

867

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING

BLINDERN

O - 152/73

TYRIFJORDEN OG DENS FORURENSNINGSSITUASJON

Problemmotat

av Hans Holtan

6. 1. 1977

INNHOILDSFORTEGNELSE

	Side
1. BRUKSINTERESSER I TYRIFJORDEN	4
2. BRUKSPLAN FOR TYRIFJORDEN OG TILHØRENDE NEDBØRFELT- BEHOVET FOR UNDERSØKELSER	5
3. TYRIFJORDENS UTVIKLING	5
3.1 Generelt	5
3.2 Data om Tyrifjorden	6
3.3 Naturbetingede faktorer	6
3.4 Menneskelig inngrep og vurdering av disse	11
3.5 Forurensningsbelastning	13
3.6 Tyrifjordens kjemiske vannkvalitet	15
3.7 Biologiske forhold i Tyrifjorden	17
4. PRINSIPPUTFORMING AV ET UNDERSØKELSESPROGRAM	18
4.1 Målsetting for undersøkelsesprogrammet	18
4.2 Oppbygging og utforming av undersøkelsen	19
5. FORSLAG TIL RAMMEPROGRAM	21
5.1 Registrering av tilførsler og avløp	21
5.2 Undersøkelsesprogram for Tyrifjorden	22
5.2.1 Strender og bunnområder	24
a) Sedimentundersøkelse	24
b) Høyere aquatisk vegetasjon (makrofytter)	24
c) Bentos	24
5.2.2 Frie vannmasser	25
a) Hydrologi/strømningsforhold	25
b) Vannkjemi	26
c) Biologiske forhold	26
6. UTFØRELSE OG OMKOSTNINGER	30
LITTERATUR	31

### TABELLFORTEGNELSE

	Side
1. Data om Tyrifjorden, Mjøsa, Norsjø, Gjersjøen, Mälaren, Lake Erie.	9
2. Tyrifjordens nedbørfelt. Arealfordeling og bosetting.	12
3. Spesifikke avløpstall.	13
4. Transport av næringsalter til Tyrifjorden, basert på 1967-tall (industri, silo o.l. er ikke tatt med).	13
5. Næringssaltkonsentrasjonen i $\mu\text{g P/l}$ og $\mu\text{g N/l}$ om våren.	15

### FIGURFORTEGNELSE

1. Innsjøens næringsnivå.	7
2. Tyrifjorden. Oversiktskart over nedbørfelt.	8
3. Forbruket av N, P og K i handelsgjødsel i Norge.	11
4. Fosforbelastning i relasjon til middel dybde for noen større innsjøer i Sveits, Nord-Amerika, Finland, Sverige og Norge. (Etter Vollenweiders (1968) eutrofimodell.)	16
5. Modell av produksjonssystemet i en innsjø.	19
6. En forenklet næringskjede i en innsjø.	22

## 1. BRUKSINTERESSER I TYRIFJORDEN

Tyrifjorden er ikke bare en naturperle og en del av et enestående naturlandskap, den er også på forskjellige måter av stor praktisk verdi for lokalsamfunnet (innsjøens lokale nedbørfelt) og for store befolkningsgrupper utenfor dette. Innsjøen brukes i dag som vannkilde for en rekke oppsittere og hytteeiere i omegnen, og den benyttes både direkte og via tilløpene (Storelva, Sokna m.fl.) som resipient for kommunalt så vel som industrielt avløpsvann. I likhet med andre store vassdragssystemer anvendes den også for fiske, båtsport, rekreasjon og for en rekke andre gjøremål. Blant annet på grunn av innsjøens nære beliggenhet til Oslo er den og dens nedbørfelt i utstrakt grad benyttet i rekreasjonssammenheng.

Den økende velstandsutvikling stiller stadig større krav til et godt miljø, og rent vann kommer sikkert til å bli en av de aller viktigste deler av vår levestandard. Samtidig kan man vente seg stadig sterkere ønsker om å utnytte innsjøene og deres nedbørfelt til forskjellige formål. Den mest aktuelle bruksinteresse som direkte berører Tyrifjorden er Oslo-områdets planer om å utnytte den som drikkevannskilde. Asker, Bærum og Oslo har i lengere tid arbeidet med planer om å bruke Tyrifjorden som drikkevannskilde. Dessuten er innsjøen potensiell vannkilde for Drammensområdet og ved eventuell samkjøring også for områdene øst for Oslo/Oslofjorden.

I fremtiden er det grunn til å tro at "verdien" av Tyrifjorden vil øke sterkt. I løpet av de senere år har spesielt de store vannsystemer fått en stadig mer mangesidig anvendelse. Den nåværende utnyttelse vil trolig i et lengre tidsperspektiv vise seg å føre til konsekvenser som har uheldige samfunnsmessige sider. En verdsettelse av en innsjø med utgangspunkt i dagens anvendelse vil derfor sikkert føre til en underestimering av den langsiktige verdi.

## 2. BRUKSPLAN FOR TYRIFJORDEN OG TILHØRENDE NEDBØRFELT - BEHOVET FOR UNDERSØKELSER

For å sikre en god vannressursforvaltning for Tyrifjorden, mener vi det bør utarbeides en bruksplan (eller "flerbruksplan"). En bruksplan kan defineres som en nedbørfelt-avgrenset sektorplan for utnyttelse og vern av vannressurser. Slike planer må inneholde faglige anvisninger og forslag til tiltak innenfor hele spektret av brukerinteresser. Bruksplanen må inneholde avveininger av forskjellige brukerinteresser, noe som innebærer politiske valg. For å treffe slike valg må konsekvensene av de tiltak som foreslås presenteres.

En bruksplan for Tyrifjorden må utformes slik at den kan få innpass i oversiktsplaner etter bygningsloven, i første rekke fylkesplanen for Buskerud. For å kunne treffe valg om riktig bruk av Tyrifjorden i dag og i fremtiden, står kunnskap om Tyrifjorden og hvordan denne oppfører seg ved påvirkninger av ulike typer helt sentralt.

En bruksplan må hvile på vel funderte faglige avgjørelser for å ha noen reell verdi. Det kunnskapsgrunnlag vi i dag har av Tyrifjorden er langt fra tilstrekkelige og videre undersøkelser er helt nødvendige.

## 3. TYRIFJORDENS UTVIKLING

### 3.1 Generelt

Inntil for få år siden har store, dype innsjøer som Mjøsa, Tyrifjorden, Norsjø m.fl. i folks bevissthet blitt betraktet som usårbare med hensyn til forurensninger. De negative virkninger som tross alt oppsto ved utslipp av forurensninger, betraktet man bare som problemer av lokal karakter uten avgjørende betydning for innsjøens hovedvannmasser. Utviklingen i en rekke store innsjøer verden over, som i for sterk grad er blitt belastet med avløpsvann (Lake Ontario, Lake Erie, Bodensee, Zürichsee, Lago Maggiore osv.), har vist at denne bedømmelse var fullstendig feilaktig. Forurensningssituasjonen i Mjøsa er det ferskeste og mest drastiske eksempel på en

slik utvikling i vårt land. Tyrifjorden, i likhet med andre innsjøer, utgjør en integrert del av et større geografisk område som har en avgjørende innvirkning på vannets kjemiske kvalitet og den biologiske produksjon i innsjøen. Kjennskap til Tyrifjordens materialballanse er derfor en grunnforutsetning for bedømmelse av vannets kvalitative forandring og dermed av mulighetene for i fremtiden å benytte innsjøen til ulike formål.

Innsjøen kan betraktes som et produksjonssystem som tilføres råvarer og energi og som produserer vann av en viss kvalitet. Forbindelsen mellom de faktorer som påvirker vannets kjemiske sammensetning og den biologiske produksjon innenfor dette system er skjematisk anskueliggjort i fig. 1. Figuren viser at så vel eksterne som interne fysiske og kjemiske faktorer påvirker den biologiske balanse. Inngrep i deler av dette produksjonssystem kan derfor få konsekvenser for systemet som helhet. I det følgende skal det presenteres en del bakgrunnsdata som i noen grad belyser utviklingen i Tyrifjorden og som kan tjene som grunnlagsmateriale ved utarbeidelse av et forsknings/overvåkningsprogram for innsjøen.

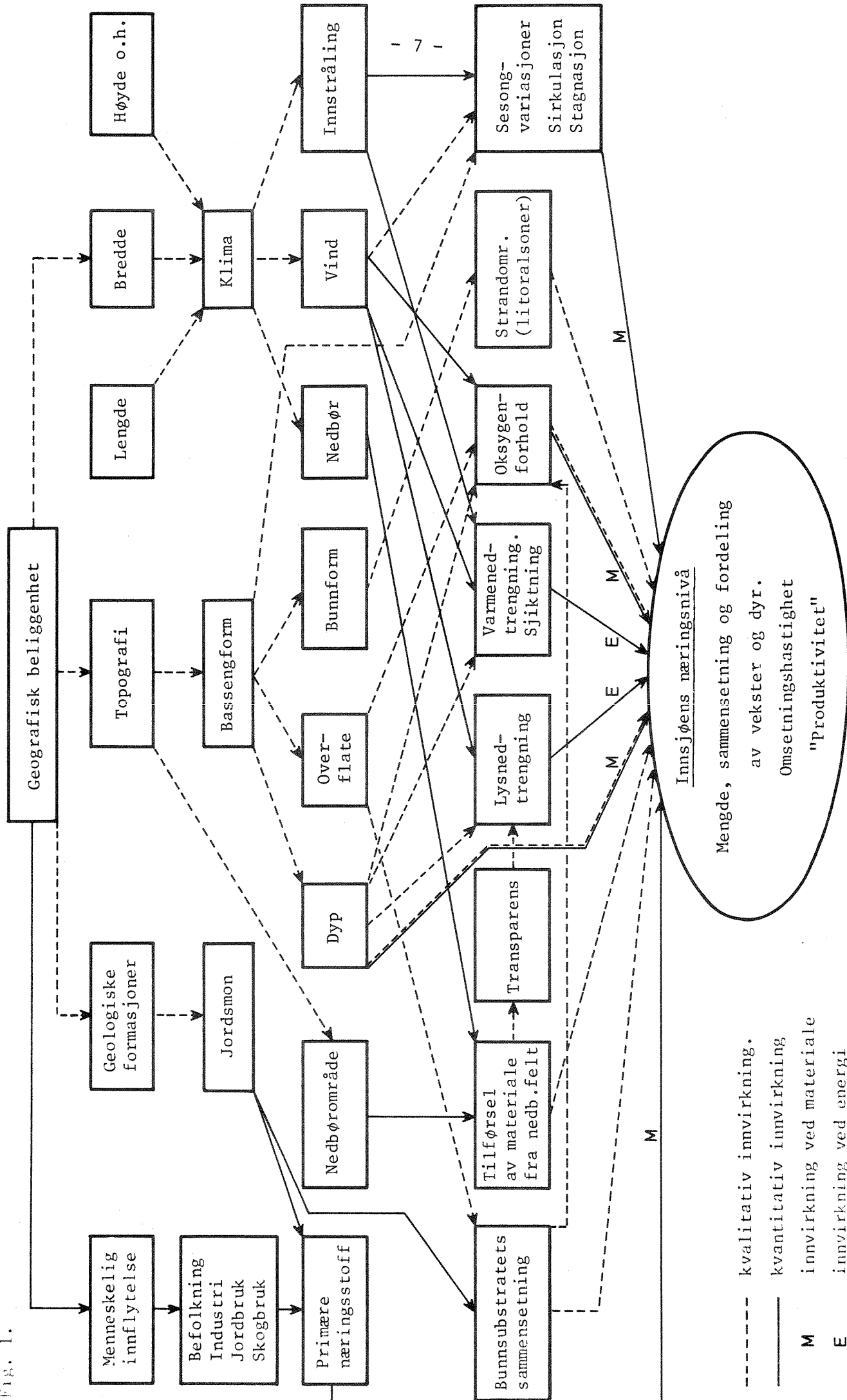
### 3.2 Data om Tyrifjorden

Tyrifjorden (Holsfjorden) (fig. 2) har et overflateareal på ca. 121,3 km<sup>2</sup>, et volum på bort imot 14 km<sup>3</sup>, største dyp på 295 m og et middeldyp på 114 m. Nedbørfeltet er på 9808 km<sup>2</sup> og den midlere vannføring ved utløpet (Vikersund) er 170 m<sup>3</sup>/sek. Vannmassenes teoretiske oppholdstid er 2,6 år (den teoretiske oppholdstid for Mjøsa er 5,6 år). I tabell 1 er morfometriske og hydrologiske data for Tyrifjorden jevnført med tilsvarende data for andre store innsjøer.

### 3.3 Naturbetingede faktorer

Den geografiske beliggenhet innvirker så vel kvalitativt som kvantitativt på produksjonen i en innsjø. Nedbøren varierer regionalt innenfor nedbørområdet fra årstid til årstid og fra år til år. Materialtransporten til innsjøen varierer således sterkt med tiden. Vinden endrer forutsetningen for lysets og varmens nedtrengning, for sjiktningsforholdene og for vannets evne til å ta opp oksygen. Innstrålingen påvirker varmetilførselen, sirkulasjonen, stagnasjonen og vegetasjonsperiodens lengde.

Fig. 1.



- - - - - kvalitativ innvirkning.  
 ————— kvantitativ innvirkning  
**M** innvirkning ved materiale  
**E** innvirkning ved energi

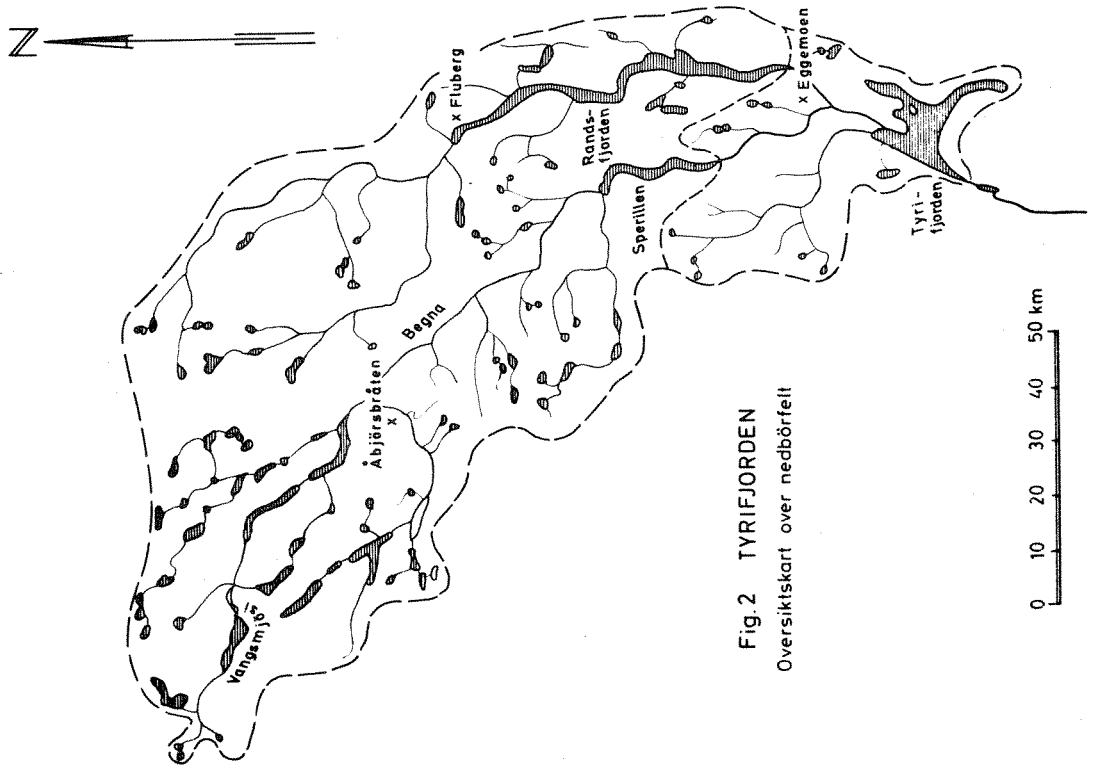
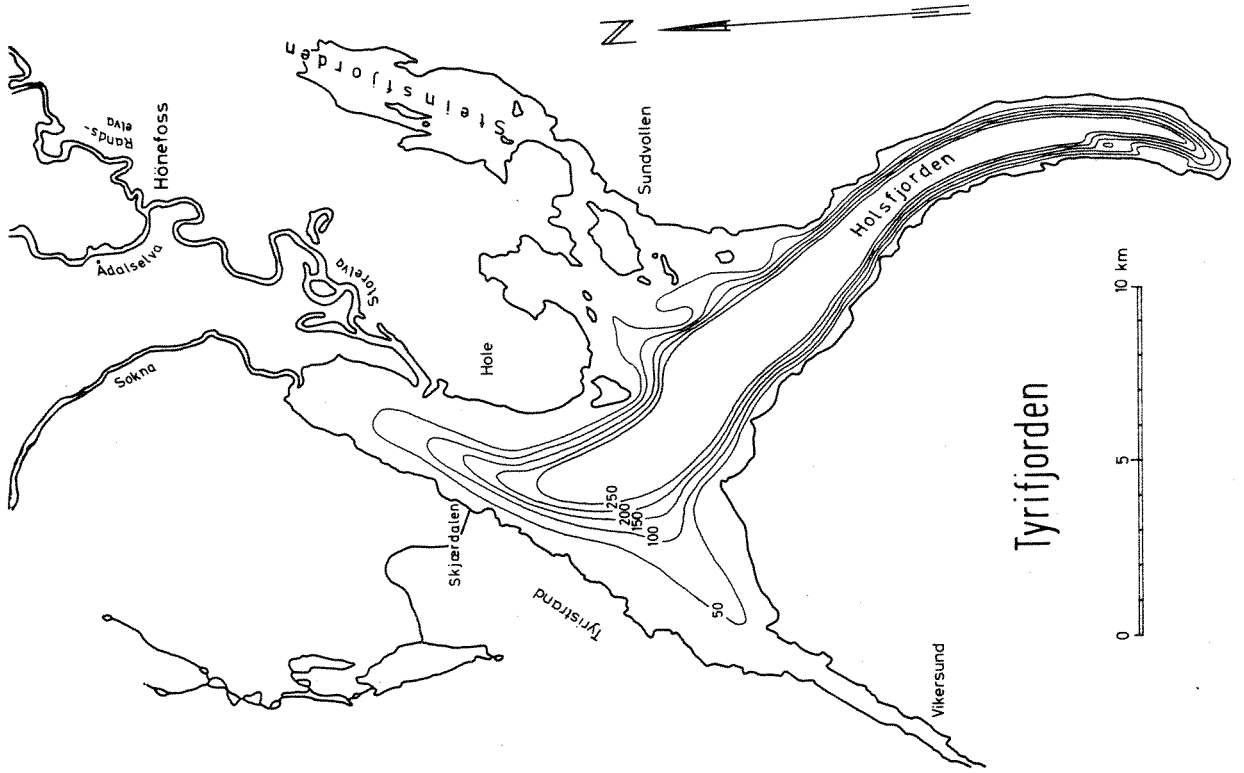


Fig. 2 TYRIFJORDEN  
Oversiktskart over nedbørfelt



Tabell 1. Data om Tyrifjorden, Mjøsa, Norsjø, Gjersjøen, Mälaren, Lake Erie.

	Tyrifjorden	Mjøsa	Norsjø	Gjersjøen	Mälaren	Lake Erie
Overfl. areal, km <sup>2</sup>	121	365	58,4	2,7	1140	25800
Volum, km <sup>3</sup>	13,83	56,2	5,1	0,06	14	460
Nedbørfelt, km <sup>2</sup>	9808	16420	9975	84	22603	103000
Største dyp	295	449	170	60		
Middeldyp, m	114	153	87	23	13	18
Teoretisk oppholds tid, år	2,6	5,6	0,55	1,5	2,7	2,6
Nedbørfelt i forhold til volum km <sup>2</sup> pr. km <sup>3</sup>	700	292	1956	1400	1600	170
Middelvannføring ved utløp m <sup>3</sup> /s	170	320	298	1,26	168	5490

De geologiske formasjoner er avgjørende for jordsmonnet og dermed indirekte for næringssalt- og stofftransporten til Tyrifjorden. Størsteparten av Tyrifjordens nedbørfelt er bygget opp av harde bergarter som grunnfjell, sparagmitter og sterkt omdannede kambro-silur bergarter. Disse bergarter er tungt løselig og betinger således et elektrolyttfattig avrenningsvann. I områdene øst for søndre del av Randsfjorden og Randselva-Storelva består berggrunnen i det vesentligste av relativt lite omdannede kambro-silur bergarter som til dels inneholder kalk. Dreneringsvannet fra disse områdene har derfor betydelig høyere elektrolyttinnhold enn fra feltet forøvrig.

Dette området er også sterkt utnyttet i jordbrukssammenheng og jordbruket som forurensningskilde har størst aktualitet her.

Det er mange og til dels store innsjøer i Tyrifjordens nedbørfelt. Randsfjorden og Sperillen som ligger langt nede i tilrenningssystemet, har en sterkt utjevneende effekt på avløpselvenes vannføring så vel som på vannets kvalitet.

Innsjømagasinene fungerer som sedimentasjonsbassenger og bidrar dermed til en minskning av tilførslene av næringssalter og annet materiale til Tyrifjorden.

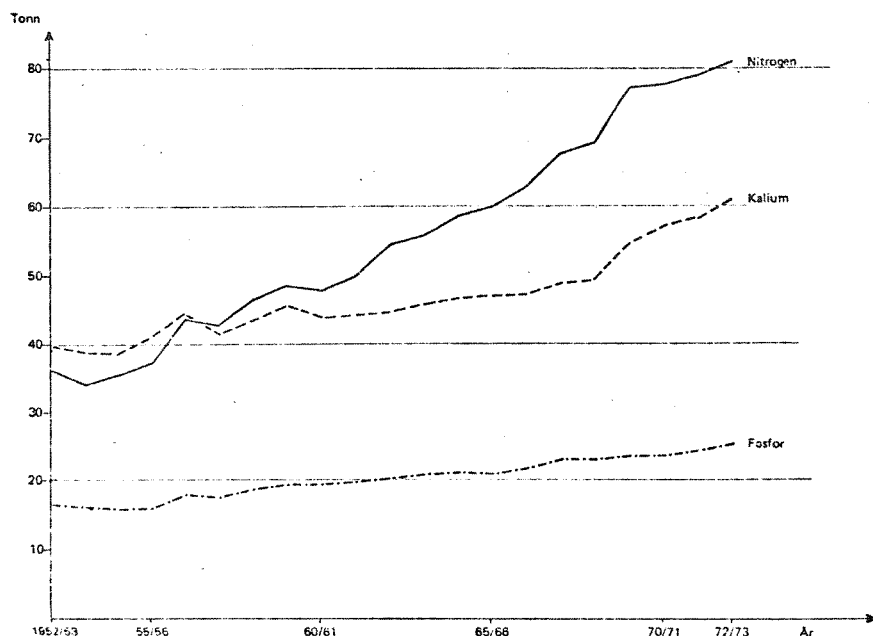
Tyrifjorden omfatter også Steinsfjorden som er en sidearm til selve innsjøen. Den midlere avrenning fra Steinsfjorden er oppgitt til  $1 \text{ m}^3/\text{sek.}$  og vannets teoretiske oppholdstid er her 3,4 år. Forurensningstilførslene til Steinsfjorden blir i vesentlig grad tatt hånd om og omsatt i dette innsjøparti. Steinsfjorden virker med andre ord som en buffer for de lokale forurensningstilførsler, slik at virkningen av disse på Holsfjorden blir mindre. Steinsfjorden virker som et naturlig biologisk renseanlegg for det næringsrike vannet som tilføres og passerer.

### 3.4 Menneskelig inngrep og vurdering av disse

Menneskets inngrep og utnyttelse av naturen medfører at forutsetningene for den biologiske produksjon i vannsystemene forandres. Forandringen er til dels en direkte følge av inngrep i form av oppdyrking, tørrlegging, skogsdrift, kraftverkbygging o.l., dels en funksjon av sekundære effekter forårsaket av industrialisering og urbanisering. En økt tilførsel av næringsstoffer medfører en økt produksjon av organisk materiale i form av høyere akvatisk vegetasjon, begroing og plante- og dyreplankton, bunndyr og fisk. Organiske stofftilførsler fra bebyggelse, industri, jordbruk o.l. påvirker bl.a. innsjøens oksygenbalanse. Partikulært materiale som transporteres til innsjøen forandrer lystilgangen i vannet, sedimentenes tilvekst og egenskaper m.m. Utslipp av giftstoffer forstyrrer de biologiske forhold, bl.a. produksjonsforholdene.

Dyrket areal i Tyrifjordens nedbørfelt har økt fra ca. 322 km<sup>2</sup> til ca. 348 km<sup>2</sup> i løpet av perioden 1907 til 1969 (oppgave fra Buskerud fylke). Man må anta at forbruk av handelsgjødsel i Tyrifjordens nedbørfelt har økt tilsvarende den generelle økning ellers i landet (fig. 3). Dessuten må man ta i betraktning at driftsmåten i jordbruket i betydelig grad har endret karakter i den senere tid. Av spesiell betydning i denne sammenheng er gjødsellagrenes tilstand og kapasitet, gjødslingsrutiner, økt erosjon som følge av omlegging til korndyrking osv.

Fig. 3. Forbruket av N, P og K i handelsgjødsel i Norge.



Befolkningstilveksten og urbaniseringen har medført at innsjøens belastning har økt vesentlig. Den totale befolkningmengden har økt fra 60690 i 1900 til 86211 i 1975. Dette skyldes først og fremst en økning av tettstedbefolkningen. I Ringerike kommune økte f.eks. befolkningen fra 16755 i 1900 til 29962 i 1975. Det er med andre ord i innsjøens nærområder befolkningsøkningen har vært størst.

Økt forbruk og en stadig høyning av den sanitære standard har sikkert betydd mer for økningen av forurensningsmengdene enn befolkningstilveksten. Dessuten er fettsåpen som var i bruk frem til ut i 1940-årene nå skiftet ut med syntetiske vaskemidler som i varierende grad inneholder fosfater - en av de viktigste faktorer i eutrofieringssammenheng.

Man må anta at den industrielle utvikling har ført til økt tilførsel av organisk stoff og næringsalter.

Ekspansjonen som har funnet sted innenfor industri og bosetting har i størst utstrekning funnet sted i Tyrifjordens nærområde. Derved mottar innsjøen stadig større direkte belastning uten at forurensningen i vesentlig grad blir tatt hånd om og redusert i mellomliggende innsjøer og elvestrekninger.

Tabell 2 viser arealfordeling og bosetting i Tyrifjordens nedbørfelt i 1967 (Rapport O-15/64, Tyrifjorden. En limnologisk undersøkelse 1967 - 1968. Blindern, april 1970).

Tabell 2. Tyrifjordens nedbørfelt. Arealfordeling og bosetting.

(Fra NIVA-rapport O-15/64).

	Nedbørfelt totalt	Nedbørfelt for Randsfjord og Sperillen	Nedbørfelt nede- for Randsfjord og Sperillen
Nedbørfelt km <sup>2</sup>	9808	8253	1555
Skog "	3927	2944	983
Myr "	544	472	72
Dyrket mark "	454	342	112
Uproduktivt område "	4883	4496	387
Antall mennesker	84200	54700	29500
Antall pers. pr. km	8,6	6,6	19

### 3.5 Forurensningsbelastning

Det er meget vanskelig og arbeidskrevende å måle forurensningstransporten (næringsstofftransporten) til en innsjø, og for Tyrifjorden er en slik undersøkelse ikke foretatt. Ved en teoretisk beregning av næringsstofftransporten er det vanlig å bruke følgende koeffisienter (NIVA-rapport 0-151/73. Gudbrandsdalsvassdraget, Mjøsa, Vormå. Resipientundersøkelser 1974-1975. Blindern, oktober 1975). (Tabell 3.)

Tabell 3. Spesifikke avløpstall.

Tilførsler	Total fosfor	Total nitrogen
Fra befolkning	2,5 g P/pers./døgn	12 g N/pers./døgn
" jordbruk	0,04 kg P/km <sup>2</sup> /døgn	3 kg N/km <sup>2</sup> /døgn
" skog	0,016 " "	0,55 " "
" utmark	0,008 " "	0,27 " "

Den totale næringsstofftilførsel til vassdraget blir på bakgrunn av tabell 2 og 3 følgende (tabell 4):

Tabell 4. Transport av næringssalter til Tyrifjorden, basert på 1967-tall (industri, silo o.l. er ikke tatt med).

Tilførsler	Tonn tot. P/år	Tonn tot. N/år
Fra befolkning	ca. 77	ca. 370
" jordbruk	" 7	" 500
" skog	" 26	" 900
" utmark	" 14	" 480
Sum	ca. 124	ca. 2250

Ved teoretiske betraktninger er det nødvendig å ta hensyn til hvor i nedbørfeltet forurensningskilden, jordbruksaktiviteten o.l. befinner seg. Diffuse forurensningstilførsler (avrenning fra jordbruk, spredt bebyggelse o.l.) er alltid vanskelig å beregne/vurdere. Patalas (1972) har fremstilt følgende ligning for angivelse av fosforbelastningen på en innsjø:

$$L_p = E_s \cdot \frac{A_d}{A_o} + \frac{E_c \cdot C}{A_o} + 0,15 L_{AP} \frac{A_o(a)}{A_o}$$

hvor  $E_s$  = eksportkoeffisient av fosfor fra jord i gram total fosfor (P) pr.  $m^2$  av nedbørfeltet pr. år.

$A_d$  = landareal i  $m^2$ .

$A_o$  = innsjøoverflate i  $m^2$ .

$E_c$  = årstilførsel av fosfor i gram pr. person.

$C$  = antall personer.

$L_{AP}$  = total fosforbelastning for den (de) nederste innsjø(er) i vassdraget ovenfor i gram P/ $m^2$  innsjøoverflate og år.

$\frac{A_o(a)}{A_o}$  = forholdet mellom overflatearealet av den (de) nederste innsjøer i vassdraget ovenfor og den aktuelle innsjø.

0,15 er fremkommet ved å anta at 85% av fosforet som tilføres den (de) siste innsjøen(e) ovenfor holdes tilbake i denne (disse) innsjø(er). For Mjøsas vedkommende holdes ca. 75% av de teoretiske tilførsler tilbake i innsjøen. I betraktning av at Randsfjorden og Sperillen får relativt liten tilførsel av fosfor, kan man anta at minst 25% av tilførselen til disse innsjøer transporteres videre til Tyrifjorden.

Hvis man anvender 0,25 i stedet for 0,15 i beregningen ovenfor, tilsvarer fosfortransporten til Tyrifjorden når industriforurensningene ikke er tatt med:

$$L_p = 0,43 \text{ g P/m}^2 \text{ innsjøoverflate} \cdot \text{år.}$$

Dette tilsvarer en total årlig fosforbelastning på ca. 58 tonn.

Ved å anta en midlere total konsentrasjon på 7  $\mu\text{g P/l}$  og 300  $\mu\text{g N/l}$  i Dramselva ved Vikersund, blir transporten ut av Tyrifjorden ca. 38 tonn total fosfor og ca. 1600 tonn total nitrogen pr. år. Disse beregninger må bare betraktes som orienterende - det er viktig å fremskaffe nyere og mer nøyaktige data om forurensningsbelastningen.

I fig. 4 er Tyrifjorden sammen med en del andre innsjøer (norske og utenlandske) tegnet inn i Vollenweiders diagram. Innsjøen er tegnet inn på bakgrunn av den kjennskap som foreligger angående biologiske forhold og fosforbelastning. Vannforekomsten beveger seg nå inn i et område som i eutrofisammenheng ansees som betenkelig.

### 3.6 Tyrifjordens kjemiske vannkvalitet

Vannet i Tyrifjorden har en lav total saltgehalt. Dette har sammenheng med at mesteparten av nedbørfeltet er bygd opp av harde bergarter. Den lave saltholdighet og ionesammensetningen har medført at innsjøen i sin grunnkarakter er oligotrof (næringsfattig).

Midlere konsentrasjon av næringssaltinnholdet i Tyrifjorden (under vårsirkulasjonen) jevnført med andre store innsjøer er fremstilt i tabell 5.

Tabell 5. Næringssaltkonsentrasjonen i  $\mu\text{g P/l}$  og  $\mu\text{g N/l}$  om våren.

Innsjø	Total fosfor	Total nitrogen
Tyrifjorden 1973/74	5	300
Mjøsa 1974	10	495
Mälaren	38	750
Lake Erie	20	470
Lake Ontario	13	400-600

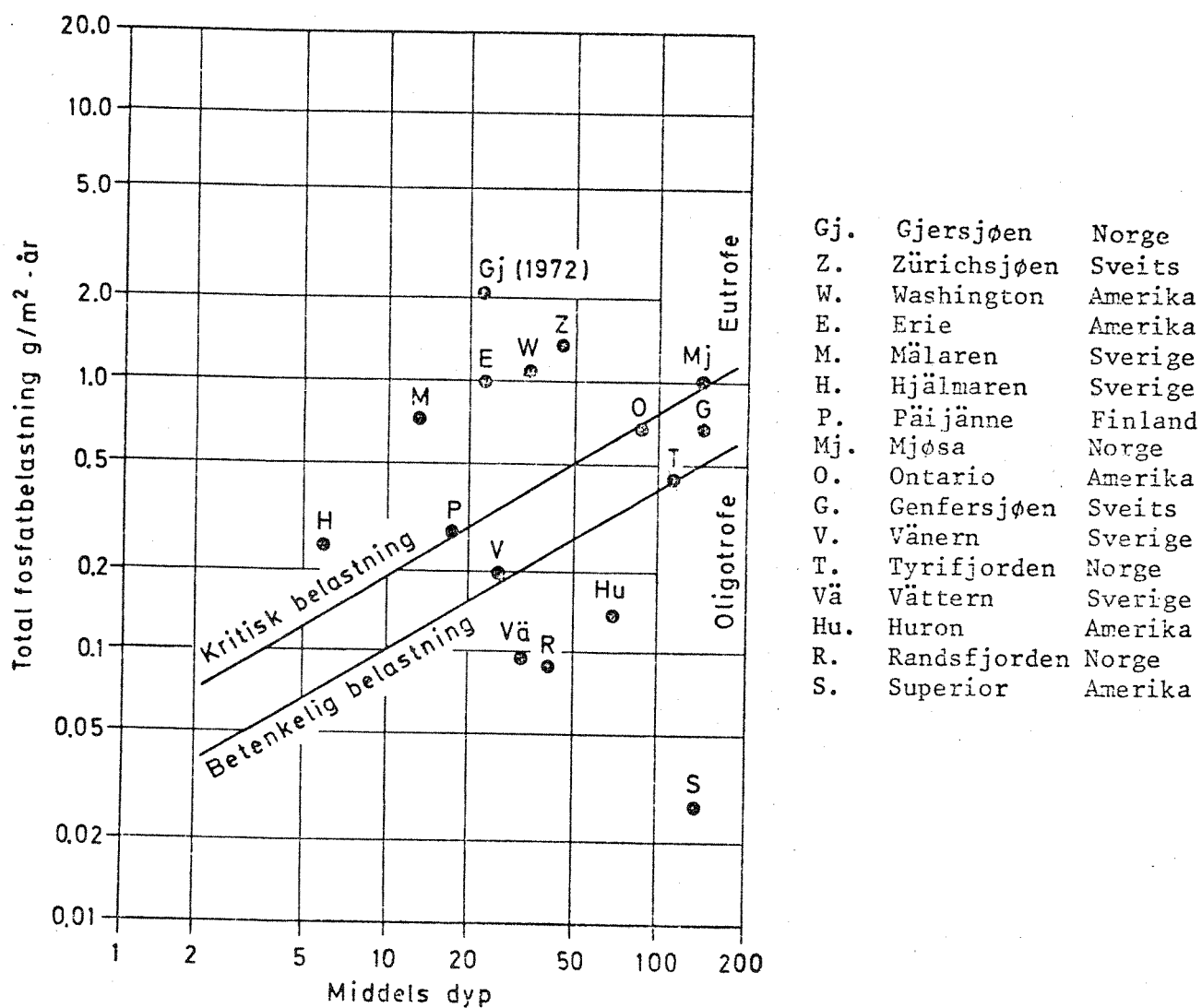


Fig. 4. Fosforbelastning i relasjon til middel dybde for noen større innsjøer i Sveits, Nord-Amerika, Finland, Sverige og Norge. (Etter Vollenweiders (1968) eutrofimodell)



Blant annet på grunn av utslipp fra treforedlingsbedrifter i Hønefoss-området er transporten av organisk materiale via Storelva betydelig (i 1967 ca. 110000 pers. ekv.). Det partikulære organiske materiale (fiberstoffer o.l.) er i betydelig grad sedimentert i Storelva og utenfor dennes munningsområde. Her foregår det nå en markert anaerobisk nedbrytning av dette materiale med bl.a. utvikling av metangass, drift av "slamkaker" o.l.

### 3.7 Biologiske forhold i Tyrifjorden

Diskusjonen av de biologiske forhold og produksjonsforholdene i Tyrifjorden grunner seg i vesentlig grad på professor Strøms undersøkelser i 1932 og NIVA-rapport O-143/70. Biologiske undersøkelser i Holsfjorden 1971. Blindern, mai 1972, samt cand.real. S. Rogneruds hovedfagsarbeid ved Universitetet i Oslo (pers. med.).

På bakgrunn av ovennevnte undersøkelser er det klart at de biologiske forhold i Tyrifjorden i kvantitativ sammenheng har endret karakter fra 1930-årene og frem til i dag. Blant annet har siktedypet i nevnte tidsrom blitt redusert med 1,5 til 2,5 m. Blågrønnalgen *Oscillatoria* sp., som har masseforekomst i mange forurensede innsjøer i Amerika, Sentral-Europa og i bl.a. Gjersjøen og Mjøsa, ble først observert i Steinsfjorden vinteren 1961. Samme alge ble første gang observert i Holsfjorden i 1967. Det er grunn til å tro at denne alge vil kunne utvikle større populasjoner i Holsfjorden ved gunstigere vekstbetingelser. Hverken *Oscillatoria* sp. eller kiselalgen *Fragilaria crotonensis* som nå har stor forekomst i innsjøen, ble funnet av Strøm i 1930, og man må anta at disse alger er nykommere i Holsfjorden.

Ifølge NIVA-rapport O-143/70 hadde dyreplanktonet mengdemessig forandret seg slik at antall individer i 1971 var 2-3 ganger større enn i 1930. Også i kvalitativ sammenheng var dyreplanktonet markert forandret, idet flere arter som var vanlig i 1971-planktonet ikke forekom i 1930.

Imidlertid har ikke produksjonen av dyreplankton økt i samme grad som produksjonen av planteplanktonet - noe som bl.a. har favorisert et høyt bakterieinnhold, idet bakteriene endrer seg av organisk stoff.

Nevnte undersøkelsesresultater viser at Tyrifjorden nå er inne i en ustabil økologisk tilstand hvor planteplanktonproduksjonen er for stor i forhold til produksjonen av dyreplankton. Dette er en utvikling som ved økt forurensningstilførsel vil øke eksponensielt. Forekomsten av kiselalger har i løpet av 1970-årene vært i en sterk utvikling. Det er derfor grunn til å forsere iverksettelse av forurensningsbegrensende tiltak hvis man skal kunne unngå en tilsvarende utvikling som i Mjøsa. Tiltakenes utforming og omfang, eventuelle avskjærende avløpssystemer, o.l. bør bestemmes på bakgrunn av undersøkelsesresultater.

#### 4. PRINSIPPUTFORMING AV ET UNDERSØKELSESPROGRAM

##### 4.1. Målsetting for undersøkelsesprogrammet

Tyrifjorden brukes i dag som vannkilde for en rekke oppsittere og hytteeiere rundt innsjøen. Samtidig blir innsjøen og dens tilløp brukt som resipient for avløpsvann. Det knytter seg store interesser til innsjøen i rekreasjonsammenheng (bading, fiske, båtsport m.m.). Endelig er Tyrifjorden et dominerende element i naturlandskapet. Tyrifjorden er potensiell vannkilde for Oslo og en rekke kommuner rundt Oslofjorden. En grunnleggende forutsetning for en rasjonell bruksplan er at det finnes tilstrekkelig kunnskap om innsjøen og hvordan den reagerer på de menneskelige aktiviteter i området. Selv om Tyrifjorden i lengre tid har vært gjenstand for betydelig forskningsinnsats, er kunnskapsmengden ennå altfor liten til å muliggjøre en formålstjenlig forvaltning av innsjøen på lengre sikt.

Den langsiktige målsetting for en forsknings- og undersøkelsesvirksomhet i Tyrifjorden bør være å skape naturvitenskapelige modeller som kan anvendes for å prognosere den fremtidige utvikling i innsjøen på grunnlag av den virksomhet som er planlagt eller planlegges i innsjøen og dens nedbørfelt.

Innsjøer av Tyrifjordens type er et komplisert fysikalsk, kjemisk og biologisk system som hittil i liten grad er utforsket. Det vil derfor bli nødvendig med et omfattende forskningsarbeid hvis det skal bli mulig

å fremskaffe modeller som kan anvendes for prognoseformål. Undersøkelser i store vassdragssystem må omfatte relativt lange tidsperioder hvis representative data skal fremskaffes. Erfaring fra andre tilsvarende prosjekter tyder på at mye arbeid gjenstår innen man kan besvare enkle spørsmål av typen "Hva tåler Tyrifjorden".

Undersøkelsene må imidlertid legges opp på en slik måte at det dagsaktuelle informasjonsbehov kan tilgodesees under arbeidets gang. Det er nødvendig at virksomheten med bibeholdelse av hovedmålsettingen - å utarbeide modeller for innsjøen - utformes slik at den også på kort sikt kan gi "nyttige" resultater.

#### 4.2 Oppbygging og utforming av undersøkelsen

På bakgrunn av den skisserte målsetting for undersøkelsen er det naturlig å ta utgangspunkt i at innsjøen fungerer som et integrert fysikalsk-kjemisk-biologisk produksjonssystem (fig. 5). Råvarene er de stoffer som tilføres innsjøen via tilløpene, direkteutslipp fra tettsteder, industrier og via nedbøren. Sluttproduktene består til dels av stoffer som transporteres ut ved Vikersund, og dels av stoffer som avsettes på bunnen. Innenfor innsjøen produseres ulike mellomprodukter i et antall næringskjeder. Sedimentene inngår også som råvareleverandører ved utløsning og tilbaketransport av visse stoffer til de frie vannmasser.

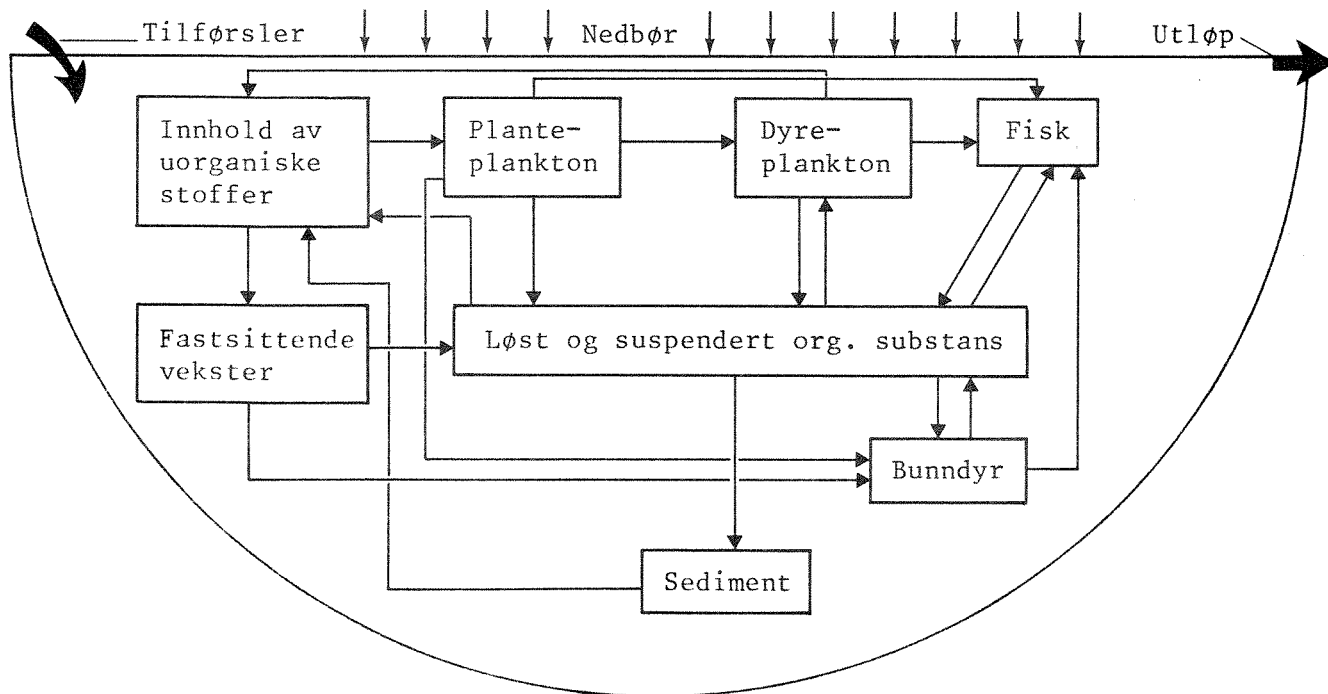


Fig. 5. Modell av produksjonssystemet i en innsjø.

Utviklingen i innsjøen styres av ytre faktorer hvorav en betydelig del er naturbetinget. Men ved menneskelig inngrep kan forutsetningene og den opprinnelige balanse i systemet forskyves. Utslipp av forurensninger fra tettsteder, industrier og andre forurensningskilder er kanskje de faktorer som har tiltrukket seg den største interesse i denne sammenheng. Tiltak som oppdyrking, kraftverksreguleringer o.l. vil også kunne ha betydning ved at de radikalt endrer avrenningsforholdene.

Problemet er å lage modeller av hendelsesforløpet i innsjøen. Disse kan senere anvendes for å prognosere den fremtidige utvikling når det gjelder vannkvalitet, fiskeproduksjon m.m. Fig. 5 som angir en modell av spillet mellom faktorer, viser at det først og fremst er nødvendig med kunnskaper innenfor følgende delområder:

- Mengden av alt levende og dødt materiale i innsjøen (fisk, plankton, bunndyr, vekster, organiske og uorganiske stoffer i de frie vannmasser samt i sedimentene).
- Omsetningshastigheten for organisk og uorganisk materiale.
- Sammenhengen mellom innsjøens stoffomsetning og eksterne faktorer (materialtilførsel, solenergi, vind, islegging m.m.).
- Materialtap ved utløp og sediment.

Funksjonsdyktige modeller av innsjøen kan ikke utarbeides uten god kunnskap om de ytre faktorer som påvirker systemet. Hovedspørsmålet gjelder for øvrig hvordan de menneskelige inngrep kan ventes å påvirke innsjøen og hvordan disse effekter best skal kunne elimineres ved ulike former for forurensningsbegrensende tiltak.

Undersøkelsen av Tyrifjorden kan med denne prinsipielle oppbygging av problemstillingen hensiktsmessig deles opp i to hoveddeler, en "innsjødel" og en "tilførselsdel". "Innsjødelen" skal inneholde en forsknings- og undersøkelsesvirksomhet som innrettes dels på registrering av de fysiske, kjemiske og biologiske forhold i innsjøen, dels på utredninger av produksjonssystemets oppbygging og funksjon. Hensikten med dette arbeidet er å lage modeller av innsjøen, som kan anvendes for å bedømme innsjøens utvikling.

Virksomheten innenfor "tilførselsdelen" skal ha til hensikt å klarlegge mengde og type av tilførsler til Tyrifjorden via tilløpene, via direkteutslipp av kommunalt og industrielt avløpsvann, samt via diffuse tilførsler fra landområdene. Dette forutsetter at det opprettes en rekke målestasjoner for registrering av tilførsler fra nedbørfeltet. Måling av stofftransporten ut fra innsjøen må også inngå i denne undersøkelse. Dette arbeidet som blir både av registrerende og utredende karakter, bør utformes for i første rekke å tilgodese behovet av data for forsknings- og undersøkelsesarbeidet som skal foregå i selve innsjøen, men datamaterialet skal også tilgodese det løpende informasjonsbehov, f.eks. kontroll av effekten av forurensningsbegrensende tiltak. o.l.

## 5. FORSLAG TIL RAMMEPROGRAM

### 5.1 Registrering av tilførsler og avløp

Alle tilførsler til Tyrifjorden i likhet med transporten i utløpselva (Vikersund), bør registreres på en slik måte at både de årlige mengder og variasjonsmønsteret over året er tilfredsstillende kartlagt.

Registreringssystemet må så langt som råd er basere seg på målinger i vassdrag og i utløp fra forurensningskilder. Den delen av den totale tilførselsmengden som må beregnes på grunnlag av erfaring og andre oppgaver av almen karakter, bør reduseres så langt råd er hvis tilfredsstillende nøyaktighet skal oppnås.

Beregning av tilførselen av forurensninger og andre stoffer til Tyrifjorden må baseres på følgende:

- Målinger av stofftransporten i tilløpenes utløpsområder.
- Målinger av direkteutslipp.
- Utredninger om tilførselene fra Tyrifjordens nærområder.

For å fremskaffe gode data om stofftransporten til innsjøen, er det nødvendig med et fyldig og godt observasjonsmateriale om vannføringen i vassdragene (tilløp, avløp) samt arealnedbør for innsjøen og dens nærområder. Det er også viktig å få klarhet i vannutskiftingen og vannkvaliteten i Steinsfjorden.

## 5.2 Undersøkelsesprogram for Tyrifjorden

Undersøkelsene i selve Tyrifjorden bør som nevnt ta sikte på å utarbeide fysisk-kjemisk-biologiske modeller for innsjøen, som kan anvendes for å prognosere utviklingen i innsjøen ved ulike former for utnyttelse. Det skal her poengteres at det til dels gjelder å kartlegge kompliserte forløp - hvordan de ulike faktorer virker inn på hverandre. De ulike prosessene er sammenkoplet i kompliserte mønster og danner ulike former for næringskjeder (fig. 6).

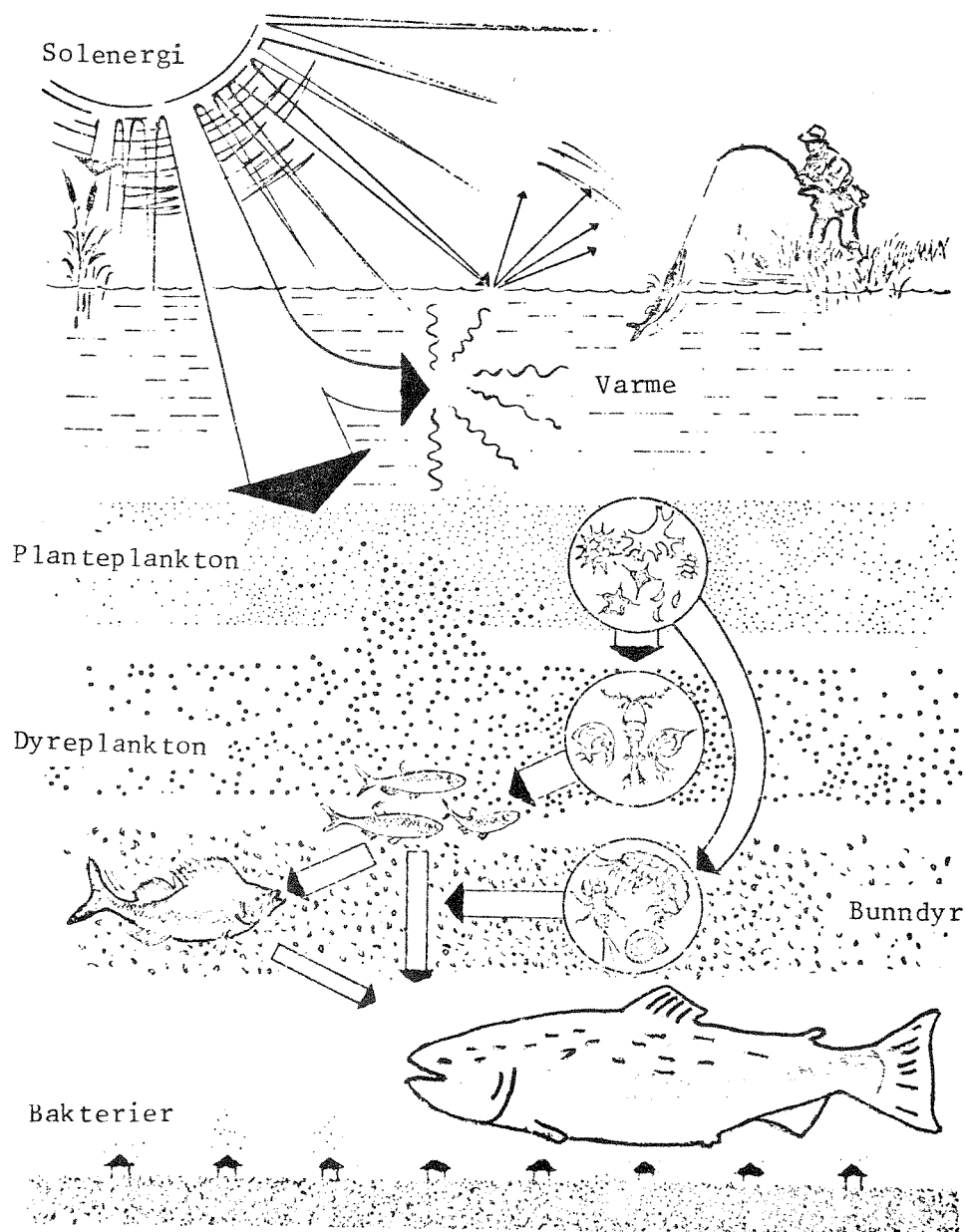


Fig. 6. En forenklet næringskjede i en innsjø.

En undersøkelse av en innsjø som økosystem må nødvendigvis bli omfattende og tidkrevende. Virksomheten er av tverrvitenskapelig (fysikalsk, kjemisk, biologisk) natur og den forutsetter et intimt samarbeide av fagfolk med forskjellig bakgrunn.

Det er samtidig nødvendig med en klar arbeidsfordeling mellom de ulike delområder for at arbeidet skal kunne drives rasjonelt og gi anvendbare resultater.

Registrering av kjemiske, fysiske og biologiske data i de frie vannmasser gir bare øyeblikksbilder av forholdene ved prøvetakingstidspunktet. Hvis man skal fremskaffe relevante fakta om forholdene i de frie vannmasser, er det nødvendig med kontinuerlige undersøkelser over en relativt lang tidsperiode.

Arbeidet med innsjøundersøkelsen kan deles opp i to delområder:

1. Strender og bunnområder
  - a. Sedimentundersøkelser
  - b. Høyere vegetasjon
  - c. Bentos (fastsittende alger og bunndyr)
2. Frie vannmasser
  - a. Hydrologi/strømningsforhold
  - b. Vannkjemi
  - c. Biologiske forhold
    - Bakterier
    - Plantep plankton
    - Klorofyll og primærproduksjon
    - Dyreplankton
    - Bunnfauna
    - Fisk
  - d. Tungmetaller

I det følgende skal det kort redegjøres for de forsknings- og undersøkelsesaktiviteter som er nødvendig innenfor de forskjellige delområder:

### 5.2.1 Strender og bunnområder

#### a) Sedimentundersøkelse

I sedimentene deponeres de sluttprodukter som ikke føres videre via utløpet eller fordunster fra innsjøens overflate. Sedimentenes sammensetning gir derfor et godt bilde av langtidsforandringene i en innsjø og gjenspeiler f.eks. gjennom innholdet av visse metaller menneskenes aktivitet. Sedimentene har en avgjørende betydning for utviklingen i ulike vannsystemer, bl.a. som næringskilde såvel for bunnfauna og høyere vegetasjon som for den biologiske produksjon i de frie vannmasser.

For å kunne kartlegge sedimentforholdene er det nødvendig å samle inn et hundretalls bunnprøver fra hele innsjøen. Dessuten er det nødvendig med noe tettere prøver fra områdene utenfor elveutløp og eventuelle punktutslipp, fra Kroksundområdet o.l.

#### b) Høyere aquatisk vegetasjon (makrofytter)

Utbredelsen av høyere vegetasjon er først og fremst en funksjon av tilgangen på næringsstoffer og av strømnings- og bølgeforholdene. Kartlegging av denne type vegetasjon kan derfor gi god informasjon dels om forandringer i næringsnivå, dels om dybdeforholdene langs innsjøstrendene.

Ved å benytte seg av moderne teknikk for flyfotografering kan man gjennomføre en kartlegging av den høyere vegetasjon i løpet av kort tid. For tolkning av bildematerialet kreves kompletterende feltstudier innenfor noen typeområder.

#### c) Bentos

Undersøkelser av bentos kan på samme måte gi verdifull informasjon om vannmiljøet innenfor innsjøens strandområde. Det er også mulig ved slike studier å registrere forandring i det opprinnelige miljø. Resultatene av bentosstudier er av spesiell interesse da de gir et bilde av situasjonen innenfor de strandnære områder som utnyttes for bading og friluftsliv og for andre fritidsaktiviteter.



### 5.2.2 Frie vannmasser

Tyrifjorden er en stor og dyp innsjø som sterkt påvirkes av ytre faktorer, først og fremst de meteorologiske forhold (vind, nedbør, lufttrykksendringer o.l.). En prøve samlet inn fra de frie vannmasser gir derfor bare et øyeblikksbilde av tilstanden i prøvetakingspunktet. Bestemmelse av vannets beskaffenhet i en stor innsjø krever derfor undersøkelser som gjennomføres med stor prøvetakingstetthet både i tid og rom. Skal man utrede utviklingstendenser kreves undersøkelser som strekker seg over lengre tidsperioder, slik at virkninger av naturlige langtidsvariasjoner kan elimineres.

#### a) Hydrologi/strømningsforhold

For å kunne få en klarhet i utskiftningsforholdene, forurensningsspredning o.l., er det nødvendig å kartlegge de storstilte strømningsmønstre i Tyrifjorden. Slike undersøkelser er også nødvendige for å kunne vurdere variasjonsmønsteret i fysisk-kjemiske og biologiske forhold.

Som nevnt foreligger det visse planer om å benytte Holsfjorden som vannkilde med uttak i de sydlige områder av innsjøen. Videre er det for tiden stor interesse for å føre vann fra Tyrifjorden til vanningsanlegg i Lierområdet. Strømningsundersøkelsene (modellene) må legges opp på en slik måte at eventuelle effekter av slike tiltak kan bli klarlagt. Slike strømningsundersøkelser må utføres parallelt langs følgende tre arbeidslinjer:

- oppbygging av dynamiske modeller av strømningsforholdene i Tyrifjorden
- synoptiske undersøkelser
- målinger på et fast stasjonsnett

Matematiske modeller konstrueres ved at den generelle samhörighet mellom vindsituasjon, lufttrykk og vanntemperatur kombineres med de spesielle grensevilkår som gjelder for innsjøen. Ved hjelp av slike modeller kan strømforholdene deretter simuleres som funksjon av en viss vær-situasjon. Resultatene av disse teoretiske beregninger kan siden kontrolleres, dels ved synoptiske undersøkelser og dels ved hjelp av målere som automatisk registrerer strøm, temperatur, vannstand m.m.

b) Vannkjemi

Innsamling av observasjonsmateriale angående Tyrifjordens innhold av løst og partikulært materiale er en viktig del av de planlagte undersøkelser. Disse data skal gi allsidig og representativ informasjon om konsentrasjonsnivåene både i tid og rom. Ettersom strømningsforholdene er ukjent, må det foreløpig relativt hyppig samles inn materiale fra et stort antall stasjoner og fra flere dyp.

Det kjemiske observasjonsmaterialet er meget viktig for utarbeidelsen av fysisk-kjemisk-biologiske modeller av innsjøen. God kjennskap til Tyrifjordens innhold av løst og partikulært materiale og om fordelingen av dette materiale i vannmassene er avgjørende for tolkningen av resultatene av de biologiske undersøkelser.

c) Biologiske forhold

Utslipp av avløpsvann eller forskjellige typer menneskelig inngrep i naturen leder før eller senere til biologiske effekter i innsjøer og elver. En kartlegging av de biologiske forhold gir derfor det mest informative og samlede bilde av miljøforholdene.

Som tidligere nevnt, må undersøkelser av denne art legges opp på en slik måte at man kan danne seg et helhetsbilde av innsjøens produksjonssystem. Dette innebærer at de ulike momenter i næringsveven studeres såvel kvalitativt som kvantitativt samt at forbindelsene mellom de ulike faktorene kartlegges. Av praktiske grunner må man imidlertid ved gjennomførelsen foreta en relativt langtgående arbeidsdeling. Visse undersøkelser er av engangskarakter, mens andre må bygges opp som periodiske studier. Atter andre parametre krever derimot en løpende registrering gjennom en lengre tidsperiode. De biologiske undersøkelser av Tyrifjorden må minst omfatte en treårsperiode hvis man skal oppnå et tilfredsstillende nøyaktig og representativt materiale.

Bakteriologiske undersøkelser vil gi verdifullt underlag for bedømmelse av vannkvaliteten og av nedbrytning av organisk materiale. Spredningen av bakterier kan også gi god informasjon om de lokale strømningsforhold. Prøveinnsamlingen kan skje samtidig med de øvrige biologiske, kjemiske

og hydrologiske studier. Det innsamlede prøvemateriale må i første rekke analyseres på koliforme bakterier, heterotrofe bakterier og av den mikrobielle biomasse.

Planteplankton inntar en nøkkelstilling i de frie vannmassers næringskjede: planteplankton- dyreplankton og bunndyr - fisk og høyere dyrearter. Mange arter av planteplanktonet utgjør gode indikatorer på forandringer av den opprinnelige vannkvalitet. Den totale mengde gir en oppfatning av de kvantiteter som inngår i det biologiske kretsløp. Forskjeller i planteplanktonmengden virker inn på hele det biologiske og kjemiske kretsløpet i innsjøen.

Innsamling av planteplanktonprøver bør skje for å belyse planktonutviklingen både regionalt og i detalj. Forekomst av vannblomst og av alger som forårsaker direkte skader f.eks. ved belegg på garn og ved påvirkning av vannets lukt og smak, bør man ha under spesiell oppmerksomhet. Ettersom mengden planteplankton kan variere betydelig såvel i løpet av et år som mellom de ulike år, må denne type undersøkelser omfatte en tidsperiode på minst tre år.

Klorofyllmålinger anvendes for å kvantifisere planteplanktonets biomasse (biomassens vekt og volum). Direkte kvantitative analyser av planteplanktonet kan i en viss utstrekning erstattes med klorofyllmålinger. Kombineres disse målinger med produksjonsmålinger,  $C^{14}$ -analyser, kan også produksjonsfunksjoner når det gjelder den biologiske aktiviteten bestemmes. Klorofyll- og  $C^{14}$ -målinger bør utføres i samme omfang som undersøkelser av de planteplanktoniske forhold. Ved synoptiske undersøkelser kan hovedvekten med fordel legges på klorofyllanalyser.

Dyreplanktonet er det neste ledd i næringskjeden, dvs. de såkalte sekundærprodusentene eller primære konsumenter. Mange dyrearter er i likhet med planteplanktonet følsomme for miljøforandringer. I en innsjø med balansert livsmiljø er dyreplanktonet både kvalitativt og kvantitativt i harmoni med planteplanktonet. Når planteplanktonmengden er for stor i forhold til vannets innhold av dyreplankton, blir det produsert organisk stoff som ikke går inn i næringskjeden. Denne organiske produksjon kan

føre til situasjoner med stort forbruk av oksygen i vannmassene såvel som i sedimentene. Det er dette som nå er i ferd med å skje i Mjøsa. Tyrifjordundersøkelsene har vist (NIVA, 1971) at dette også er i ferd med å skje der, og det er derfor grunn til å frykte at hvis primærproduksjonen (produksjonen av alger) eller tilførselen av næringsalter ikke blir redusert, vil økosystemet i løpet av relativt kort tid endres radikalt, dvs. man kan risikere Mjøsatilstander.

Innsamlingen av dyreplanktonmaterialet bør skje samtidig med at det samles inn prøver av planteplankton. Det vil derved være mulig å studere forholdet mellom de to ledd i næringskjeden. Videre er den kvalitative sammensetning av dyreplanktonet av stor interesse i forurensningssammenheng. Et slikt materiale gjør det også mulig å studere en eventuell utvikling siden 1931 (prof. Strøms undersøkelser).

Blant innsjøens bunnorganismer finnes mange arter som har spesifikke krav til miljøet. Disse organismer er bundet til grensesjiktet sedimentvann der oksygeninnholdet lett påvirkes av f.eks. forurensninger. Bunnfaunaen er følsom for ugunstige påvirkninger og vil lett kunne integrere negative effekter. Derved gjenspeiler den miljøets egenskaper under en lengre tidsperiode.

Bunnfaunaen er en viktig del av fiskenæringen og forandringer i bunnfaunaen kan dermed bli avgjørende for fiskeproduksjonen. I bunnområder som er anrikt med miljøgifter kan disse via bunnorganismer tilføres fiskekjøttet.

Undersøkelse av bunnfaunaen bør omfatte innsamling av prøver i løpet av et par års tid. Undersøkelsene bør konsentrere seg om hovedbassenget og de mest utsatte grunn- eller strandområder.

Bestandsutviklingen hos fiskefaunaen i en innsjø gjenspeiler i første rekke de naturbetingede fluktuasjoner. Forandringer i fiskebestanden kan i mange tilfeller være en følge av utslipp av avløpsvann, reguleringsinngrep, økt fiske og andre menneskelig inngrep. En akselererende eutrofiutvikling kan medføre en hurtig endring i artssammensetningen (edlere

fiskearter skiftes ut med mindre edle o.l.). Ved kombinasjon med annen informasjon om vannet kan tallmessige mål på fiske gi verdifulle opplysninger om utviklingen i innsjøer og vassdrag.

Data angående fiskefaunaen kan skaffes ved biologisk prøvefiske på faste prøvefiskestasjoner. Aldersbestemmelse, tilvekstanalyser og undersøkelser av fiskens næringsorganismer er nødvendig for å kunne vurdere resultatene av prøvefisket. Samtidige undersøkelser av dyreplankton og bunndyr er av stor verdi.

Resultatene av prøvefisket bør kompletteres med sammenstillinger av fiskestatistikk og intervjuundersøkelser. Ved utnyttelse av fiskestatistikk må man spesielt være oppmerksom på at resultatene kan variere som følge av variasjoner i bestanden fra år til år - noe som har sin årsak i forandringer i næringstilgangen, vannets temperatur m.m.

De fiskeribiologiske undersøkelser i Tyrifjorden bør i første omgang konsentreres om innsamling av grunnleggende data om fisket og dets avkastning samt om fiskeartenes utbredelse og frekvens. Dette grunnmaterialet kan siden brukes for å planlegge den fortsatte virksomhet og for gjennomføringer av feltundersøkelser.

Biologisk prøvefiske bør startes opp snarest mulig. I denne sammenheng kan det bli nødvendig å bygge ut midlertidige faste prøvefiskestasjoner. Dette stasjonsnett kan siden korrigeres på bakgrunn av resultatene fra den øvrige undersøkelsesvirksomhet.

Tungmetaller, biocider og lignende stoffer anrikes i motsetning til organismer. Giftvirkningen blir mer markert jo lengre opp i næringskjeden man kommer.

Utslipp av slike fra kjemisk synspunkt stabile stoffer, utgjør en latent fare for forstyrrelse av det biologiske livet i Tyrifjorden. Forekomsten av denne type stoffer i de ulike organismer og i bunnsedimentene bør derfor kartlegges. I en innledende fase bør det samles inn fisk fra hele Tyrifjorden for derved å få klarlagt den regionale fordeling av tungmetaller og giftstoffer.

## 6. UTFØRELSE OG OMKOSTNINGER

For å kunne gjennomføre en undersøkelse av det format som dette ramme-  
program angir, er det nødvendig med deltakelse av spesialister fra flere  
fagområder. Det er således nødvendig å lage et prosjekt hvor flere  
institusjoner deltar, f.eks. Universitetet, Direktoratet for vilt- og fersk-  
vannsfisk, Hydrologisk avdeling i NVE, m.fl. Videre er det en selvfølge  
at lokale krefter, f.eks. Utb. av i Buskerud fylke, veterinæretater m.fl.  
deltar. Som eksempler på arbeidsoppgaver som kan utføres ved lokal arbeids-  
kraft kan nevnes: innsamling av registreringsdata, innsamling av vann-  
prøver, kjemiske og bakteriologiske analyser, deltakelse i feltarbeid, m.m.  
Det vil også være fordelaktig om oppdragsgiver kunne stille en hurtig-  
gående god arbeidsbåt til disposisjon.

NIVA har også fått i oppdrag å utarbeide undersøkelsesprogram for Mjøsa  
og andre innsjøer. Hvis disse undersøkelser blir realisert, vil det  
være mulig å lage arbeidsenheter som kan utnyttes rasjonelt og hensikts-  
messig i et rutinemessig opplegg. Derved kan omkostningene for de  
enkelte prosjekter bli mindre.

Man må anta at oppstartingen og det første års undersøkelser vil være  
mest arbeidskrevende. Vi vil anta at omkostningene for dette års under-  
søkelser vil dreie seg om et beløp av størrelsesorden 1 mill. kroner  
for Tyrifjorden. Et nøyaktig omkostningsoverslag vil det selvsagt ikke  
være mulig å fremlegge før undersøkelsesprogrammet er detaljert utformet  
og eventuelle andre institusjoners/etatens arbeidsinnsats er avklart.

LITTERATUR

Norsk institutt for vannforskning 1972. Biologiske undersøkelser i Holsfjorden (Tyrifjorden) 1971. Blindern, mai 1972.

Norsk institutt for vannforskning 1975. O-151/73. Gudbrandsdalsvassdraget, Mjøsa, Vormå. Resipientundersøkelser 1974-1975. Blindern, oktober 1975.

Norsk institutt for vannforskning 1970. O-15/64. Tyrifjorden. En limnologisk undersøkelse 1967-1968. Blindern, april 1970.

Patalas, K., 1972. Crustacean plankton and the eutrophication of the St. Lawrence Great Lakes. J. Fish. Res. Bd. Canada, 29.

Strøm, K.M., 1932. Tyrifjord. A Limnological Study. Skr. norske Vidensk. Akad., I. Mat.-Nat. 1932.3.

Vollenweider, R.A. and Dillon, P.J. 1974. The Application of the Phosphorus loading concept to eutrophication research. Canada Centre for Inland Waters Environment Canada, Burlington, Ontario.