

Strømforhold, fødetilgang og algetoksiner i et blåskjellanlegg

*Currents, food supply and algae toxins
in a blue mussel farm*

av

Jan Aure, Tore Strohmeier, *Arne Duinker,
Tonje Castberg og Asbjørn Svardal

* Fiskeridirektoratets ernæringsinstitutt

Havforskningsinstituttet

Desember 2002

INNHOLDSFORTEGNELSE

SAMMENDRAG	3
<i>SUMMARY</i>	
1. OMRÅDEBESKRIVELSE.....	5
1.1 Strømålinger.....	6
1.2 Fluorescens, turbiditet,tempertur,saltholdighet og planteplankton.....	6
1.3 Fylningsgrad og algetoksiner.....	8
2. OBSERVASJONER.....	9
2.1 Strøm og vanntransport.....	9
2.2 Fluorescense/klorofyll og planteplankton.....	12
2.3 Fylningsgrad og algetoksiner.....	16
2.4 Fødetilgang og biomasse i anlegget.....	19
3 BEREGNING AV STRØM, FØDETILGANG OG BÆREEVNE.....	24
3.1 Beregning av strøm i et skjellanlegg.....	24
3.2 Beregning av fødetilgang og bæreevne.....	26
4.REFERANSER.....	32

SAMMENDRAG

Blåskjell lever av å filtrere planktonalger og andre små organiske partikler som finnes i sjøvannet. Under naturlige forhold påvirker vanligvis ikke skjellene tettheten av alger i sjøvannet og de naturlige planktonkonsentrasjoner og strømforholdene bestemmer fødetilgangen. I et blåskjellanlegg hvor det er en stor biomasse skjell konsentrert på et lite område vil fødetilgangen også være bestemt av anleggets form, plassering i forhold til framherskende strømretning, tettheten av skjell i anlegget og andre nærliggende skjellanlegg. Det har overaskende nok vært få undersøkelser både i Norge og utlandet for å studere fødetilgangen til blåskjellanlegg og hvor stor biomasse skjell et gitt anlegg kan ha uten at det f eks går utover skjellkvaliteten, dvs matinnholdet i skjellene. Tilførselene av alger har også trolig stor betydning for hvor fort skjellene kvitter seg med algetoksiner i perioder med ikke - giftige alger i fjorden.

I mange tradisjonelle norske skjellanlegg er det ofte dårlig vekst og sterkt varierende matinnhold i skjellene i perioden før høsting. Det kan også ta lang tid før skjellene blir giftfrie i perioder med ikke - giftige alger i sjøvannet. I denne undersøkelsen har vi derfor satt fokus på å øke forståelsen av fysiske og biologiske faktorer som bestemmer fødetilgang, produksjon og algetoksiner i et blåskjellanlegg.

I august 2002 ble forholdene i og rundt et blåskjellanlegg nær utløpet av Lysefjorden i Rogaland undersøkt mhp strøm, fluorescense/klorofyll, turbiditet, planteplankton, algetoksiner i skjellene og skjellkvalitet (matinnhold i skjellene). Det undersøkte anlegget var ca 250 meter langt og 15 meter bredt og samlokalisert med tre andre tilsvarende blåskjellenheter (figur 1). Det var 10 bæreliner parallelt med lengdeaksen av anlegget og avstanden mellom hver bæreline var ca 1,5 meter. På bærelinene var det festet blåskjellsamlere (svenskeband) med ca 50 cm avstand. Strømforholdene i området var dominert av inn - og utgående tidevannstrøm. Strømforholdene i anlegget var også påvirket av skjellanlegget oppstrøms ved utgående tidevannsstrøm (figur 1). Skjellene i anlegget var litt over 2 år gamle (utsatt våren 2000) og biomassen skjell våren 2002 var antatt å være ca 65 tonn og i august 2002 ca 70 tonn, med størst biomasse i den sørvestre delen av anlegget.

Resultatene fra undersøkelsen kan sammenfattes som følger:

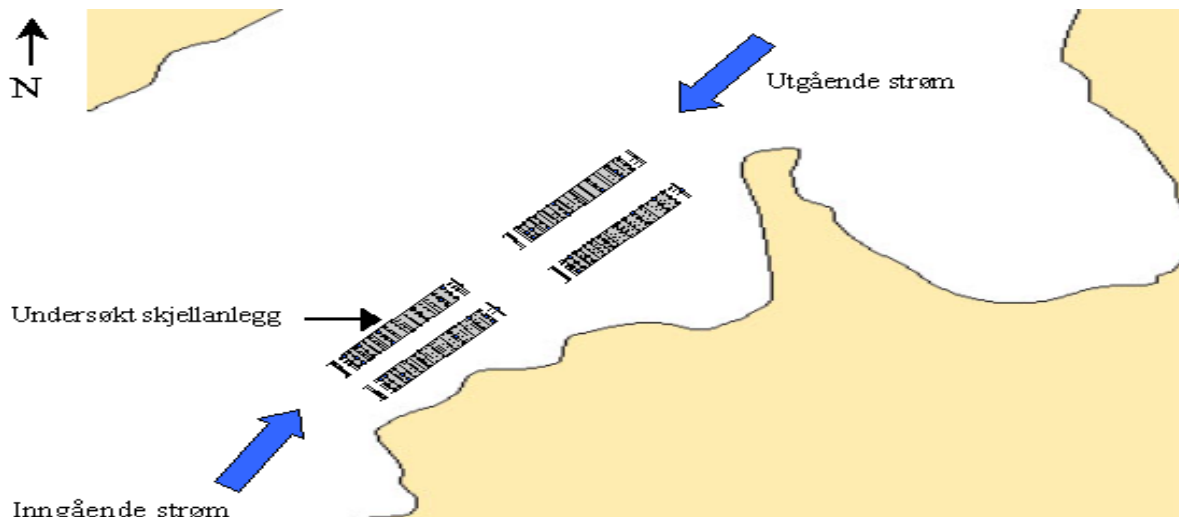
- Den fysiske friksjonen førte til en betydelig reduksjon av vannutskiftingen i skjellanlegget. Fødetilgangen til skjellanlegget ble dermed redusert til omlag 25 % av fødetilgangen til skjell med fri tilgang på fjordvann.
- Planktonkonsentrasjonene avtok hurtig innover i anlegget og allerede etter 20 - 30 meter var fluorescense-verdiene redusert til ca 50 % av verdiene i innstrømmende fjordvann.
- Dette medførte at store deler av skjellanlegget, som hadde en lengde på 200 meter, var næringsbegrenset i lengre tidsrom av en tidevannsyklus.
- Fylningsgraden (matinnholdet) i skjellene var varierende og det kan se ut som det er en sammenheng mellom fødetilgang og avgiftingshastighet, med raskere avgifting ved større fødetilgang.
- Konkurransen mellom blåskjell og gul sjøpung førte til redusert fylningsgrad (matinnhold) og færre skjell dypere enn ca 5 meter i anlegget.
- Fødetilgangen var mindre enn fødebehovet, og det var dermed for mye skjell i forhold til bærevnen for anlegget.
- Når biomassen av skjell tilpasses bærevnen vil en forvente 1) økt og jevnere fylningsgrad (matinnhold), 2) økt vekst og 3) raskere avgifting av skjellene i giftfrie perioder.
- Det er utviklet en modell som beregner strøm, fødetilgang og bæreevne for et skjellanlegg.
- Modellberegninger viser at fødetilgangen og bærevnen kan økes betydelig ved å øke bredde/lengdeforholdet i et skjellanlegg.
- Modellen viste størst relativ økning i bærevnen når strømmen økte ved høye bredde/lengdeforhold og planktonkonsentrasjoner.
- For å sikre optimal fødetilgang må skjellanlegg plasseres slik at de ikke påvirker strømforholdene og planktonkonsentrasjonene til nærliggende skjellanlegg.

SUMMARY:

Seawater currents, mussel (Mytilus edulis L.) condition index (content of soft tissue), algae concentrations and algae toxins (DST) were measured in a commercial farm in Lysefjorden, in southern Norway. Based on the data we accessed processes related to water exchange, removal rate of algae biomass and the mussel plant specifications to increase the understanding of how physical and biological factors influence the carrying capacity of mussels in longline culture. Friction from mussels etc in the farm retarded the current velocity and potential food supply to about 25 % of ambient flow. The biomass of mussels in this farm was too high, resulting in reduced quality and increased toxicity in mussels. A carrying capacity model of a mussel farm was developed and calculations show that carrying capacity of a blue mussel farm increased considerably with increased width/length ratio. The highest relative increase in carrying capacity was obtained by increase in current velocities at high width/length ratios and algae concentrations.

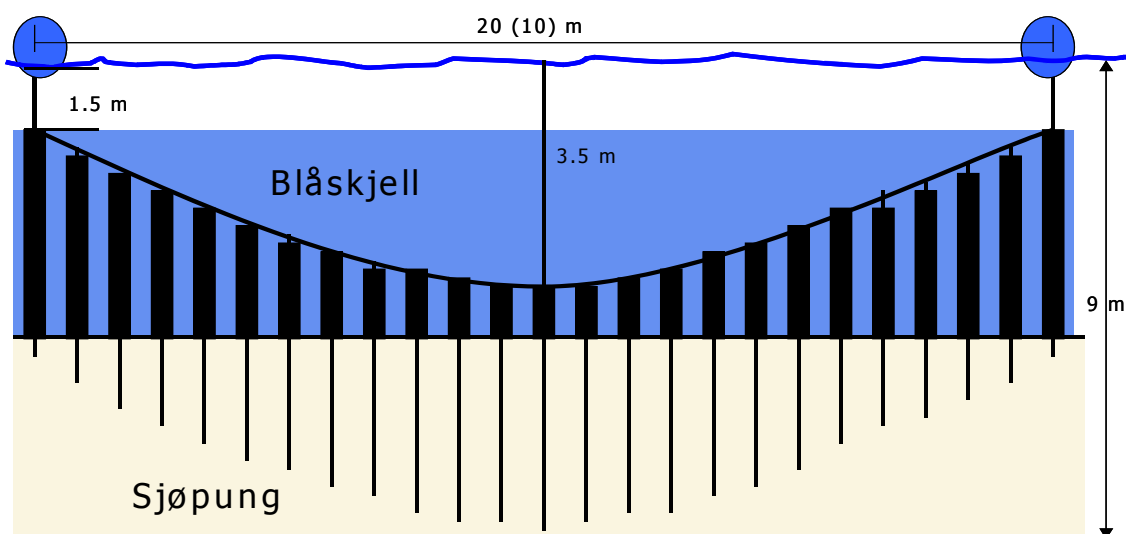
2. OMRÅDEBESKRIVELSE OG MÅLEPROGRAM

Det undersøkte blåskjellanlegget var lokalisert like utenfor Vika nær utløpet av Lysefjorden i Rogaland. Skjellanlegget lå ytterst, sammen med tre andre blåskjellanlegg (figur 1).



Figur 1. Plassering av det undersøkte skjellanlegget.

Dybden under anlegget varierte mellom 15 og 30 meter og var grunnest inn mot land. Det undersøkte skjellanlegget var 250 meter langt, 15 meter bredt, med 10 bæreliner og hadde 11 rekker med blåser til oppdrift ved utsett. Den skjellbærende delen av blåskjellanlegget var ca 200 meter lang med 10 bæreliner jevnt fordelt over bredden, som gir en avstand mellom bærelinene på ca 1.5 meter. Det var festet blåskjellsamlere (svenskebånd) til bærelinene med 50 cm avstand. Lengden til blåskjellsamlerne var 5.5 meter. Bærelinen var nedsenket til 1.5 meter under vannflaten ved blåsene og om lag 3.5 meter under vannflaten i midten mellom blåsene, se figur 2.



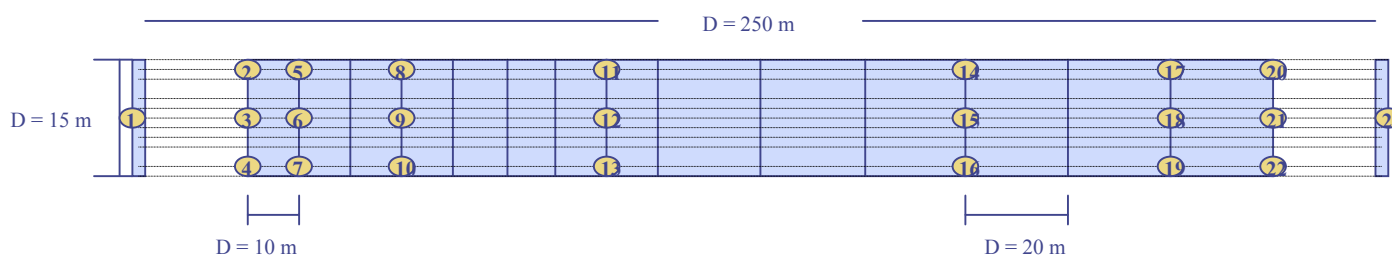
Figur 2. Vertikalsnitt av blåskjellanlegget mellom to blåserrekker.

Blåskjellsamlerne var dermed fra 1.5 til 9 meters dyp, men hovedtyngden av blåskjell var grunnere enn 5 meter da skjellene ble utkonkurrert av gul sjøpung (*Ciona intestinalis*) dypere enn ca 5 meter. Blåskjellanlegget ble satt ut våren 2000 og var klar til høsting høsten 2002. Biomassen av skjell om våren og i august 2002 var av driftansvarlig anslått til henholdsvis ca 65 og 70 tonn, med størst biomasse i den sørvestlige ende av anlegget.

Strømmene i området er betydelig påvirket av tidevannsstrømmen gjennom det forholdsvis smale innløpet til Lysefjorden. Med en ”kanal” i skjellanlegget menes det i den følgende tekst passasjen mellom bærelinene i lengderetningen gjennom skjellanlegget.

2.1 Strømmålinger

Strøm ble målt hvert 10 minutt i 4 meter dyp med en strømmåler (modell SD 6000, Sensordata A/S). I første måleperiode fra ca kl 1400, 18.08.02 til kl 0920, 19.08.02 ble strøm observert på stasjonene 1, 3, 12 og 21 (figur 3). I andre måleperiode, som startet kl 1730, 20.08.02 og ble avsluttet kl 1240, 23.08.02, ble strøm observert ved stasjonene 1, 3, 9 og 12.



Figur 3. Det undersøkt blåskjellanlegget sett ovenifra. Tall markerer målestasjonsnummer.

2.2 Fluorescens, turbiditet, temperatur, saltholdighet og planteplankton

Fluorescens/klorofyll, turbiditet, temperatur og saltholdighet ble målt med en STD - sonde (Model SD 204, SAIV A/S) fra overflaten og ned til om lag 10 meters dyp. Under den første strømmålingsperioden ble de forannevnte parametere observert på stasjonene 1, 3, 12 og 21 kl 1800, 18.08.02 og kl 0900, 19.08.02 (figur 3). I andre strømmålingsperiode ble det foretatt STD - målinger 20.08, kl 1800, på stasjonene 1, 3, 9 og 12. Den 21.08, kl 1000 og 23.08, kl 0940 ble det utført tilsvarende målinger i et stasjonsnett som dekket hele blåskjellanlegget, med til sammen 23 stasjoner. Det ble også tatt målinger på en referansestasjon ute i fjorden.

Blåskjellsamlerne var stedvis begrodd av trådformige makroalger og dersom sonden passerte gjennom et makroalgelag ga det et markant utslag både på fluorescens og turbiditet. Derfor ble unormalt høye fluorescensverdier slettet fra datasettet.

Vannprøver ble tatt med Ruttner vannhenter i skjellanlegget på stasjon 1, 3, 9, 12, 23 (figur 3) og i upåvirket fjordvann. Alle prøver ble tatt på 4 m dyp, med samme plassering som strømmålerne. På stasjon 12 ble det i tillegg tatt prøver på 0.5 m og 7 m. Prøvene ble umiddelbart fiksert med nøytral lugol (1 %) for mikroskopering og 2 % glutaraldehyd for Flow Cytometri (FCM). Større alger ble talt på filter i mikroskop med en deteksjonsgrense på $320 \text{ celler} \cdot \text{l}^{-1}$. Mindre alger og cyanobakterier ble talt med FCM med en deteksjonsgrense på ca. $3.3 \cdot 10^5 \text{ celler} \cdot \text{l}^{-1}$. Resultatet av FCM tellingene kan være noe underestimert ettersom prøvene var fiksert, imidlertid var det lite støy i prøvene og det tyder på at tapet ikke var betydelig. Karboninnhold pr. celle estimert etter Verity (1992) med cellevolum anslått etter Travers (1974) og Miljøstyrelsen (1992).

Fluorescens/klorofyll (mg/m^3) målt med sonden ble kalibrert med målinger av klorofyll - *a* basert på filtrerte vannprøver i Lysefjorden og analysert ved Forskningsstasjonen Flødevigen (Anne Dubernet). Klorofyll - *a* verdiene var ca 1,45 ganger større enn fluorescens/ klorofyll verdiene målt med sonden. En høy korrelasjon mellom fluorescens/klorofyll og turbiditet indikerer at partiklene i fjordvannet var dominert av levende planteplankton (figur 4).

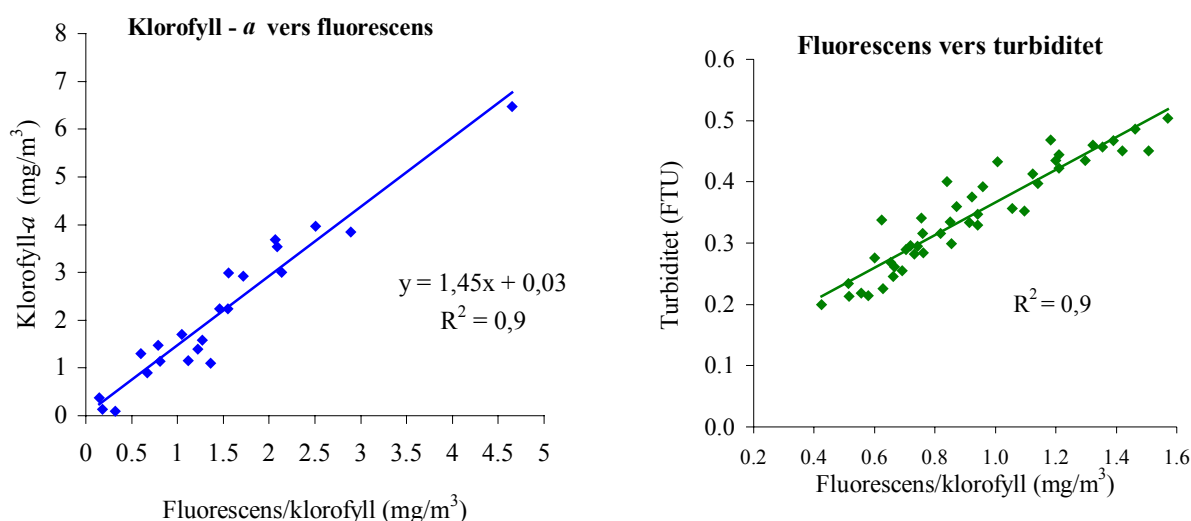


Fig 4. Sammenheng mellom målt klorofyll - *a* og fluorescens/klorofyll målt med sonden. Sammenheng mellom turbiditet og fluorescens/klorofyll målt med sonden

2.3 Fylningsgrad og algetoksiner.

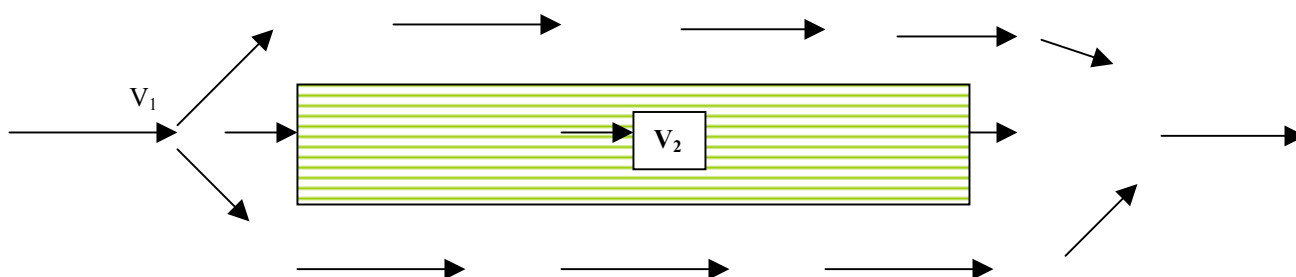
Det ble tatt 60 prøver av blåskjell i anlegget 3. september 2002. Prøvene ble tatt på 21 stasjoner på 2, 4 og 6 meters dyp, med unntak av tre stasjoner på 6 meters dyp der det hovedsakelig vokste gul sjøpung. Prøvene var fordelt i anlegget fra stasjon 2 til og med stasjon 22 (figur 3). Skjellene ble rensset og dampet. Innmaten ble rensset ut, veid og oppbevart ved -20 grader C. Skallene ble veid, og fylningsgraden ble beregnet som vekt dampet innmat/skallvekt*100. Omregning til begrepet ”% matinnhold i skjell” basert på innmat/helvekt av ferske skjell*100 % (% matinnhold) er bla avhengig av skalltykkelse og kan variere mye, men feks fylningsgrad 67 basert på skallvekt tilsvarer ca. 20 % basert på helvekt, tilsvarende gir 86 ca. 25% og 106 ca. 30 %. Analysene av algetoksiner (DST) ble gjort på hel, dampet innmat av skjell og analysene ble utført ved Havforskningsinstituttet ved Seksjon for Marin Kjemi (ref Asbjørn Svardal)

3. OBSERVASJONER

3.1 Strøm og vanntransport

Strøm

Skjellanleggets lengdeakse lå omlag parallelt med hovedstrømretningen for den inn - og utgående tidevannstrøm i fjorden (figur 1). Friksjonen fra skjell, tau osv fører til at strømmen i fjorden (V_1) bøyes av rundt et skjellanlegg og reduserer strømmen inne i selve skjellanlegget (V_2) (figur 5). Et skjellanlegg som er plassert oppstrøms/nedstrøms for nært et annet skjellanlegg reduserer bakgrunnstrømmen i fjorden (V_1) og følgelig vannutskiftningen i begge skjellanleggene.

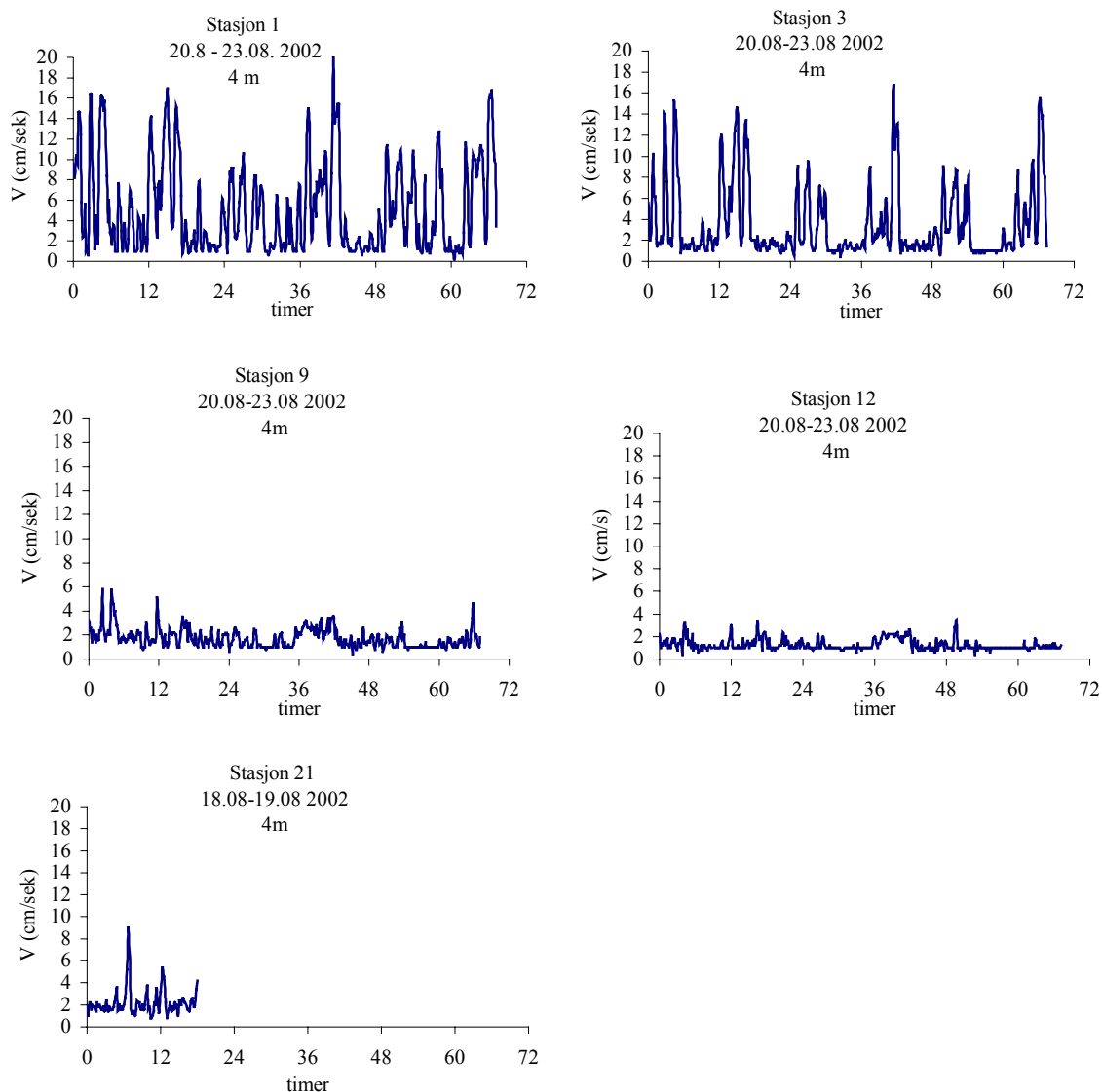


Figur 5 Prinsippkisse av strøm ved et blåskjellanlegg.

Strømforholdene ved stasjon 1, ca 20 meter utenfor anlegget mot innløpet av fjorden (figur 3), var preget av tidevannsstrømmene i fjorden, med maksimal inngående strøm på ca 17 cm/sek og utgående strøm på ca 12 cm/sek (figur 6 og 7). Midlere strømfart ved stasjon 1 uansett strømretning var 5.2 cm/sek. Midlere inngående strøm (7.5 cm/s) var ca dobbel så stor som midlere utgående strøm (3.8 cm/s) (tabell 1). I kanten av skjellanlegget mot sørvest (stasjon 3) var midlere inngående strøm ca 5.4 cm/sek, og midlere utgående strøm ca 1.6 cm/sek (figur 6 og 7). Strømforholdene både ved stasjon 1 og 3 var tydelig påvirket av skjellanlegget ved utgående tidevannsstrøm i fjorden.

Tabell 1 Midlere strømfart i skjellanlegget uansett retning (V_m). Midlere strømfart i skjellanlegget ved inn (Vinn) - og utgående strøm (Vut) i fjorden. Måleperiode 20.08-23.08 2002 for stasjonene 1, 3 9 og 12. Måleperiode for stasjon 21 var 18.08-19.08 2002. Standardavvik i parentes.

Stasjon	Avstand (m)	V_m (cm/s)	Vinn (cm/s)	Vut (cm/s)
1	-20	5,2 (4,4)	7,5 (4,7)	3,8 (2,7)
3	0	3,5 (3,5)	5,4 (4,1)	1,6 (0,6)
9	30	1,7 (0,8)	2,0 (1,0)	1,5 (0,5)
12	70	1,2 (0,5)	1,4 (0,6)	1,2 (0,5)
21	200	2,2 (1,2)	2,0 (0,5)	2,8 (1,8)

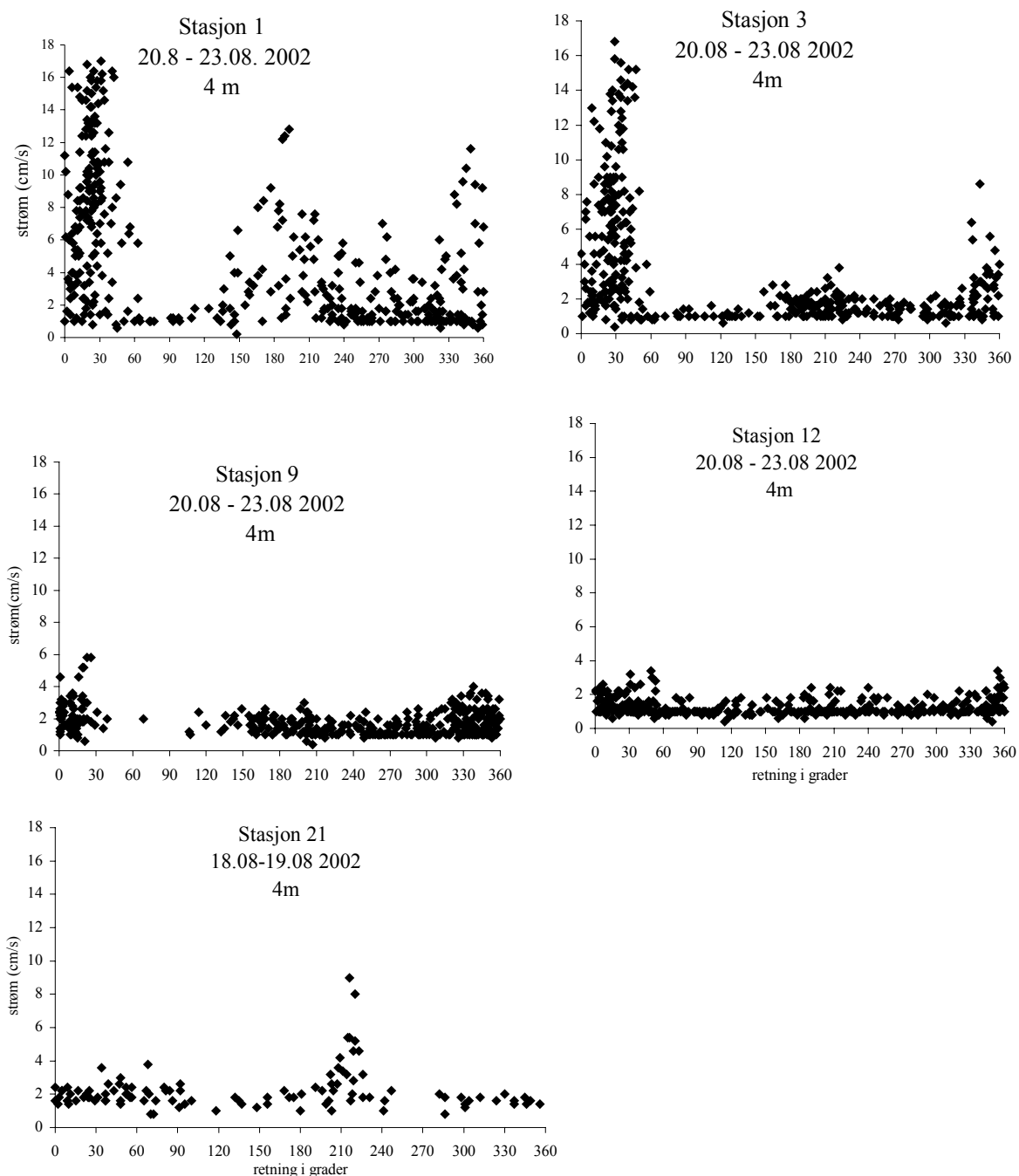


Figur 6. Strømfart i 4m dyp på stasjonene 1, 3, 9,12 (20 - 23 august 2002) og 21 (18 - 19. august 2002) (se figur 3).

Ved stasjon 9 og 12, henholdsvis ca 30 m og 70 m inne i skjellanlegget, var strømfarten betydelig redusert og retningen ustabil (figur 6 og 7). Midlere strømfart ved stasjon 9 og 12 var henholdsvis 1.7 og 1.2 cm/sek, dvs. 20 - 30 % av midlere strømfart observert ved stasjon 1 (tabell 1).

Ved stasjon 21, lokalisert ved anleggets nordøstside (figur 3), var det også svake strømmer, med unntak ved utgående tidevannsstrøm hvor det ble observert maksimal strømfart opp mot 8.0 cm /sek (figur 6 og 7). Midlere strøm uansett retning ved stasjon 21 var 2.2 cm/s, ca 40 % av strømfarten ved stasjon 1. Midlere strøm ved inn - og utgående tidevann ved stasjon 21

var henholdsvis 2.0 cm/s og 2.8 cm/s (tabell 1). Temperaturen var 18 - 19 °C og saltholdigheten økte fra ca 21 psu i overflatelaget til ca 28 psu på 10 meter dyp.



Figur 7. Strømfart i 4m dyp versus retning for stasjonene 1, 3, 9, 12 og 21 (se fig 3)

Vanntransport

Midlere vanntransport (Q_v) gjennom et skjellanlegg kan uttrykkes som:

$$Q_v = V_2 * A_e \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1)$$

Hvor V_2 er midlere strømfart inne i skjellanlegget og $A_e = B * D$ er tverrsnittsarealet hvor B = bredden av anlegget og D = dybden av skjellbåndene. Med $B = 15$ m, $D = 5.5$ m og $V_{2\text{inn}} = 2.25$ cm/s og $V_{2\text{ut}} = 1.5$ cm/s var Q_v ca 1.8 m³/s ved inngående tidevann og ca 1.2 m³/s ved utgående tidevann. Middelet for ut - og inngående tidevann blir da ca $1,5$ m³/s.

Oppholdstiden av vannet i skjellanlegget (T_v) kan nå beregnes :

$$T_v = \text{Vol}/Q_v \quad (2)$$

$\text{Vol} = B * D * L$, hvor L er lengden på anlegget. Lengden på skjellanlegget er ca 200 meter og Vol blir da 16500 m³.

Med en midlere vannutskifting på $1,5$ m³/s blir midlere oppholdstid for vannet (T_v) i skjellanlegget ca 3 timer.

Tiden det tar for skjellene å filtrere volumet av skjellanlegget T_a er:

$$T_a = \text{Vol}/(\text{Ksm} * B_s) \quad (3)$$

Hvor Ksm er midlere filtreringsrate (m³/s/kg skjell) og B_s er biomasse skjell. Biomassen av skjell i anlegget i august 2002 er antatt å være omlag 70 tonn og med en Ksm på ca 0.00003 m³/s/kg skjell (Oppen - Berntsen, 2000, Rosenberg, 1982) er $T_a = 2.2$ timer.

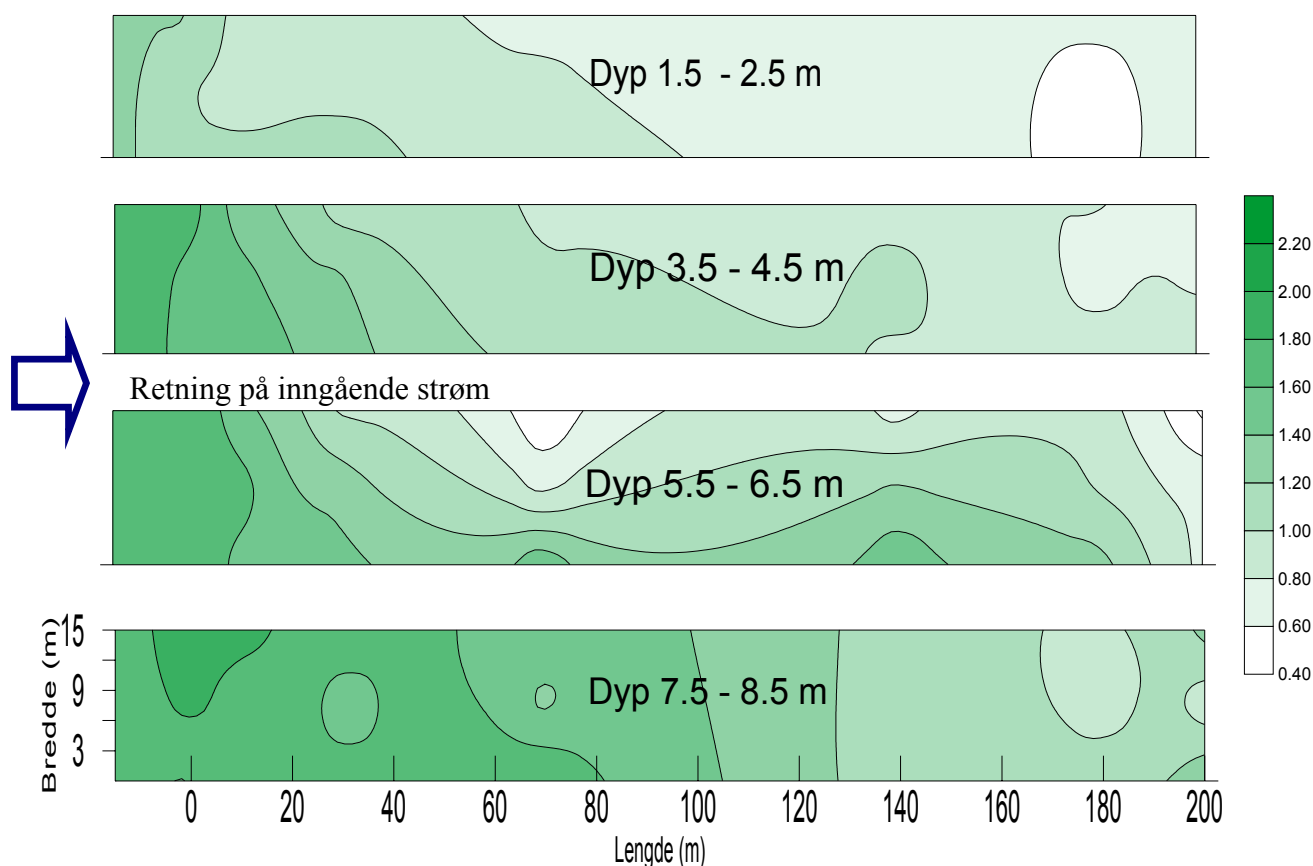
Da T_a er mindre enn T_v viser dette at blåskjellene har en teoretisk muligheten til å tømme det innstrømmende vannet for alger, under forutsetning av at fødeuttaket er konstant gjennom anlegget.

3.2 Fluorescens/klorofyll og planteplankton

Fluorescens/klorofyll

Fluorescensen i det undersøkte blåskjellanlegget varierte med dypet, avstand inn i anlegget og med inngående og utgående strøm. Forskjeller i fluorescens mellom inngående og utgående vannmasser beskrives i kap. 3.4. Figur 8 viser midlere fluorescens i fire horisontale snitt gjennom blåskjellanlegget ved inngående strøm. I grove trekk viser figuren at: 1) fluorescens avtar etter hvert som vannet trenger gjennom skjellanlegget og 2) at fluorescens øker med dypet. For å sammenligne fluorescens i vannmassen som tilføres anlegget med vannmassen som forlater skjellanlegget er vertikalfordelingen av fluorescens ved inngående

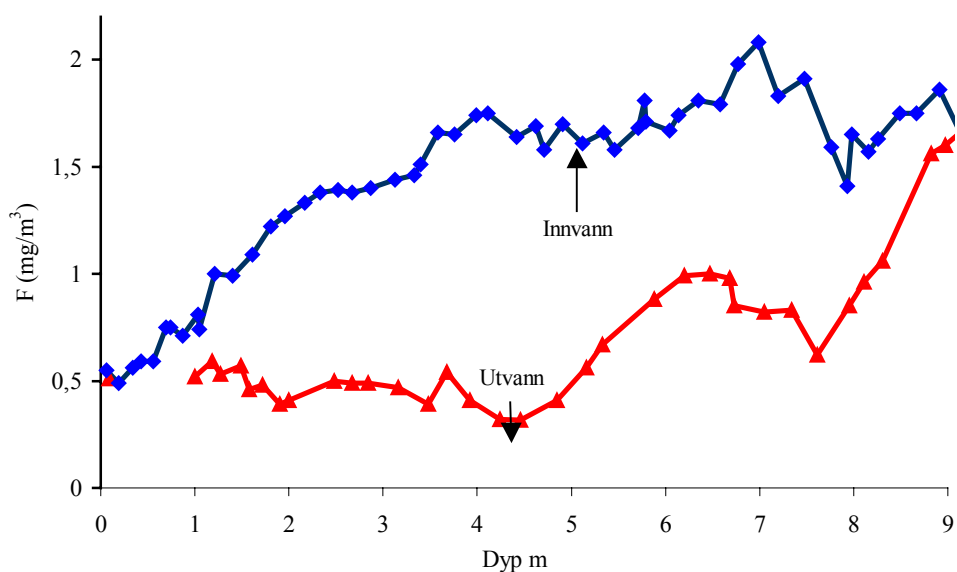
tidevannsstrøm vist i figur 9. Figuren viser hvordan skjellenes filtrering førte til markert lavere fluorescens i enden av skjellanlegget (utvannet) sammenlignet med upåvirkete vannmasser i fjorden (innvann). De laveste fluorescens verdiene ble målt ved 4 -5 meters dyp dette sammenfaller med hvor det var størst biomasse skjell gjennom anlegget



Figur 8. Horisontal fordeling av fluorescens/klorofyll (mg/m^3) i blåskjellanlegget målt med sonden ved fire dyp og inngående strøm 21.08.02. Fluorescens/klorofyll verdiene er midlet mellom 1.5–2.5, 3.5–4.5, 5.5–6.5 og 7.5–8.5 meters dyp.

Forbruket av alger i skjellanlegget kan illustreres ved den midlere reduksjon av fluorescens gjennom anlegget. Midlere fluorescens ved inngående strøm er fremstilt i figur 10 for 4 meters dyp. I dette avsnittet benyttes middelverdiene for 4 meters dyp. Dette fordi det grunnere enn 3.5 meter og dypere enn 5 meter ikke var skjell igjennom hele anlegget (se avsnitt 2 og fig 2). Figur 10 viser at fluorescens verdiene i 4 meter dyp avtok innover i anlegget og allerede 30 meter inn i anlegget var fluorescense redusert til ca 47 % av konsentrasjonen i innstrømmende fjordvann. Omlag 70 meter inn i anlegget var fluorescens verdiene ca 40 % og i enden av anlegget (200 m) ca 30 % av bakgrunnsverdien i fjorden. Det var dermed svært lite alger igjen fra omlag halveis inn i anlegget. Dette betyr at deler av

blåskjellanlegget trolig var næringsbegrenset i et lengre tidsrom i løpet av en tidevannssyklus. I avsnitt 3.1, *Strøm og vanntransport*, viser beregninger at blåskjell kan redusere algekonsentrasjonen i det innstrømmende vannet ned til en nedre terskeverdi, dersom midlere fødeuttak er tilnærmet konstant. Observasjonene foran viste at ca 60 % av tilførte alger ble konsumert allerede ca 70 meter inn i anlegget ved inngående tidevannstrøm. Fra 70 meter til enden av anlegget (200 m) var konsumet redusert til kun 10 % av tilførte alger, dvs totalt ca 70 % av algene ble tatt opp av skjellene i anlegget.

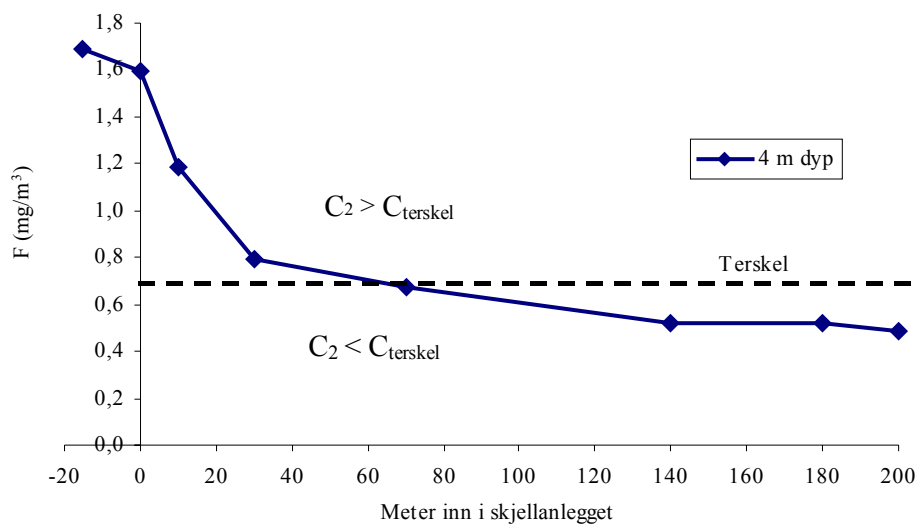


Figur 9. Fluorescens/klorofyll (F) (mg/m^3) målt med sonden på stasjon 1 og 18 i det undersøkte anlegget ved inngående tidevannsstrøm

Dette indikerer at planktonkonsentrasjoner under en gitt terskelverdi ($C_2 < C_{\text{terskel}}$), ikke er tilgjengelig som føde for blåskjell, se figur 10. Dette kan skyldes at filtreringsraten mhp alger reduseres betydelig når planktonkonsentrasjonen kommer under et gitt terskelnivå. Litteraturen bekrefter reduserte filtreringsrater for blåskjell ved lave klorofyllverdier, ca $0.5 \text{ mg klorofyll } a / \text{m}^3$ (Riisgård og Randløv 1981, Riisgård 1991, Clausen og Riisgård 1996, Dolmer 2000, 2001). I vår undersøkelse ser terskelverdien ut å være omlag $0.7 \text{ mg}/\text{m}^3$ fluorescens, som i følge figur 4 tilsvarer $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ klorofyll - *a* (figur 10). Denne terskelverdien kan være avhengig av strømhastighet, planktonkonsentrasjon, algesammensetning, temperaturforhold, størrelsen på skjellene osv.

Det er gjennomført flere studier på næringstilgang i skjellanlegg. Heasman et al. (1998) undersøkte sammenhengene mellom fødeuttak og vekst, kondisjon og produksjon av skjell

dyrket på flåter med 60 og 90 cm avstand mellom bærelinene. De konkluderte med at dyrkningsenheter med høy tetthet medførte fødebegrensning på lokal skala (innenfor flåten). Næringsmangelen økte med blåskjellenes alder og med redusert avstand mellom bærelinene. Næringsmangelen forklart ved redusert fødeinntak og nedsatt strømhastighet



Figur 10. Middelerdi av fluorescens/klorofyl (F) (mg/m³) målt på 4 meters dyp (sondemålinger) gjennom anlegget ved inngående strøm.

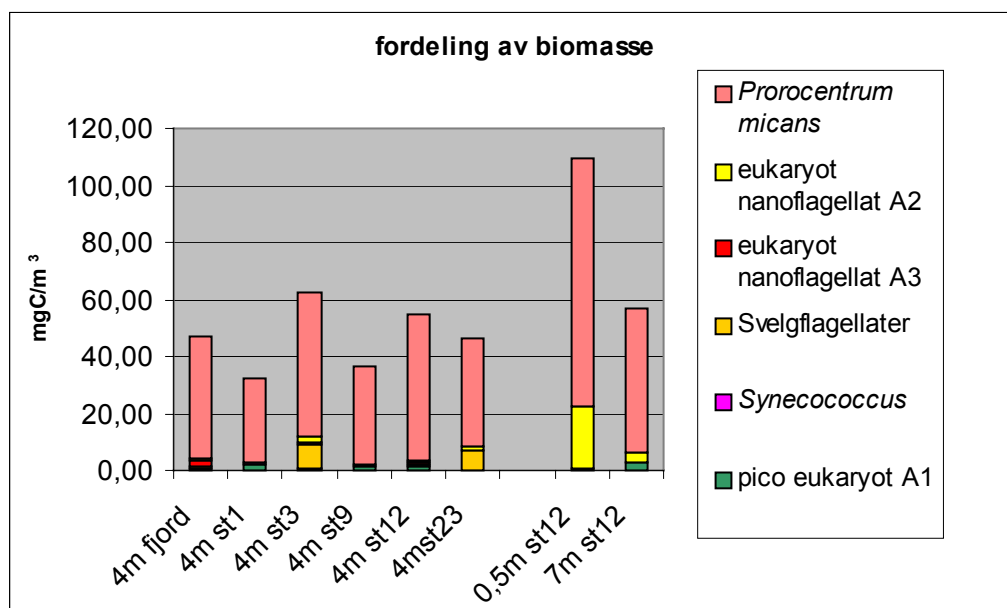
i anlegget ved økt biomasse. I likhet med våre observasjoner fant Hesman *et al* (1998) betydelig høyere klorofyll - *a* verdier i innstrømmende vann enn i utgående vann.

Skjell har stor kapasitet til å filtrere vann og fødetilgangen kan bli begrenset ved høye dyrkningstettheter (Navarro *et al.*, 1991). Blåskjellanlegg er spesielt tette med tanke på antall skjell per arealenhet. Når skjelltettheten øker kan det bli en reduksjon i skjellenes vekstrate og økt dødelighet (Grant *et al.* 1993). Erfaringer fra flere store skalldyrprodusenter har vist at å overstige bæreevnen, dvs fødetilgangen er mindre enn fødebehovet i et skjellanlegg, fører til nedsatt vekstrate, senere oppbygging etter gyting, nedsatt motstandskraft mot sykdom (Pitcher og Calder, 1998) og lokal næringsbegrensning (Camacho *et al.*, 1991).

For å unngå næringsmangel og de konsekvenser som er knyttet til det, er det derfor svært viktig at fordelingen av biomassen i et blåskjellanlegg tilpasses næringstilgangen.

Plantep plankton

Algesamfunnet var dominert av *Prorocentrum micans* $3.2-7.4 \cdot 10^4 \text{ l}^{-1}$, samt *Ceratium furca* og andre mindre dinoflagellater. Det var få ”pico eukaryote” alger (A1) ($<1-5 \mu\text{m}$) $7.5 \cdot 10^5-3.2 \cdot 10^7 \text{ l}^{-1}$, og et lite innslag av antatte svelgflagellater (A3) i noen prøver på inntil $2.3 \cdot 10^7 \text{ l}^{-1}$ og en populasjon av *Synechococcus* sp på $1.4-8.4 \cdot 10^6 \text{ l}^{-1}$. I enkelte prøver var det også en del nanoflagellater (A2). Som potensiell føde for skjell utgjør *P. micans* 40 - 65% av algebiomassen ($\mu\text{gC} \cdot \text{l}^{-1}$). Gruppen nano flagellater er svært heterogen, og denne gruppen utgjør inntil 15 % av algebiomassen i enkelte prøver (stasjon 12, 0.5m). Picoflagellater utgjør fra 0.1 til 5 % av algebiomassen og cyano populasjonen var mindre enn 1 % av algebiomassen. Fordeling av biomassen av de dominerende algartene i skjellanlegget er vist i figur 11. På stasjon 12 ble det tatt prøver på 0.5, 4 og 7 meters dyp (figur 11). Det vil si over skjellanlegget (0,5 m) og inne i skjellanlegget.



Figur 11. Biomasse av alger i og ved skjellanlegget, 23.08.02.

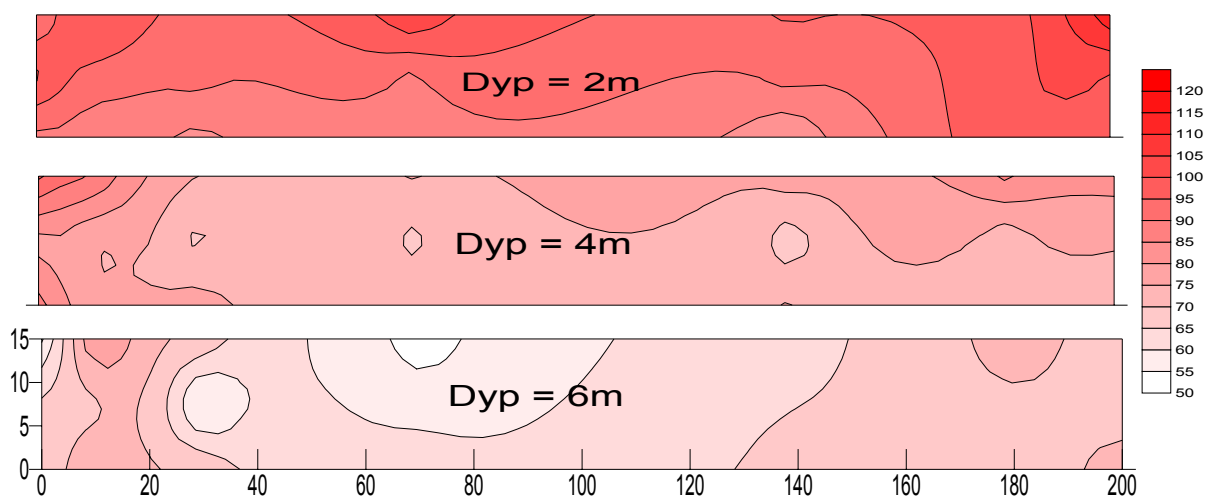
Over anlegget var *P. micans* konsentrasjonen dobbelt så høy som i de andre prøvene, mens konsentrasjonen på 4 og 7 meter dyp var om lag like. Det var betydelig mer flagellater, både A1 nano- og A2 pico- eukaryote på 7 meter enn ellers i anlegget. I 0.5 meter dyp var det også en betydelig populasjon av nanoflagellater, 10 ganger høyere enn ellers i anlegget, denne populasjonen virker heterogen og gjenspeilet antakelig et artsrikt flagellatsamfunn. Denne populasjonen utgjorde ca.14 % av biomassen i prøven. Variasjonen i prøvene synes

større enn hva vi observerte ellers i Lysefjorden, uavhengig av skjellanlegg. Det er vanskelig å konkludere ut fra denne ene prøvetakningen da prøvene ble tatt i en periode med strømvending i fjorden. Algetellingene gjenspeiler artsfordelingen når terskelverdien for alger i anlegget er nådd. Biomasseberegningene samsvarer med den kalkulerte terskelverdien gitt som klorofyll - a (mg/m^3). Nye undersøkelser av algeforholdene i et skjellanlegg bør derfor utføres med gjentatte prøver i løpet av en tidevannssyklus. Kontrollerte forsøk vil ytterligere kunne belyse problemstillingen.

3.3 Fylningsgrad og algetoksiner

Fylningsgrad

Høyest fylningsgrad ble observert øverst i anlegget, i endene av anlegget og på den siden av anlegget som vendte ut mot fjorden (fig 13). Fylningsgraden avtok markant med dypet, og inn mot land. Fylningsgrad var høyest på 2 meters dyp og lå mellom ca 80 og 110. Det kan skyldes at det var lite skjell på to meters dyp da anlegget buet ned (se figur 2) og at skjellene fikk tilført relativt mye næring fra det overliggende vannet som strømmet hurtig over blåskjellsamlerne.



Figur 13. Fylningsgrad i det undersøkte skjellanlegget ved tre ulike dyp uttrykt som (bløtdeler / skallvekt)*100. Sammenheng mellom fylningsgrad og % matinnhold i skjellene: 67 = 20 %, 86 = 25 % og 106 = 30 %.

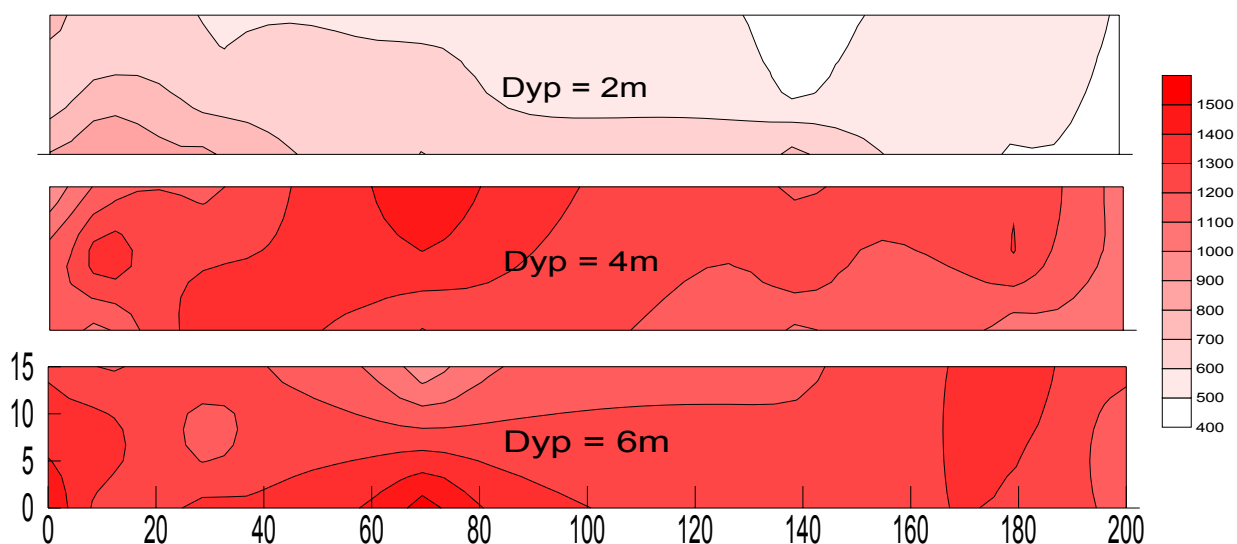
Fylningsgraden var også høyest på den siden som vendte ut mot fjorden og lavest på den siden som vendte inn mot land. Fylningsgraden var også noe høyere på endene. Det var relativt lavt uttak av føde på to meters dyp og fluorescens/klorofyll verdiene var høyere enn foreslått terskelverdi.

Fylningsgrad i 4 meter dyp varierte mellom 55 og 80 og var markert lavere enn på 2 meters dyp. Også i 4 meter dyp var fylningsgraden høyest på den siden av anlegget som vendte ut mot fjorden og på endene av anlegget. Fra avsnitt 3.2 antyder målingene periodevis næringsmangel i 4 meters dyp og den forholdsvis lave fylningsgraden i skjellene styrker denne antakelsen.

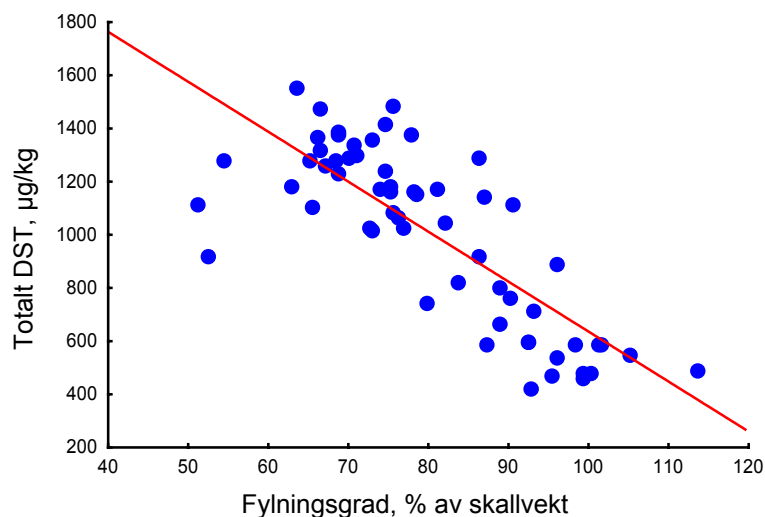
Fyllingsgraden var ytterligere redusert på 6 meters dyp (50 - 70), selv om fluorescensverdiene var høyere (figur 8) og det var færre skjell. Vi tror at dette skyldes en betydelig konkurranse mellom blåskjell og gul sjøpung dypere enn 5 meter. Dykkeundersøkelse viste også at blåskjellene på dette dypet ikke var synlige blant gul sjøpung. Observasjonene under prøvetakingen ga også et inntrykk av en betydelig redusert biomasse av blåskjell med økende dyp. Problemet med sjøpung og andre næringskonkurrenter til blåskjell bør undersøkes nærmere.

Algetoksiner

Målinger av algetoksiner viste at skjellanlegget under prøvetakingen var i en avgiftningssituasjon hvor totalt innhold av DST gradvis avtok fra 870 $\mu\text{g}/\text{kg}$ skjellmat 23. august til 156 $\mu\text{g}/\text{kg}$ skjellmat 14. oktober (Skarra, H., pers med).



Figur 14. Innhold av DST ($\mu\text{g}/\text{kg}$ skjellmat) i det undersøkte skjellanlegg på 2, 4 og 6 meters dyp, 03.09.02.



Figur 15. Innhold av DST toksiner, summen av de ulike derivatene plottet mot fylningsgrad av blåskjell.

Giftanalyser av blåskjell viste en motsatt sammenheng mellom giftinnhold og fylningsgrad : de høyeste giftverdiene ble funnet i de delene av anlegget hvor det var lavest fylningsgrad. Det motsatte forholdet (figur 15) skyldes trolig fødetilgang. Sammenhengen mellom veksthastighet og økt fylningsgrad er observert i blåskjellanlegg tidligere (Duinker upublisert). Fylningsgraden er således et integrert mål på oppbygging av bløtdeler siden siste gyting og forskjellene innen et skjellanlegg skyldes sannsynligvis ulik fødetilgang. Størrelsen på skjellene er et tilsvarende integrert mål på vekstvilkårene, men i dette tilfellet integrert over hele levetiden til skjellene.

Resultatene demonstrerer at giftinnholdet i skjellene i et skjellanlegg kan variere med en faktor på opptil 4 (figur 14), avhengig av hvor skjellene vokser i anlegget. Resultatene styrker hypotesen om at det er en sammenheng mellom fødetilgang og avgiftningshastighet, med raskere avgiftning ved større fødetilgang. Tidligere har en sammenligning mellom ulike lokaliteter antydnet at fødetilgang er en viktig faktor for avgiftning (Dahl og Johannessen, 2001). Observasjonene i denne undersøkelsen styrker denne antakelsen ved at det hovedsakelig var fødetilgangen som varierte innenfor anlegget og i liten grad andre miljøforhold som temperatur og saltholdighet.

Situasjonen vil trolig være omvendt i perioder med giftalger i vannet og akkumulering av gift i skjellene. Det kan forventes at skjell med bedre fødetilgang akkumulerer giften raskere. Et viktig skritt videre vil være å gi en beskrivelse av endringene av giftinnholdet i skjell under og etter en oppblomstring av *D. acuta* som er den viktigste kildeorganismen til DST i Norge. I en slik undersøkelse må en også undersøke algens varierende toksinproduksjon.

Dersom biomassen av skjell i et skjellanlegg tilpasses bæreevnen og næringsbegrensning unngås vil dette gi: 1) høyere og jevnere fylningsgrad (matinnhold) og 2) mulighet for redusert avgiftningstid.

3.4 Fødetilgang og biomasse i anlegget

Konsentrasjonen av alger i anlegget er bestemt av tilførslene av alger og algeopptaket fra skjellene. Figur 16 a - d viser reduserte fluorescens/klorofyll verdier nedstrøms i skjellanlegget. Ved utgående strøm 19. august ble midlere fluorescens/klorofyll mellom 2 og 6 meter redusert fra ca 1,0 mg/m³ ved innløpet av anlegget til ca 0.32 mg/m³ ved utgangen. Ved inngående tidevannsstrøm 21 og 23 august ble midlere fluorescens/klorofyll mellom 2 og 6 meter redusert fra 1.40 mg/m³ ved innløpet til ca 0.6 mg/m³ ved utløpet av anlegget. Observasjonene viste at skjellene filtrerte ut 60 - 70 % av algene som ble tilført skjellanlegget.

Transporten av alger (Q_f) gjennom en flate A_e i fjorden er:

$$Q_f = A_e * V_1 * C_1 \quad (\text{kg/s}) \quad (4)$$

Hvor A_e = tverrsnittsareal, V₁ = midlere strøm i fjorden og C₁ = konsentrasjon av alger i fjorden.

Tilførselen av alger til skjellanlegget blir :

$$Q_s = A_e * V_2 * C_1 \quad (5)$$

Hvor V₂ er midlere strøm i anlegget . V₂ er mindre enn V₁ pga friksjonen i anlegget.

Algetilførselen i % til anlegget blir da:

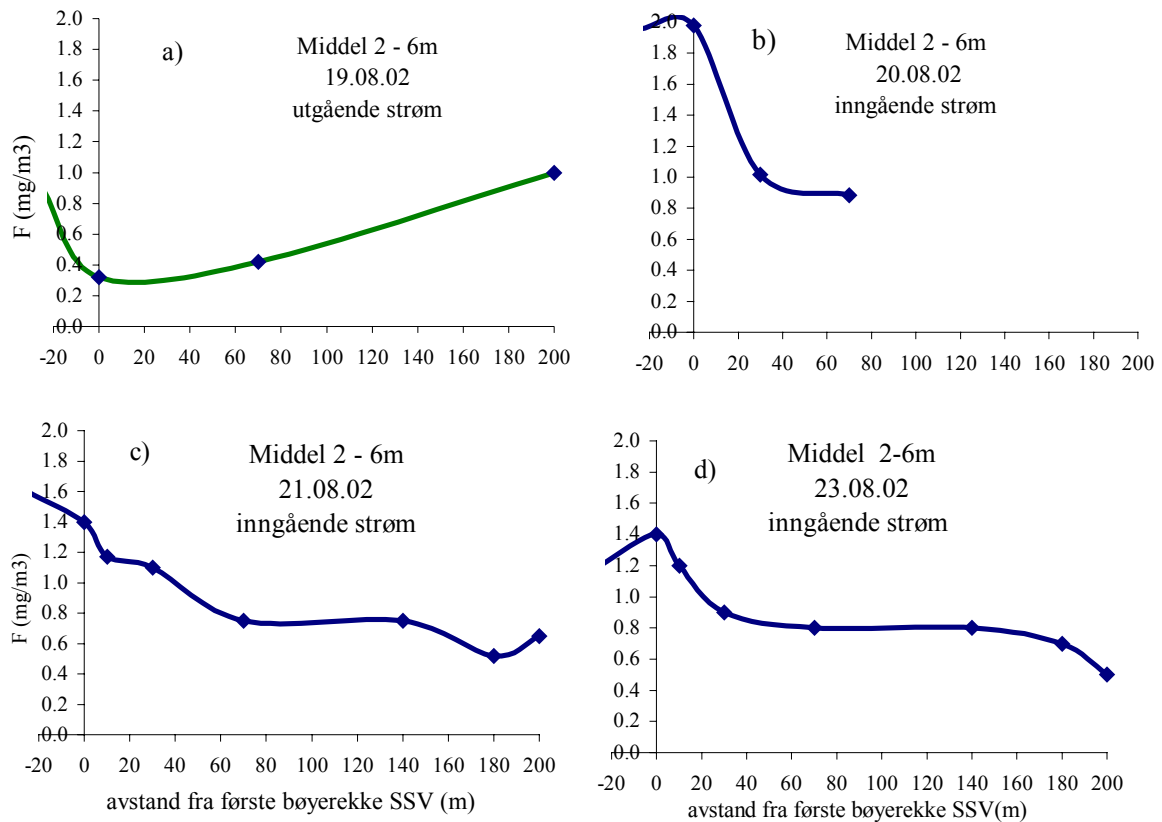
$$Q_s/Q_f * 100 = V_2/V_1 * 100 \% \quad (6)$$

Ut fra observasjonene var midlere V₁ ca 7.5 cm/s og V₂ = ca 2 cm/s ved inngående strøm og Q_s/Q_f = 26%. Algetransporten inn i skjellanlegget var dermed redusert til omlag 25 % av algetransporten i upåvirket sjøvann .

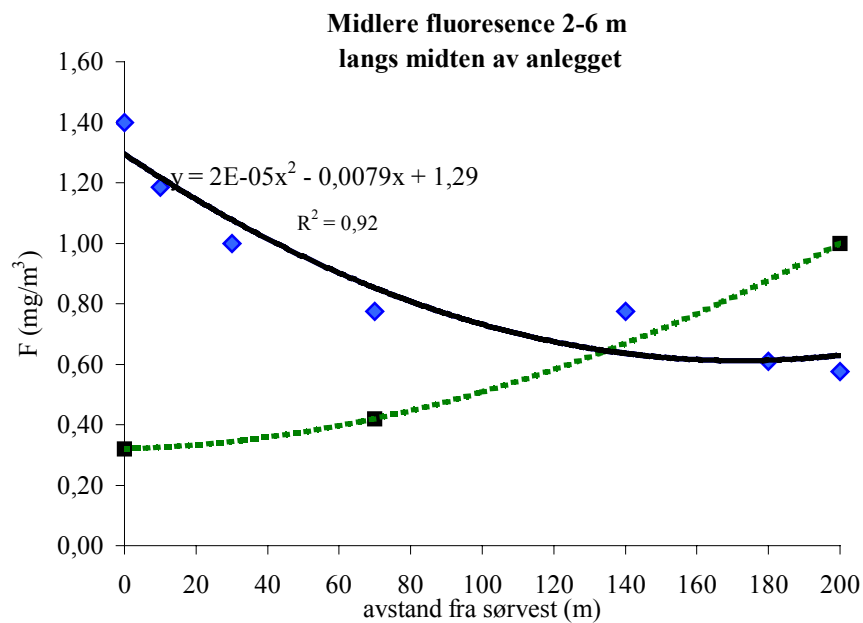
Figur 17 viser at fluorescens/klorofyll ved inn - og utgående strøm i skjellanlegget C(x) med god tilnærming (R² = 0,92) kan beskrives som :

$$C(x) = ax^2 + bx + d \quad (7)$$

Hvor x = avstanden langs lengdeaksen av anlegget .



Figur 16 Midlere fluorescens/klorofyll (F)(mg/m³) mellom 2 og 6 meter dyp (sondemålinger) i skjellanlegget ved ut - og inngående tidevannsstrøm.



Figur 17. Midlere fluorescens/klorofyll (F) (mg/m³) målt med sonden i skjellanlegget mellom 2 og 6m meter dyp for inngående strøm (hel linje) og utgående strøm (prikket linje).

For $x = 0$ er $C(x) = C_1 = d$. Når $x = L$ er $C(x) = C_2$ og for $x = L/2$ er $C(x) = C_3$

Konstantene a og b blir da

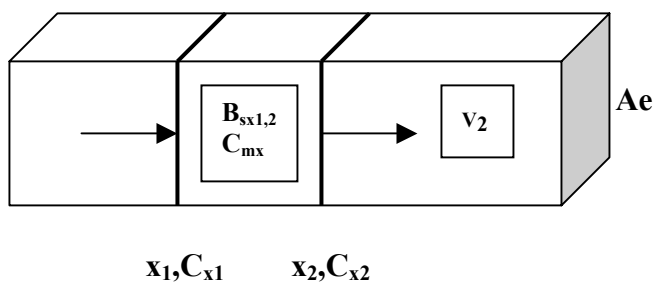
$$a = 2*(C_1+C_2-2C_3)/L^2 \quad b = - (3C_1+C_2-4C_3)/L \quad (8)$$

a og b settes inn i ligning (8) og vi får følgende uttrykk for $C(x)$:

$$C(x) = 2*(C_1+C_2-2C_3)/L^2 *x^2 - (3C_1+C_2-4C_3)/L *x + C_1 \quad (9)$$

Planktonkonsentrasjonene gjennom et skjellanlegget $C(x)$ kan beregnes ved ligning (9) når vi kjenner C_1 , C_2 og C_3 og L . Figur 17 viser at C_1 og C_2 var høyere ved inngående enn ved utgående tidevannsstrøm. Dette kan trolig være et resultat både av innflytelsen fra skjellanleggene innenfor det undersøkte anlegget (se figur 1) og reduserte alge-konsentrasjoner i fjorden ved utgående tidevann. De ulike konsentrasjonene av alger ved inn- og utstrømmende tidevann førte også til større variasjoner i fluorescens/klorofyll verdiene i den sørvestlige enn i den nordøstlige enden av anlegget. Omlag 140 meter fra første bøyerække i den sørvestlige enden av anlegget var det forholdsvis lave fluorescens/klorofyll verdier, men også minst variasjon.

Dette viser at strømforholdene og planktonkonsentrasjonene i fjorden har stor betydning både for fordelingen og variasjonene i planktonkonsentrasjonene i et skjellanlegg. I områder med f.eks. stabil strøm i en retning vil planktonkonsentrasjonen reduseres gradvis nedstrøms gjennom skjellanlegget og tidsvariasjonene vil være betydelig mindre enn i et tidevannsdominert system.



Figur 18 Prinsipskisse av en seksjon i et skjellanlegg.

Under stasjonære forhold er det en balanse mellom tilførsel av alger, algeopptak fra skjell og uttransporten av alger i en gitt av seksjon av anlegget mellom x_1 og x_2 .

$$C_{x1} * Ae * V_2 = C_{x2} * Ae * V_2 + C_{mx1,2} * B_{sx1,2} * K_{sx1,2} \quad (10)$$

Hvor C_{x_1} og C_{x_2} (mg/m^3) er henholdsvis planktonkonsentrasjonen inn og ut av seksjonen, A_e (er tverrsnittsarealet (m^2), V_2 (m/s) er strømmen i anlegget, $C_{mx_{1,2}}$ (mg/m^3) er midlere planktonkonsentrasjon i seksjonen, $B_{sx_{1,2}}$ er midlere biomasse av skjell (kg) i seksjonen og $K_{sx_{1,2}}$ er skjellenes midlere filtreringsrate av vann ($\text{m}^3/\text{s}/\text{kg}$ skjell) i seksjonen.

Ligning (10) løses med hensyn på $B_{sx_{1,2}}$:

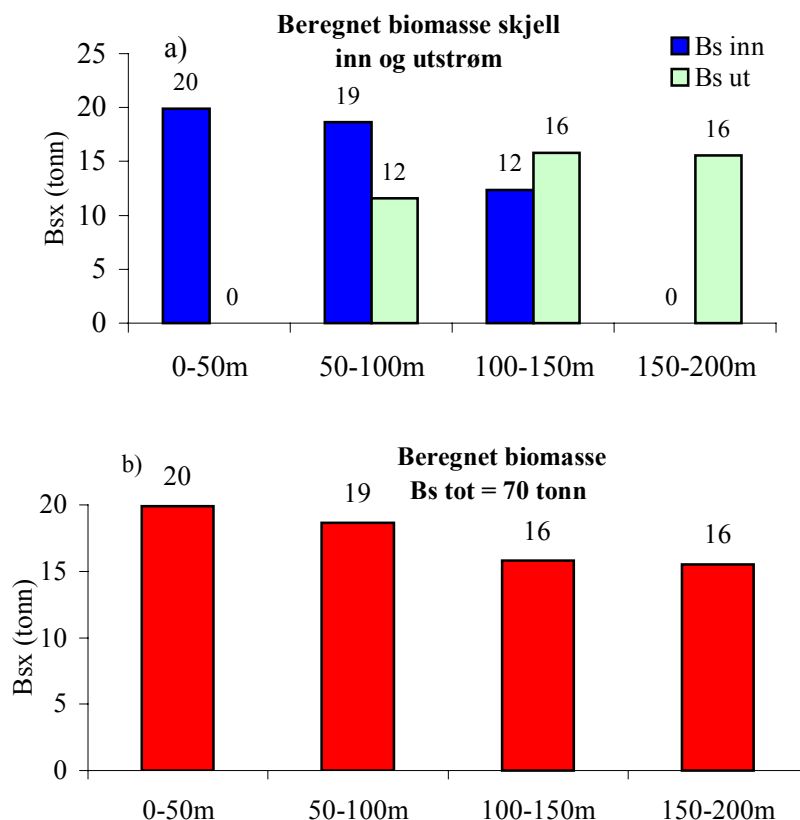
$$B_{sx_{1,2}} = (C_{x_1} - C_{x_2}) * V_2 * A_e / K_{sx_{1,2}} / C_{mx_{1,2}} \quad (\text{kg}) \quad (11)$$

Ved å integrere ligning (9) fra x_1 til x_2 kan vi beregne $C_{mx_{1,2}}$:

$$C_{mx_{1,2}} = (a/3(x_2^3 - x_1^3) + b/2(x_2^2 - x_1^2) + C_1(x_2 - x_1)) / (x_2 - x_1) \quad (12)$$

Vi setter $C_{mx_{1,2}}$ inn i ligning (11) og får:

$$B_{sx_{1,2}} = (C_{x_1} - C_{x_2}) * V_2 * A_e / K_{sx_{1,2}} / (a/3 * (x_2^3 - x_1^3) + b/2 * (x_2^2 - x_1^2) + C_1 * (x_2 - x_1)) * (x_2 - x_1) \quad (\text{kg}) \quad (13)$$



Figur 19 a) Beregnet biomasse skjell i anlegget ved ligning (13), basert på observasjoner b) Beregnet biomasse skjell for seksjonene 0-50m og 50-100m for inngående strøm og seksjon 100-150m og 150-200m for utgående strøm.

$B_{sx1,2}$ kan bestemmes da vi kjenner C_1, C_2, C_3 (figur 17) og V_2 (tabell 1) fra observasjonene. L = lengden av anlegget (200 meter) og innstrømningsareal A_e er 75 m^2 . $K_{sx1,2}$ som er midlere filtreringsrate i hver seksjon, antatt konstant gjennom anlegget. C_{x1} og C_{x2} beregnes ved ligning (9).

På grunnlag av observasjonene er midlere biomasse beregnet for seksjonene 0 - 50 m, 50 - 100m, 100 -150 m og 150 - 200 m for inn - og utgående strøm (figur 19 a). Midlere filtreringsrate for blåskjell er satt til $0,00003 \text{ m}^3/\text{sek}/\text{kg}$ skjell (Oppen – Berntsen, 2000, Rosenberg, 1982) og tverrsnittsarealet A_e er 75 m^2 . Vi ser at for seksjonene 0 - 50 m og 50 - 100 m var B_{sx} tilsynelatende betydelig større ved inngående (ca 20 tonn) enn ved utgående tidevann (0 - 12 tonn). I seksjonen 100 - 150 m var beregnet B_{sx} noe større ved utgående tidevann (ca 16 tonn) enn ved inngående tidevann (12 tonn). B_{sx} i 150 - 200 m seksjonen i den nordøstlige enden av anlegget var ca 16 tonn ved utgående tidevannsstrøm og ca 0 tonn ved inngående tidevannsstrøm. For både inn - og utgående strøm avtok B_{sx} fra 3. seksjon og var ca null i 4. seksjon. Dette kan forklares med at filtreringsraten for skjellene ($K_{sx1,2}$) ble betydelig redusert når konsentrasjonene av fødepartikler (planktonalger) kom under et gitt terskelnivå (se figur 10).

For å unngå innflytelsen av redusert filtreringsrate har vi valgt beregnet B_{sx} for inngående strøm i seksjonene 0 - 50 m og 50 -100 m og B_{sx} for utgående strøm for seksjonene 100 - 150 m og 150 - 200 m (figur 19 b).

Figur 19 b viser at i de to første seksjonene er biomassen av skjell beregnet til ca 20 tonn og i de to siste ca 16 tonn. Total biomasse blåskjell i anlegget i august 2002 blir da ca 70 tonn, fordelt med ca 60 % på de to første og ca 40 % på de to siste seksjonene. Dette stemmer bra overens med opplysninger vi har fått fra driftsansvarlige for skjellanlegget angående biomassen skjell i august 2002 (se foran).

4. BEREGNING AV STRØM, FØDETILGANG OG BÆREEVNE

I det følgende vil vi etablere en enkel modell for beregning av bæreevnen for blåskjell i et skjellanlegg.

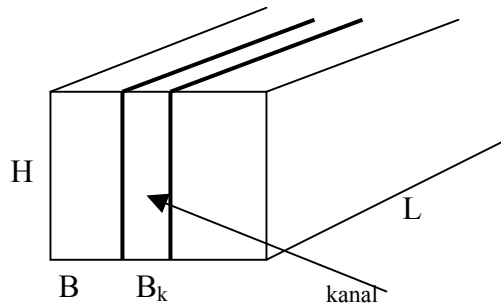
4.1 Beregning av strøm i et skjellanlegg

Vannet som strømmer gjennom anlegget mellom bærelinene påvirkes av friksjonen fra skjellbåndene (strømpene) som i det undersøkte anlegg henger med en avstand på ca 0.5

meter langs bærelinene (se figur 2). Området mellom bærelinene kan tilnærmet oppfattes som "kanaler" gjennom anlegget (figur 20). Friksjonen i en kanal (F_f) kan uttrykkes som:

$$F_f = -\sigma \cdot C_d \cdot P \cdot L \cdot V_2^2 \quad (14)$$

Hvor C_d = friksjonskonstant, P = omkretsen av kanalen som ikke vender mot vann, L = kanalens lengde, V_2 = midlere strømhastighet i kanalen. σ = tettheten av sjøvann.



Figur 20 Prinsippskisse av en "kanal" i skjellanlegget.

Den totale trykkraft som vannet i kanalen utsettes for er:

$$F_p = \sigma \cdot g \cdot A_k \cdot \text{diff } h \quad (15)$$

Hvor $A_k = B_k \cdot H$ er tverrsnittsarealet av "kanalen", g = tyngdens akselerasjon og $\text{diff } h$ er sjøoverflatens naturlige høydeforskjell langs skjellanlegget. $F_p/A_k = \text{diff } P$, hvor $\text{diff } P$ er trykkforskjellen over samme distanse. Når vi antar at bakgrunnsstrømmen V_1 er proporsjonell med $\text{diff } P$ kan vi sette $V_1 = \text{const} \cdot \text{diff } P$. Vi kan nå uttrykke F_p som en funksjon av observert bakgrunnsstrøm (V_1):

$$F_p = A_k \cdot C' \cdot V_1 \quad (16)$$

Hvor $C' = 1/\text{const}$

Når friksjon og trykkraft balanserer hverandre, dvs med konstant strøm gjennom "kanalen", får vi:

$$\sigma \cdot C_d \cdot P \cdot L \cdot V_2^2 = A_k \cdot C' \cdot V_1 \quad (17)$$

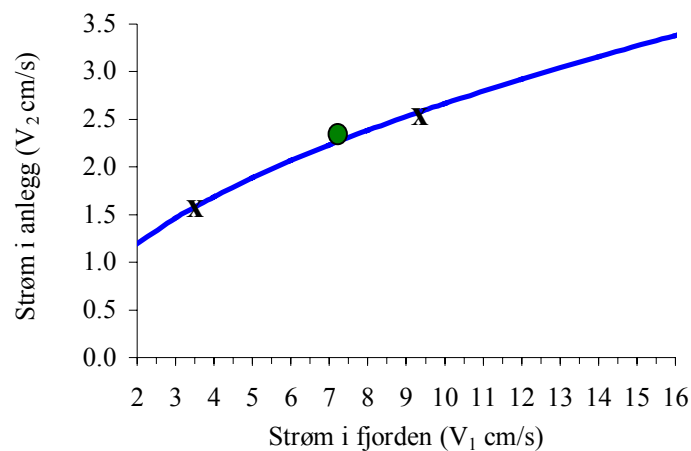
Strømmen V_2 inne anlegget blir da :

$$V_2 = (A_k \cdot C' \cdot V_1 / (\sigma \cdot C_d \cdot P \cdot L))^{0.5} \quad (18)$$

$P = 2H$, hvor H = høyden av skjellbåndene og $A_k = B_k \cdot H$, hvor B_k er avstanden mellom skjellbåndene. σ er tilnærmet lik 1. V_2 kan da uttrykkes som følger:

$$V_2 = (C' / C_d \cdot B_k / (2L) \cdot V_1)^{0.5} \quad (19)$$

I ligning (19) er konstanten C' knyttet til bakgrunnstrømmen, mens friksjonskonstanten C_d for "skjellveggen" varierer bla med størrelsen på skjellene og avstanden mellom skjellbåndene. I skjellanlegget var $L = 200$ m, $B_k = 1.5$ m, midlere inngående bakgrunnsstrøm (V_1) ca 7.5 cm/s og midlere strøm inne i anlegget (V_2) i samme periode var ca 2.2 cm/s (tabell 1). Ut fra ligning 19 er C'/C_d beregnet til 1.9. "Friksjonskonstanten" $C'/C_d = 1.9$ representerer en situasjon hvor blåskjellbåndene henger med ca 0.5 m avstand og hvor skjellene er litt over 2 år gamle (utsatt våren 2000).



Figur 21 Beregnet midlere strøm i anlegget basert på ligning 20.

C'/C_d satt inn i ligning (19) gir :

$$V_2 = (1.9 * B_k / (2L) * V_1)^{0.5} \quad (20)$$

Figur 21 viser at V_2 også ble bra simulert ved ligning (20) med observert midlere utgående strøm på 3.5 cm/s og midlere maksimal inngående strøm på 9.5 cm/s .

V_2 kan også beregnes mhp antall skjellbånd (N):

$$V_2 = (1.9 * B / L / (2N) * V_1)^{0.5} \quad (21)$$

og ut fra total lengde på bærelinene ($L_{bær}$):

$$V_2 = (1.9 * B / (2L_{bær}) * V_1)^{0.5} \quad (22)$$

Hvor B = bredden av anlegget

Med et gitt overflateareal for et skjellanlegg dvs $B \cdot L = A_f = \text{konst}$, viser for eksempel ligning (22) at V_2 er bestemt av bredden av anlegget B (og B/L), den totale lengden av bæreliner i anlegget ($L_{\text{bær}}$) og bakgrunnsstrømmen V_1 .

4.2 Beregning av fødetilgang og bæreevne

Fødetilgang

Fødetilgangen av alger til et skjellanlegg (Q_s) kan uttrykkes som følger:

$$Q_s = A_e \cdot V_2 \cdot C_1 \quad (23)$$

Hvor V_2 er midlere strøm i anlegget, A_e = innstrømningsareal og C_1 = planktonkonsentrasjon i fjorden. Satt inn ligning (22) gir:

$$Q_s = A_e \cdot (1.9 \cdot B / (2L_{\text{bær}}) \cdot V_1)^{0.5} \cdot C_1 \quad (24)$$

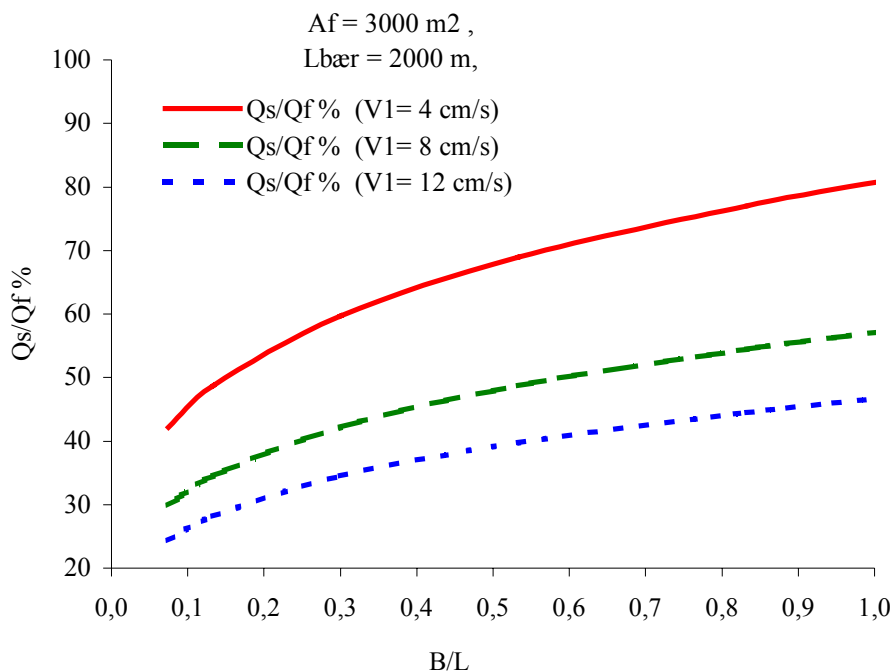
Transport av alger (Q_f) gjennom samme flate A_e i fjorden er:

$$Q_f = A_e \cdot V_1 \cdot C_1 \quad (25)$$

Fødetilgangen i skjellanlegget relativt til upåvirket fødetilgang i fjorden blir da:

$$(Q_s/Q_f) \cdot 100 \% = (1.9 \cdot B / (2L_{\text{bær}}) \cdot V_1)^{0.5} / V_1 \cdot 100 \% \quad (26)$$

Fødetilgangen til et skjellanlegg i % av naturlig fødetilgang i frie vannmasser er bestemt av B (og B/L med konst. A_f), totale lengde på bæreliner i anlegget ($L_{\text{bær}}$) og bakgrunnstrømmen i fjorden (V_1). Figur 22 viser at (Q_s/Q_f) feks øker fra ca 30 % for $B/L = 0.1$ til ca 65 % ved $B/L = 1.0$.



Figur 22. Beregnet fødetilgang (Qs/Qf %) til et skjellanlegg som funksjon av bredde/lengdeforhold (B/L) og strøm i fjorden (V₁). Arealet er 3000 m² og lengden på bærelinene er 2000 meter.

Bæreevne

Bæreevnen (Bsb) er definert som den største biomasse skjell et anlegg kan ha uten at planktonkonsentrasjonene i anlegget reduseres under et gitt terskelnivå (C_{2t}) hvor filtreringsraten for skjellene avtar betydelig (se avsnitt 3.2). Bæreevnen kan da defineres ut fra betingelsen $C_{2t}/C_1 \geq Y$, hvor C₁ er planktonkonsentrasjonen i fjorden. (1-Y)*100 % uttrykker da hvor stor prosentandel skjellene i anlegget kan ta ut av planktonkonsentrasjonen i fjorden. Hvis for eksempel Y = 0,6 kan ca 40 % av planktonkonsentrasjonen i fjordvannet forbrukes av skjellene uten at planktonkonsentrasjonene i anlegget blir lavere enn terskelverdien C_{2t}.

Midlere biomasse skjell (B_{sm}) og bæreevnen (Bsb) i et skjellanlegg kan beregnes når vi antar at det er balanse mellom tilførsel av alger, algeopptaket fra skjell og uttransporten av alger :

$$C_1 * A_e * V_2 = C_2 * A_e * V_2 + C_m * B_{sm} * K_{sm} \quad (27)$$

B_{sm} blir da:

$$B_{sm} = (C_1 - C_2) * A_e * V_2 / K_{sm} / C_m \quad (\text{kg}) \quad (28)$$

Hvor C_1 og C_2 er henholdsvis inn - og utgående konsentrasjon av alger, V_2 er midlere strøm i anlegget, A_e er inn/utstrømningsareal, K_{sm} er midlere filtreringsrate skjell og C_m er midlere konsentrasjon av alger i anlegget.

Når kravet er at $C_2 > C_{2t}$ vil skjellene tilnærmet kompensere redusert planktonkonsentrasjon (C_x) med økende filtreringsrate (K_{sx}) (Denis et al., 1999). Fødetilgangen pr kg skjell ($C_x * K_{sx}$) blir da tilnærmet konstant gjennom anlegget. Under slike næringsforhold vil også biomassen av skjell (B_{smx}) trolig være tilnærmet jevnt fordelt i anlegget. Forbruket av alger ($B_{sx} * C_x * K_{sx}$) gjennom anlegget vil da være tilnærmet konstant .

Dette viser at når $C_2 > C_{2t}$ forventes $C(x)$ å avta tilnærmet lineært gjennom anlegget:

$$C(x) = -(C_1 - C_2)/L * x + C_1 \quad (29)$$

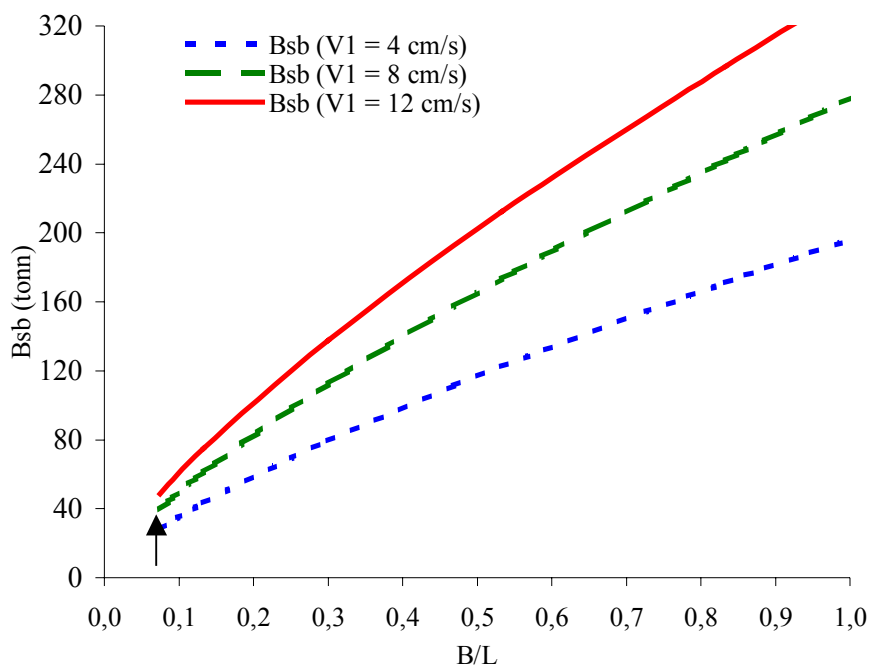
Hvor L = lengden av anlegget

Midlere planktonkonsentrasjon blir da:

$$C_m = (C_1 + C_2)/2 \quad (30)$$

C_m settes inn i lign (29) og vi får:

$$B_{sm} = 2 * (C_1 - C_2) * A_e * V_2 / K_{sm} / (C_1 + C_2) \quad (31)$$



Figur 23 Beregnet biomasse skjell fra ligning (32). $A_f = 3000 \text{ m}^2$, $L_{bær} = 2000 \text{ m}$, $Y = 0,5$ og $K_{sm} = 0,00003 \text{ m}^3/\text{s}/\text{kg}$. (Pilen angir B/L i det undersøkte anlegget).

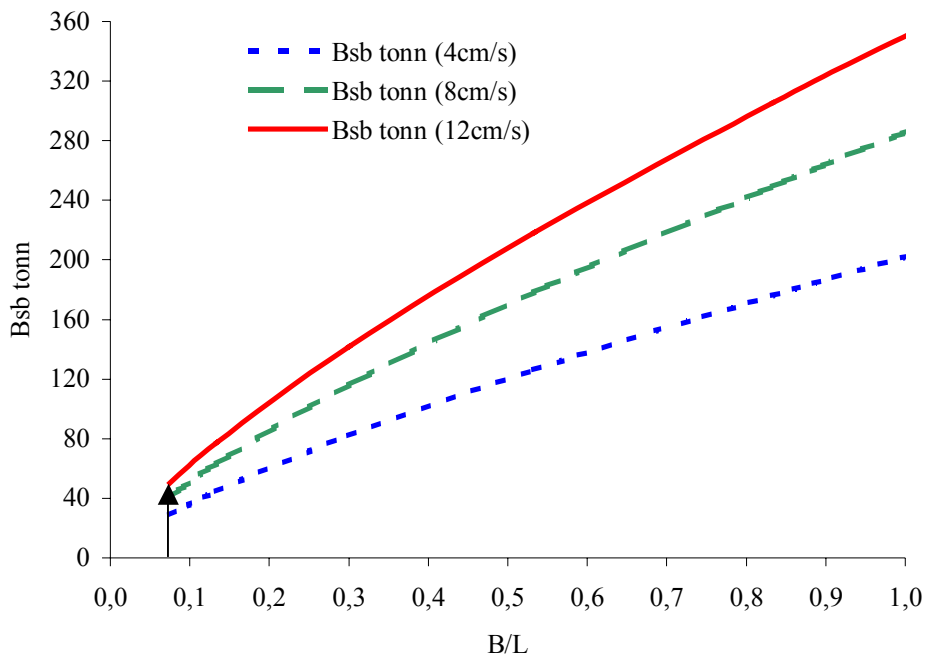
Bæreevnen B_{sb} er igjen definert ut fra betingelsen $C_{2t}/C_1 \geq Y$. Bæreevnen for anlegget kan nå beregnes når vi setter inn V_2 fra ligning (22):

$$B_{sb} = 2 \cdot (1-Y)/(1+Y) \cdot A_e \cdot (1,9 \cdot B / (2Lbær) \cdot V_1)^{0,5} / K_{sm} \quad (32)$$

Bæreevnen for et skjellanlegg B_{sb} kan beregnes når vi kjenner innstrømningsarealet ($A_e = B \cdot H$), bredden (B) og lengden (L) av anlegget, dvs areal (A_f), total lengde på bærelinene ($L_{bær}$), bakgrunnsstrøm (V_1) og $C_{2t}/C_1 = Y$. K_{sm} er en midlere filtreringsrate for blåskjell (som tidligere satt til $0.00003 \text{ m}^3/\text{s}/\text{kg}$ blåskjell).

I beregningene vist i figur 24 er $Y = C_{2t}/C_1 = 0,5$, $A_f = 3000 \text{ m}^2$, $L_{bær} = 2000 \text{ m}$. Fig 23 viser hvordan bæreevnen B_{sb} varierer med bakgrunnstrømmen V_1 og bredde/lengdeforholdet i anlegget. For eksempel øker bæreevnen med faktor på ca 3,6 når B/L økes fra 0,1 til 0,5, med $V_1 = 8 \text{ cm/s}$. Det kommer også klart fram av figuren at med liten B/L (0,1) er friksjonen i anlegget så stor at bæreevnen endrer seg lite med økende strømhastighet i fjorden.

Planktonkonsentrasjonen C_1 kan også uttrykkes som partikulært organisk karbon (POC) (mg/m^3). Om sommeren og tidlig på høsten er typiske POC - verdier i fjorder på Vestlandet ca $180 \text{ mg}/\text{m}^3$ (Aure, Erga og Asplin, 2000). Innholdet av karbon er ca 3,4 % av skjellvekt (Haamer et al, 1999). Skjellene trenger en daglig fødetilgang av karbon på minst 1 % av karbonet i bløtdelens tørrvekt (Gosling, E. (Ed.) 1992, Strand et al , 2002). Dette tilsvarer ca 1 % av karbonet i skjell med 25 % matinnhold



Figur 24. Beregnet biomasse skjell fra ligning (33). $A_f = 3000 \text{ m}^2$, $L_{\text{bær}} = 2000 \text{ m}$, $Y = 0,5$ og $C_1 = 180 \text{ mgC/m}^3$. (Pilen angir B/L i det undersøkte anlegget).

Bæreevnen for anlegget blir da:

$$Bsb = Ae \cdot (1.9 \cdot B / (2L_{\text{bær}}) \cdot V_1)^{0.5} \cdot C_1 \cdot (1-Y) / 0.034 / 0.01 \quad (33)$$

For $Ae = 3000 \text{ m}^2$, $L_{\text{bær}} = 2000 \text{ m}$, $V_1 = 8 \text{ cm/s}$ og $Y = C_{2t}/C_1 = 0.5$ ser vi av figur 24 at Bsb igjen øker med økende B/L, fra ca 50 tonn for B/L = 0.1 til ca 280 tonn for B/L = 1.0.

I avsnitt 3.2 foran er terskelverdien C_{2t} basert på observasjonene i august 2002 antatt å være om lag 1.0 mg/m^3 klorofyll - *a*. Terskelverdien C_{2t} vil imidlertid variere med strømhastighet, planktonkonsentrasjon, algesammensetning, temperturforhold, størrelsen på skjellene osv og foran vises til reduserte filtreringsrater for blåskjell ned mot $0,5 \text{ mg/m}^3$ klorofyll - *a*. Hvis vi for eksempel setter inn $C_{2t} = 1.0 \text{ mg/m}^3$ klorofyll - *a* i ligning (33) kan vi beregne bæreevnen for et gitt anlegg når vi kjenner midlere klorofyll - *a* verdi (C_1) og midlere strømførhold (V_1) for et fjordområde.

I figur 25 er bæreevnen (Bsb) beregnet for et anlegg på 3000 m^2 , bredde 40 m, lengde 75 m (bredde/lengde = 0.53) og hvor lengden på bærelinene er 2000 m. Vi ser for eksempel at

bæreevnen i anlegget øker med en faktor på 2,5 når midlere klorofyll - *a* konsentrasjonene i fjorden øker fra 1,5 - 3,0 mg/m³ med midlere strøm på 8 cm/sek

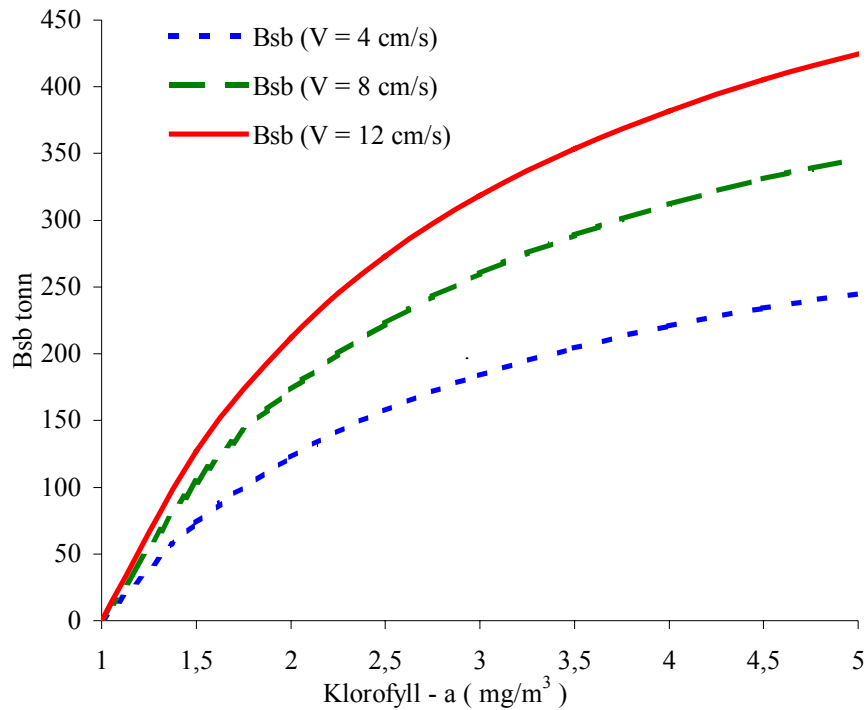


Fig 25. Beregnet bæreevne for et skjellanlegg (B_{sb}) ved ligning (32). $A_f=3000m^2$, $L_{bær} = 2000m$, $K_{sm} = 0,00003 m^3/kg/s$, $B/L = 0,5$. $L = 75m$, $B = 40m$, $C_{2t} = 1,0 mg/m^3$ klorofyll - *a*.

Figur 25 viser også at bæreevnen øker mest med økende strøm ved relativt høye midlere klorofyll - *a* verdier i fjorden.

4. REFERANSER

- Aure, J., Erga, S.R og Asplin, L. 2000. FJORDCULT: Økt biologisk produksjon i fjorder ved kunstig oppstrømning av dypvann. Fisken og Havet NR.11- 2000, Havforskningsinstituttet. 30s
- Clausen I., Riisgård H. U. 1996. Growth filtration and respiration in the blue mussel *Mytilus edulis*: no regulation of the filter-pump to nutritional needs. Mar Ecol Prog Ser. Vol 141. Pp 37-45.
- Dahl E. og Johannessen T. 2001. Relationship between occurrence of *Dinophysis* species (Dinophyceae) and shellfish toxicity. Phycologia Vol 40. Pp 223-227.
- Denis L, Alliot E og Grzebyk D. 1999. Clearance rate responses of Mediterranean mussels, *Mytilus galloprovincialis*, to variations in the flow, water temperature, food quality and quantity. Aquat Living Resour Vol 12. Pp 279-288.
- Dolmer P. 2000. Algal concentration profiles above mussel beds. J Sea Res. Vol 43. Pp 113-199.
- Dolmer P. 2001. Feeding activity of mussels *Mytilus edulis* related to near-bed currents and phytoplankton biomass. J Sea Res. Vol 44.
- Grant J. Dowd K. Thompson K. Emerson C. og Hatcher A. 1993. Perspectives on field studies and related biological models of bivalve growth and carrying capacity. In: Dame R. F. (ed) Bivalve Filter Feeders in Estuarine and Coastal Ecosystem Processes. Springer Verlag, Berlin NATO ASI Series. Vol 33. Pp 371-420.
- Gosling, E. (Ed.) 1992. The mussel *Mytilus*. *Developments in Aquaculture and Fisheries Science*, 25. Elsevier. 590 s.
- Heasman K. G. Pitcher G. C., McQuaid C.D og Hecht T. 1998. Shellfish mariculture in the Benguel system: Raft culture of *Mytilus Galloprovincialis* and the effect of rope spacing on food extraction, growth rate, production, and condition of mussels. J Shellfish Res. Vol 17. Pp 33-39.
- Miljøstyrelsen , Danmark. 1992. Plankton i de indre danske farvande, analyse af forekomst af alger og heterotrofe protister (ekskl. ciliater) i Kattegat 11 1992. Miljøministeriet Miljøstyrelsen.
- Navarro E. Iglesias J. I. P. Perez Camacho A. Labarta U. og Beiras R. 1991. The physiological energetics of mussels (*Mytilus Galloprovincialis*) from different cultivation rafts in Ria de Arosa (Galicia, N. W. Spain). Aquaculture. Vol 94. Pp 197-212.
- Oppen - Berntsen, D.O, Hoell, E. og Bøckmann, T. 2000. Biomediering ved bruk av blåskjell. Norsk Hydro Forskningscenter, Porsgrunn. Rapport F76640. 36 s.
- Rosenberg, R (red) ,1982. Odling av blåmusslor. Bokforlaget Sigmum. ISBN 91-85330-54-X. 127 s
- Riisgård H. U. 1991. Filtration rates and growth in the blue mussel, *Mytilus edulis*, Linnaeus, 1758: dependence on algal concentrations. J Shellfish Res. Vol 10. Pp 29-35.
- Riisgård H. U. og Randløv A. 1981. Energy budgets, growth and filtration rates in *Mytilus edulis* at different algal concentrations. Mar Biol Vol 61. Pp 227-234. Pitcher G. c. og Calder D. 1998. Shellfish mariculture in the Benguela System: Phytoplankton and the availability of food for commercial mussels farms in Saldanha Bay, South Africa. J Shellfish Res. Vol 17. Pp15-25.
- Strand ,Ø., Reisvaag, A., Dahl, E., Duinker, A. og Aure, J., 2002. Kartlegging av grunnlag for etablering av avgiftningsstasjon for skjell på Haugalandet. Fisken og Havet nummer 5- 2002. 41s.
- Travers, M. 1974. Le microplancton du golf de Marseille - schema du cycle annuel, répartition horizontale et verticale. Tethys 6:713-726.

Verity, P. G., C. Y. Robertson, C. R. Tronzo, M. G. Andrews, J. R. Nelson, and M. E. Sieracki. 1992.
Relationships between Cell-Volume and the Carbon and Nitrogen-Content of Marine Photosynthetic
Nanoplankton. *Limnology and Oceanography* 37:1434-1446.