

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING

Brekke

0 - 76088

BOLSTADFJORDEN

EN VURDERING AV VASSDRAGSREGULERINGSINNFLYTELSE PÅ
FJORDENS HYDROGRAFI.

Brekke, 1. september 1980

Saksbehandler: Jan Magnusson

Instituttetsjef: Kjell Baalsrud

NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning



NIVA

Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd

Postadresse:
Postboks 333, Blindern
Oslo 3

Brekke 23 52 80
Gautstadalleen 46 69 60
Kjeller 71 47 59

| |
|-----------------------------|
| Rapportnummer: 0 - 76088 |
| Undernummer: .V |
| Løpenummer: 1228 |
| Begrenset distribusjon: |

| | |
|--|-----------------------------------|
| Rapportens tittel: BOLSTADFJORDEN. EN VURDERING AV VASSDRAGSREGULERINGSINNFLYTELSE PÅ FJORDENS HYDROGRAFI. | Dato: 1.9.1980 |
| | Prosjektnummer: 0 - 76088 |
| Forfatter(e): Jan Magnusson | Faggruppe: |
| | Geografisk område: Hordaland |
| | Antall sider (inkl. bilag): 26 |

| | |
|--|---------------------------------|
| Oppdragsgiver: Voss Elektrisitetsverk | Oppdragsg. ref. (evt. NTF-nr.): |
|--|---------------------------------|

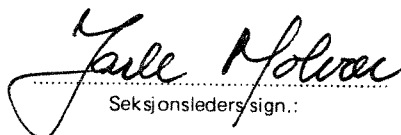
Ekstrakt:

Bolstadfjordens hydrografi blir vurdert ut fra alternative ferskvannstilførsler etter eventuelle vassdragsreguleringer i Vossevassdraget. Fjordens spesielle topografi med terskeldyp på 1.5 meter kan spesielt medføre problemer for dypvannsutskiftningen vinterstid ved at økt ferskvannstilførsel i større utstrekning blokkerer for inntrengende havvann. Beregninger tyder på at overføringer til Evanger kraftverk allerede kan ha vært tilstrekkelig til å forårsake en slik effekt.

| |
|------------------------|
| 4 emneord, norske: |
| 1. Vassdragsregulering |
| 2. Fjordsirkulasjon |
| 3. Dypvannsutskiftning |
| 4. Bolstadfjorden |

| |
|------------------------|
| 4 emneord, engelske: |
| 1. River regulation |
| 2. Fjord-circulation |
| 3. Deep-water exchange |
| 4. Bolstadfjorden |


Prosjektleders sign.:


Seksjonsleders sign.:


Instituttetsjefs sign.:

ISBN 82-577-0300-1

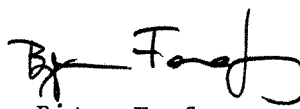
FORORD

Vassdragsrådet på Voss ba NIVA utføre undersøkelser av Vossevassdraget i brev av 11. juni 1976. Hensikten med undersøkelsene er å gi en vurdering dels av forurensningssituasjonen i vassdraget og dels av virkninger av eventuelle nye reguleringer ovenfor Vangen.

Hovedrapporten ble avgitt 13. november 1979. Det er under utarbeidelse rapporter om strømforholdene i Vangsvatnet, om vannkvaliteten i enkelte forurensede bekker og om bunnvegetasjonen i Vangsvatnet og Lønavatnet.

Denne rapporten inneholder en vurdering av hvilken betydning reguleringene kan få for de hydrografiske forholdene i Bolstadfjorden (saltholdighet, sjiktning, utskiftning av vannmassene o.l.). Rapporten er i sin helhet utarbeidet av fil.kand. Jan Magnusson ved NIVAs fjordseksjon.

Brekke, 1. september 1980


Bjørn Faafeng

I N N H O L D S F O R T E G N E L S E

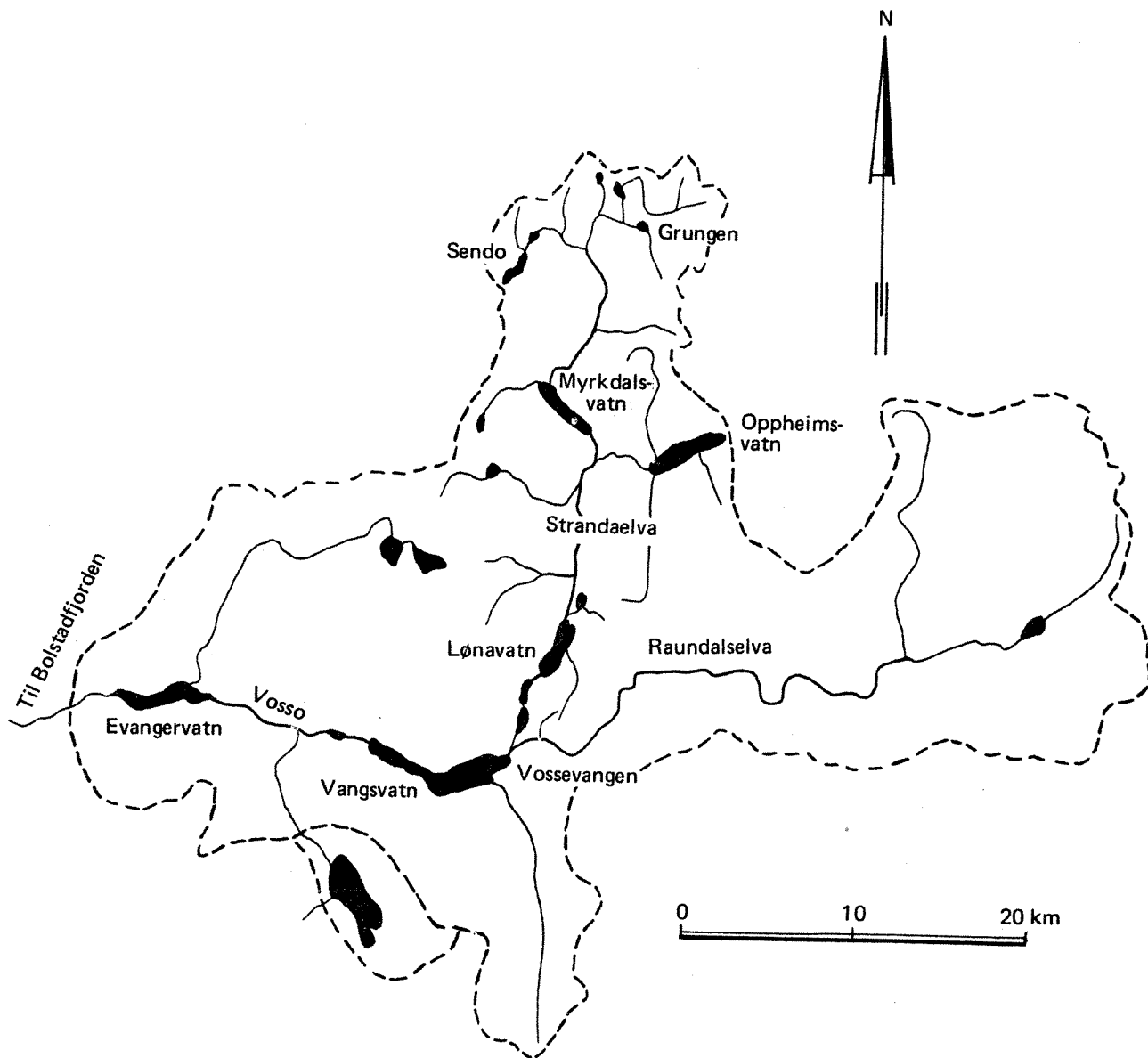
| | Side: |
|---|-------|
| 1. INNLEDNING | 3 |
| 2. PROBLEMSTILLING | 5 |
| 3. TOPOGRAFI | 6 |
| 4. FERSKVANNSTILFØRSELEN | 8 |
| 5. FERSKVANNETS FYSISKE BETYDNING I EN TERSKELFJORD | 13 |
| 6. BOLSTADFJORDENS HYDROGRAFI | 14 |
| 7. STRØMFORHOLD | 16 |
| 8. INNVIRKNING AV ENDRET FERSKVANNSTILFØRSEL | 21 |
| 9. KONKLUSJONER | 23 |
| 10. FORSLAG TIL VIDERE ARBEID | 24 |
| LITTERATUR | 25 |

1. INNLEDNING

Det er planer om ytterligere reguleringer i Vossevassdraget (fig. 1). Derved vil ferskvannstilførselen til Bolstadfjorden påvirkes. Reguleringsplanene er noe diffuse, men følgende alternativer har vært drøftet:

- a) Strandavassdraget reguleres ovenfor Myrkdalsvatn ved en kraftstasjon plassert ved innløpet. Dette betyr omfordeling av vann fra Sendo og Grungen til Myrkdalsvatn fra sommer/vårflom - til vinter. Størrelsen blir avhengig av oppdemningsarealer. I dag er vintervannføringen fra Myrkdalsvatn ca. 50% av den totale vannføringen i Strandavassdraget, dvs. mellom 3-6% av vannføringen i Vosso til Bolstadfjorden. Fra mai-september dominerer tilførselen fra Myrkdalsvatn til Strandavassdraget.
- b) De øverste deler av vassdraget, Sendo og Grungen overføres til andre nedbørfelter. Dette vil trolig medføre en reduksjon av vannføringen i Strandavassdraget med 50% vinterstid og med 30-40% resten av året. Imidlertid vil vannet fortsatt tilføres Bolstadfjorden hvis overføringen skjer til Evanger kraftverk.
- c) Raundalsvassdraget føres ut av nedbørfeltet (til kraftstasjon i Aurland). Dette vil redusere den totale vanntilførselen til Bolstadfjorden med 20-50%.
- d) Raundalselva reguleres ved kraftverk i eget løp. Opplysninger om forandringer i vannføringen foreligger foreløpig ikke.

De ovenfor skisserte reguleringene er i denne rapport vurdert mot eksisterende datagrunnlag fra Bolstadfjorden, som består i undersøkelser av Strøm (1936): "Land-locked waters, Hydrography and bottom deposits in badly ventilated Norwegian Fjords with remarks upon sedimentation under anaerobic conditions", og en doktoravhandling av John Hamilton-Taylor (1974: "The geochemistry of fjords of south-west Norway."



Figur 1. Vossevassdraget.

2. PROBLEMSTILLING

En forandring av ferskvannstilførselen til et fjordsystem kan ha både en lokal og en regional effekt. I denne foreløpige vurdering er den regionale effekten ikke behandlet, men det bør påpekes at flere relativt små lokale forandringer i distribusjonen av ferskvann til kystområdene vil påvirke den generelle sirkulasjonen i kystvannmassene og derved kunne få følger for f.eks. fiskeproduksjonen (se bl.a. Skreslet m/fl. Fresh Water on the Sea 1976). Følgene er imidlertid fortsatt ikke entydig klarlagt (Notat fra Seminar om Vassdragsregulering og Fiskeriressurser, Bergen 1979).

Den lokale effekt av en ferskvannsregulering er av to slag, som begge kan påvirke fjordmiljøet i vid forstand. Sirkulasjonen i fjorden kan forandres ved endret ferskvannstilførsel, noe som kan bidra til å forandre lokalmiljøet ved f.eks. forandrede isforhold og saltholdighet. Forandring i ferskvannstilførselen vil også innebære en forandring i transporter av næringsalter og andre stoffer til og ut av fjorden. Begge faktorer påvirker livet i det marine miljø. For å kunne diskutere eventuelle biologiske/økologiske konsekvenser for fjorden må således først fjordens sirkulasjonsmønster studeres.

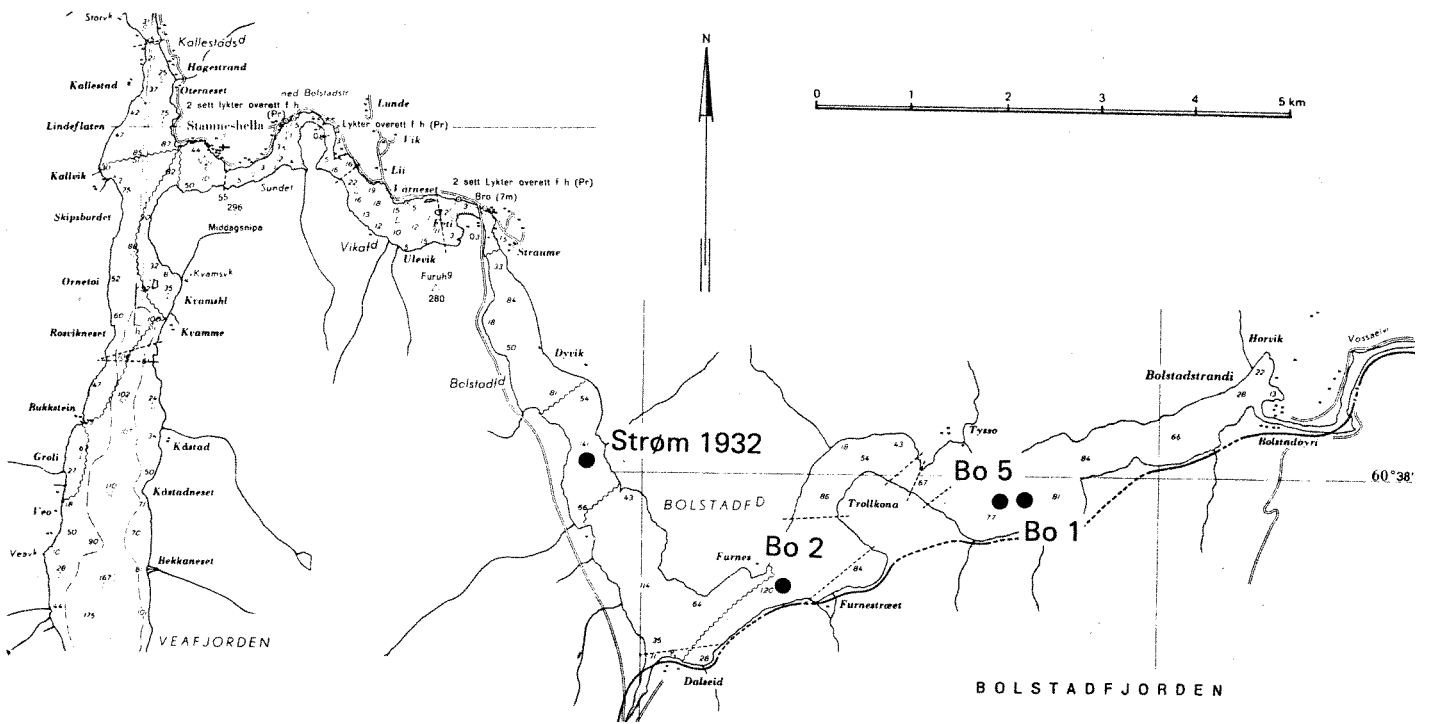
I denne rapport blir kun de fysiske faktorene diskutert i relasjon til antatte forandringer i ferskvannstilførselen. De viktigste fysiske faktorene som påvirkes av ferskvannstransporten vil innvirke på overflatelagets oppholdstid og saltholdighet samt vannutskiftningen i fjorden - prosesser som vertikal diffusjon og dypvannsfornyelser.

3. TOPOGRAFI

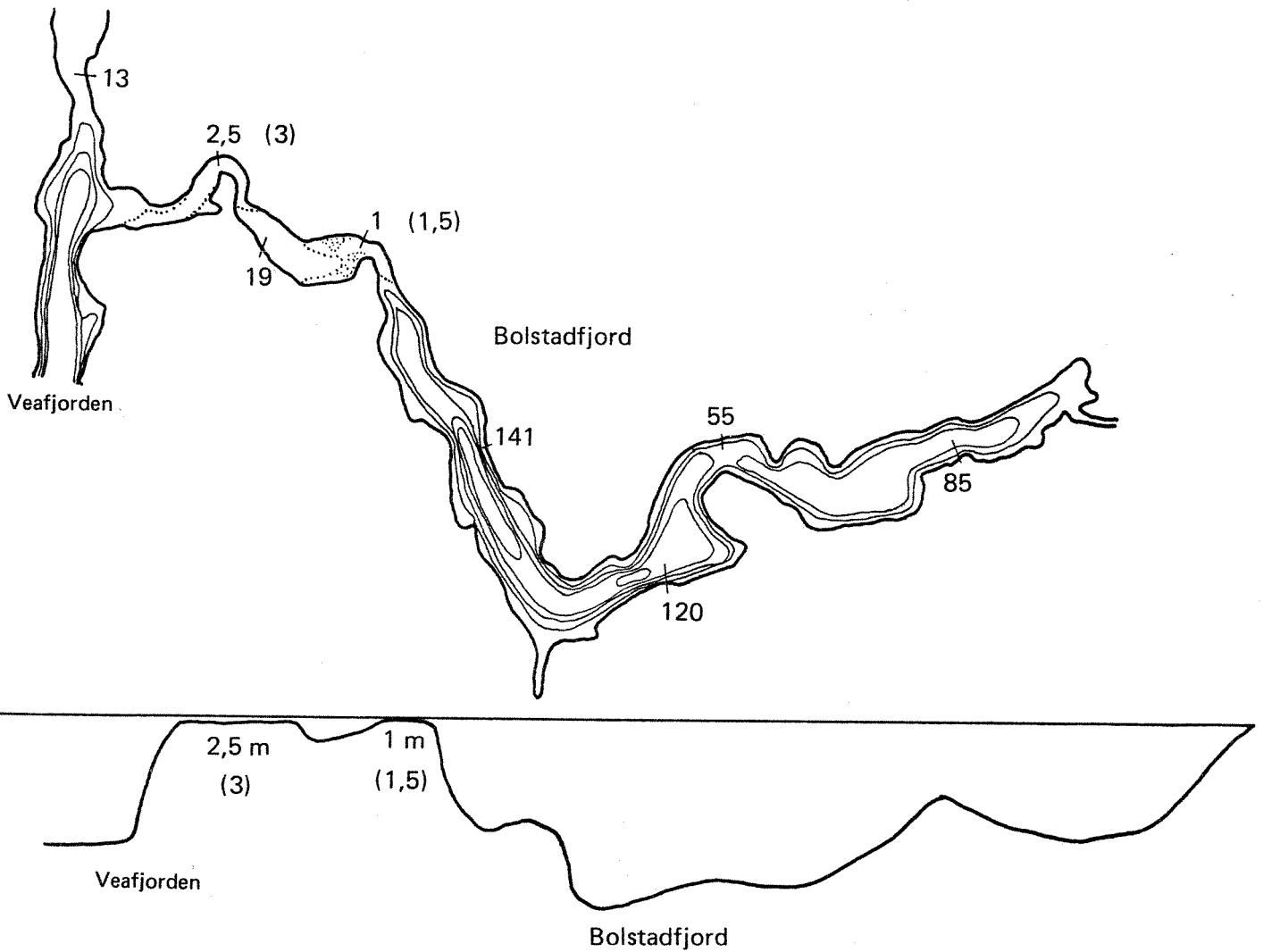
Bolstadfjorden er indre delen av et større fjordsystem innenfor Byfjorden ved Bergen (Sørfjorden, Osterfjorden og Veafjorden). Den står i forbindelse med Veafjorden via et ca. 4.5 km lang "kanallignende" utløp. Utløpsområdet mellom Straume og Stammeshella (se fig. 2) har to terskler - en ytre på ca. 3 meters dyp med en "kanalbredde" på ca. 70 meter innenfor Stammeshella og en indre terskel ved Straume på 1.5 meters dyp med ca. 50 meters "kanalbredde". Mellom tersklene ligger Vikafjorden med dyp over 20 meter.

Bolstadfjordens hovedbasseng er ca. 11.5 km langt med en overflate på 7.11 km². Fjorden er relativt smal med en "midlere" bredde på vel 600 meter. Strøm (1936) har tegnet en langsgående dybdeprofil (fig. 3) av de sparsomme opplysninger som gis av sjøkart (fig. 2). Profilen viser to hovedbassenger, hver på 140 og vel 80 meters dyp, adskilt av en terskel ved Trollkona på ca. 50 meters dyp.

John Hamilton-Taylor (1974) rapporterer fra sine undersøkelser i Bolstadfjorden 1971-72 en opploddet midtprofil som skiller seg fra Strøms profil ved en terskel på 50 meter ved Furnes og terskler på 25 meter ved Trollkona. En mulig forklaring på forskjellene er dypvariasjoner på tvers i fjorden.



Figur 2. Bolstadfjorden.



Figur 3. Bolstadfjordens topografi etter Strøm 1936.

4. FERSKVANNSTILFØRSELEN

For nedbørfeltet til Bolstadjorden må vi bruke omtrentlige tall for vannføring til fjorden da foreliggende oppgaver er unøyaktige. Ved en grundigere behandling av fjordens hydrografi må også ferskvannstilførselen revurderes.

Årsvariasjoner i Vossevassdragets vannføring er beskrevet av NIVA (1979, kap. 4). Beskrivelsen bygger på enkle modeller i mangel på vannføringsmålinger i flere viktige vassdragsavsnitt, som f.eks. Raundalselva. Fig. 4 er hentet fra ovennevnte rapport, og viser den midlere vannføringen (1965-71) i Vosso ved utløpet av Vangsvatnet.

Nedenfor Vangsvatnet ligger Evangervatnet. Evanger kraftverk har utløp i øvre del av Evangervatnet. Kraftverket ble satt i drift i februar 1969 og nedslagsfeltet var da 61 km^2 som med en normal nedbørshøyde på 2600 mm pr. år gir en årlig middelvannføring på $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Fra 1969 til 1975 har nedbørfeltet til kraftverket økt til ca. 246 km^2 eller til en årlig middelvannføring på over $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

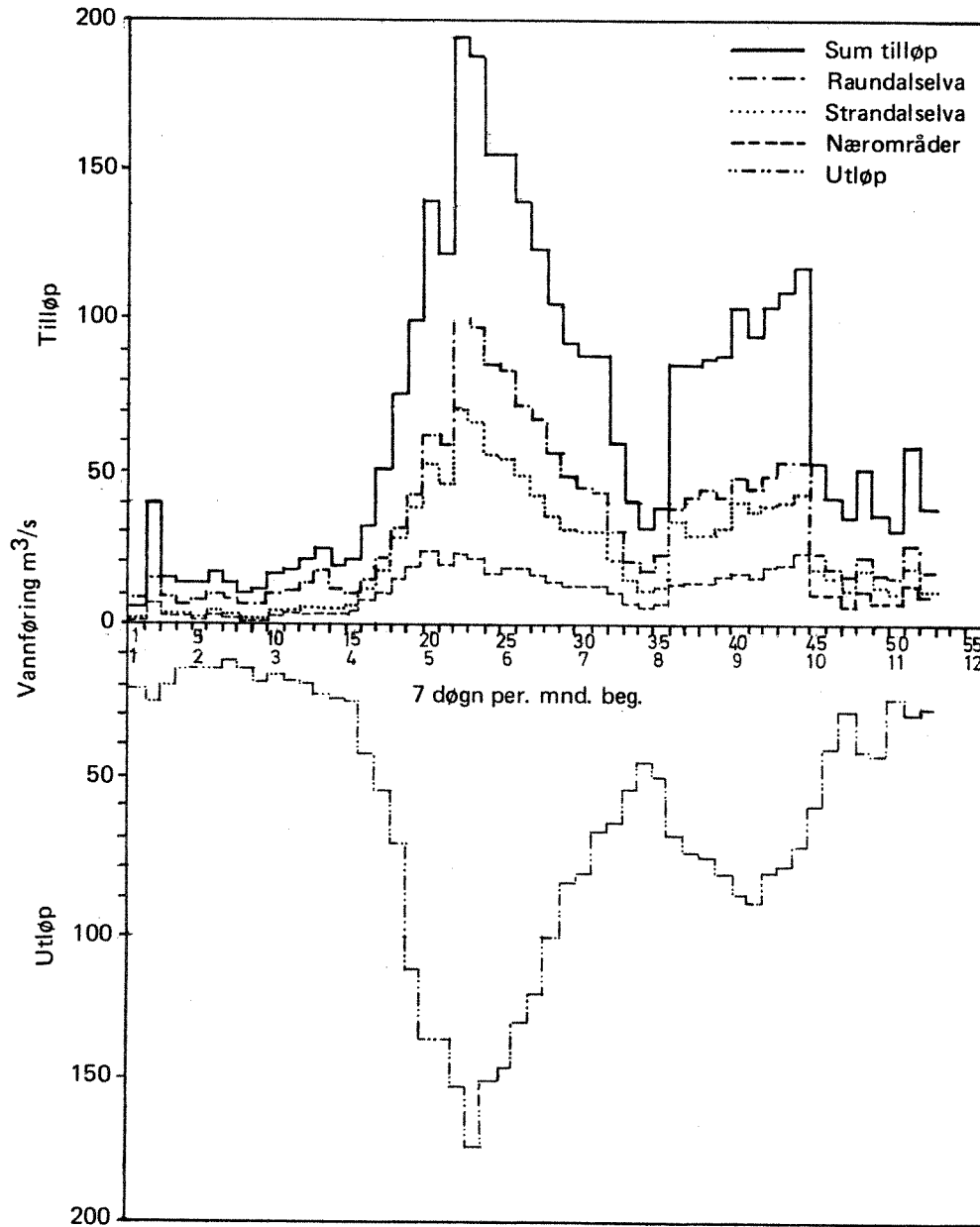
Evanger kraftverk har beregnet følgende vannføring som middel for perioden 1975-79.

Tabell 1. Midlere månedsvannføring (m^3/s) gjennom Evanger kraftverk i perioden 1975-79 inklusive overløp.

| Jan. | Feb. | Mar. | Apr. | Mai | Jun. | Jul. | Aug. | Sept. | Okt. | Nov. | Des. |
|------|------|------|------|-----|------|------|------|-------|------|------|------|
| 23 | 24 | 22 | 19 | 15 | 21 | 32 | 21 | 33 | 21 | 29 | 24 |

Årsvariasjonen kan ligge mellom $9-75 \text{ m}^3/\text{s}$ i middel pr. måned. Vintervannføringen (november til mars) ligger i snitt over $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Sommer og høst kan vannføringen ligge mellom 30 og vel $70 \text{ m}^3/\text{s}$ enkelte måneder. Størst avvik fra "normal" vannføring er i månedene juli til september samt november.

VANGSVATN
Vannbalanse
Middelverdier 1965 - 1971

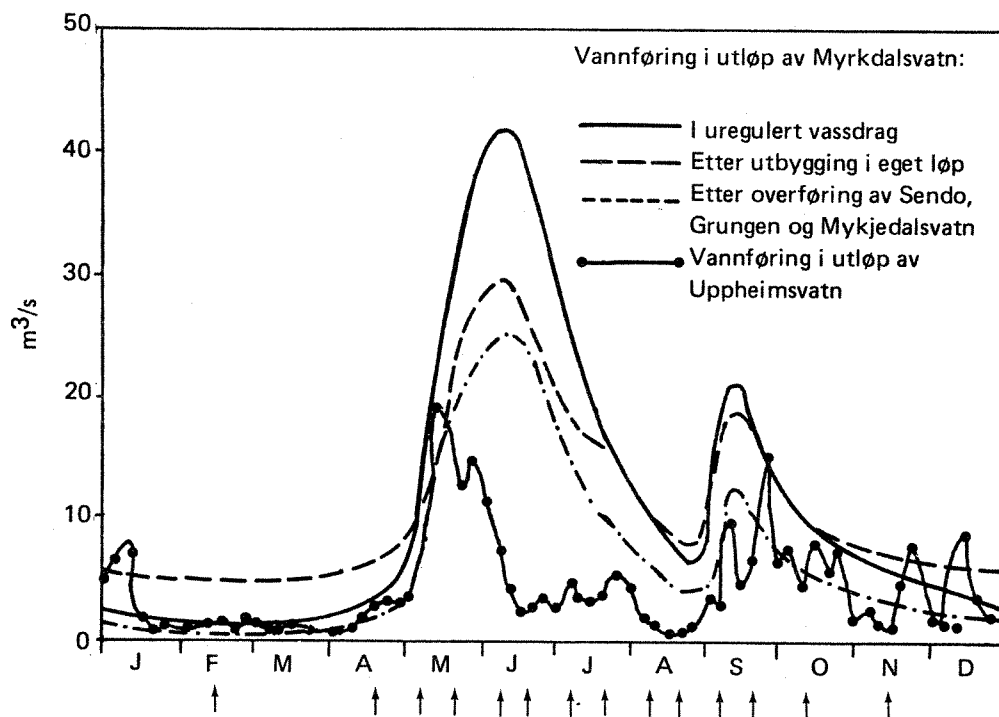


Figur 4. Beregnet vannbalanse for Vangsvatn.

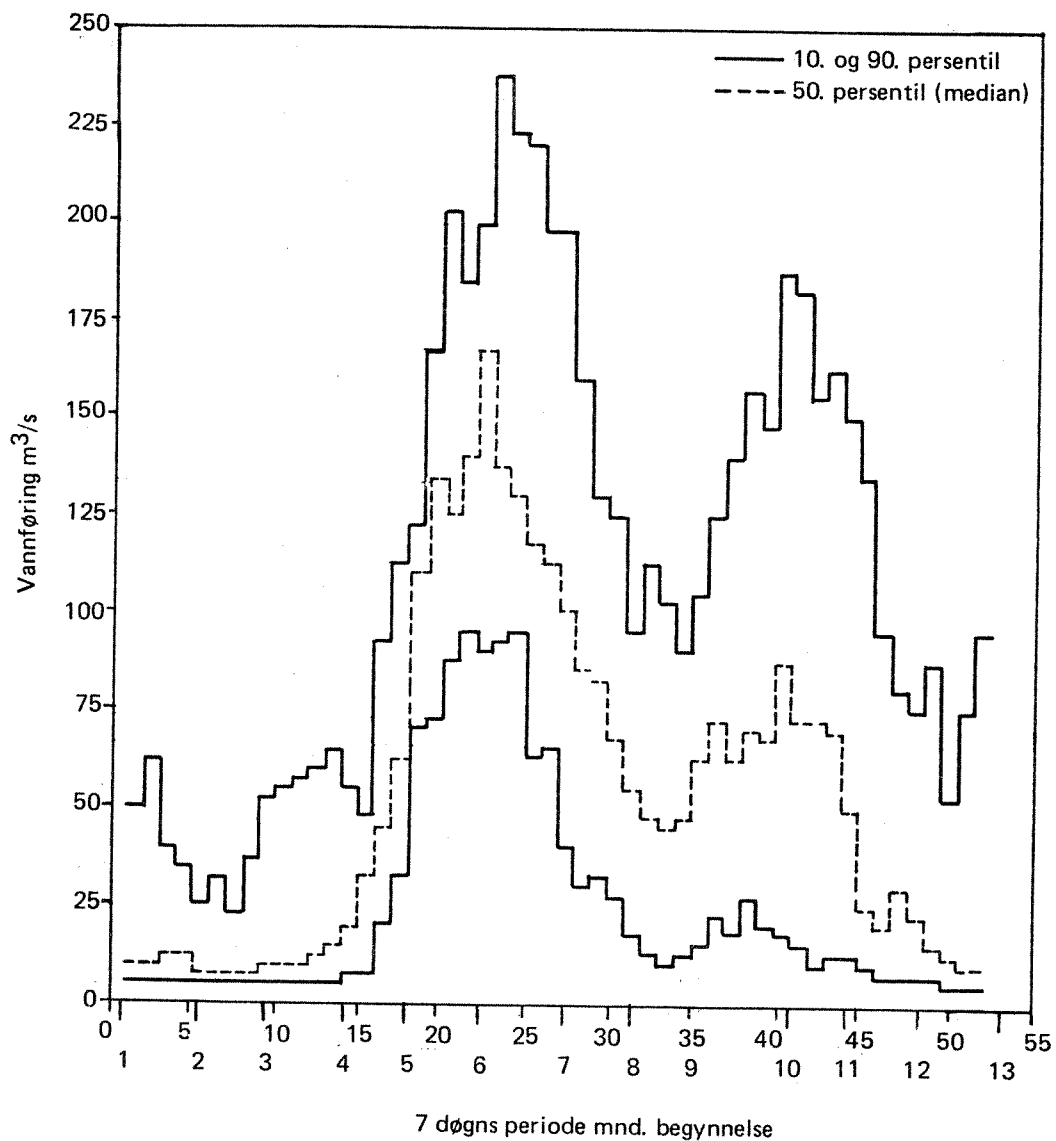
Den totale vannføringen i Vosso er mellom 40-50 m³/s vinterstid med flomtopper i mai-juli på over 150 m³/s, og en mindre høstflom på over 100 m³/s (september-oktober).

Vinterstid bidrar vassdragene som tilflyter Evangervatn med 40-60% av vannføringen i Vosso. Raundalselvas bidrag er 20-40% og Strandaelva 10-30%. Strandaelva mottar omtrent like store mengder vann fra Myrkdalsvatn som fra Oppheimsvatn (fig. 5). I vårflommen bidrar tilførslerne til Evangervatn med beskjedne 10-20% av vannføringen i Vosso, mens Raundalselva bidrar med 35-50% og Strandaelva med 30-35%. I høstflommen ligger vannføringen til vassdragene med utløp i Evangervatn på 20-30% av Vossos vannføring, mens Raundalselva tilfører vassdraget mellom 40-50% og Strandaelva 25-35%. Strandaelvas vannføring domineres av tilførsler fra Myrkdalsvatn fra flommen i mai og til høstflommen (fig. 5).

Figur 6 viser karakteristiske 7-døgn-vannføringer i utløpet av Vangsvatn, dvs. før de betydelige tilførsler til Evangervatn. Variasjonene i tilførslerne til Evangervatn er små utenom i flomperioder da andre tilførsler dominerer vannføringen i Vosso, dette som følge av reguleringen ved Evanger kraftverk. Figuren viser at Vosso har store naturlige variasjoner i vannføringen hvor de største variasjonene vinterstid ligger over medianverdien med variasjoner i området 10-50 m³/s. Derimot er variasjonene under medianverdien vinterstid små. Legger vi dette til den "stabîle" tilførselen via Evanger kraftverk på ca. 20 m³/s vil vannføringen i Vosso sjelden være lavere enn 25-30 m³/s vinterstid. Øvrige deler av året dominerer variasjonene fra Raundalselva og Strandaelva.



Figur 5. Vannføring i Strandaelva.



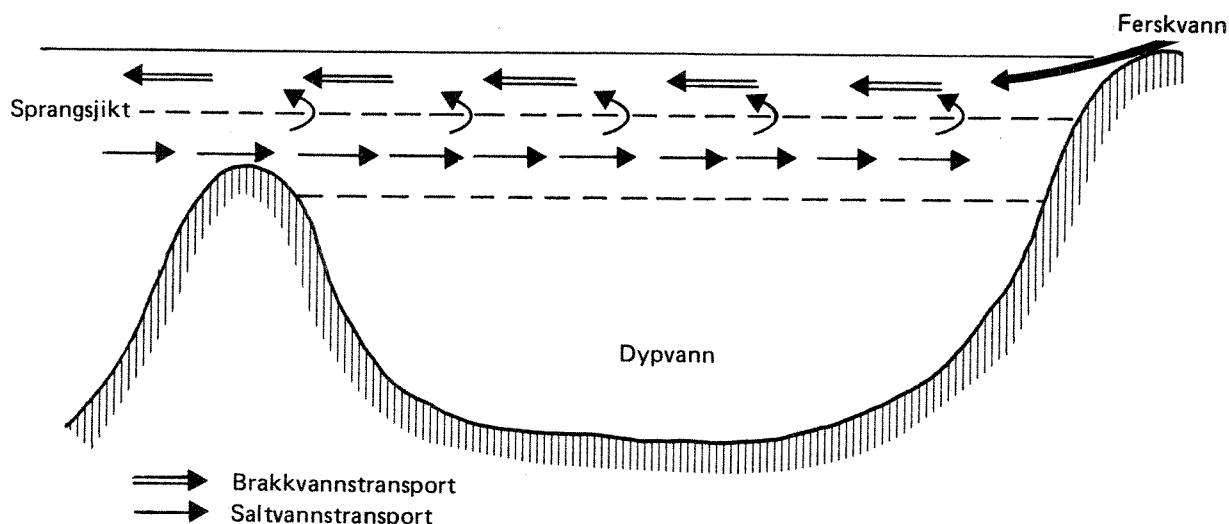
Figur 6. Karakteristiske 7-døgnsvannføring i utløpet Vangsvatn.

5. FERSKVANNETS FYSISKE BETYDNING I EN TERSKELFJORD

Tilførselen av ferskvann til en terskelfjord genererer et sirkulasjonssystem hvor ferskvannet flyter ut over det tyngre fjordvannet. Hvis vi kunne se bort fra blanding ville vannets oppholdstid i fjorden være avhengig av fjordens areal og ferskvannstilførselens størrelse. I virkeligheten føres ferskvannet ut i fjorden på en slik måte at det etter hvert blandes med fjordvannet (turbulens). Under denne brakkvannsmassen strømmer havvann inn i fjorden og kompenserer sjøvannstapet til det utstrømmende laget.

En stadig tilførsel av ferskvann gjør dette strømsystem permanent, og vi har fått hva vi kaller et estuarint sirkulasjonsmønster (Fig. 7). Tykkelsen av det utstrømmende brakkvannslaget og derved dets saltholdighet avgjøres av ferskvannstilførselen, hvordan den skjer i fjorden, av fjordens topografi, spesielt forekomsten av grunnområder som stikker opp i brakkvannslaget, samt fremfor alt av blandingsenergien fra vind og tidevann.

Dypvannet i en terskelfjord er ved terskelen avskåret fra direkte forbindelse med havet, og fornyes kun i de tilfelle tyngre havvann strømmer over terskelen. De faktorer som regulerer dypvannsfornyelsen, er i hovedsak eksterne mekanismer (kystsirkulasjon m.m.). De interne mekanismer er knyttet til eventuell tetthetsreduksjon i dypvannet, dvs. blandingsmekanismer som medfører at mindre salt vann blandes ned i det saltere dypvannet. Tetthetsreduksjonen øker sannsynligheten for dypvannsfornyelser, da en dypvannsfornyelse forutsetter at tettheten i det innstrømmende vannet er større enn dypvannets.



Figur 7. Estuarint sirkulasjonssystem.

6. BOLSTADFJORDENS HYDROGRAFI

Innsamlede hydrografiske data er fra Strøm (1932) i juni 1936, samt fra Hamilton-Taylor i august 1971 og 1972. Fig. 8 viser saltholdigheten i Bolstadfjorden ved de tre toktene.

Gjennomgående har overflatelaget meget lav saltholdighet. Sprangsjiktet ligger på 15-20 meters dyp og det er små horisontale saltgradienter inne i fjorden. Stasjonen innenfor Trollkona (Bo1, fig. 2) hadde ca. 0.2 ‰ lavere saltholdighet enn stasjon Bo2 ved Furnes 2 km lengre ut i fjorden. Nede ved Straume var overflatesaltholdigheten ca. 1.6 ‰, dvs. 0.5 ‰ over stasjonen ved Trollkona. Den midlere saltholdigheten i overflatelaget i fjorden i august 1971 er beregnet til 1.4 ‰ ± 0.4 ‰ i de øverste 12 metre. Ned til 21 meters dyp er midlere saltholdighet 1.6 ‰ for stasjonen ved Furnes og 1.18 for stasjon innenfor Trollkona. Reaksjonsstrømmens saltholdighet¹⁾ er satt til 20 ‰ og andelen ferskvann i overflatelaget er 94% innenfor Trollkona og 91% lengre ut. Ferskvannet har blitt oppblandet med 6-9% sjøvann, en meget liten innblanding.

Brakkvannet fyller fjorden ned til 20 meters dyp, dvs. utløpet i fjorden med terskel på 1.5 meters dyp er ikke tilstrekkelig for å transportere alt ferskvann direkte ut fjorden. I juni 1932 var sprangsjiktet på 16-18 meters dyp liksom i august 1972. Sprangsjiktet er kraftig utviklet. Under sprangsjiktet øker saltholdigheten langsomt ned til 40-50 meters dyp. Nedenfor er saltholdigheten nesten konstant. Dypvannets saltholdighet er nesten den samme gjennom de observerte år - omkring 21 ‰. Temperaturen varierer derimot fra 3.5° til 5.9° C. De lave temperaturene på dypvannet tyder på at dypvannsfornyelser skjer vinterstid. Det er da overflatevann fra Veafjorden som danner dypvann i Bolstadfjorden.

I 1932 observerte Strøm (1936) hydrogensulfid i ytre Bolstadfjorden fra 80 meters dyp mens Hamilton-Taylor (1974) i 1971 registrerte oksygen helt til bunns, dvs. dypvannet fornyes. Sammenligner vi temperaturdata fra indre deler av Bolstadfjorden hadde temperaturen i dypvannet fra august 1971 til august 1972 avtatt fra 5.4°C til 3.7°C. Saltholdigheten var omtrent den samme eller til og med noe lavere i 1972. Nøyaktigheten på det brukte instrumentet var imidlertid ikke bedre enn at forskjellen i saltholdigheten

1) dvs. det saltvann som tildels antas å blandes inn i ferskvannet.

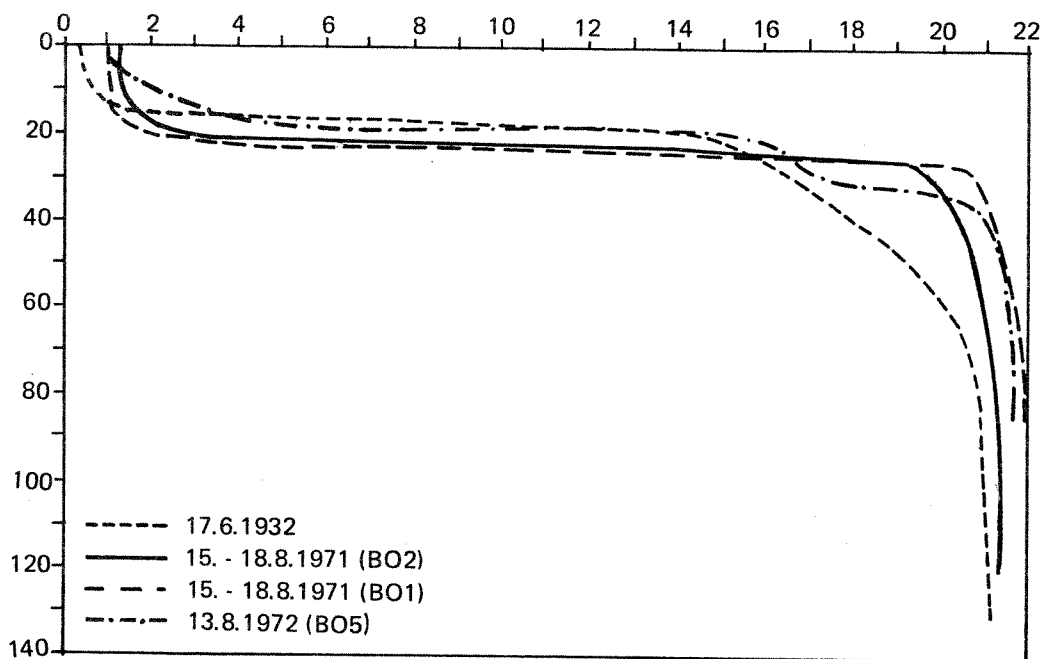


Fig. 8. Saltholdighetsobservasjoner i Bolstadfjorden 1932 (Strøm 1936) og 1971/1972 (Hamilton Taylor).

er innenfor feilmarginen. Temperaturen viste at nye vannmasser strømmet inn i indre fjord og at disse ikke kunne være gammelt dypvann fra ytre deler av Bolstadfjorden når temperaturen her i 1971 var nærmere 6°C . På tross av dypvannsfornyelse ble det målt hydrogensulfid fra ca. 50 meter og dypere i den indre delen av fjorden i 1972. Dette tyder på sterk organisk belastning på fjordens dypvann eller at dypvannsfornyelsen har vært ufullstendig. Det er sannsynlig at dypvannsfornyelser skjer hvert år men at mengden tilført nytt havvann kan variere kraftig.

Det savnes hydrografiske observasjoner fra fjorden vinterstid når ferskvannstilførselen er lavere og saltholdigheten i overflatelaget er mer influert av isdannelse og hydrografiske forhold utenfor terskelen.

7. STRØMFORHOLD

De hydrografiske observasjonene gir et bilde av sirkulasjonen i fjorden med en utstrøm av brakkvann i overflatelaget. Brakkvannstransporten er til tider så stor i forhold til transportkapasiteten i utløpskanalen at vannet stues opp under terskelnivå inne i fjorden. Dette innebærer at tilførselen av ferskvann og kanalens topografi begrenser muligheten for sjøvann fra Veafjorden å trenge inn. Grensen for en slik blokkering er beregnet av Stigebrandt (1975) ved antakelse om friksjonsfri strøm i kanal. Antakelsen om friksjonsfri strøm er for Bolstadfjorden ikke reell. Friksjonen vil minske den nåværende transportkapasiteten. Stigebrandt definerer et estuarint Froudetall,

F_e , som

$$F_e^2 = \frac{Q_f^2}{g\beta S H^3 l^2} \quad \text{hvor } \begin{array}{ll} Q_f & = \text{ferskvannstilførsel} \\ H & = \text{kanalens dyp} \\ l & = \text{kanalens bredde} \\ S & = \text{havvannets saltholdighet.} \end{array}$$

Egenvekten er bestemt fra relasjonen $\rho = \rho_o(1 + \beta S)$ som gir sambandet mellom salinitet og egenvekt. ($\beta \approx 8 \times 10^{-4}$).

Fjorden blir blokkert for havvann når $F_e > 1$. To beregninger for den "blokkerende" ferskvannsmengden er gitt hvor kun saltholdigheten er forandret fra dypvannets verdi inne i fjorden til observert saltholdighet på 4 meters dyp utenfor terskelen.

$$g = 10 \text{ m/s}^2, \quad H = 1.5\text{m}, \quad l = 50 \text{ m}, \quad \beta = 8 \times 10^{-4}$$

$$\text{gir for } S = 21\text{‰}$$

$$Q_f \geq 37 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{for } S = 30\text{‰} \text{ blir } Q_f \geq 45 \text{ m}^3/\text{s}.$$

dvs. for ferskvannstilførsler over $35\text{--}45 \text{ m}^3/\text{s}$ blokkeres sjøvannet av ferskvannet. Dette betyr at estuariet ville vært blokkert for sjøvann ca. 60% av tiden et middelår, eller ca. 30 av 52 uker (fig. 9). I denne beregning inngår ikke vann som tilføres vassdraget ved Evangervatn. Inkluderes nåværende vanntransport ved Evanger kraftverk vil trolig også de siste 22 ukene bli kritiske ved ferskvannstransport på ca. $40 \text{ m}^3/\text{s}$. De observasjoner som foreligger fra fjorden viser at ferskvann i 1932 utgjorde ca. 97% av vannvolumet ned til

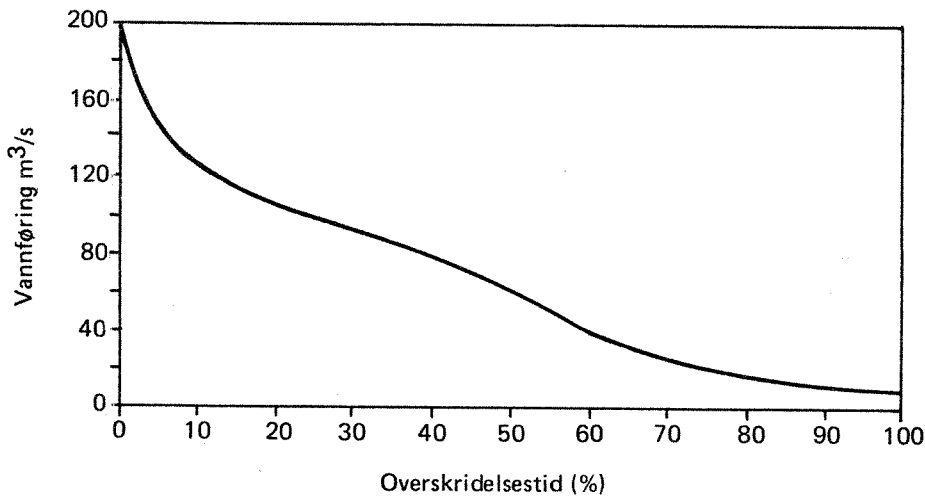


Fig. 9. Vannføring i utløpet Vangsvatn. Midlere årlig varighetskurve.

16 meter (dvs. ca. $110 \times 10^6 \text{ m}^3$). I 1971 utgjorde ferskvannet 92% av vannvolumet til 21 meter, dvs. ca. $137 \times 10^6 \text{ m}^3$, og i 1972 var ferskvannsvolumet i fjorden $115 \times 10^6 \text{ m}^3$. Vannføringsdata fra juli og august i 1971 gir en tilført ferskvannsmengde i middel på vel $86 \text{ m}^3/\text{s}$ beregnet på de 18 døgn som gikk forut for toktet og som tilsvarer ferskvannsvolumet i fjorden, dvs. ferskvannet har en midlere oppholdstid på ca. 18 døgn. Den midlere oppholdstiden 1972 var ca. 20 døgn med den noe lavere middelvannføringen på $62 \text{ m}^3/\text{s}$. Ferskvannets oppholdstid og derved overflatelagets oppholdstid avtar med økende ferskvannstilførsel. Estuariet har under toktene i 1971 og 1972 vært blokkert av ferskvannstilførselen.

Tidevannsstrømmene i området er kraftige. Bergen har en midlere tidevannsforskjell på ca. 0.9 meter (månens og solens halvdaglige komponenter). Tidevannsstrømmene kan bli så sterke at de dominerer over den utgående ferskvannsstrømmen. Størrelsen på tidevannsstrømmene gjennom fjordens utløpskanal er avhengig av fjordareal og tidevannsamplitude utenfor og innenfor kanalen. Amplituden i Bolstadfjorden er i sin tur avhengig av tidevannsbølgens demping først og fremst som følge av innsnevring i Bolstadfjordens utløpskanal. Det ytterste terskelområdet har et midlere dyp på ca. 4 meter og en lengde på 1.7 km. Det indre terskelområdet har et midlere dyp på 2 m og en lengde på 1 km. Den ytre kanalen er mellom 60-160 m bred. Den indre kanalen er mellom 50-100 m bred.

Tidevannsamplituden inne i fjorden vil være mindre enn ved Stammeshella som følge av friksjonseffekter i kanalen og ikke-viskøse dempninger avhengig av lokale akselerasjoner (Glenne and Simensen 1962; Stigebrandt 1980). Det savnes målinger av tidevannsdempningen i Bolstadfjorden, men lokalkjente angir tidevannsforskjellen til ca. 60 cm (Karl Bolstad pers. medd). Dette tall vil vi bruke til å illustrere tidevannstransporten i fjorden gjennom de minste gjennomsnittsarealer i indre terskelområdet som er ca. 1.5 m dyp og 50 m bredt. ($A \sim 75 \text{ m}^2$). Transporten beskrives av en cosinusfunksjon lik

$$Q_t = Q_o \cos \frac{2\pi t}{T}$$

hvor Q_o = transportamplituden.

Figur 10 viser tidevannstransporten over en tidevannsperiode samt midlere årligvarighetskurve (7-døgnsmidler) av vannføringen i Vosso (v/Bulken). Her inngår altså ikke tilførsler fra Evanger kraftverk. Sammenlignes de to kurvene, fremgår at omtrent 26 uker av året er den ukentlige middelvannføringen over $60 \text{ m}^3/\text{s}$ (hvilket betyr at i dette tilfellet vil vanntransporten variere omkring $60 \text{ m}^3/\text{s}$ istedenfor omkring $0 \text{ m}^3/\text{s}$ i figur 10). Tidevannstransporten forskyves altså i forhold til det naturlige svingpunkt ved at den totale innstrømmingstiden avtar og utstrømmingstiden øker. Transporten av vann inn i fjorden avtar således og transporten ut øker ved økende ferskvannstilførsler. Innstrømmingstiden ved ferskvannstilførsel på $60 \text{ m}^3/\text{s}$ og tidevannsforskjell på 0.6 m vil iflg. figuren bli ca. 5 timer, hvor strømmen har samme retning fra overflate til bunn i kanalen ved Straume og uttransporten vil på tilsvarende måte skje under ca. 6.5 timer. I ca. 1 time vil det være to-veis transport i kanalen ved Straume.

Ved økende ferskvannstilførsel avtar inntransporten av vann fra Veafjorden til Bolstadfjorden og uttransporten øker. Ved en ferskvannstilførsel på $200 \text{ m}^3/\text{s}$ beregnes innstrømmingstiden til ca. 2.5 timer når strømmen er lik fra overflate til bunn i kanalen ved Straume. Ukemiddelvannføringer over $200 \text{ m}^3/\text{s}$ overskrides av Vosso annet hvert år.

Tidevannet fører med seg saltere og derved tyngre vann inn i fjorden. Terskelområdet er på 1.3 km^2 og hvis vi antar at dette vannet utgjøres av tidligere utstrømmende fjordvann (brakkvann) ned til 2 meters dyp, vil $2.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ vann i tillegg til den indre ferskvannstilførsel (i middel $60 \text{ m}^3/\text{s}$) dvs. ca. $3.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ vann av et tidevannsvolum på $4.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ være gammelt fjordvann og altså ikke bidra til noen utskiftning. Under midlere ferskvannstilrenning vil således ca. 80-90% av vannstandsforandringen svare til en oppstuing av brakkvann i fjorden, og ca. 10-20% til en egentlig tilførsel av nytt saltvann. Forskjellen mellom sommer og vinter er her selvfølgelig stor. Perioden mai-november er ferskvannstilførselen normalt over $60 \text{ m}^3/\text{s}$ og dette vil minke saltvannstransporten inn i fjorden vesentlig. Vinterstid eller perioden januar-april er normalvannføringen $40-50 \text{ m}^3/\text{s}$ som tilsvarer $0.9-1.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ på 6.2 timer, eller 20-25% av tidevannstransporten. Hvis vi fortsatt antar at vannet på 0-2 meters dyp i terskelområdet er "gammelt" overflatevann fra Bolstadfjorden innebærer dette at 15-20% av inngående tidevann utgjøres av nytt vann fra Veafjorden.

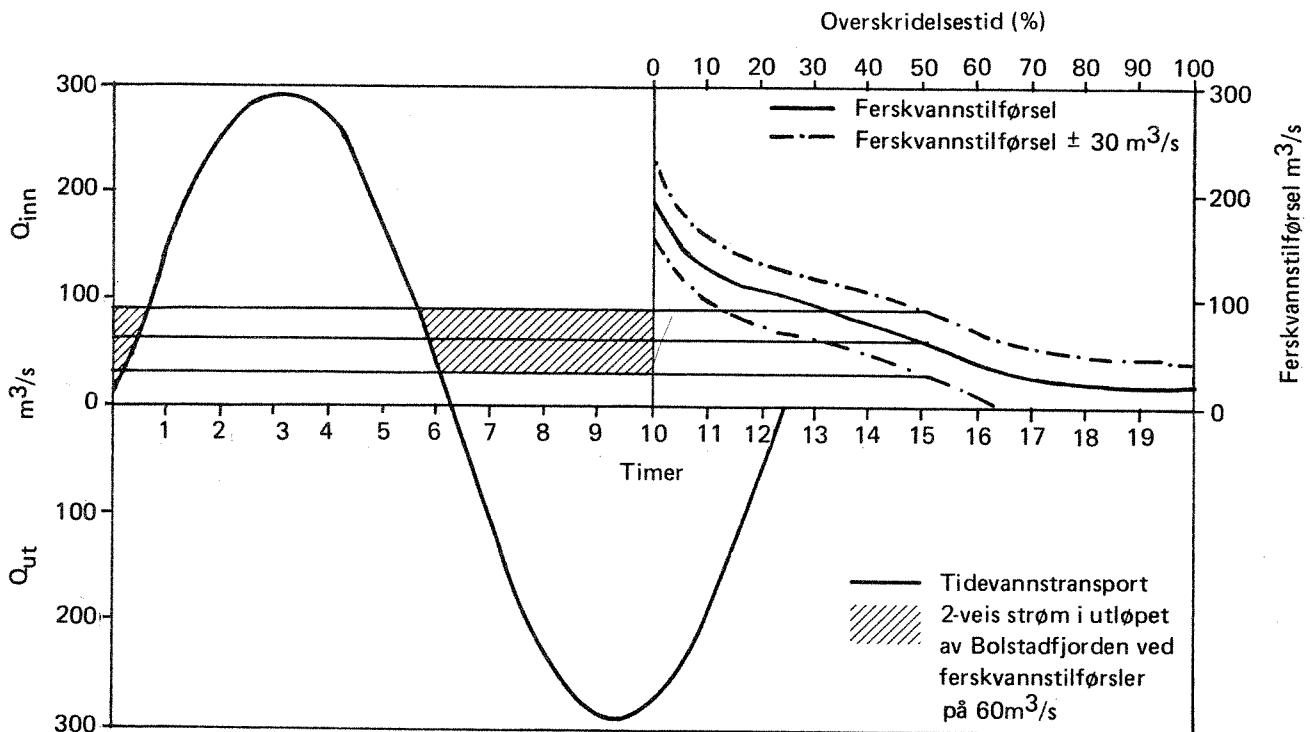


Fig. 10. Beregnede tidevannstransporter til Bolstadfjorden ved antatt amplitude på 0.3m samt midlere årlig varighetskurve (7 døgns midler) av vannføringer ved Bulken (ovenfor Evangervatn).

Saltvann som føres inn med tidevannet vil være tyngre enn brakkevannet i fjorden og derved synke ned under terskelnivået. Når tidevannet snur mot ebb trekkes i hovedsak overflatevann ut fjorden. På den måte "pumpes" saltvann inn og ferskvann ut fjorden. Det tyngre havvannet vil generere turbulens i fjorden og turde være den viktigste blandingsmekanismen for dypvannet.

Videre bestemmer tidevannet trolig vannutskiftningsepisodene ved at inngående tidevann fører med seg nytt dypvann. Denne utskiftningsmekanismen er beskrevet av Edwards og Edelsten (1977) for en skotsk fjord. Det er derfor viktig å opprettholde lav ferskvannstilførsel vinterstid for å få effektive dypvannsutskiftninger. Økt ferskvannstilførsel vinterstid kan medføre tidvis dårligere vannutskiftning. Hvis dypvannsfornyelsen skulle skje kun ved et tidevannsvolum, ville det ta over 2 måneder å fornye alt vann under 50 meters dyp og vel 4 måneder for alt vann under 20 meters dyp. Muligheten finnes for at utskiftningen kan være mer effektiv ved at tidevannet samvirker med ytre trykkeffekter.

Ytterligere en faktor kan stimulere utskiftningen, og det er hvis en har tetthetsreduksjon av dypvannet, dvs. saltinnholdet i dypvannet avtar med tiden som følge av at vertikale "transportprosesser" (diffusjon) blander ferskvann ned i dypvannet. Er denne mekanismen effektiv, vil det innstrømmende saltvannet kunne danne nytt dypvann med lavere egenvekt enn når vertikaldiffusjonen i fjorden er liten. Egenvektreduksjonen i Bolstadfjordens dypvann er ikke kjent og må studeres med observasjoner i felt.

De mekanismer som her er beskrevet og i viss utstrekning beregnet, bygger på usikre antakelser for tidevannsmekanismene i fjorden. Likeså er "pumpeprosessen" av havvann inn i en terskelfjord med tidevannskrefter dårlig kjent, spesielt gjelder det den turbulensgenererende effekt det nedsynkende havvannet vil ha på fjordens dypvann, og derved også ferskvannstilførselens betydning for tetthetsreduksjonen av dypvannmasser i Bolstadfjorden. De eksisterende modeller for videre beregninger av friksjonseffekter og innsnevringseffekter bør ikke brukes uten kontrollerende hydrografiske observasjoner. Samtidig må disse observasjonene kompletteres med målinger av ferskvannstilførselen til Bolstadfjorden.

8. INNVIRKNING AV EN ENDRET FERSKVANNSTILFØRSEL

De foreslåtte planer på regulering vil alle forandre ferskvannstilførselen til Bolstadjorden og derved påvirke følgende mekanismer:

- 1) Den estuarine sirkulasjon
- 2) Dypvannsfornyelsen

Det er klart at de forandrede forhold i terskelområdet blir helt avgjørende for effekten av en eventuell forandring. Spesielt vil en økning av vannføringen vinterstid få betydning for dypvannsfornyelsen ved å minke muligheten for tilførsel av saltvann til fjorden. Med en økning av middelvannføringen med 10-20 m³/s vil tilgjengelig tid for inntransport av havvann avta. Størrelsen på denne transporten og dens egentlige betydning gir ikke de eksisterende data grunnlag for å beregne.

De brukte observasjonene er alle fra tiden før den siste utbyggingen av nedslagsfeltet til Evanger kraftverk. Fra 1969 til 1975 har den årlige middelvannføringen gjennom kraftverket økt fra 5 m³/s til vel 20 m³/s. Idag er således vintervannføringen så høy at vannutskiftningsmekanismene kan ha blitt påvirket negativt. Den videre utbyggingen som inngår i reguleringsplanene for Vosso, skulle innebære at

- a) Strandavassdraget reguleres ovenfor Myrkdalsvatn ved en kraftstasjon ved innløpet, noe som kan øke vannføringen i Strandaelva vinterstid med ca. 3 m³/s. For Vosso innebærer dette en økning av vannføringen vinterstid med 6-7%. Effekten av en slik forandring av ferskvannstilførselen vil idag ikke kunne beskrives kvantitativt fordi eksisterende kjennskap til de estuarine prosesser er for dårlig. De beregninger som kan gjennomføres, også etter at feltmålinger er foretatt, vil ikke være av tilstrekkelig nøyaktighet. En forandring på 6-7% av ferskvannstilførselen vil ikke kunne postuleres etter modeller.

Sommerstid vil reguleringen ikke ha noen betydning for Bolstadjorden.

- b) Ved å overføre de øverste deler av Strandavassdraget, Sando og Grungen til andre nedslagsfelter, vil vannføringen vinterstid til Bolstadfjorden kunne bli redusert med 1-2 m³/s. Dette vil ikke føre til målbare forandringer i Bolstadfjorden.

Vårflommen vil bli noe mindre - i middel omtrent 20 m³/s - som ligger vel innenfor de normale variasjonene og utgjør ca. 10-15% av den midlere vannføringen i mai-juni. Etter vårflommen øker betydningen av vannføringen i Strandavassdraget, men vil likevel ikke reduseres med mer enn 5-10 m³/s i juli-oktober; et middelår med normale vannføringer i Vosso på 80-100 m³/s. Ut fra nåværende kjennskap til fjorden må også dette betraktes som små forandringer. Hvis nedbørfeltene overføres til Evanger kraftverk vil resultatet for Bolstadfjorden kunne bli en omfordeling av vann fra sommer til vinter, noe som vil øke vintervannføringen med kanskje 3-4 m³/s. En slik forandring vil trolig ikke føre til målbare forandringer i fjorden.

- c) Raundalsvassdraget føres ut av nedbørfeltet til Vangsvatn. Denne regulering innebærer en kraftig reduksjon av ferskvannstilførselen vinterstid med 20-40% eller fra en midlere månedsvannføring på 40-50 m³/s til 25-40 m³/s, noe som er en betydelig minking. Den tilsvarer ikke helt økningen fra 1969 av ferskvannstilførsler ved utbyggingen av Evanger kraftverks nedslagsfelt. Vintersituasjonen vil således innebære en forandring mot mer normale ferskvannstilførsler til Bolstadfjorden. Derimot er Raundalselvas bidrag til vannføringen i Vosso i flomperioder opp mot 50%. Dette er et stort inngrep som ikke bør foretas uten nærmere undersøkelse av flomperiodens og ferskvannstilførselens betydning for fjordens sirkulasjonssystem i sommerhalvåret.

9. KONKLUSJONER

De foreløpige konklusjoner om effektene på Bolstadfjorden av eventuelle endringer i ferskvannstilførselen er at en mindre regulering, som en kraftstasjon i innløpet til Myrkdalsvatnet, neppe får noen innflytelse av betydning på sirkulasjonssystemene og derved sammenhengende effekter i Bolstadfjorden. En slik regulering vil, med den størrelse i forandringene som kan beregnes idag, ligge innenfor usikkerhetsmarginen for de modeller som vil kunne appliseres på fjorden også etter kompletterende feltmålinger. Dette gjelder også for alternativet om å overføre Sendo og Grungen til andre nedbørfelter. Et forbehold er at vannføringen ikke forandres mer enn antatt i denne rapporten. Derimot må en overføring av Raundalsvassdraget til annet nedbørfelt antas å medføre betydelige forandringer i Bolstadfjordens sirkulasjonssystem. Forandringene i ferskvannstilførselen vil i dette tilfellet kunne endre oppholdstiden for brakkvann i betydelig grad, samt også påvirke den vertikale diffusjonen og dypvannsfornyelsene. Terskelområdet spesielle topografiske utforming og betydningen av de prosesser som styres av topografien, tidevannet og ferskvannstilførsel krever observasjoner av et helt annet omfang enn de som foreligger.

Til slutt bør det understrekes at reguleringen av nedbørfeltet til Evanger kraftverk og derved økende ferskvannstilførsel vinterstid har vært av en slik størrelse at fjordens vannutskiftningsmekanisme allerede kan ha blitt mindre effektiv. Følgene kan være at hydrogensulfiddannelsen i fjordens dypere vann øker og derved begrenser det marine liv i disse vannmasser. I en ekstrem situasjon kan hele fjordens dypvann bli oksygenfritt. Ved større hydrografiske forandringer kan hydrogensulfidholdig vann komme opp i overflatelaget og også der drepe fisk og annet liv. Det er derfor alvorlig å forandre fjordens sirkulasjonssystem og en bør først klarlegge effekten av den allerede gjennomførte reguleringen innen nye reguleringer iverksettes.

10. FORSLAG TIL VIDERE ARBEIDE.

De felter som bør klarlegges for å kunne se på effekten i Bolstadfjorden av reguleringer i området er først og fremst de fysiske forhold, men dette arbeide bør kompletteres med en biologisk befaring.

Følgende fysiske faktorer bør studeres:

- 1) Tidevannsdempingen mellom Veafjorden og Bolstadfjorden.
- 2) Strømhastigheter og sjiktning i terskelområdet ved flomvannføring, lavvannføring og middelvannføring.
- 3) Det inngående tidevannets innlagring i selve Bolstadfjorden.
- 4) Vertikale diffusjonsprosesser i dypvannet.
- 5) Oksygenforhold i dypvannet og stagnasjonsperiodens lengde.
- 6) Overflatelagets tykkelse og saltholdighet som funksjon av ferskvannstilførselen.
- 7) Isdannelsen.

Litteratur

- Anon, 1979: Mulige effekter av ferskvannsreguleringer på våre fiskeriresurser. Referat fra Seminar om Vassdragsreguleringer og fiskeriresurser i Bergen den 21.5.1979. Utarbeidet av forskere ved Fiskeridirektoratets Havforskningsinstitutt.
- Edwards, A. and Edelsten, D.J., 1977: Deep Water Renewal of Loch Etive: A three Basin Scottish fjord. Estuarine and Coastal Marine Science, 5.
- Glenne, B. and Simensen, T., 1963: Tidal current choking in the Landlocked Fjord of Nordåsvatnet. SARSIA 11.
- Hamilton-Taylor, John, 1974: The geochemistry of fjords of south-west Norway. Ph.D-thesis, Univ. of Edinburgh. 138 pp. Stensil.
- Norsk institutt for vannforskning, 1976.
Program for undersøkelse av Vossevassdraget. O-88/76. B.Faafeng.
- Norsk institutt for vannforskning, 1979.
En undersøkelse av Vossevassdraget 1977, O-88/76. B.Faafeng og medarb.
- Skreslet, S., Leinebø, R., Matthews, J.B.L., Sakshaug, E (Editors): 1976: Fresh water on the sea. Proceedings from a symposium on the influence of fresh-water outflow on biological processes in fjords and coastal waters, 22-25 April 1974, Geilo, Norway. The Association of Norwegian Oceanographers, Oslo 1976.
- Stigebrandt, A.T., 1975: Stationær två lagerstrømning i Estuarier. Vassdrags- og Havnelaboratoriet, Trondheim.
- Stigebrandt, A.T., 1976: An the Effect of Barotropic Current Fluctuations on the two-layer Transport Capacity of a Constriction. Journal of Physical Oceanography, Vol. 7.
- Stigebrandt, A.T., 1980: Some aspects of tidal interaction with fjord constrictions. Estuarine and Coastal Marine Science Vol. 10, nr. 11.

Strøm, K.M., 1936: Land-locked waters. Hydrography and bottom deposits in badly ventilated Norwegian fjords with remarks upon sedimentation under anaerobic conditions. Skr. Norske Vidensk. Akad., Oslo.