes COWI AS presenterte i samarbeid med COWI (Danmark) en skisseløsning med bruk av en flytende pumpestasjon som gir stor fleksibilitet med hensyn på trinnvis utbygging, varierende utslippsdyp og flytting av stasjonen. Fagrådet gav i november 2001 Hjellnes COWI AS i oppdrag å utarbeide et forprosjekt for bruk av flytende pumpestasjoner ved Svartskog med en total kapasitet på 12 m³/s. Formålet var å klarlegge plassering, utforming av pumpestasjon med nedføringsrør, diffusor og forankring samt miljø-/sikkerhetsmessige forhold og anleggs-/driftskostnader.

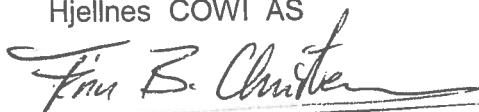
Rapporten gjennomgår de teoretiske beregningene for nedpumping av overflatevann og gir forslag til utforming og plassering av diffusor og angir pumpekapasiteter og driftstid for å oppnå optimal effekt av nedpumpingen. Likeledes beskrives hvordan pumpestasjonen med diffusor teknisk sett kan utformes og monteres.

Forprosjektet er utarbeidet av Hjellnes COWI i samarbeid med COWI. COWI har vært ansvarlig for en supplerende vurdering av de hydrografiske forhold i Bunnefjorden og dimensjoneringsgrunnlaget for pumpekapasitet og diffusorutforming. Hjellnes COWI har vært ansvarlig for innhenting av underlagsdata, utforming av tekniske detaljer og beregninger vedrørende den flytende pumpestasjonen, elektrotekniske anlegg, kostnader og utarbeidelse av rapport.

Arbeidene i Hjellnes COWI har vært utført av siv.ing. Finn B. Christensen som oppdragsansvarlig og Sean Sweeney som saksbehandler. Ph.D. Carsten Jurgensen fra COWI har bistått med vurderinger av innlagingsforhold og diffusorløsning i samarbeid med dr. tech. Flemming Bo Pedersen.

Rapporten er revidert 21. mars 2003 i samsvar med kommentarer fra NIVA og fagrådets styringsgruppe.

Oslo, 21. mars 2003
Hjellnes COWI AS



Finn B. Christensen
oppdragsansvarlig

INNHOLDSFORTEGNELSE

SIDE

SAMMENDRAG	2
INNLEDNING	4
1 VURDERINGER VEDR. DYPVANNSFORNYELSE I BUNNEFJORDEN	5
1.1 Bunnefjordens overordnede hydrografi.....	5
1.2 Ytre påvirkninger	6
1.3 Vannsirkulasjon	6
1.4 Miljøforbedrende prosesser	7
2 LOKALISERING AV PUMPESTASJON.....	9
3 DIMENSJONERINGSGRUNNLAG FOR NEDPUMPING	11
4 DIMENSJONERING AV NEDFØRINGSRØR OG DIFFUSOR	13
5 UTFORMING AV PUMPESTASJON, NEDFØRINGSRØR DIFFUSOR OG FORANKRING.	15
6 STRØMTILFØRSEL	16
7 MONTERING.....	18
8 DRIFT	19
9 TRINNVIS UTBYGGING	20
10 MILJØ OG SIKKERHET	21
11 KOSTNADER	22
11.1 Anleggskostnader.....	22
11.2 Driftskostnader	22
11.3 Kostnader for prøvedrift.....	22

VEDLEGG:

1. Internt notat." Dybvandsfornyelse i bunnefjorden". Flemming Bo Pedersen, professor, dr.tech.
2. Kart over Bunnefjorden
 - 2.1- Aktuelle lokaliseringer av pumpeanlegg
 - 2.2- Pumpeanlegg på Bekkenstein, Svartskog
 - 2.3- Prinsippskisse for 3 stk flytende pumpeanlegg
 - 2.4- Snitt flytende pumpeanlegg på Bekkenstein
3. Diverse data for Bunnefjorden
 - 3.1- Tidevannsnivåer

3.2- Variasjoner over året i egenvekt, statisk høyde pga tetthetsforskjell

3.3- Tidevannsnivåer i forhold til pumpestasjon, bølgehøyder, vinddata

4. Strømningsmønster for sirkulær diffusor

5. Utforming av pumpehus, nedføringsrør, diffusor og moring

5.1- Detalj av pumpestasjon, oppriss

5.2- Detalj av pumpestasjon med flyteseksjon, nedføringsrør, diffusor og moring

6. Pumpedata

6.1- Vannføring versus energitap

6.2- ABS pumpe, type VUP-1201

6.3- Snitt av pumpe

6.4A og B - Tekniske pumpedata

6.5- Pumpekurve

7. Montering av pumpestasjon

8. Pumpestasjon for prøvedrift

9. Kostnader

10. Elektrotekniske anlegg

10.1 - Trafokiosk

10.2 - Tett kabelgjennomføring

10.3 - El.kabel frakoblet pumpestasjon

SAMMENDRAG

Prosjektgrunnlag

For å forbedre dypvannsfornyelsen i Bunnefjorden i indre Oslofjord har NIVA forslått å forbedre den naturlige egenveksreduksjonen på dypvannet i Bunnefjorden ved nedpumping av overflatevann.

NIVA's teoretiske beregninger konkluderte med at utslippsdypet har stor betydning for å bedre forholdene i den dypeste del av vannmassene. Oksygenforholdene i dypvannet er svært avhengig av utslippsdypet. Den beste løsningen er å slippe ut overflatevannet så dypt som mulig, dvs. nær bunnen på det dypeste stedet i fjorden, men det er også gunstig å fordele utslippet på ulike dyp. Ved å fordele utslippsdypet mellom 100 og 140 m vil en kunne oppnå jevnere forhold fra år til år. For en gitt plassering av utslipp(ene) vil effekten på dypvannsfornyelsen og oksygenforholdene være avhengig av tilført mengde overflatevann. Beregningene viste at effekten av å variere utslippsdypet er langt større enn å bruke en diffusor med flere og mindre stråler. Det var også viktigere enn å øke vannmengden. Pumping av 12 m³/s ned til 120 m gir bedre og mer årvisst forbedring enn å pumpe 30 m³/s til 100 m.

Fagrådet besluttet i samråd med NIVA at en plassering nær Svartskog skulle velges som grunnlag for et forprosjekt for et flytende pumpeanlegg med en total kapasitet på inntil 12 m³/s fordelt på hele året. Pumpeanlegget skulle baseres på en trinnvis utbygging fra en til tre pumper.

Plassering av pumpeanlegg

Basert på en vurdering av detaljerte sjøkart, bunnforhold, nærliggende kraftlinjer, adkomstmulighet og tilgjengelig kommunal tomt, anbefales pumpeanlegget plassert like syd for Bekkenstein som vist på vedlegg 2.2 og 2.3. Denne plassering vil være optimal i forhold til alle de angitte vurderingsfaktorer.

Alternativ effektvurdering av nedpumping av overflatevann

Som grunnlag for forprosjektet har COWI gjennomført en alternativ effektvurdering av nedpumpingen, som bygger på en overordnet resipienthydraulisk analyse (altså ikke en numerisk hydrodynamisk modell). Fordelen ved denne metoden er at den gir et konkret dimensjoneringsgrunnlag for nødvendige pumper og diffusorer, samtidig som effekten av de foreslåtte tiltak umiddelbart klarlegges. Denne vurderingen er i sin helhet vedlagt denne rapporten som vedlegg 1 og kun de viktigste beregninger og konklusjoner er tatt med i den etterfølgende beskrivelsen.

Bunnefjordens naturlige bunnvannsfornyelse forekommer med langvarige intervaller, slik at det ofte oppstår anoksiske forhold i de dypere lag av fjorden. Ved kunstig å øke diffusjonsprosessen i bunnvannet til samme verdi som i den tilstøtende Vestfjorden, får man den optimalt oppnåelige bunnvannsfornyelse i Bunnefjorden. COWI's beregninger viser at dette krever en nedpumping av overflatevann på ca. 9 m³/s i ca. 9 måneder av året til de dypeste partier i fjorden. Nedpumpingen bør gjennomføres i den delen av året hvor det er en markant tetthetsforskjell mellom topp og bunn ($\Delta \sigma > 5 \text{ kg/m}^3$ iht vedlegg 3.2), dvs i perioden mars tom november. En økning av den nedpumpede vannmengde ut over disse 9 m³/s i denne perioden, vil ikke gi noen markant større effekt på Bunnefjordens bunnvannsfornyelse.

Konklusjon

Det foreslås at man velger den hydraulisk optimale løsning med :

ett pumpeanlegg plassert ved Bekkenstein (Svartskrog) basert på bruk av to pumpestasjoner på tilsammen ca 9 m³/s, som pumper overflatevann ned til ca 140 meters dybde i de 9 månedene, hvor tetthetsforskjellen mellom topp og bunn er større enn delta σ = ca 5 kg/m³ (mars t.o.m november). Alternativt pumper 6,8 m³/s gjennom hele året.

Et annet krav som må oppfylles, er at den nedpumpede vannmengden fordeles jevnt i bunnvannet. Dette kravet må oppfylles gjennom en optimal dimensjonering av diffusor.

Man kan med rimelig sikkerhet konkludere med at den nødvendige omrøring av Bunnefjordens bunnvann i forbindelse med nedpumping av overflatevann er sikret, såfremt diffusorarrangementet dimensioneres slik at det skapes en medrivning til den oppadrettede vannstrålen på ca. $40 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ på et år.

Utforming av pumpestasjon, nedføringsrør og forankringsanordning

Det flytende pumpeanlegget er vist i detalj i vedlegg 5.1 og 5.2. Anlegget er satt sammen av en øvre del, selve pumpestasjonen, og en nedre del som omfatter nedføringsrøret, diffusor og en forankringsanordning.

Utforming av diffusor

Diffusoren bygges som en forlengelse av nedføringsrøret, men utformes som et Ø1600 GUP-rør hvor vannføringen fordeles jevnt langs omkretsen via 6 stk Ø500 mm horisontalt rettede diffusorrør, se vedlegg 5.2. På denne måten unngår man bruken av diffusor med lange horisontale fordelingsledninger.

Elektrotekniske anlegg

Forprosjektet er basert på en trinnvis utbygging av pumpeanlegget fra en til tre pumpestasjoner ved Bekkenstein i Bunnefjorden. Hver pumpe skal styres av en frekvensomformer slik at pumpekapasitet kan varieres fra 3 til $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Hver pumpe krever en energitilførsel på 350 kW.

Eksisterende 10 kV høyspentlinje har kapasitet til uttak av inntil 900 kW, dvs 2 stk pumpestasjoner. Ved installasjon av 3 stk pumper må eksisterende høyspentlinje forsterkes. Fra eksisterende høyspentlinje føres det en ny 250 m lang kraftlinje frem til ny trafokiosk som plasseres ved adkomstvei ca. 60m fra sjøen som angitt på vedlegg 2.3. Ny høyspentlinje med tilhørende transformator, 10kV/690V, anbefales dimensjonert for 3 stk pumper, dvs uttak av inntil ca. 1100 kW.

Fra trafo føres kabler gjennom trekkerør på land og i egne kabelvernrør fra landtak og 20 m ut i sjøen. Videre legges kabelene på sjøbunnen ut til pumpeanleggets moring. Fra 150 m dyp og opp til pumpestasjonen føres kabel langs hovedrøret opp til flyteseksjonen hvor de forankres før de føres videre inn i pumpestasjonen.

Kostnader

De totale anleggskostnadene er beregnet til ca. 11,1 mill kr. for et pumpeanlegg med en pumpestasjon for $3\text{-}5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Driftskostnadene for 9 måneders drift er beregnet til ca. 1,5 mill kr.

Prøvedrift

Nødvendig pumpekapasitet i forhold til omrøringskapasitet er fortsatt usikker og det bør derfor vurderes om det er ønskelig med prøvedrift av et pumpeanlegg med midlertidig strømtilførsel fra et dieselaggregat for å fremskaffe mest mulig data. Pumpe og dieselaggregat kan monteres på en flåte som vist i vedlegg 8. Alternativt bygges pumpestasjonen som foreslått i vedlegg 5.1 og 5.2 med mulighet for utskifting av pumpen. På denne måten kan investeringen på 5 mill. kr. til permanent kraftfremføring utsettes inntil pumpekapasiteten er klarlagt.

Anleggskostnaden for et prøveprosjekt basert på montering av pumpe på flåte og strøm fra dieselaggregat vil være ca. 4 mill kr. Driftskostnaden for 3 måneders drift av prøveanlegget er ca. 1,3 mill kr. Pumpen, nedføringsrør, diffusor og moring med forankringsenhet kan senere benyttes i et permanent anlegg.

INNLEDNING

For å forbedre dypvannsfornyelsen i Bunnefjorden i indre Oslofjord er det forslått å forbedre den naturlige egenvektsreduksjonen på dypvannet i Bunnefjorden ved nedpumping av overflatevann.

Etter oppdrag fra Fagrådet for vann- og avløpsteknisk samarbeid i indre Oslofjorden har NIVA gjennomført en teoretisk beregning av effekter ved nedpumping av overflatevann til Bunnefjordens dypvann ved hjelp av en simuleringsmodell. Konklusjonen av beregningene og supplerende vurderinger er at den beste løsningen er å slippe ut overflatevann nær bunnen på det dypeste stedet i fjorden. Beregningene viste også at det var gunstig å fordele utslippet på ulike dyp, samt å fordele vannmengden geografisk på to utslippssteder. Det dypeste utslippet burde ligge ved Svartskog i søndre del av Bunnefjorden, hvor fjorden har sitt største dyp på 150 til 154 meter. Det andre utslippet burde lokaliseres til området utenfor utløpet av Gjersjøelva, hvor største dyp er ca. 120 meter.

For å unngå anoksisk dypvann (laveste ambisjonsnivå) kreves en vannmengde på 4 m³/s ved kontinuerlig pumping. Med 8 m³/s vil det være mulig å oppnå middels ambisjonsnivå og med 12 m³/s skulle det være mulig å oppnå høyeste ambisjonsnivå (jevnlige ca. 1 ml/l oksygen i bunnvannet, en konsentrasjon som gir grunnlag for reetablering av reker). Nedpumping av overflatevann vil gi utskiftning av Bunnefjordens dypvann stort sett hvert år, som er en stor forbedring i forhold til den naturlige situasjonen, hvor det kan gå 3-4 år mellom hver utskiftning. Dette forutsetter at eventuelle klimaforandringer ikke gir dårligere forhold for dypvannsfornyelse.

I stedet for å pumpe kontinuerlig kan en pumpe i deler av året, men med en større vannmengde pr. tidsenhet. Det er av overordnet betydning hvor store volumer lettere overflatevann som tilføres dypvannet i løpet av et år.

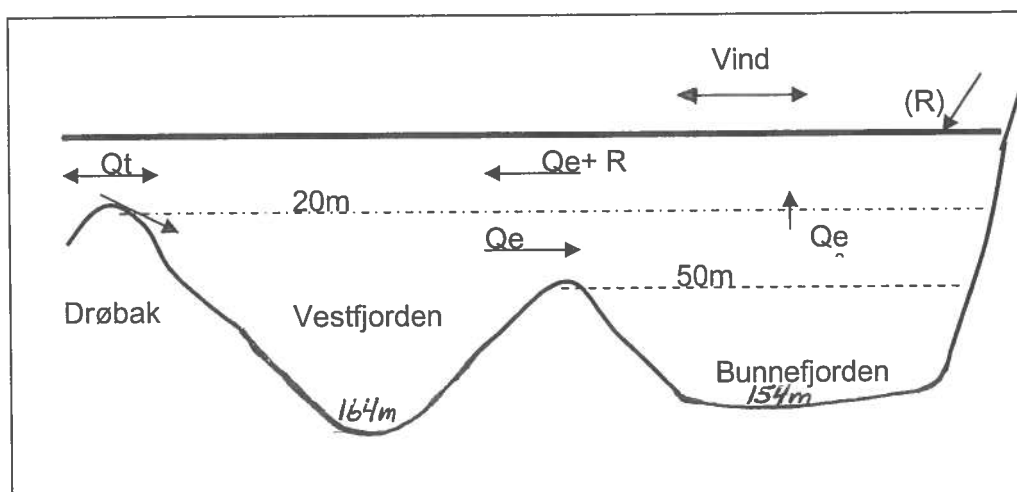
Forprosjektet er basert på konklusjonene og data i rapporten fra NIVA (Fagrådet, rapport nr. 78), supplerende data over variasjoner i vannets egenvekt fra NIVA, supplerende vurderinger utført av COWI av Bunnefjordens hydrografi og innlagingsforhold og data innhentet fra Oslo havnevesen, kystdirektoratet og det norske meteorologiske institutt. ABS Pumper har bistått med vurdering av pumpetekniske detaljer og Vera Fiberglass og Flowtite Norway med detaljer vedrørende bruk av glassfiberarmert polyester (GUP) i pumpestasjonen.

1 VURDERINGER VEDR. DYPVANNSFORNYELSE I BUNNEFJORDEN

Det er nødvendig at prosjekteringen av de tekniske anlegg skjer på grunnlag av forståelse av de mekanismer som virker i fjordsystemet. Grunnlaget for en vellykket inngripen i fjordens miljøforhold er en basal forståelse av de grunnleggende fysiske og miljømessige prosesser. Derfor legges det i det etterfølgende vekt på å beskrive disse prosessene og angi overslagsmessige vurderinger av størrelsesorden på de viktigste parametre (vannføringer, konsentrasjoner osv.). Disse overslagene benyttes til å vurdere effektene av de tiltak som foreslås, og supplerer dermed de gjennomførte modellberegninger fra NIVA.

1.1 Bunnefjordens overordnede hydrografi

Bunnefjordens bathymetri er skissert i NIVA-rapport nr 78. Supplerende opplysninger om tilførte ferskvannsmengder fra elvene (Fagrådet) og om vertikal tetthets- og oksygenfordeling er innhentet (NIVA). Den overordnede sirkulasjonen er illustrert ut fra en overslagsmessig beskrivelse av de ytre randbetingelser for fjorden. Sirkulasjonen er vist i figur 1.1.



Figur 1.1

Illustrasjonen av den overordnede sirkulasjonen i Bunnefjorden i normalsituasjonen, hvor sirkulasjonen styres av medrivningen Q_e . Tidevannet fører til en pulserende strøm Q_t , ferskvannstilførselen betegnes med R . I situasjoner hvor det innstrømmende vannet over Drøbaktterskelen er tyngere enn overflatevannet i Vestfjorden, vil det innstrømmende vannet innleire seg under 20 m.

Med en omtrentlig lengde på 15 km, bredde på ca 2 km og en dybde på 150 m, og et V-formet tverrsnitt på tvers og på langs samt en skilleflate i 50 meters dybde fremkommer følgende nøkkeltall for Bunnefjorden inkl. Lysakerfjorden:

- Totalt volum $26 \cdot 10^8 \text{ m}^3$
- Volum i bunnvannet $10 \cdot 10^8 \text{ m}^3$
- Volum i overflatevannet $16 \cdot 10^8 \text{ m}^3$

For å relatere de angitte pumpemengder på hhv. 12 og $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ville det teoretisk ta mellom 2,6 og 6,3 år å erstatte bunnvannet med overflatevann.

1.2 Ytre påvirkninger

I det følgende gjennomgås de ytre påvirkninger som betyr mest for vannutskiftningen og miljøforholdene i Bunnefjorden.

Tidevannet

Det anslås at tidevannet på ca 0.2 meter gir et tidevannsprisme for både Vestfjorden og Bunnefjorden på $0,2 \cdot 2 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3 = 12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Over 6 timer vil dette gi en gjennomsnittlig vannføring Q_t på ca. $550 \text{ m}^3/\text{s}$. Denne pulserende vannføring vil stort sett kun pumpe det samme vann frem og tilbake i overflaten og gir dermed ikke anledning til netto vannutskiftning.

Ferskvannstilstrømning

Ferskvannsmengden i Bunnefjorden er kvantifisert ved å anta en lagtykkelse på minst 10 m, et areal på $15 \cdot 2 \text{ km}^2$ og en gjennomsnittlig tetthetsforskjell på $8 \sigma_t$ (sigma-t). Dette anslaget gir en "ferskvannssøyle" på 3,1 m eller en mengde på ca. 10^8 m^3 . Hvis denne mengde skal komme fra elvene, vil det ved en gjennomsnittlig vannføring på ca. $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ta ca. 4 år. Det er derfor urealistisk at tro at ferskvannstilførselen fra elvene kan ha signifikant betydning for ferskvannsmengden og dermed lagdelingen i Bunnefjorden. Den styrende mekanisme for lagdelingen ligger derfor i den ytre randbetingelse ved Drøbaksterskelen.

Vind

Vindhastigheten er viktig for vurderingen av den tilførte energi som i form av turbulens er medvirkende til homogenisering av overflatelaget. Ca. 4 % av denne energien anvendes til oppadrettet medrivning av tungt vann fra de dypere vannlag. Dette vil igjen gi anledning til en densitetsdrevne sirkulasjon i fjordsystemet, slik som den er illustrert i figur 1.1.

σ_t -variasjoner i overflaten av Skagerrak

Variasjoner av σ_t i overflaten av Skagerrak representerer den ytre randbetingelse ved Drøbak og bestemmer derfor om tidevannet pumper vann inn som er tyngre eller lettere enn vannet som allerede er i fjordsystemet. Over årstidene varierer σ_t mellom 12 og 20 i Skagerrak (Gustafsson, 1997) og mellom 7 og 27,6 i 0-20 meters dyp i Drøbaksundet (NIVA).

1.3 Vannsirkulasjon

Drøbaksterskelen dikterer dybden av skilleflaten. Saltholdigheten utenfor Drøbaksterskelen dikteres av overflatelagets saltholdighet i ytre Oslofjord samt Skagerrak. Kun i spesielle og sjeldne situasjoner (hver 2-4 år) vil saltholdigheten være så høy og varigheten av innstrømningen av tungt vann over terskelen så lang at det fortrenger bunnvannet i Bunnefjorden. I normal-situasjonen vil sirkulasjonen i Bunnefjorden være dominert av medrivning fra det nedre lag og en tyngdedreven sirkulasjon i de øverste 50 m. Denne sirkulasjonen overlages av tidevannets pulserende strøm. Strømningsmønstret er skissert i figur 1.1. Den lokalt tilførte energi fra vinden gir oppadrettet mixing (entrainment) som kan beregnes til ca. 10^{-5} m/s , (Pedersen, 1986). Denne hastigheten er basert på en vind på 7 m/s som er typisk i Skagerrak området. Med denne hastighet over skilleflatens areal blir vannføringen Q_e ca. $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Denne vannføring er betydelig større enn vannføringen fra elvene og den er derfor av primær betydning for vannutskiftningen i Bunnefjorden. Sirkulasjonen som løper inn i Bunnefjorden mellom 50 og 20 m dybde og ut i overflatelaget foregår permanent og varierer bare litt i styrke på grunn av de sesongmessige variasjoner i tilførsel av turbulent kinetisk energi.

Det er først og fremst denne sterke sirkulasjonen som gjør det mulig å forbedre miljøforholdene i Bunnefjorden ved nedpumping av overflatevann fordi den garanterer at forholdene i overflaten holdes konstant.

1.4 Miljøforbedrende prosesser

Som det er angitt i NIVA-rapporten er det følgende to prosesser som forventes å forbedre miljøet i Bunnefjorden:

- Densitetsreduksjon i bunnvannet
- Tilførsel av oksygen ved sirkulasjon

Disse to prosesser vil i det følgende beskrives kvalitativt.

Densitetsreduksjon i bunnvannet

For å forbedre miljøforholdene i Bunnefjordens dypvann reduseres densiteten ved nedpumping av lett overflatevann. På denne måten vil det skje oftere at densiteten i 50 m dyp i Vestfjorden er større enn i bunnlaget i Bunnefjorden. (Populært sagt: Det friske vannet fra Vestfjorden vil strømme inn i 50 m dybde og på grunn av Bunnefjordens nå lave densitet vil det nye vannet synke til bunns og dermed fortrenge det gamle vannet.)

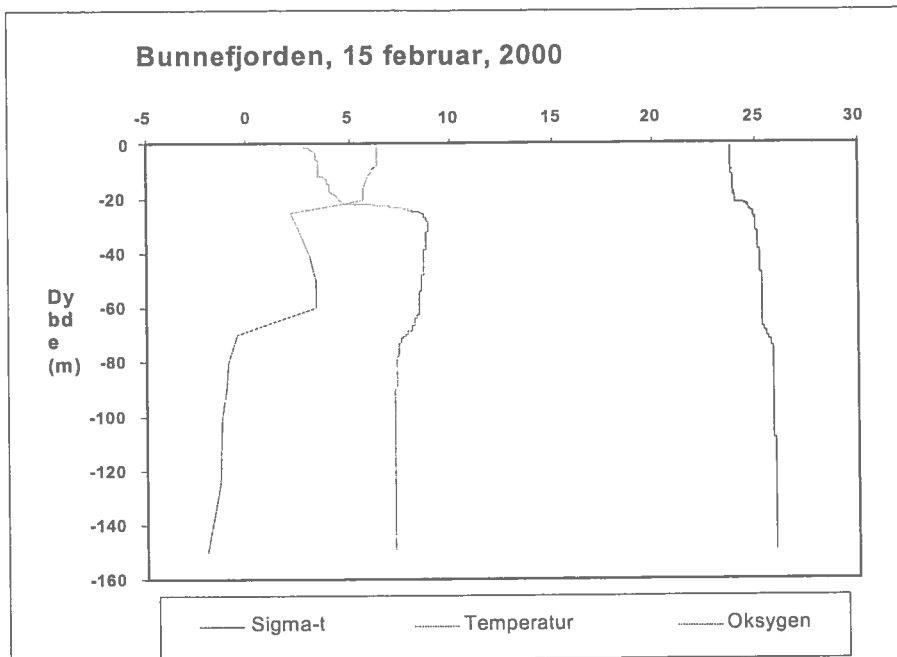
De nåværende densitetsforholdene i Vestfjorden (50m) og i Bunnefjorden (100m) er beskrevet i figur 7 i NIVA rapport nr 78. Her ses at densiteten i Vestfjorden i 50 m i 11 hendelser har vært større enn densiteten i Bunnefjorden på 100 m. Den viste periode er på 27 år, dvs. den naturlige utskiftning skjer gjennomsnittlig hvert 2½ år. Av gradienten på "Bunnefjordskurven" ($0,1 \sigma_t/\text{år}$) finnes den naturlige nedpumping av overflatevann til ca. $0,6 \text{ m}^3/\text{s m}^3$. Ved forskjellige pumperater ($4\text{-}12 \text{ m}^3/\text{s}$) vil denne gradient økes med en faktor 7 til 30. Dermed vil σ_t i Bunnefjorden falle vesentlig og omtrent like så hurtig som i Vestfjorden. Dermed kan vannutskiftningshendelsene forventes å skje ca. 1 gang årlig. Som sideberegning kan det nevnes at densiteten i bunnvannet vil falle med ca. $1 \sigma_t/\text{år}$ ved nedpumping av ca. $5 \text{ m}^3/\text{s}$ overflatevann.

Dersom det legges til grunn at fortyningen vi være ca. 500 vil sirkulasjonen i dypvannet ved en pumpe rate på $5 \text{ m}^3/\text{s}$ være $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Ved et volum på $7 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ betyr det en sirkulasjonstid på under en uke. Det kan altså legges til grunn homogene forhold i bunnvannet.

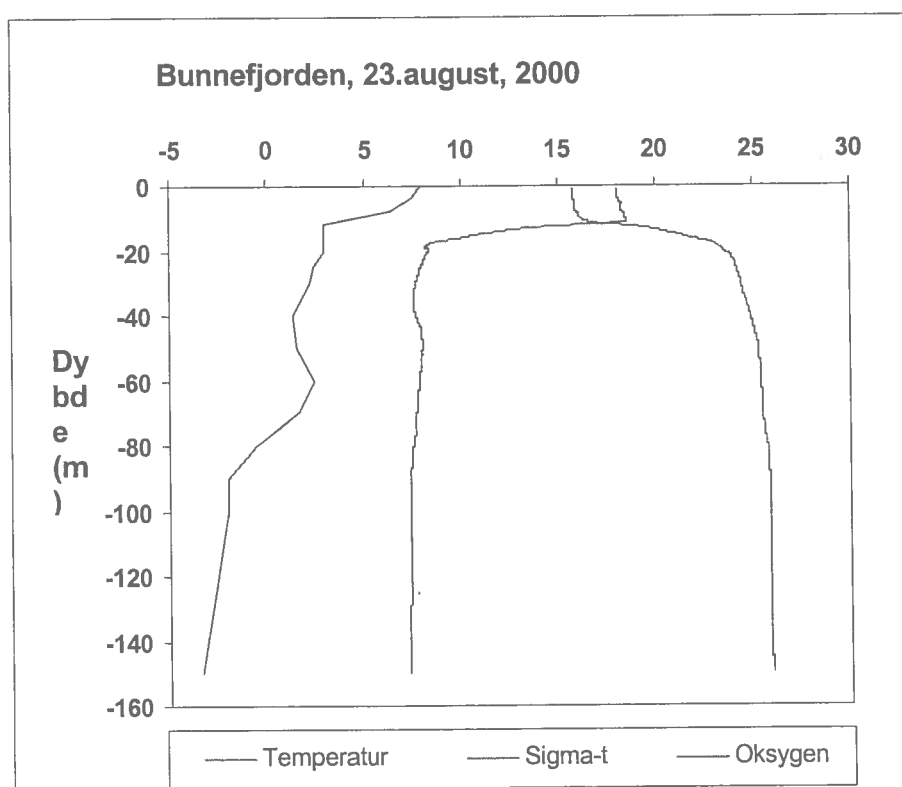
Tilførsel av oksygen ved sirkulasjon

Nedpumpingen av oksygenrikt vann fra overflaten vil bety en liten økning av oksygenkonsentrasjonen omkring diffusorerne, men konsentrasjonen vil ikke stige merkbart. Hvis den homogene vannmassen strekker seg høyere enn terskeldybden på 50 m vil vann fra Vestfjorden delta i dypvannssirkulasjonen. Modelleringene utført av NIVA viser at innlagring ved de fleste scenarier vil forekomme i denne dybde. Profilene for oksygen i figur 1.4.2 a og i figur 1.4.2.b illustrerer at oksygen forekommer i akseptable konsentrasjoner i vannmassene over 50 m. Jo mere av det oksygenrike vann over terskelen som blir dratt inn i den sirkulerende vannmassen jo bedre blir forholdene. Denne effekten vil belyses nærmere i de videre undersøkelsene.

Det understrekes at tilstanden i det dype bunnvannet forventes å bli betydelig bedre etter etablering av pumpingen. Derfor vil utgangssituasjonen i bunnvannet være betydelig bedre enn i de viste profiler, det forventes ikke negative konsentrasjoner av oksygen (dvs H_2S).



Figur 1.4.a
Vertikal profilmåling, februar 2000, (NIVA 2001).



Figur 1.4.b
Vertikal profilmåling, august 2000, (NIVA 2001).

2 LOKALISERING AV PUMPESTASJON

NIVA's teoretiske beregninger konkluderte med at utslippsdypet har stor betydning for å bedre forholdene i den dypeste del av vannmassene. Oksygenforholdene i dypvannet er svært avhengig av utslippsdypet. Den beste løsningen er å slippe ut overflatevannet så dypt som mulig, dvs. nær bunnen på det dypeste stedet i fjorden, men det er også gunstig å fordele utslippet på ulike dyp. Ved å fordele utslippsdypet mellom 100 og 140 m vil en kunne oppnå jevnere forhold fra år til år. For en gitt plassering av utslipp(ene) vil effekten på dypvannsfornyelsen og oksygenforholdene være avhengig av tilført mengde overflatevann. Beregningene viste at effekten av å variere utslippsdypet er langt større enn å bruke en diffusor med flere og mindre stråler. Det var også viktigere enn å øke vannmengden. Pumping av 12 m³/s ned til 120 m gir bedre og mer årviss forbedring på 130 m dyp enn å pumpe 30 m³/s til 100 m.

Modellkjøringene behandler bare den vertikale inndelingen av vannmassene i Bunnefjorden, og regner med horisontalt midlere verdier i hvert dyp. De kan derfor ikke brukes til å si noe om den horisontale fordelingen av utslippet. Ut fra en skjønnsmessig vurdering basert på fjordens topografi og på kjennskap til dypvannsfornyelsesprosessen og generell kunnskap om tetthetsdrevne strømmer i et basseng anbefalte NIVA bruk av to pumpeanordninger i Bunnefjorden. Den ene med et utslippsdyp på ca. 140 m plassert i det dypeste området i den sørlige delen av fjorden på høyde med Blylaget – Svartskog, hvor fjorden har en dybde på 150 – 154 m. Den andre med et utslippsdyp på 100-120 m burde plasseres i det nordøstlige dypvannsområdet ved utløpet av Gjersjøelva, hvor dybden er 126 – 130 m. De aktuelle lokaliseringene er vist i Vedlegg 2.1.

Siden innstrømning av nytt dypvann skjer fra nordvest, vil den angitte plassering av diffusorer sikre at hele fjorden deltar i dypvannsutskiftningen.

Fagrådet besluttet i samråd med NIVA at en plassering nær Svartskog skulle velges som grunnlag for et forprosjekt for et flytende pumpeanlegg med en total kapasitet på inntil 12 m³/s fordelt på hele året. Pumpeanlegget skulle baseres på en trinnvis utbygging fra en til tre pumper.

Basert på en vurdering av detaljerte sjøkart, bunnforhold, nærliggende kraftlinjer, adkomstmulighet og tilgjengelig kommunal tomt, anbefales pumpeanlegget plassert like syd for Bekkenstein som vist på vedlegg 2.2 og 2.3. Denne plassering vil være optimal i forhold til alle de angitte vurderingsfaktorer.

Området syd for Bekkenstein ligger i Oppegård kommune, men er eid av Oslo kommune og har g.nr. 32 og b.nr. 2. Området er i kommuneplanen angitt som et LNF område og er benyttet til friluftsområde og avmerket på kart og med skilt som offentlig badeplass. Eksisterende adkomstvei er kommunal. Trafokiosk for pumpeanlegget foreslås plassert like øst for adkomstveien som angitt på vedlegg 2.3. Nærmeste kraftlinje (10kV) ligger ca. 250 m i luftlinje nordøst for aktuell plassering av trafokiosk. Avstanden fra trafokiosk til sjøen er ca. 60 m. Kraftlinjen har i dag kapasitet til å ta ut ca. 900 kW, dvs at inntil 2 pumpestasjoner kan kjøres samtidig. Linjen må oppgraderes dersom det besluttes å montere 3 pumpestasjoner. Kraftlinjene i området er under oppgradering, men energileverandøren (Østnett) vet ikke når disse arbeidene vil bli slutført.

Vedlegg 2.3 viser forslag til plassering av inntil 3 pumpestasjoner. Plasseringen er basert på et utslippsdyp på 140 m og en beregnet minste avstand mellom diffusorene på 200 m. Den trinnvise utbyggingen er markert med 1,2 og 3, dvs at pumpene plasseres i den angitte nummerrekkefølge. Det fremgår av de angitte dybdeangivelser på vedlegg 2.3 at de dypeste partiene i Bunnefjorden ligger i dette området. Det fremgår også at sjøbunnen er relativt flat hele veien vestover til Nesodlandet (ca 700m) og sydover (ca 1400m) til like syd for Svartskog

brygge. Syd for Svartskog brygge blir den dype sjøbunnen smalere (ca. 100 m) og dybden blir gradvis mindre frem til den innerste delen av fjorden. Like nord for den valgte plassering ligger det en rygg nesten midt i fjorden som strekker seg fra Bekkenstein til Kirkevikbanken som hever seg 20 – 25 m over den flate sjøbunnen på 150 m. Denne ryggen medfører at det går to dyprenner, en langs vestsiden og en langs østsiden av fjorden. I den østre renna varierer dybden fra 100 m i nord til 150m i syd og den strekker seg helt fra Nordstrand og sydovertil Bekkenstein. Hvilken betydning denne ryggen vil få for utskiftingen av dypvannet ved nedpumping av overflatevann ved Bekkenstein er uviss, men utfra en overordnet betraktning av utskiftningsmekanismen vil denne ryggen sannsynligvis ikke medføre noe problem. Dette gjelder spesielt dersom det senere også etableres et pumpeanlegg ved utløpet av Gjersjøelva. Dette pumpeanlegget vil bli liggende omtrent i den midtre del av den østre dyprenna (se vedlegg 2.1).

På sjøkartet er det angitt at det ligger en telekabel (fiberkabel) ca. 450-500 m fra land langs den østre del av Bunnefjorden. Det har ikke vært mulig å få informasjon om den nøyaktige plassering av denne kablen. Kablen ligger antagelig nedspylt. Det må derfor gjennomføres en ROV-undersøkelse med metalldetektor og TV for nøyaktig lokalisering av kablen og en detaljert kartlegging av bunnforholdene rundt de foreslåtte plasseringene før eventuell detaljprosjektering starter.

Likeledes må endelig plassering diskuteres med aktuelle fiskerorganisasjoner og kystdirektoratet og eventuelle krav til legging av el.kabler klarlegges. I forprosjektet er det forutsatt at el.kabler legges i rør fra trafokiosk og ca.20 m ut fra land og deretter legges på sjøbunnen frem til pumpestasjonen. Eventuelt krav om nedspyling av el.kabler vil føre til betydelige merkostnader for legging av kabler.

3 DIMENSJONERINGSGRUNNLAG FOR NEDPUMPING

Etter oppdrag fra Fagrådet har NIVA gjennomført en teoretisk beregning av effekter ved nedpumping av overflatevann til Bunnefjordens dypvann ved hjelp av en numerisk, hydrodynamisk simuleringsmodell. Konklusjonen av beregningene og supplerende vurderinger er at den beste løsningen er å slippe ut overflatevann nær bunnen på det dypeste stedet i fjorden med en kontinuerlig vannføring på $12 \text{ m}^3/\text{s}$ fordelt på flere pumper over hele året og eventuelt to lokaliteter.

Som grunnlag for forprosjektet har COWI gjennomført en alternativ effektvurdering av nedpumpingen, som bygger på en overordnet resipienthydraulisk analyse (altså ikke en numerisk hydrodynamisk modell). Fordelen ved denne metoden er at den gir et konkret dimensjoneringsgrunnlag for nødvendige pumper og diffusorer, samtidig som effekten av de foreslåtte tiltak umiddelbart klarlegges. Denne vurderingen er i sin helhet vedlagt denne rapporten som vedlegg 1 og kun de viktigste beregninger og konklusjoner er tatt med i den etterfølgende beskrivelse av dimensjoneringsgrunnlag for nedpumping og utforming av nedføringsrør og diffusor.

Bunnefjordens naturlige bunnvannsfornyelse forekommer med langvarige intervaller, slik at det ofte oppstår anoksiske forhold i de dypere lag av fjorden. Ved kunstig å øke diffusjonsprosessen i bunnvannet til samme verdi som i den tilstøtende Vestfjorden, får man den optimalt oppnåelige bunnvannsfornyelse i Bunnefjorden. COWI's beregninger viser at dette krever en nedpumping av overflatevann på ca. $9 \text{ m}^3/\text{s}$ i ca. 9 måneder av året til de dypeste partier i fjorden. Nedpumpingen bør gjennomføres i den delen av året hvor der er en markant tetthetsforskjell mellom topp og bunn ($\Delta \sigma > 5 \text{ kg/m}^3$ iht vedlegg 3.2), dvs. i perioden mars tom november. En økning av den nedpumpede vannmengde ut over disse $9 \text{ m}^3/\text{s}$ i denne perioden, vil ikke gi noen markant større effekt på Bunnefjordens bunnvannsfornyelse.

Det foreslås derfor, at man velger den hydraulisk optimale løsning med

ett pumpeanlegg plassert ved Bekkenstein (Svartskrog) basert på bruk av to pumper på tilsammen ca $9 \text{ m}^3/\text{s}$, som pumper overflatevann ned til ca 140 meters dybde i de 9 månedene, hvor tetthetsforskjellen mellom topp og bunn er større enn delta $\sigma = \text{ca } 5 \text{ kg/m}^3$ (mars t.o.m november). Alternativt pumpes $6,8 \text{ m}^3/\text{s}$ gjennom hele året.

Et annet krav som må oppfylles, er at den nedpumpede vannmengden fordeles jevnt i bunnvannet. Dette kravet må oppfylles gjennom en optimal dimensjonering av diffusor.

Det nedpumpede vannet vil på grunn av den lavere tetthet søke tilbake mot overflaten. Under denne oppstigningen skjer det en horisontal tilførsel av det omkringliggende vann til den oppstigende vannstrålen. Denne prosessen kalles medrivning/entrainment. Ved å la det nedpumpede vann komme ut i relativt tynne stråler kan man oppnå en betydelig medrivning, som er i stand til å øke den resulterende mengde sirkulerende vann med f.eks. en faktor på 100 til over 1000. I takt med at vannmiksingene i strålen økes minskes tetthetsforskjellen mellom det oppstigende vann og omgivelsene. Når tetthetsforskjellen forsvinner, vil det oppstigende vann innlagre seg horisontalt på det nivå som har den samme tetthet som det oppstigende vann. Det nedpumpede sterkt fortynnede vann vil derfor søke vekk fra pumpestedet i takt med at det medrevne vann søker inn mot pumpestedet. Denne sirkulasjonen, som er vist i vedlegg 4, betegnes baroklin sirkulasjon, fordi den er betinget av den horisontale tetthetsdifferanse. Betingelsen for at hele Bunnefjordens bunnvann deltar i bunnvannsfornyelsen er derfor automatisk sikret gjennom den barokline sirkulasjon.

Imidlertid må det også være et krav at omrøringen av bunnvannet er så kraftig at det ikke går for lang tid før hele fjorden har tilnærmevis samme tetthet horisontalt. Det finnes ingen numerisk modell som er i stand til å bestemme hastigheten i denne barokline sirkulasjon. Man kan derfor

kun gjennomføre noen størrelsesmessige vurderinger som sannsynliggjør at utskiftingen av fjordens bunnvann er effektiv nok.

Den første betingelse for at det er en tilstrekkelig omrøring, er at den mengde vann som settes i sirkulasjon er så stor at den er i stand til å fornye hele bunnvolumet på relativ kort tid. Det er i dette tilfelle fastsatt at diffusoren skal gi en medrivning svarende til at det teoretisk sett skal skje ca. 37 totale omrøringer av bunnvannet i løpet av ett år.

Den andre betingelsen som må oppfylles, er at de hastigheter, som medrivningen av vannstrålen gir anledning til, er så store at de er i stand til å føre vannet til og fra så hurtig at det kan nå ut til de ytterste punkter på den fastsatte tid (ca. 2 uker). Som nevnt tidligere finnes det ingen modell som kan beregne hastigheten i den barokline sirkulasjon. Imidlertid viser erfaringer fra målinger i naturen, at hastigheten i naturlig forekomne barokline sirkulasjoner ofte er i størrelsesorden fra 1 til 10 cm/s. Da avstanden fra pumpestedet til det fjerneste punkt i Bunnefjorden er ca 10 km, vil det altså ta i størrelsesorden en uke til en måned for det oppblandede vann å komme frem og tilbake til det fjerneste punkt. Dette vil være ensbetydende med at bunnvannet vil bli totalt oppblandet fra 10 til 50 ganger på et år, altså i god overensstemmelse med ovennevnte estimat.

Man kan derfor med rimelig sikkerhet konkludere med at den nødvendige omrøring av Bunnefjordens bunnvann i forbindelse med nedpumping av overflatevann er sikret, såfremt diffusorarrangementet dimensioneres slik at det skapes en medrivning til den oppadrettede vannstrålen på ca. $40 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ på et år.

4 DIMENSJONERING AV NEDFØRINGSRØR OG DIFFUSOR

I henhold til ovenstående vurderinger foreslås det at det monteres to pumpestasjoner ved Bekkenstein, hver med en kapasitet på $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$, og at hver av pumpene utformes med et diffusor- arrangement på 140 meters dyp. Dette vil medføre en medrivning av det omkringliggende bunnvann på i størrelsesordenen $40 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ på et år. Den oppadstigende vannsøylen vil innlagres på ca. 50 meters dybde.

Pumper

Ulike pumpetyper er blitt vurdert og flere pumpeleverandører er blitt kontaktet. Basert på kapasitet, pumpens utforming og pumpeleverandørens referanser til pumping av sjøvann ble det besluttet å basere forprosjektet på bruk av neddykkede propellpumper. Det finnes i alt tre leverandører i Norge av denne pumpetypen. Som grunnlag for forprosjektet, valgte man å basere seg på en propellpumpe av typen VUP-1201M 3500/4-82 fra ABS Pumper. Pumpen har en maks. kapasitet på $5 \text{ m}^3/\text{s}$ mot 5 m VS med en motoreffekt på 350 kW. Ved bruk av frekvensomformer kan kapasiteten varieres i området 3 – $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Se vedlegg 6.2-5 for detaljer vedrørende pumpen. Det er forutsatt at det innhentes pris på denne pumpetypen fra flere pumpeleverandører ved detaljprosjektering.

Nedføringsrør

Fra pumpen ledes vannet gjennom et $\text{Ø}1400\text{mm}$ loddrett rør av plast (PE 80) med trykkklasse PN6. Rørets totale lengde er ca. 134m. På enden av røret, ca. 10m over sjøbunnen, monteres det en diffusor. Øverst på røret, monteres det en flyteseksjon som sikrer en oppadrettet kraft som holder røret på plass i en vertikal stilling. Utformingen er vist i vedlegg 5.2 .

Diffusor

Diffusoren er en forlengelse av nedføringsrøret, men utformet som et $\text{Ø}1600$ GUP-rør hvor vannføringen fordeles jevnt langs omkretsen via 6 stk $\text{Ø}500$ mm horisontalt rettede diffusorrør, se vedlegg 5.2. På denne måten unngår man bruken av diffusor med lange horisontale fordelingsledningene. Ved å unngå de horisontale fordelingsledningene, som var foreslått i det opprinnelige forslag fra NIVA, unngår man dels problemet med at diffusoren ville få ulike trykkforhold på grunn av trykktap i ledningen og dels unngår man de kompliserte tekniske problemer med installasjon og forankring av horisontale rør. Den foreslåtte utformingen vil få liten innvirkning på fiske og oppankring av båter i området rundt diffusoren.

Betingelsen for at man kan benytte denne diffusortypen er at:

- 1 - De etablerte diffusorstrålene ikke interfererer. Dette krever stor diffusordiameter.
- 2 - De etablerte strålene skal ha en passende stor medrivning for å sikre hurtig omrøring av fjordens bunnvann. Dette krever små diffusordiameter.

Dette forhold er belyst nærmere i det nedenstående.

En innledende beregning viser at 6 diffusorrør på 140 meters dyp med en diffusordiameter på 0.5 m tilfredsstiller begge krav. Dette betinger at pumpeanlegget baseres på montering av 2 pumper hver med en kapasitet på ca $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ og en trykkehøyde på ca. 4,3 meter. Følgende størrelser er valgt:

Vannføring per pumpe :	$4.5 \text{ m}^3/\text{s}$
Antall diffusorutløp :	6 stk
Vannføring per diffusorutløp:	$0.75 \text{ m}^3/\text{s}$
Diameter diffusorutløp :	0.50 m
Diameter nedføringsrør :	1400 mm (ytre) 1264mm (indre)

Lengde nedføringsrør :	134 m
Areal diffusorutløp :	0.196 m ²
Areal nedføringsrør :	1.254 m ²
Hastighet i diffusorutløp :	3.83 m/s
Hastighet i nedføringsrør :	3.59 m/s

Energitap

Det totale energitap fra inntaket i pumpestasjonen til utløpet i diffusorrør er beregnet til 4.97m ved en maksimum pumpekapasitet på 5 m³/s. Energitapet versus pumpekapasitet er vist i vedlegg 6.1 for en maks. statisk høyde på 1,16 meter. Den statiske høyden vil variere over året på grunn av forskjellen i tetthet på overflatevannet og bunnvannet, se vedlegg 3.2.

Medrivningseffekt

Da tettheten av det nedpumpede vannet varierer med tiden vil de etablerte vannstrålene ha en tracé og oppblanding, som varierer med tiden. I nedenstående tabell er det angitt noen karakteristiske verdier for strålene. Disse er for oversiktens skyld vist grafisk i vedlegg 4 for en pumpekapasitet på 5 m³/s. Det påpekes at med den valgte dimensjon og plassering av diffusorutløp, vil de etablerte vannstrålene ikke påvirke hverandre (dvs at den beregnede medrivning ikke reduseres på grunn av interferering mellom strålene).

Per diffusor fås et densimetrisk Froude's tall F_{Δ} på

$$F_{\Delta} = V / (\Delta g r)^{1/2},$$

hvor Δ er tetthetsforskjell (lik $\sigma \cdot 10^{-3}$)
 g er tyngdeakselerasjonen = 9.81 m²/s
 og r er diffusorutløpets radius = 0.2 m.

Da Δ varierer over året, se vedlegg 3.2, er det beregnet forskjellige Δ -verdiers innflytelse på diffusorarrangementet :

σ [kg/m ³]	F_{Δ}	(Y/r)/ F_{Δ}	(Y/r)/S	S	(X/r)/ F_{Δ}	X [m]
3	78	5.8	2.4	190	6.8	106
6	55	8.2	2.4	190	7.2	79
9	45	10	2.4	190	7.6	68
12	39	12	2.4	190	8.0	62

Y= diffusordybden i forhold til innlagringsnivået = 90 m

S= fortyningen i innlagringsnivået (50 m dybde)

X = er den horisontale avstand fra diffusor utløp til strålens senter på innlagringsnivået

Bredden av strålen B (diameteren) i 50 meters dybde er bestemt av medrivningen :

$$B = 0.36 \cdot Y = 32\text{m} \quad (\text{gjelder for alle } \sigma \text{ - verdier})$$

Resultatet av beregningen for en pumpekapasitet på 5 m³/s og $\sigma = 9 \text{ kg/m}^3$ er vist i vedlegg 4.

For alle σ - verdier er den medrevne vannføring beregnet til 190 ganger diffusorvannføringen, som gir :

omrøringsvannføring = 1710 m³/s for to pumper tilsammen, eller

omrøringsvolum (9 måneders drift) = 40*10⁹ m³

Omrøringsvolumet tilsvarer altså 37 ganger bunnvannsvolumet, som tilsvarer en omrøring per uke i en 9 måneders driftsperiode.

5 UTFORMING AV PUMPESTASJON, NEDFØRINGSRØR, DIFFUSOR OG FORANKRING.

Det flytende pumpeanlegget er vist i detalj i vedlegg 5.1 og 5.2. Anlegget er satt sammen av en øvre del, selve pumpeasjonen, og en nedre del som omfatter nedføringsrøret, diffusor og en forankringsanordning. Anlegget består av følgende hovedelementer:

- 1 – **Pumpeasjonen (kalt Duppen)** med kontrollrom, pumpe, ballasttank, inntak med gitter, og to-delt pumperør (Ø1000mm) fra pumpekammeret og ned til selve nedføringsrøret (Ø1400mm). Hele pumpeasjonen er forutsatt bygd i GUP-materialer basert på standard tanker, rør og rørdeler. Inntaket vil bli bygd i GUP med rustfrie staver i inntaksristen for å hindre innsug av større gjenstander. Inntaket er spesielt utformet for å hindre kavitasjon og vibrasjoner i pumpen. Ved en pumpekapasitet på 3 og 5 m³/s vil vannhastigheten mellom stavene i inntaket være henholdsvis ca. 0,42 og 0,69 m/s. Pumpeasjonen kan heves og senkes ved å heve og senke vann-nivået i ballasttanken med trykkluft fra en luftkompressor montert i kontrollrommet. Pumpeasjonen festes til flyteseksjonen med en flenseforbindelse.
- 2 - **Flyteseksjon** er i sin helhet bygd i GUP og består av et Ø1400mm rør som er ført gjennom en Ø2400 GUP- tank. Flyteseksjonens oppdrift reguleres ved å heve og senke vann-nivået i tanken med trykkluft. Flyteseksjonens oppgave er å skaffe tilstrekkelig oppdrift for å holde nedføringsrøret på plass i en vertikal posisjon. Flyteseksjonen skal samtidig gi ekstra oppdrift til pumpeasjonen ved lav vannstand. Flyteseksjonen kobles til justeringsrøret med flenser.
- 3 – **Justeringsrøret** er et Ø1400 PE-rør. Lengden, 5-10m, tilpasses på stedet under montasjen avhengig av endelig innmålt avstand til moring. Røret flenses til hovedrøret.
- 4 - **Hovedrøret** er et Ø1400 PE-rør med lengde 105m. Røret sveises på fabrikk og slepes i hel lengde frem til monteringsstedet.
- 5 - **Diffusor** består av tre deler, et reduksjonsrør i GUP (Ø1600 til Ø1400), et vertikalt Ø1600-rør med 6 stk. Ø500 horisontale GUP-rør og en bunnplate i galvanisert stål med 6 stk. syrefaste staver. Stavene skal overføre strekk-kraften fra hovedrøret til forankringsanordningen på sjøbunnen.
- 6 - **Forankringsrøret** er 9,5m langt hvor den øverste delen består av et Ø1000 PE-rør og den nedre delen av en stålplate med et kort Ø 1000 stålrør. Delene er flenset sammen. Den øvre delen flenses til bunnen av diffusoren og den nedre delene festes til forankringskonen med låsepinner. Forankringsrøret danner en strekkfast forbindelse mellom diffusor og forankringskonen som er festet til moringen.
- 7 - **Forankringskonen** utføres av et stålrør med en konisk topp slik at forankringsrøret lett kan gli ned i konen og føre boltene som er festet i forankringskonens flens inn i hullene i forankringsplaten på forankringsrøret.
- 8 - **Moringen** er en betongkloss med areal på 3,6x3,6m og høyde på 2m og er dimensjonert for full oppdrift av pumpeasjon ved en høyvannstand på 2.20m (sjøkartnull) og 100 års frekvens. Den totale oppdrift som moringen skal dimensjoneres for er beregnet til 352 kN. Det er benyttet en sikkerhetsfaktor på 1,5. Pumpens dreiemoment overføres via nedføringsrøret til moringen.

6 STRØMTILFØRSEL

Forprosjektet er basert på at det kan etableres et pumpeanlegg med inntil 3 stk pumpestasjoner ved Bekkenstein i Bunnefjorden for pumping av overflatevann ned til ca 150 m. Hver pumpe skal ha en pumpekapasitet på 3 til 5 m³/s og krever en energitilførsel på 350 kW. Det er i første omgang beregnet å bygge anlegget for 1 stk pumpe med muligheter for senere utvidelse til totalt 3 stk pumper.

Eksisterende 10 kV høyspentlinje har kapasitet til uttak av inntil 900 kW, dvs 2 stk pumpestasjoner. Ved innstallasjon av 3 stk pumper må eksisterende høyspentlinje forsterkes. Fra eksisterende høyspentlinje føres det en ny 250 m lang kraftlinje frem til ny trafokiosk som plasseres ved adkomstvei ca. 60m fra sjøen som angitt på vedlegg 2.3. Ny høyspentlinje med tilhørende transformator, 10kV/690V, anbefales dimensjonert for 3 stk pumper, dvs uttak av inntil ca. 1100 kW.

Det elektrotekniske anlegget kan deles i 2 hoveddeler: 1 - Landanlegg og 2 – Sjøanlegg. Alle installasjoner skal tilfredsstille kravene iht FEL / NEK 400 og FEA- M samt gjeldende underliggende forskrifter for relevante anleggsdeler.

Landanlegg.

Landanlegget består av:

1 - en 10 kV overføringslinje fra eksisterende kraftlinje og frem til en ny trafokiosk

2 - en prefabrikkert trafokiosk (se vedlegg 10.1) av betongelementer, b x l = 4,2 x 6,3 m og h= 2,5m, plass-støpt betongfundament og med følgende utstyr:

- 1 stk 10kV "isolert kompaktanlegg", med effektbryteravgang til transformator m/måling,
- 1 stk 1600 kVA transformator 10kV/690V,
- 1 stk 690 V fordeling, med plass for utvidelse til totalt 3 stk pumper, bestykket med;
- 1 stk effektbryter til innmatningsfelt 1600A,
- 1 stk lastbrytersikringer og frekvensomformer med avgang 400kW,
- 1 stk fordelingstransformator 690/400V,
- 1 stk frekvensomformer ACS604 (AAB – Skien) med støysikring.
- 1 stk 400V mating
- 1 stk 400/230V fordeling til lys, stikk, varme og annet teknisk og
- 1 stk PLS
- 1 stk radiosender for overføring av signaler til sentral kontroll/overvåkingsstasjon.

Det settes av plass og forberedes for utvidelse til ytterligere 2 stk lastbrytersikringer og frekvensomformer avganger 400 kW i ovennevnte 690V fordeling.

Jording utføres som fundamentjord med 95 mm² Cu wire forlagt i røranlegg ned til sjøen hvor denne tilkobles til Cu plate montert i sjøen.

Nettleverandøren (Østnett) har vurdert omfanget av støy fra trafoanlegget med frekvensomformer og funnet dette akseptabelt når frekvensomformerne utføres med støysikring i henhold til leverandørens egne spesifikasjoner. Endelige beregninger og spesifikasjoner skal leveres nettleverandøren for godkjenning under eventuell detaljprosjektering.

3 - innstøpte trekkør (5 stk Ø150mm rør) fra trafo til sjøkanten for føring av kraftkabler og signalkabler fra kiosken til sjøen.

4 - kabelanlegg bestående av 3 separate kabler:

- 1 stk 3x185 mm² Cu stålmert sjøkabel for tilførsel til pumpe, min bøyradius 1,5 m.

1 stk 3x16 mm² Cu ståalarmert sjøkabel for tilførsel til lys og andre tekniske installasjoner, min bøyradius 1,5 m.

1 stk 4 fiber for styring / signalering fra tekniske installasjoner på sjøanlegg, fiberkabel kan med fordel spinnes inn sammen med 16 mm² kabel for lys og teknisk installasjoner.

Sjøanlegg.

Sjøanlegget består av:

1 - 5 stk trekkør montert på sjøbunnen fra land og 20 meter ut

2 – kabelanlegget bestående av 3 separate kabler :

1 stk 3x185 mm² Cu ståalarmert sjøkabel for tilførsel til pumpe

1 stk 3x16 mm² Cu ståalarmert sjøkabel for tilførsel til lys og andre tekniske installasjoner

1 stk 4 fiber for styring / signaler fra tekniske installasjoner på pumpestasjonen

Fra trekkerør på land føres sjøkabelene i egne kabelvernør fra landtak og 20 m ut i sjøen. Videre legges kabelene på sjøbunnen ut til pumpeanleggets moring. Fra 150 m dyp og opp til pumpestasjonen føres kabel langs hovedrøret opp til flyteseksjonen hvor de forankres før de føres videre til pumpestasjonen.

Det er for kraftkabelens dimensjonering to forhold som må vurderes. Dette er maksimal lengde for frekvensstyring og mekaniske belastninger i forbindelse med innfesting og leggemåte på sjøbunnen. Alle kabler er beregnet med 750m lengde. Utgangspunkt for dette er at pumpestasjonen skal ligge ca 400 m fra land og transformator kiosken plasseres 60 m fra sjøen. Videre føres kablene ned til 150 m dyp og opp til pumpestasjonen ved havoverflaten.

Kabelens lengde til pumpestasjonen er innenfor det krav som er satt av leverandøren av frekvensomformereren. For å sikre mot skade fra mekaniske belastning må det benyttes sjøkabler med ståalarmering og kabelen må ligge på sjøbunnen i hele sin lengde uten for lange fri spenn. Minimum bøyradius er 1,5m.

3 - festeanordning på flyteseksjon for feste av kabler til nedre og øvre del av flyteseksjonen for å holde kablene langs hovedrøret. Se vedlegg 10.3. Kabelfestet må dimensjoneres for vekten av 135m kabel i sjøvann med en sikkerhetsfaktor på 1,5.

4 – kabelgjennomføringsenhet til pumpestasjon som skal sikre tett innføring av kabler til pumpestasjonen. Se vedlegg 10.2. Innføring av kablene foretas gjennom skråstilte trykkvannrette skottgjennomføringer i siden på pumpestasjonen og over vannflaten. Kabelene festes utvendig på pumpestasjonen før gjennomføringen slik at vekten av kablene ikke belaster gjennomføringsenheten. Pumpestasjonen er via nedføringsrøret forankret i moringen på sjøbunnen slik at kablene ikke blir utsatt for vertikale bevegelser pga vannstandsvariasjoner og bølger.

5 – koblingsskap i pumpestasjon for tilkobling og fordeling av strøm til pumpe, signalanlegg, lys, lanterne, varme og en liten kompressor. Det blir i samme fordeling etablert PLS for oppsamling av kritiske data fra pumpens følere som sendes via fiberkabel til landstasjon for styring av pumpe og varsling av eventuelt driftsstans. Fra landstasjonen sendes signalene via radio/mobiltelefon til en sentralt driftssentral.

Frakobling av pumpestasjon.

Frakobling av pumpestasjon for ilandføring av denne på vinterstid og ved vedlikehold kompliserer kabelinstallasjonen da kabelendene blir liggende under vann på ca 10 m dyp i frakoblingsperioden. For å sikre at kablene er tette i enden må kabelene sendes til Aberdeen for påføring av trykkvannrette konektorer. Dette er forenlig for kraftkabler men kan by på problemer for fiberkabelen som må utføres med en krympestrømpe på enden ved frakobling eller en tett boks med trykkvannrette kabelgjennomføringer.

7 MONTERING

Det er forutsatt at pumpeasjonen skal monteres på det valgte utslippssted ved sammensetting av fire hoveddeler som vist i vedlegg 7. Hoveddelene er fra bunnen og opp:

1 – Moring med forankringskon bygges på land og heises på plass fra en slepebåt med kraftig vinsj.

2 – Nedføringsrør med forankringsrør, diffusor og flyteseksjon settes sammen på land og skyves under sammensetningen ut på sjøen. Diffusorrørene og toppen av flyteseksjonen er midlertidig utstyrt med blindflenser. Hele rørarrangementet slepes til utslippsstedet og senkes ned ved sakte uttapping av luft via luftekran i blindflensen montert på toppen av flyteseksjonen. Blindflensene på diffusor tas av når diffusor er ca. 20m under vannflaten. Nedføringsrøret senkes kontrollert ned og kobles med forankringskonen. Låsepinnene som låser nedføringsrøret til moringen settes på plass ved bruk av ROV. Deretter fjernes blindflensen på toppen av flyteseksjonen og vannstanden i flyteseksjonen reguleres til beregnet nivå.

3 – Pumpeasjonen monteres på land og pumpe heises på plass etter at pumpeasjonen er sjøsatt. Pumpeasjonens nedsynkning i vann reguleres med å heve/senke vann-nivået i ballasttanken med trykkluft. Pumpeasjonen slepes til utslippsstedet og senkes ned for sammenkobling til nedføringsrøret. Denne operasjonen utføres av froskemenn. Etter sammenkobling justeres pumpeasjonens oppdrift med vann-nivået i ballasttanken.

4 – El. kabler trekkes fra sjøen gjennom trekkerør til trafokiosken og legges på sjøbunnen fra enden av trekkerørene og frem til pumpeasjonen. Kablene festes til flyteseksjonen med bruk av froskemenn og føres inn i pumpeasjonen via den trykkvannnette gjennomføringen over vannstanden. Når elkablene og fiberkabelen er festet i koblingskapet er pumpeasjonen klar for drift.

8 DRIFT

Det er i utgangspunktet forutsatt at pumpestasjonen kun skal være i drift i 9 måneder hvert år, dvs fra mars tom november, når tetthetsforskjellen mellom overflatevannet og bunnvannet er størst ($> 5 \text{ kg/m}^3$). Pumpen skal i denne tiden gå kontinuerlig. Pumpens kapasitet kan varieres mellom 3 til $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ved manuell innstilling av frekvensomformereren. Ved bruk av frekvensomformer unngår man høyt effektforbruk og startmoment ved oppstart av pumpen. Pumpens dreiemoment i driftssituasjonen er minimal i forhold til nedføringsrørets kapasitet og vil bli overført til moringen gjennom nedføringsrøret.

Ved oppstart av pumpen må eventuelt luft i toppen av selve pumpehuset fjernes ved manuelt eller automatisk å åpne ventilen på utluftingsrøret som er ført opp halvveis på veggen av pumpehuset, se vedlegg 5.2. Ved inspeksjon av pumpen og eventuell utløfting av pumpen for vedlikehold når pumpestasjonen er montert, må trykkutjevningsventilen åpnes før lokket til pumpehuset demonteres. Pga tetthetsforskjellen mellom overflatevannet og bunnvannet vil det statiske trykket mot lokket variere mellom ca. 0,5 til 1,3 m.

I vinterperioden fra desember til mars, når faren for tilising er størst, er det forutsatt at pumpestasjonen kobles fra nedføringsrøret og slepes inn til kai for lagring i sjøen eller på land. I denne perioden heises pumpen ut for overhaling. Det er finnes ingen data på istykkelse i Bunnefjorden og hvordan isen brytes opp i vårperioden. For å unngå skader på pumpestasjonen har man foreslått å demontere pumpestasjonen i den kaldeste vinterperioden inntil man har innhentet tilstrekkelig data vedrørende isforholdene. Alternativt kan en liten andel av vannmengden føres ut mot overflaten fra to dyser montert på hvert bend på pumperøret. Ved daglig drift av pumpen i korte perioder kan området rundt pumpestasjonen holdes isfritt. Bruk av et luftesystem kan også vurderes.

Under drift overvåkes temperaturen i motorens viklinger, eventuelt vann i oljekammeret, kortslutninger og andre driftsparametere etter behov som f.eks. vannets saltinnhold (ledningsevne) i overflatevann og bunnvann, oksygeninnhold i overflatevann og bunnvann og hydrogensulfid (H_2S) i bunnvannet. Signalene fra transmittere/følere føres til lokal PLS i pumpestasjonen og videre via fiberkabel til landstasjonens overvåkingssentral og via radio til en sentral driftsstasjon.

Ved frakobling av pumpestasjonen må alle kabler demonteres og senkes ned i vannet som vist på vedlegg 10.3. Kabelendene beskyttes av krympemuffer. Plasseringen av nedføringsrøret angis med merkebøye. Line for opptak av kabler festes til en egen bøye ca. 1m under merkebøyen. Merkebøyen er festet til denne bøyen med wire og skjærpinner slik at kun merkebøyen føres bort ved sterke belastninger fra isen.

Etter frakobling av kabler reguleres vann-nivået i ballasttanken slik at pumpestasjonen kan frakobles flyteseksjonen og heves opp for sleping til kai.

9 TRINNVIS UTBYGGING

Pumpeanlegget ved Bekkenstein er planlagt for utbygging av totalt 3 stk pumpestasjoner med store investeringer i selve pumpestasjonen og anlegg for fremføring av strøm. Nødvendig pumpekapasitet er fortsatt usikker og det bør derfor vurderes om det er ønskelig med prøvedrift av et pumpeanlegg med midlertidig pumpeinstallasjon og strømtilførsel for å skaffe mest mulig data vedrørende denne type pumpearrangement. Følgende trinnvise utbygging anbefales:

Fase 1 – montering av en pumpestasjon bestående av moring, diffusor, nedføringsrør og en midlertidig pumpearrangement basert på bruk av pumpe montert på en flåte. Dette systemet er vist i vedlegg 8. Det er forutsatt at pumpen drives av et dieselaggregat montert på flåten. Pumpen monteres i et GUP-rør med inntak som foreslått for permanent pumpestasjon. Det benyttes kun et pumperør ut som kobles med en glidekobling til nedføringsrøret. På flåten monteres det en 20 m³ dobbelvegget dieseltank. Dieselaggregatet er montert i en 20' fots støydempet container og leies sammen med dieseltanken for den aktuelle driftsperioden. Forbruket av diesel vil være ca. 2,6 m³ per dag ved en pumpekapasitet på 5 m³/s. Dieseltanken må fylles en gang per uke.

Ved å unngå å bruke kabler fra land kan man utsette investeringene til kraftfremføring på ca. 5 mill. kroner.

Når det er innhentet tilstrekkelig data fra prøveanlegget, etter f.eks. 3 måneders drift i sommerhalvåret (april, mai, juni) når tetthetsforskjellen er stor og økende, kan det vurderes om man vil gå videre med å bygge en permanent pumpestasjon.

Fase 2 – det monteres en permanent pumpestasjon med el.kabler fra en permanent trafokiosk på land. Det gjennomføres en prøvedrift over 3 år med variasjon av pumpekapasiteten for å vurdere omrøringskapasitet og driftstid for pumpe. Innsamlede data analyseres og behovet for montering av pumpestasjon nr. 2 og 3 vurderes.

Fase 3 – eventuell montering av pumpe nr.2 og 3 basert på erfaringene fra fase 2.

10 MILJØ OG SIKKERHET

Følgende miljømessige forhold er vurdert:

Støy

Pumpene er nedsenket i vann og vil derfor ikke gi støy direkte til luft. Kontrollrommet over pumperøret er isolert og vil dempe eventuell støy fra toppen av pumperøret. Det vil ikke være sjenerende støy fra trafokiosken på land. Det forventes ikke at pumpestasjonen skal gi sjenerende støy til nærliggende bebyggelse.

Estetisk sjenanse

Trafokiosken vil bli plassert på østsiden av adkomstveien og inn mot en fjellskråning. Denne vil derfor ikke være til sjenanse for folk som benytter området mellom adkomstveien og sjøen til bading om sommeren. Området er lite benyttet om våren og høsten.

El. kablene vil bli ført i trekkør fra trafo til ca. 20m ut fra land. På land vil trekkørne legges på bakken (hovedsaklig fjell med ca. 10 – 20cm jord) og støpes inn av sikkerhetsmessige grunner til ca. 2m ut i vannet. Over innstøpingen legges 15cm jord som tilsåes frem til ca. 2m fra vannkanten.

Den synlige delen av pumpestasjonen vil stikke mellom 3 til 3,8m over havflaten avhengig av tidevannsnivået. Selv om pumpestasjonen blir liggende ca. 400m fra land vil den bli lett synlig fra Bekkensten, men ikke så markant fra Nesoddsiden av fjorden.

Sikkerhet

Pumpestasjonen skal iht kystverkets krav og av sikkerhetsmessige grunner males med en signalgul farge for å være lett synlig for fritidsbåtene. På toppen av pumpestasjonen skal det monteres et hvit lys for belysning av pumpestasjonen og et gult, blinkene markeringslys (0,3 sek. lysblink og 2,7 sek. mørk periode).

Ilandføringstedet for kabler skal merkes med godkjent skilt med "ankring forbudt – kabelanlegg". Av sikkerhetsmessige grunner er el.kablene ført i trekkør fra trafo og til 20m ut fra land. På land og 2m ut i vannet er trekkørne støpt inn med en overdekking på 10cm armert betong.

Av sikkerhetsmessige grunner er det valgt å ikke montere leder på siden av pumpestasjonen. Dette vil hindre uvedkommende å klatre opp på pumpestasjonen fra fritidsbåter. Det er forutsatt at vedlikeholdsmannskapet ved besøk av pumpestasjonen skal ha med seg en spesiallaget geider for å klatre opp på toppen av stasjonen. Rundt toppen av pumpestasjonen monteres det rekkverk i sjøvannsbestandig aluminium for å tilfredsstille sikkerheten for vedlikeholdsmannskapet som skal ned i pumpestasjonen.

Det er montert riststaver på pumpeinntaket med en fri åpning på 14 cm. Ved maks. pumpekapasitet på 5 m³/s vil vannhastigheten gjennom riståpningen være 0,69 m/s. Inntaket ligger ca. 4m under vannflaten. Dette gir økt sikkerhet for at badende ikke skal bli dradd inn i pumpen.

I henhold til kystverket og Oslo havnevesen skjer det ingen trafikk med dyptgående skip syd for "Storflua" i Bunnefjorden, kun trafikk av slepebåter med tømmerlektene til og fra tømmerlageret ved utløpet av Gjersjøelva. Det er kun fiskebåter og fritidsbåter med en seilingsdybde på inntil 5m som benyttes i det aktuelle området ved Bekkenstein. Av sikkerhetsmessige grunner er dybden til toppen av flyteseksjonen når pumpestasjonen er demontert, satt til ca. 10m.

Den kraftige oppdriften vil holde pumpestasjonen i en tilnærmet loddrett stilling med små avvik på grunn av vind og strøm. Det er ikke behov for wire/kjetting for å holde pumpestasjonen på plass. Dette medfører at pumpestasjonen er til liten fare for båttrafikken i området.

11 KOSTNADER

Grunnlaget for beregning av anleggs- og driftskostnader er vist i vedlegg 9.1 og 9.2. Kostnadene er dels basert på innhentelse av overslagspriser fra leverandører av pumper, GUP-rør/tanker og el.anlegg og dels på enhetspriser basert på erfaringstall for tilsvarende materialer/utstyr/arbeider. Driftskostnadene er basert på enhetspriser på nettleie og energi oppgitt av netteier og lokal energileverandør. Priser for driftskontroll, vinteropplag og vedlikehold er basert på estimerte timer, normale timepriser og prosentsatser.

11.1 Anleggskostnader

De totale anleggskostnadene er beregnet for et pumpeanlegg med en pumpestasjon og tilleggs-kostnaden for utvidelse med en pumpestasjon til totalt 2 pumpestasjoner. Dersom det monteres 3 pumpestasjoner vil prisen for den tredje pumpen være lik prisen for pumpe nr. 2.

Post nr.	Utstyr/arbeid	Første pumpe, kr.	Andre pumpe, kr.
1	Elektrisk anlegg	5 100 000	3 600 000
2	Pumpestasjon med pumpe, nedføringsrør, diffusor og forankringsanordning	5 100 000	5 100 000
3	Montering	900 000	800 000
	SUM	11 100 000	9 500 000

11.2 Driftskostnader

Driftskostnadene er beregnet for 9 måneders drift per år og med demontering og lagring av pumpestasjonen på land i vinterperioden.

Post nr.	Spesifikasjon	Første pumpe	Andre pumpe
1	Energi	1 213 000	1 213 000
2	Driftskontroll	52 000	23 000
3	Vinteropplag, demontering/montering	77 000	77 000
4	Vedlikehold av trafo og pumpestasjon	115 000	100 000
	SUM	1 457 000	1 413 000

11.3 Kostnader for prøvedrift

Dersom det blir aktuelt med en prøvedriftsperiode bør strømliveransen til pumpen baseres på bruk av leie av dieselaggregat og dieseltank. Benyttes en lagringstank på 20 m³ er det behov for oppfylling av tanken ca. 1 gang i uken. Prisen for diesel inkluderer levering av diesel direkte til lagringstanken på flåten fra tankbåt. Pumpen monteres under en flåte hvor lagringstank for diesel og dieselaggregat plasseres oppe på flåten som vist på vedlegg 8. Investeringen i pumpe, nedføringsrør med flyteseksjon, diffusor og forankringsenhet kan senere benyttes for en permanent pumpestasjon. Kostnadene til bygging av flåte, pumpehus med inntak og pumperør er investeringer som ikke direkte kan utnyttes i et permanent pumpeanlegg, men som kan benyttes til tilsvarende prøveanlegg andre steder i Bunnefjorden eller i andre fjorder dersom prøvedriften viser tilfredsstillende resultater.

De totale anleggskostnadene fremgår av nedenstående tabell.

Post nr.	Utstyr/arbeid	Kostnad, kr.
1	Flåte, inntak, pumpekum og pumperør	920 000
2	Pumpe	880 000
3	Nedføringsrør, flyteseksjon, diffusor og forankringsanordning	1 750 000
4	Montering av nedføringsrør etc.	400 000
	SUM	3 950 000

Av en investering på ca. 4 mill. kr. kan ca. 3 mill utnyttes til et eventuelt permanent anlegg. Tilsvarende investering i et permanent anlegg med strømforsyning fra land har en investeringskostnad på ca. 11,1 mill kr.

Nedenforstående kostnadoverslag over driftskostnader er basert på 3 måneders drift (90dager) og demontering av flåte med pumpestasjon etter bruk.

Post nr.	Utstyr/arbeid	Kostnad, kr.
1	Leie av dieselaggregat, 2 286,- kr/døgn	210 000
2	Leie av dieseltank, 543,- kr/døgn	50 000
3	Dieselforbruk, 2 592 l/døgn x 4,- per liter= 10 368,- kr/døgn	935 000
4	Driftsovervåking/kontroll	25 000
5	Montering/demontering av flåteenhet	70 000
6	Vedlikehold pumpe	30 000
	SUM	1 320 000

Den totale driftskostnaden for et prøveanlegg i 3 måneder tilsvarer omtrent 9 måneders drift med et permanent pumpeanlegg.

VEDLEGG 1

Internt notat. Dybvandsfornyelse i bunnefjorden.
Flemming Bo Pedersen, professor, dr.tech

DYBVANDSFORNYELSE I BUNNEFJORDEN, NORGE.

De i denne rapport anførte tal er alle baseret på foreløbige værdier taget fra NIVA rapporten. En detailldimensionering vil blive foretaget på baggrund af bekræftede, mere detaljerede oplysninger om fjordens karakteristika.

1. BAGGRUND.

Fjordgruppen i Fagrådet for vand- og afløbsteknisk samarbejde i indre Oslofjord har ønsket at øge sandsynligheden for bundvandsfornyelse og dermed bedre oxygenforholdene i Bunnefjorden. Dette kunstige åndedræt til Bunnefjorden kan skabes ved at pumpe lettere overfladevand ned til vandmasserne under tærskelniveau, således at tætheden af bundvandet mindskes.

Fagrådet har efter en indledende invitation til 5 forskellige firmaer valgt firmaet *Hjellnes Cowi* til at forestå den videre udredning af projektet. Undertegnede er tilknyttet Cowi til at yde bistand med de hydrauliske/oceanografiske forhold i projektet.

Fagrådet har indledningsvist benyttet NIVA til at udrede og beregne effekterne af den tænkte nedpumpning af lettere overfladevand til de dybere vandmasser i Bunnefjorden. De foreløbige beregninger har opereret med vandføringer på fra $8 \text{ m}^3/\text{s}$ til $12 \text{ m}^3/\text{s}$, fordelt på flere pumper og eventuelt to lokaliteter.

Nærværende rapport er en alternativ effektvurdering af nedpumpningen, som bygger på en overordnet recipienthydraulisk analyse (altså ikke en numerisk hydrodynamisk model). Fordelen ved den her anvendte metode er, at den samtidigt giver et konkret dimensioneringsgrundlag for de nødvendige pumper og diffusorer, hvor effekten af de foretagne tiltag umiddelbart forstås.

2. KONKLUSION.

Bunnefjordens naturlige bundvandsfornyelse forekommer med for langvarige intervaller, således at der ofte forekommer anoxiske forhold. Ved kunstigt at øge diffusionsprocessen i bundvandet til samme høje værdi som i den tilstødende Vestfjorden, får man den optimalt opnåelige bundvandsfornyelse i Bunnefjorden. Hertil kræves en nedpumpning til bunden af overfladevand på ca $9 \text{ m}^3/\text{s}$ i ca 9 måneder om året, nemlig i den del af året, hvor der er en markant densitetsforskel mellem top og bund. En øgning af den nedpumpe vandmængde ud over disse $9 \text{ m}^3/\text{s}$ i ca 9 måneder om året, vil ikke give nogen markant større effekt på Bunnefjordens bundvandsfornyelse. Det foreslås derfor, at man vælger den hydraulisk optimale løsning med

ét anlæg (Svartskrog) forsynet med to pumper på tilsammen ca $9 \text{ m}^3/\text{s}$, der pumper overfladevand ned til ca 140 meters dybde i de måneder (ca 9), hvor densitetsforskellen mellem top og bund er større end $\Delta \sigma = \text{ca } 5 \text{ kg/m}^3$.

3. DEN NUVÆRENDE BUNDEVANDSFORNYELSE.

Den inderste del af Oslofjorden består af det ca 200 meter dybe Drøbaksundet, som via Drøbaktærsklen i ca 20 meters dybde er forbundet med den ca 140 meter dybe Vestfjorden, som via Bunnefjordtærsklen i ca 50 meters dybde er forbundet med den inderste ca 160 meter dybe Bunnefjorden. På grund af tidevand og vindgenereret intern seiching, forekommer der interne bølger, der giver anledning til en diffusionsproces under tærskelniveau i alle fjordene, det vil sige en proces som med tiden gradvis reducerer tætheden af de dybtliggende vandmasser.

3.1 Vestfjorden.

Specielt den højtliggende Drøbaktærskel (20 m) betinger en høj produktion af turbulent kinetisk energi og interne bølger, som giver en meget effektiv nedblanding af højere beliggende let vand til lavere beliggende tungere vand i Vestfjorden, således at egenvægten af bundvandet i denne fjord hurtigt reduceres. På grund af denne tæthedsreduktion øges sandsynligheden for at tætheden uden for Drøbaktærsklen bliver højere end inden for Drøbaktærsklen og dermed, at der kan forekomme en tærskeloverskylning med en fornyelse (udskiftning) af bundvandet i Vestfjorden. Ud fra observationer af egenvægten i perioden 1990-98, se Figur 1 [Figur 6 i NIVA rapporten] kan man estimere diffusionen (raten i egenvægtsreduktionen) i Vestfjorden til i størrelsesordenen

$$D\sigma/Dt = 1.3 \text{ kg / m}^3 \text{ per 1 år (Vestfjorden).}$$

3.2 Bunnefjorden.

Den dybereliggende tærskel (50 meter i stedet for 20 meter) samt det mindre opland for tidevandet betinger, at diffusionsprocessen i Bunnefjorden er markant mindre end i Vestfjorden. Dette betyder, at efter at et tærskeloverskyl til Bunnefjorden har fundet sted, vil bundvandets øgede tæthed være meget lang tid om at blive reduceret til en værdi, som betinger en fornyet tærskeloverskylning. En størrelsesorden af diffusionsprocessens hastighed kan estimeres ud fra observationer af egenvægten i perioden 1990-99, se Figur 2 [Figur 5 i NIVA rapporten].

$$D\sigma/Dt = 0.13 \text{ kg / m}^3 \text{ per 1 år (Bunnefjorden),}$$

dvs en størrelsesorden mindre end den fortyndingseffekt, der forekommer i den tilstødende Vestfjorden.

4. DIMENSIONERINGSGRUNDLAG FOR NEDPUMPNING.

Ved kunstigt at øge Bunnefjordens nedblanding en faktor 10 vil Bunnefjorden og Vestfjorden opnå samme grad af fortynding i bundvandet og dermed vil en bundvandsfornyelse i Vestfjorden statistisk set også betyde en bundvandsfornyelse i Bunnefjorden. Opholdstiden for bundvandet i Bunnefjorden vil derfor blive væsentlig reduceret ligesom der tilføres yderligere oxygen fra overfladevandet, hvorfor iltforholdene i Bunnefjorden vil blive markant forbedret. Bunnefjordens bundvandsfornyelse er betinget af tæthedsforholdene i Vestfjorden, og derfor kan forholdene i Bunnefjorden ikke uden videre blive bedre end de naturlige forhold i Vestfjorden betinger, hvilket er forklaret nærmere nedenfor. Det har derfor ingen praktisk betydning at pumpe mere vand ned i Bunnefjordens dybvand end lige netop den mængde, som kunstigt øger diffusionsprocessen til den værdi, der forekommer i Vestfjorden, dvs $D\sigma / Dt = 1.3 \text{ kg} / \text{m}^3$ per 1 år.

4.1 Fornyelse af Bunnefjordens vandmasser.

Som skitseret på Figur 3 indeholder Bunnefjorden 3 forskellige vandmasser, betinget af de geometriske forhold, nemlig

1. niveau A fra 0 til 20 meters dybde
2. niveau B fra 20 til 50 meters dybde
3. niveau C fra 50 til ca 160 meters dybde

4.1.1 Niveau A : Vandmasserne i niveau A har fri udveksling med den centrale del af Oslofjorden og dermed Skagerrak. Tætheden σ er derfor bestemt af σ i overfladen i Oslofjorden (Skagerrak). Tætheden varierer kraftigt over året, som antydtes på Figur 4 [Figur 24 i NIVA rapporten]. Denne kobling til Oslofjorden/Skagerrak betinger, at en nedpumpning af vand til Bunnefjordens bundvand ingen betydning har for overfladevandets tæthedsforhold.

4.1.2 Niveau B : I intervallet mellem de to tærskler foregår der en fri udveksling (baroklin cirkulation) med Vestfjorden. Da nedblandingen i Vestfjorden er større end nedblandingen i Bunnefjorden, vil vandet i Vestfjordens niveau B være lettere (uhyre lidt) end i samme niveau i Bunnefjorden. Der vil derfor foregå en vedvarende baroklin cirkulation for at udjævne denne tæthedsforskel. Cirkulationen vil være indadgående fra 20 til 35 meters dybde og udadgående fra 35 til 50 meters dybde, se Figur 3.

4.1.3 Niveau C : I vandmassen under tærskelniveau (under 50 meter) vil der ikke være nogen horisontal udveksling med vandet i Vestfjorden. En nedpumpning af overfladevand til dette niveau vil derfor kun give anledning til en intern omrøring, som indikeret på figur 3. På grund af den lavere tæthed af det nedpumpe vand vil tætheden σ af bundvandet falde støt med tiden. I takt med nedpumpningen sker der et tilsvarende tærskeloverskyl til Vestfjorden.

Når tætheden af bundvandet på denne måde er faldet til tætheden af mellemvandet (niveau B) vil det opblandede bundvand ikke længere søge ned mod bunden af Bunnefjorden, men derimod deltage i den barokline cirkulation over Bunnefjordens tærskel til Vestfjorden. På dette tidspunkt vil en fortsat nedpumpning af overfladevand ikke komme Bunnefjorden til nytte, hvorfor nedpumpningen nu vil være formålsløs (med mindre man da også ønsker at give Vestfjorden kunstigt åndedræt).

4.2 Bundvandsfornyelse ved tærskeloverskyl.

I forbindelse med upwelling af bundvand i Oslofjorden vil der kunne forekomme tærskeloverskyl over Drøbaktærsklen. Betingelsen er, at det upwelledede vands tæthed er større end tætheden af bundvandet på tærskelniveau i Vestfjorden. Da sidstnævnte tæthed på grund af nedblanding falder gradvist med tiden, se Figur 1, vil sandsynligheden for tærskeloverskyl vokse med tiden. Såfremt nedblandingen i Bunnefjorden er bragt på samme værdi som i Vestfjorden, vil der være basis for en bundvandsfornyelse i Bunnefjorden hver gang der forekommer en bundvandsfornyelse i Vestfjorden. Fornyelsesfrekvensen i Bunnefjorden øges dermed fra den nuværende naturlige på 2 – 4 år til 1 – flere gange per år, ligesom i Vestfjorden.

4.3 Nødvendig pumpemængde til Bunnefjordens bundvand.

Den nødvendige mængde overfladevand, der skal nedpumpes, kan bestemmes ud fra en simpel kontinuitetsbetragtning, der bygger på, at Bunnefjordens tæthedsreduktion med tiden skal være lig med Vestfjordens naturlige tæthedsreduktion:

Volumenet VOL af bundvandet i Bunnefjorden under tærskelniveau, altså i intervallet fra 50 til 160 meters dybde, er oplyst at være

$$VOL = 1.1 \cdot 10^9 \text{ m}^3.$$

Dette volumen har en gennemsnitlig tæthed på ca 1026 kg/m^3 , svarende til

$$\sigma = 26 \text{ kg/m}^3.$$

For at reducere tætheden med en værdi på $D\sigma / Dt = 1.3 \text{ kg/m}^3$ per år (ligesom i Vestfjorden) nedblandes et volumen $X \cdot 10^9 \text{ m}^3$ på et år med en gennemsnitlig tæthed på $\sigma = 18 \text{ kg/m}^3$, hvilket ud fra Figur 4 er skønnet at være den gennemsnitlige årlige værdi af overfladevandets tæthed. Blandingsvolumenet $(X + 1.1) \cdot 10^9 \text{ m}^3$ vil dermed få den ønskede gennemsnitlige σ - værdi på $\sigma_x = 26 - 1.3$, når følgende betingelse er opfyldt

$$(1.1 \cdot 10^9) \cdot (26) + (X \cdot 10^9) \cdot (18) = (1.1 + X) \cdot 10^9 \cdot (26 - 1.3)$$

hvoraf man finder $X = 0.21$ eller at der skal nedpumpes $0.21 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ per år (ca 20% af bundvandsvolumenet) af overfladevand med en gennemsnitlig tæthed på $\sigma = 18 \text{ kg/m}^3$. I denne indledende beregning er det (på den sikre side) antaget, at den mængde vand, der skyller over tærsklen til Vestfjorden ($0.21 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ per år) har en tæthed på $\sigma_x = 26 - 1.3$.

Fordelt på et år, svarer dette volumen til en nødvendig nedpumpingsrate på

$$Q = 6.8 \text{ m}^3/\text{s} \text{ igennem hele året eller } Q = 9 \text{ m}^3/\text{s} \text{ igennem de 9 måneder om året, hvor tæthedeforskellen mellem top og bund er større end ca } \sigma = 5 \text{ kg/m}^3.$$

Et andet krav, der skal være opfyldt, er, at den nedblandede vandmængde skal fordeles ligeligt over bundvandet.

4.4 Nødvendig omrøring (blanding) af det nedpumpede overfladevand.

Det nedpumpede vand vil på grund af den lavere tæthed søge tilbage mod overfladen. Under denne opstigning sker der en horisontal tilførsel af det omgivende vand til den opstigende jet/plume, en proces, der kaldes medrivning/entrainment. Ved at lade det nedpumpede vand komme ud i relativt tynde stråler kan man opnå en betragtelig medrivning, der er i stand til at øge den resulterende mængde cirkulerende vand med f.eks. en faktor 100 til 1000 (eller mere). I takt med at vandføringen i strålen øges mindskes tæthedsforskellen mellem det opstigende vand og omgivelserne. Når tæthedsforskellen dermed til sidst forsvinder (idet den naturlige lagdeling betinger, at tætheden af bundvandet aftager mod overfladen), vil det opstigende vand indlejre sig horisontalt på det niveau, der har den samme tæthed som det opstigende vand. Det nedpumpede stærkt fortyndede vand vil derfor søge væk fra pumpestedet i takt med, at det medrevne vand søger ind mod pumpestedet. Denne cirkulation, som er vist på Figur 3, betegnes baroklin cirkulation, idet den er betinget af den horisontale tæthedsdifference. Betingelsen for at hele Bunnefjordens bundvand deltager i bundvandsfornyelsen er derfor helt automatisk sikret gennem den barokline cirkulation. Imidlertid må det også være et krav, at omrøringen af bundvandet er så kraftig, at der ikke går alt for lang tid før hele fjorden har tilnærmelsesvis samme tæthed horisontalt. Desværre findes der ingen model, der er i stand til at bestemme hastigheden i denne barokline cirkulation (altså heller ikke den af NIVA anvendte model), hvorfor man kun kan udføre nogle størrelsesorden betragtninger til at sandsynliggøre, at omrøringen af fjordens bundvand er effektiv nok.

Den første betingelse for at der er en tilstrækkelig omrøring er, at den mængde vand, der sættes i cirkulation er så stor, at den er i stand til at gennemløbe hele bundvoluminet på relativ kort tid. Begrebet "relativ kort tid" kan i praksis f.eks. være en uge til en måned. Da udgifterne til diffusorer ikke er afgørende betingede af valg af medrivning, er der i den aktuelle dimensionering (se nedenfor) valgt et arrangement,

der giver en medrivning svarende til at der teoretisk set skulle ske ca 37 totale omrøringer af bundvandet i løbet af et år.

Den anden betingelse, der skal være opfyldt, er, at de hastigheder, som medrivningen og indlejringen af strålen giver anledning til, er så store, at de er i stand til at føre vandet til og fra så hurtigt, at det kan nå ud i de yderste punkter på den afsatte tid (ca 2 uger). Desværre findes der ingen model, der kan give den barokline cirkulations hastighed. Imidlertid viser erfaringer fra målinger i naturen, at hastigheden i naturligt forekomne barokline cirkulationer ofte er i størrelsesordenen fra 1 til 10 cm/s. Da afstanden fra pumpestedet til det fjerneste punkt i Bunnefjorden er ca 10 km, vil det altså tage i størrelsesordenen en uge til en måned for det opblandede vand at komme frem og tilbage til det fjerneste punkt. Dette vil være ensbetydende med, at bundvandet vil blive totalt opblandet fra 10 til 50 gange på et år, altså i god overensstemmelse med ovennævnte estimat.

En anden betragtning kunne være følgende hypotetiske situation: Såfremt det opblandede vand ikke kunne forlade positionen omkring pumpen ville der meget hurtigt ske en ophobning af let vand lokalt, som ville skabe en trykfordeling som afveg markant fra omgivelserne, og som dermed helt automatisk ville give anledning til en cirkulation, som kunne udjævne denne trykforskel. Selv så lille en tæthedsforskel som 0.1 kg/m^3 (under 10 % af den beregnede årlige tæthedsvariation) ville give en trykdifference på de ca 100 meter dybde af bundvandet, som modsvarer 1 cm vandsøjle. Med den aktuelle tykkelse af det cirkulerende lag (100 m) ville denne trykforskel initiere en såkaldt lock-exchange hastighed på over 10 cm/s, se f.eks Bo Pedersen [side 27, 1986].

Man kan derfor med rimelig sikkerhed konkludere, at den nødvendige omrøring af Bunnefjordens bundvand i forbindelse med nedpumpning af overfladevand er sikret, såfremt diffusor arrangementet dimensioneres således, at der skabes en medrivning til jet/stålerne på ca $40 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ på et år, som valgt i det aktuelle design præsenteret nedenfor.

4.5 Oxygenforholdene i bundvandet efter nedpumpning af overfladevand.

Den naturlige nedbrydning af organiske stoffer i bundvandet giver i størrelsesordenen en ilt-sænkning på ca

$DO_2 / Dt = 2.5 \text{ ml/l per 1 år (Bunnefjorden)}$.

Der tilføres nu overfladevand med fuld iltmætning (ca 9 ml/l) i en mængde af $0.2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ vand på et år, dvs

$$(0.2 \cdot 10^9) \cdot (9) = (1.3 \cdot 10^9) \cdot DO_2 / Dt \text{ hvoraf } DO_2 / Dt = 1.4 \text{ ml/l}$$

idet det modtagne volumen er $1.1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.

Da oxygen indholdet i Bunnefjorden i perioden 1990 – 1999 typisk steg til 2.5 til 3.5 ml/l i forbindelse med bundvandsfornyelser, vil et ilttilskud på 1.4 ml/l per år betyde en reduktion af ilt-sænkningen fra 2.5 ml/l til ca 1 ml/l, hvorfor oxygen indholdet – alt andet lige – vil holde sig over 1.5 til 2.5 ml/l i fremtiden, når nedpumpningen er iværksat. Da overfladevandet i gennemsnit har en højere temperatur end bundvandet, vil der ske en opvarmning af bundvandet, og dermed en højere biologisk aktivitet. Dette vil kunne nedbringe oxygenindholdet. Der er på nuværende tidspunkt ingen detaljerede oplysninger om den årlige variation af saltindhold, temperatur samt iltindhold af overfladevandet.

5. DIMENSIONERING AF NEDFØRINGSRØR OG DIFFUSORER.

I henhold til ovenstående analyse foreslås det, at der udføres to pumpeanlæg med hver en kapacitet på $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ og at dette anlæg forsynes med et diffusor arrangement i 140 meters dybde, som medfører en medrivning af det omgivende bundvand på i størrelsesordenen $40 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ på et år inden det blandede vand indlejrer sig under 50 meters dybde.

5.1 Pumper og nedføringsrør.

Der er i HC rapporten foreslået anvendt ABS Submersible Propellor Pump. Med den ønskede vandføring falder valget på to pumper type VUP-H1201, der har en optimal virkningsgrad for et drifttryk på ca 6 m og en vandføring på 4 til $6 \text{ m}^3/\text{s}$

Der vælges et 1200 mm lodret rør på ca 135 meters længde, som lidt over bunden forsynes med en diffusorford, som fordeler vandføringen jævnt langs omkredsen på 6 styk 400 mm vandret rettede diffusorrør, altså ingen horisontale fordelerledninger. Ved at undgå de horisontale fordeler ledninger, som har været påtænkt i de oprindelige forslag undgår man dels problemet med at diffusorerne ville få uens trykforhold på grund af tryktab i ledningen, dels undgår man de komplicerede tekniske problemer med installation og forankring af vandrette rør. Betingelsen for, at man kan nøjes med det her foreslåede arrangement er, at de etablerede diffusorstråler ikke interfererer, altså at den beregnede medrivning opnås. Dette forhold er belyst nedenstående.

Da tætheden af det nedpumpede vand varierer med tiden vil de etablerede jets/plumes have en tracé og opblanding, som varierer med tiden. I nedenstående skema er angivet nogle karakteristiske værdier for strålerne. Disse er for overskuelighedens skyld afbildet i Figurerne 8 og 9 for tilfældet med to pumper på hver $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Det bemærkes, at med den valgte dimension og placering af diffusor rørene opnås det, at

strålerne ikke påvirker hinanden (dvs at den beregnede medrivning ikke reduceres på grund af interaktion mellem strålerne).

5.2 Diffusor arrangement.

For at undgå de vandrette fordelingsrør stilles der visse krav til diffusorerne:

1. De etablerede stråler må ikke interferere. Dette kræver stor diffusor diameter.
2. De etablerede stråler skal have en passende stor medrivning for at sikre hurtig omrøring af fjordens bundvand. Dette kræver lille diffusor diameter,

En indledende beregning viser, at 6 diffusorer i 140 meters dybde med en diffusor diameter på 0.4 m tilfredsstiller begge krav, såfremt anlægget opbygges af 2 pumper med hver en kapacitet på ca 4.5 m³/s og en trykhøjde på 5 af 6 meter. Dette eftervises her. Følgende størrelser er valgte:

Vandføring per pumpe :	4.5 m ³ /s
Antal diffusorer :	6 stk
Vandføring per diffusor:	0.75 m ³ /s
Diameter af diffusor :	0.40 m
Diameter af nedføringsrør :	1.2 m
Længde af nedføringsrør :	135 m
Areal af diffusor :	0.126 m ²
Areal af nedføringsrør :	1.13 m ²
Hastighed i diffusor :	6.0 m/s
Hastighed i nedføringsrør :	4.0 m/s
Hastighedshøjde i diffusor :	1.93 m
Hastighedshøjde i nedføringsrør :	0.86 m

ENERGITAB :

Energitalbet i nedføringsrøret er indledningsvist beregnet ud fra Manning formlen med et Manningtal på 90 m^{1/3}/s :

$$V=M R^{2/3} (\Delta H/L)^{1/2}$$

Med tal indsat findes et lednings energitab på $\Delta H= 1.3$ m.

Indløbs arrangementet antages indledningsvist at give et energitab på 1.5 gange hastighedshøjden i røret, altså et enkelttab på $\Delta H= 1.3$ m.

Diffusortabet andrager ca 1.5 gange hastighedshøjden i diffusoren, altså 2.9 m.

Det samlede energitab i nedføringsrør og diffusorer bliver derfor i størrelsesordenen :

Energिताb = 1.3 + 1.3 + 2.9 = 5.5 m, i overensstemmelse med pumpens karakteristikk.

Per diffusor fås et densimetrisk Froude's tal F_{Δ} på

$$F_{\Delta} = V / (\Delta g r)^{1/2},$$

hvor Δ er tæthedsdeficit (lig med $\sigma^* 10^{-3}$)
 g er tyngdeaccelerationen = 9.81 m²/s
og r er diffusorens radius = 0.2 m.

Da Δ varierer over året, se Figur 4, undersøges forskellige Δ -værdiers indflydelse på diffusorarrangementet :

σ [kg/m ³]	F_{Δ}	(Y/r)/ F_{Δ}	(Y/r)/S	S	(X/r)/ F_{Δ}	X [m]
3	78	5.8	2.4	190	6.8	106
6	55	8.2	2.4	190	7.2	79
9	45	10	2.4	190	7.6	68
12	39	12	2.4	190	8.0	62

Her betyder

Y diffusordybden i forhold til indlejringsniveauet = 90 m

S fortyndingen i indlejringsniveauet (50 m dybde)

X er den horisontale afstand fra diffusor udløb til strålens center på indlejringsniveauet

(S og X som funktion af Y,R og F_{Δ} kan findes i Bo Pedersen, 1986, og er her gengivet som Figurene 5 og 6).

For alle σ - værdier findes den medrevne vandføring til 190 gange diffusorvandføringen, altså ialt

omrøringsvandføring = 1710 m³/s for de to pumper tilsammen, eller

omrøringsvolumen (9 måneders drift) = 40*10⁹ m³

Omrøringsvolumenet svarer altså til 37 gange bundvandsvolumenet, hvilket modsvarer en omrøring per uge i de 9 måneders driftperiode.

Flemming Bo Pedersen
Professor, dr. tech.
Ulrikkenborg Allé 37,3
DK2800 LYNGBY

Bredden af strålen B (diameteren) i 50 meters dybde er bestemt af medrivningen :

$$B = 0.36 * Y = 32\text{m}$$

gældende for alle σ - værdier.

På vedlagte 3 figurer af diffusorarrangementet er vist

Figur 7 : Diffusorfod med udløbsrør og strømkors til dæmpning af hvirveldannelse. I den detaljerede projektering af diffusor foden er det vigtigt at overgangen fra 1200 mm nedføringsrøret til de 6 diffusor rør bliver så strømlinjet som muligt, altså at der etableres ledekegler i 1200 mm røret.

Figur 8 : Centerlinie tracé af strålerne for forskellige σ - værdier, samt strålebreddens variation med dybden for et eksempel med $\sigma = 9$ (breddevariationen er den samme for alle σ - værdier).

Figur 9 : Strålernes horisontale udbredning for eksemplet med $\sigma = 9$. Da dette eksempel er repræsentant for den mest kritiske situation med hensyn til interaktion af strålerne, viser figuren, at der ikke er nogen fare for, at strålerne sammenblandes.

6. LITTERATUR :

Bo Pedersen, Flemming, 1986: Environmental Hydraulics: Stratified Flows, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, 18, Springer Verlag.

NIVA rapport , 2000 : Forbedring af dypvannsfornyelsen i Bunnefjorden.
Opdragsgiver: Fagrådet for vann og avløpsteknisk samarbeid i indre Oslofjord.
NIVA : Norsk Institutt for vannforskning.