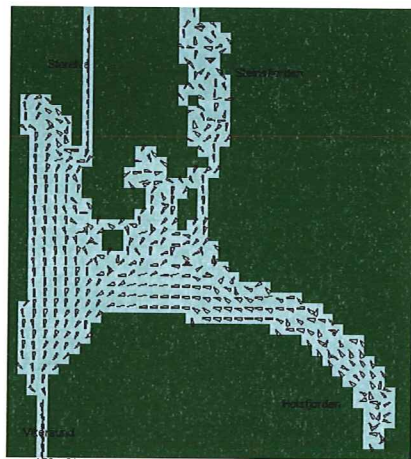
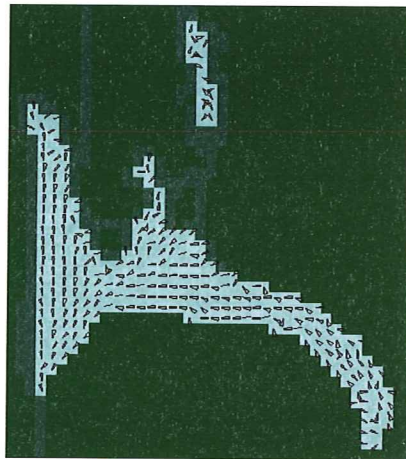


FREMTIDIG ØKT VANNUTTAK I HOLSFJORDEN

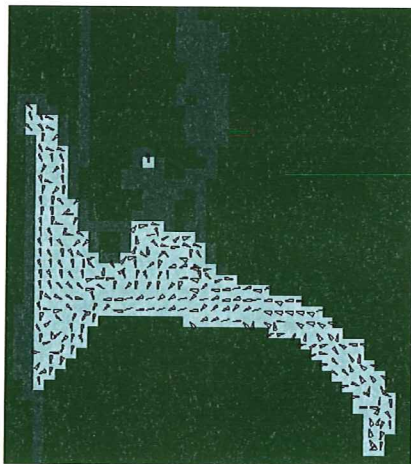
Betydning for strømningsmønsteret i Tyrifjorden med vekt på spredning av bakterier til Holsfjorden fra de mer forurensede delene av fjordsystemet.



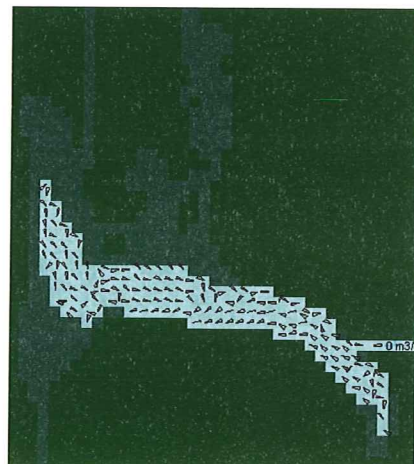
0 - 12 m
0.0 m/s — 5 cm/s 0.1 km



12 - 24 m
0.0 m/s — 5 cm/s 0.1 km



24 - 90 m



90 m

RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning

Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5008 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-NIVA A/S

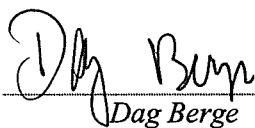
9015 Tromsø
Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 77 68 05 09

Tittel Fremtidig økt vannuttak i Holsfjorden - Betydning for strømningsmønsteret i Tyrifjorden med vekt på spredning av bakterier til Holsfjorden fra de mer forurensede delene av fjordsystemet.	Løpenr. (for bestilling) 4314-2000	Dato 30.11.2000
	Prosjektnr. Udemnr. O-20205	Sider Pris 38
Forfatter(e) Torulv Tjomsland Dag Berge	Fagområde Hydrologi	Distribusjon Fri
	Geografisk område Buskerud	Trykket NIVA
Oppdragsgiver(e) Oslo kommune. Vann- og avløpsetaten (VAV)	Oppdragsreferanse Kjell Eng	

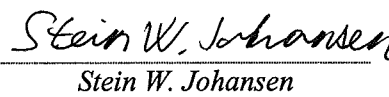
Sammendrag

Det totale vannuttaket fra Holsfjorden vil kunne øke fra i dag ca. 2 m³/s til maksimalt 12 m³/s i fremtiden. For å vurdere om dette kan endre strømningsmønsteret i Tyrifjorden, og om det blir økt inntransport til Holsfjorden av bakterier fra de mer forurensede delene av Tyrifjorden, er det gjort en rekke matematiske strøm- og spredningssimuleringer under ulike værforhold. Simuleringsresultatene er sammenholdt med hydrofysiske og bakteriologiske observasjoner fra fjordsystemet, og dette har dannet grunnlaget for vurderingene. Konklusjonen virker rimelig klar: Hverken strømningsforholdene i fjordsystemet eller den bakteriologiske vannkvaliteten i vannuttakene i Holsfjorden vil bli merkbart endret som følge av økt vannuttak til 12 m³/s.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. Drikkevannskilde	1. Drinking water supply
2. Vannkvalitet	2. Water quality
3. Strøm og spredning	3. Currents and spreading
4. Tyrifjorden	4. Lake Tyrifjorden


Dag Berge

Prosjektleder


Stein W. Johansen

Kvalitetssikrer


Nils Roar Sælthun

Forskningsjef

ISBN 82-577-3946-4

Norsk institutt for vannforskning
Oslo

O-20205

Fremtidig økt vannuttak i Holsfjorden

Betydning for strømningsmønsteret i Tyrifjorden med vekt på spredning av bakterier til Holsfjorden fra de mer forurensede delene av fjordsystemet.

Oslo 30. November 2000

Saksbehandler: Dag Berge

Medarbeider: Torulv Tjomsland

Forord

Rapporten er utarbeidet på oppdrag fra Oslo Kommune, Vann- og avløpsverket, Avdeling for vannforsyning (VAV).

Rapporten gir resultatene av matematiske strøm- og spredningssimuleringer for å belyse om fremtidige økte vannuttak fra Holsfjorden kan medføre at strømningsmønsteret i Tyrifjorden endres slik at det kan skje økt inntransport til Holsfjorden av bakterier fra de mer forurensede deler av fjordsystemet. Simuleringsresultatene er sammenholdt med hydrofysiske og bakteriologiske observasjoner fra Tyrifjorden de siste 20 åra.

Simuleringene er utført av hydrolog Torulv Tjomsland, NIVA. Limnolog Dag Berge har vurdert simuleringene i forhold til reelle observasjoner, og stått for sammenstillingen av rapporten. Han har også vært NIVA's prosjektleder.

Kontaktpersoner i VAV har vært Kjell Engh, som er Oslo kommunes prosjektleder for Holsfjordutbyggingen.

Oslo 30.11.2000

*Dag Berge
(Prosjektleder)*

INNHOOLD

1. SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER	6
2. INNLEDNING	8
3. TIDLIGERE STRØM- OG SPREDNINGSOBSERVASJONER.....	10
4. UTBREDELSESMØNSTER AV KOLIFORME BAKTERIER I TYRIFJORDEN..	15
5. NYE STRØM OG SPREDNINGSSIMULERINGER.....	18
6. KONKLUSJONER OG DISKUSJON.....	33
7. LITTERATUR	37

1. SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER

Det totale vannuttaket fra Holsfjorden vil kunne øke fra ca. 2 m³/s, som er normalt i dag, til totalt 12 m³/s i fremtiden. Oslo kommune (VAV) har planer om å ta ut vann fra Holsfjorden med maksimalt uttak beregnet til 6 m³/s. Uttaket er tenkt lagt til 100 meters dyp. Man ønsket en vurdering, basert på realistiske modellsimuleringer, av om de økte vannuttakene kan endre strømningsmønsteret i Tyrifjorden slik at det blir økt innstrømning til Holsfjorden av bakterier fra de mer forurensede delene av Tyrifjorden.

Det ble antatt at tilførslene av termotolerante bakterier til Tyrifjorden var som observert i 1999/2000 (Berge m.fl. 2000). Tilførslene ble fordelt slik: Storelva 80%, Tyristrand området 10%, Sundvollen området 7% og i sørenden av Holsfjorden 3%. I Storelva ble det antatt midlere årsvannføring og en konsentrasjon på 400 termotolerante bakterier/100 ml.

Det er laget spredningsscenarioer ved å benyttet strøm- og spredningsmodeller ved ulike vind og temperaturprofiler i innsjøen. Resultatene fra disse simuleringene sammen med generelle hydrodynamiske vurderinger sammenholdt med observasjoner fra Tyrifjorden, har dannet grunnlag for konklusjonene.

Ved sterk vind mot øst eller sørøst kan vi forvente at de ytre delene av Holsfjorden kan bli påvirket av bakterier. Det er meget liten sannsynlighet for at selve vannuttaket vil kunne bli forurenset. Ved andre vindretninger vil bakteriene mest sannsynlig dø før de når inn i Holsfjorden. I perioder hvor det kun er gjennomstrømning, f.eks. under islagt innsjø eller etter lengre vindstille perioder, blir strømhastighetene såpass små at bakteriene kun i liten grad spres før de dør eller sedimenterer. Bakterietilførslene sør i Holsfjorden er såpass små at kun en ubetydelig andel forventes å nå dypvannsuttakene, og da kun inntakene nærmest Sylling.

Vannskiftningen i Holsfjorden i tillegg til gjennomstrømning skjer fortrinnsvis i form av vinddrevne strømmer. Vinddrevne strøm på 5 cm/s inn i Holsfjorden gjennom et tverrsnitt tilsvarende en bredde på 2 km og en dybde på 10 m, gir en vannføring på 1000 m³/s. Reelle verdier vil selvfølgelig variere mye, men vil, i alle fall i den isfrie delen av året, være av en helt annen størrelsesorden enn vannuttaket og fullstendig dominere over bidraget fra vannverksuttaket.

Ingen av modellsimuleringene viste at vannuttaket fra Holsfjorden ville endre strømningsmønsteret i Holsfjorden. Ved maksimalt vannuttak på 12 m³/s lokalisert til kun ett vannuttak blir strømhastighetene noen få 10-metere fra tunnelåpningen bare noen mm/s. Slike strømhastigheter vil ikke skille seg ut i fra de naturlige forekommende i omgivelsene. Vann fra de sentrale delene av Tyrifjorden vil nødvendigvis trekkes mot vannuttaket tilsvarende vannuttakets

størrelse selv om hastighetene vil være så små at de ikke vil være målbare. Imidlertid vil dette ikke influere på bakterienes spredningsforløp. De vil uansett dø eller sedimentere på praktisk talt det samme stedet i innsjøen med eller uten vannuttak. Selv simuleringer under vindstille forhold hvor hele avløpet fra Tyrifjorden ($162 \text{ m}^3/\text{s}$) ble tenkt ledet til vannuttaket i Holsfjorden gav så små strømhastigheter at bakteriene ville dø lenge før de nådde fram til vannuttakene i Holsfjorden.

Konklusjonen virker rimelig klar: Økt vannuttak fra Holsfjorden opptil $12 \text{ m}^3/\text{s}$ vil ikke gi hverken målbar eller merkbar endring av strømførholdene i Holsfjorden. Det vil heller ikke medføre noen økt fare for inntransport til Holsfjorden av bakterier fra de mer forurensede deler av Tyrifjorden.

2. INNLEDNING

I forbindelse med høringen til Holsfjordprosjektets konsekvensutredning har det fremkommet behov fra flere hold om fremtidig økt vannuttak fra Holsfjorden. Man er bekymret for at når disse realiseres, vil det kunne endre på strømningsmønsteret i Holsfjorden og Tyrifjordsystemet, slik at man kan få økt innstrømning til Holsfjorden av forurensninger fra de mer forurensede deler av Tyrifjorden.

Det foreligger ingen formelle, samlede kalkyler over hvilket vannuttak som forventes tatt ut av Holsfjorden i fremtiden, men noen antydninger er gitt nedenfor. Oslo kommune (VAV) tar sikte på å bygge et uttak som kan være i stand til å forsyne hele Oslo, ca 6 m³/s. Normalt vil tappingen fra Holsfjorden være mye mindre, ca 1-2 m³/s. Asker og Bærum har i dag en konsesjon på maks 1,5 m³/s. Vanningsvann til Lierelva har i dag en konsesjon oppad til 1,2 m³/s, men man kan tenke seg at dette stiger til 3 m³/s. Drammensområdet har et fremtidig økt drikkevannsbehov anslått til 1,5 m³/s. En av planene er å dekke dette fra Holsfjorden. I tillegg har Sylling drikkevannsinntak i Holsfjorden, på ca 0,03 m³/s. Når alt dette legges sammen blir det fremtidige uttaket fra Holsfjorden ca 12 m³/s, noe som er et maksimalt anslag. I tillegg kommer noe uttak av vann til jordbruksvanning langs fjorden.

VAV har i sin utredning bare vurdert hvordan sitt uttak vil influere på strømningsforhold. Det har nå fremkommet sterke ønsker fra flere høringsinstanser/brukere om at innvirkning på strømningsforhold må analyseres i modellberegninger der de maksimale fremtidige uttaksmengder legges til grunn (kfr. uttalelse fra Glitrevannverket).

Strøm og spredningsanalysene vil omfatte

1. Innvirkning på strømningsforhold
2. Fare for spredning av hygienisk forurensning fra de mer forurensede deler av Tyrifjorden

Analysene blir utført ved hjelp av anerkjente matematiske strøm- og spredningsmodeller, som bl.a. tidligere er kalibrert i Tyrifjorden.

Det vil bli gjort simuleringer for flere uttaksmengder: Intet vannuttak fra Holsfjorden, 12 m³/s (fremtidig anslått maks-uttak), samt en tenkt situasjon der hele Tyrifjordens avløp går ut i Sylling, slik det var en gang for ca 10000 år siden.

Det vil bli gjort simuleringer for sjiktet vannmasse (typisk sommersituasjon) , og usjiktet vannmasse (vår, høst, og det meste av vinteren), samt islagt situasjon. Det vil bli simulert for vindstille vær og sterk vind.

Det vil bli lagt på typiske konsentrasjoner av termostabile koliforme bakterier i innkommende vann fra Storelva (ca 80%), langs Tyristrand-Vikersund området (ca 10%), i Sundvolden området (ca 7%), samt i Sylling (ca 3%). Disse vil bli pålagt en karakteristisk dødsrate og sedimentasjonsrate. Kombinert med strømberegningene vil dette gi et bilde over forventet spredning av hygienisk forurensning innover i Holsfjorden ved ulike vannuttak. Disse typer av simulering har tidligere gitt god overensstemmelse med observerte forhold i Tyrifjorden.

3. TIDLIGERE STRØM- OG SPREDNINGS-OBSERVASJONER

I den isfrie delen av året er det vinden som er den dominerende strømndrivende kraft. I tillegg kommer gjennomstrømning av vann fra tilløp - utløp (og vannuttak) og som følge av vannstandsending på omkring 2 m, fortrinnsvis i tilknytning til snøsmelteflommen.

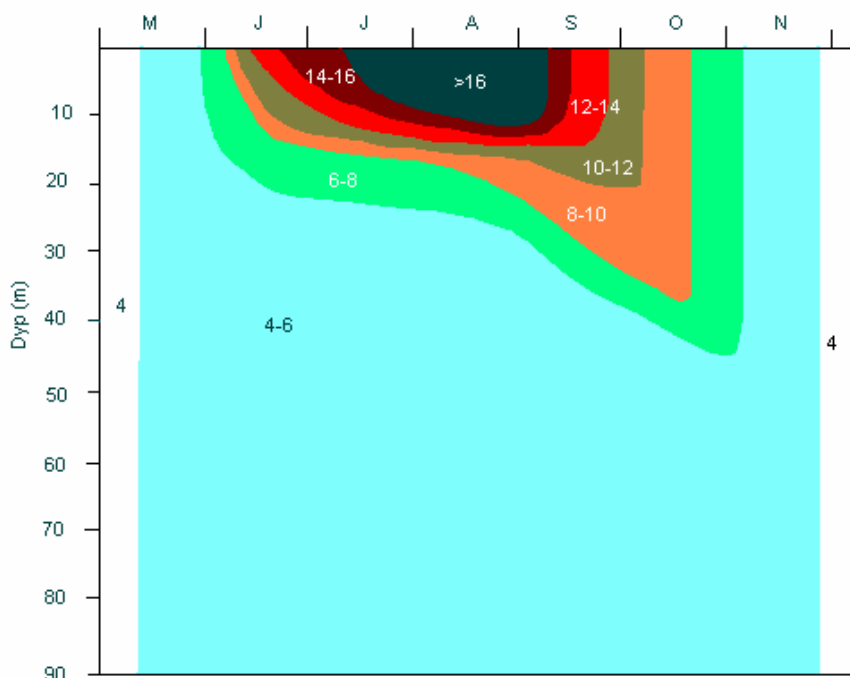
Årlig middelvannføring ut av Tyrifjorden er på ca. 160-170 m³/s (kfr Berge 1983). Deler av dette vannet strømmer fra Storelva i Nordfjorden direkte til utløpet ved Vikersund, mens spredning til Holsfjorden skjer fortrinnsvis ved strømmer p.g.a. vind og vannstandshevning og noe også som følge vannuttak. Det er hva vannuttaket betyr, man skal prøve å finne ut av her.

For Steinsfjorden ble midlere årlig vannutskiftning både p.g.a. gjennomstrømning og vannstandsending beregnet til nær 1 m³/s, mens bidraget fra vinddrevede strømmer gjennom Kroksund ved Sundvollen ble anslått til 0.01 m³/s. For Holsfjorden blir tilsvarende vannutskiftning fra vannstandsendinger ca. 1 m³/s, gjennomstrømning p.g.a. vannuttak på noen kubikkmeter pr. sekund, mens den vinddrevede vannutskiftningen kan være mer enn tusen ganger større.

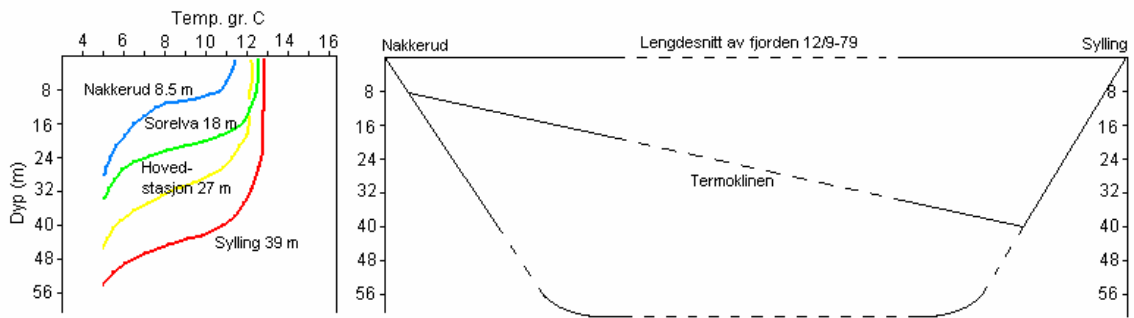
I [Figur 3.1](#) er temperaturforholdene i Tyrifjorden fra mai til ut november vist. Det er bare tatt med verdier fra 0-90m da det på større dyp er nærmest konstant temperatur rundt 3,8-4 °C. I mai sirkulerer vannmassene med 4 °C gjennom hele vannsøylen. Utover sommeren varmes overflatevannet opp. Det utvikles et varmt overflatelag med tykkelse ca 10-15m med relativt jevn temperatur. Dette overflatelaget kalles epilimnion. Under dette ligger et overgangssjikt karakterisert av raskt temperaturavtak med dypet. Dette kalles sprangsjiktet, metalimnion eller termoklinområdet. Under dette ligger det permanent kalde dypvannet (hypolimnion). Tetthetsdifferensene p.g.a. temperaturforskjellene gjør vannmassene stabile og motvirker vertikal transport og dermed spredning av forurensninger. I slutten av november/begynnelsen av desember er temperaturen igjen blitt 4 °C og innsjøen sirkulerer. Høsten 1999 var svært mild, og innsjøen sirkulerte dette året ikke før ved årsskiftet. Ved ytterligere avkjøling utover vinteren blir overflatevannet lettere og vannmassene mer stabile for vertikal transport. Vår og senhøstes, da vannmassene sirkulerer, eller er lite stabile og dermed utsatt for sterk vertikal blanding som følge av vind, er innsjøen mest utsatt for transport av f.eks. bakterier til dypt vann. Da vannvolumet som blandes er svært stort vil konsentrasjonene bli tilsvarende lave. Horisontale vinddrevede strømmer møter mer motstand under sirkulasjonsperiodene, noe som gjør at bakterieforurensset vann fra Storelva ikke trenger så langt inn i Holsfjorden som om sommeren.

I slike store innsjøer som Tyrifjorden kan sprangsjiktet stille seg skrått som følge av vedvarende vind i én retning. Et situasjonsbilde fra 12. september 1979 illustrerer dette, se Figur 3.2. Ved den anledningen hadde det vært langvarig forutgående nord-vest vind. Overflatevannet ble stuert opp i Sylling som igjen bevirker at dypvannet presses opp i den motsatte enden av fjorden. I Nordfjorden lå termoklinen på dette tidspunkt på 6 m, mens den lå på ca 40m's dyp i Sylling. I lé-enden av fjorden får man oppadgående strømmer (upwelling), mens man i lo-enden får nedadgående strømmer (downwelling). Innblanding av hypolimnionvann i le-enden fører til at overflatetemperaturen kan være opptil 5-6 grader lavere enn i den andre enden av fjorden. I drikkevannssammenheng vil slik skråstilling av termoklinen være et problem for uttak av drikkevann i enden av store innsjøer hvis inntaket ligger for grunt. Vanninntaket kan lett bli liggende i epilimnion flere ganger i løpet av sommerhalvåret.

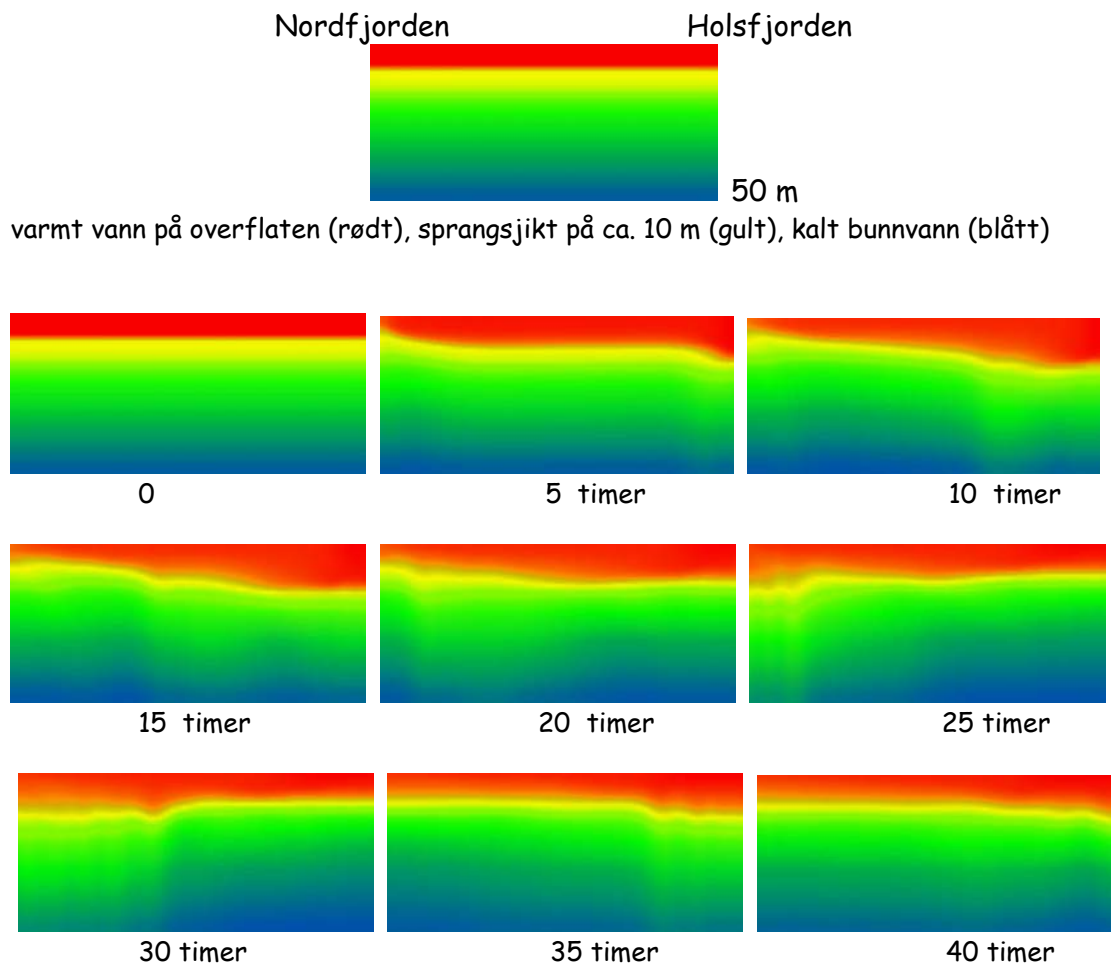
Ved vedvarende vind over en lagdelt innsjø blir vannoverflaten svakt skrånende mot vindretningen. Dette forårsaker en returstrøm i dypere lag slik at sprangsjiktet får en stigning i motsatt retning av overflaten. Når vinden opphører kan det settes igang en stående bølgebevegelse (seiche) som kan svinge fram og tilbake fra mellom endene av innsjøen, i dette tilfellet mellom Holsfjorden og Nordfjorden. Stømretningen vil være motsatt rettet over og under sprangsjiktet. De største hastighetene vil finne sted like under sprangsjiktet. Observasjonene i sentrum av Tyrifjorden viser at slike indre bølger er vanlige i Tyrifjorden. En slik seiche er simulert vha datamaskin i [Figur 3.3](#).



Figur 3.1 Temperaturforholdene i Tyrifjorden i sommerhalvåret fra overflaten og ned til 90m dyp, °C. (fra Berge 1981).



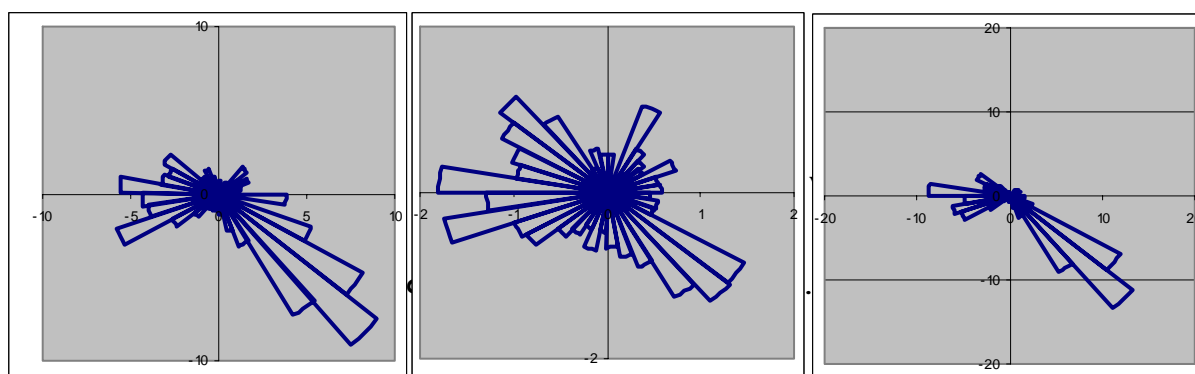
Figur 3.2 Temperatursprangsjiktets stilling etter vedvarende vind fra nord/nordvest. Situasjonsbilde fra 12/9-79 (etter Berge 1980).



Figur 3.3 Simulerte indre bølger (seiche)

Indre bølger har stor betydning for vannutskiftningen spesielt i perioder hvor det er et velutviklet sprangsjikt om sommeren. Simuleringsresultatene som vist i Figur 3.3 er et eksempel på hvordan en slik bølge kan forplante seg en gang fram og tilbake mellom endene av Holsfjorden og Nordfjorden (Olsen og Tjomsland 1998).

Sommeren 1998 var de vanligste vindretningene på Frognøya rettet mot sørøst og mot vest, Figur 3.4. Tidligere undersøkelser over en lengre periode viste en noe mer nord- og sørlig retning. Stasjonen bør være representativ for størstedelen av Tyrifjorden. Observasjoner ved Sundvollen (Figur 3.5) viser imidlertid at Steinsfjorden og sannsynligvis også Holsfjorden blir sterkt påvirket av fallvinder mot vest fra de høytliggende områdene østenfor (Bratli m.fl. 1999). Observasjoner viser at strømmene stadig endres i både retning og fart. Imidlertid viste observert strøm i sentrum av Tyrifjorden en samlet vanntransport som hadde omtrent samme retning som vind observert på Frognøya, Figur 3.6. Disse hovedretningene bidrar til en effektiv vannutskiftning av Holsfjorden.

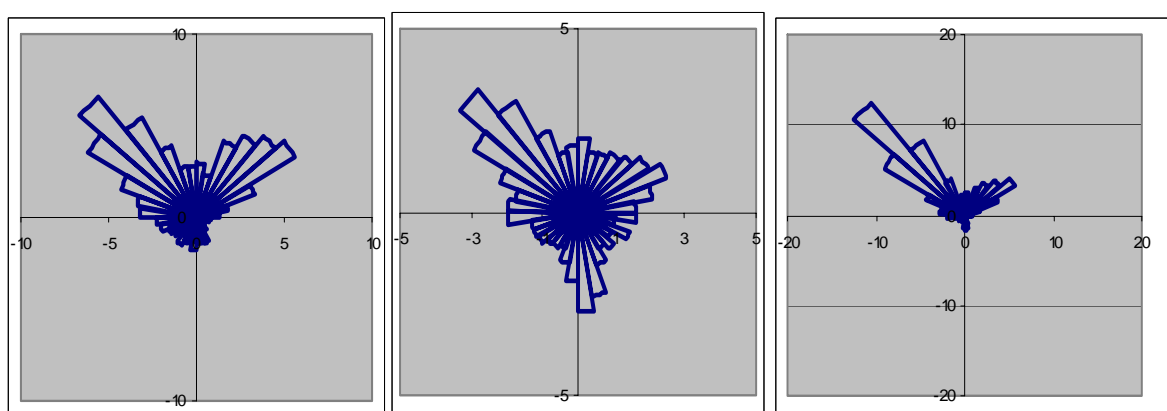


Vindretning mot (%)

Midlere fart (m/s)

Vindvei (%)

Figur 3.4 Vindobservasjoner på Frognøya 18. Juni - 4. Juli 1998

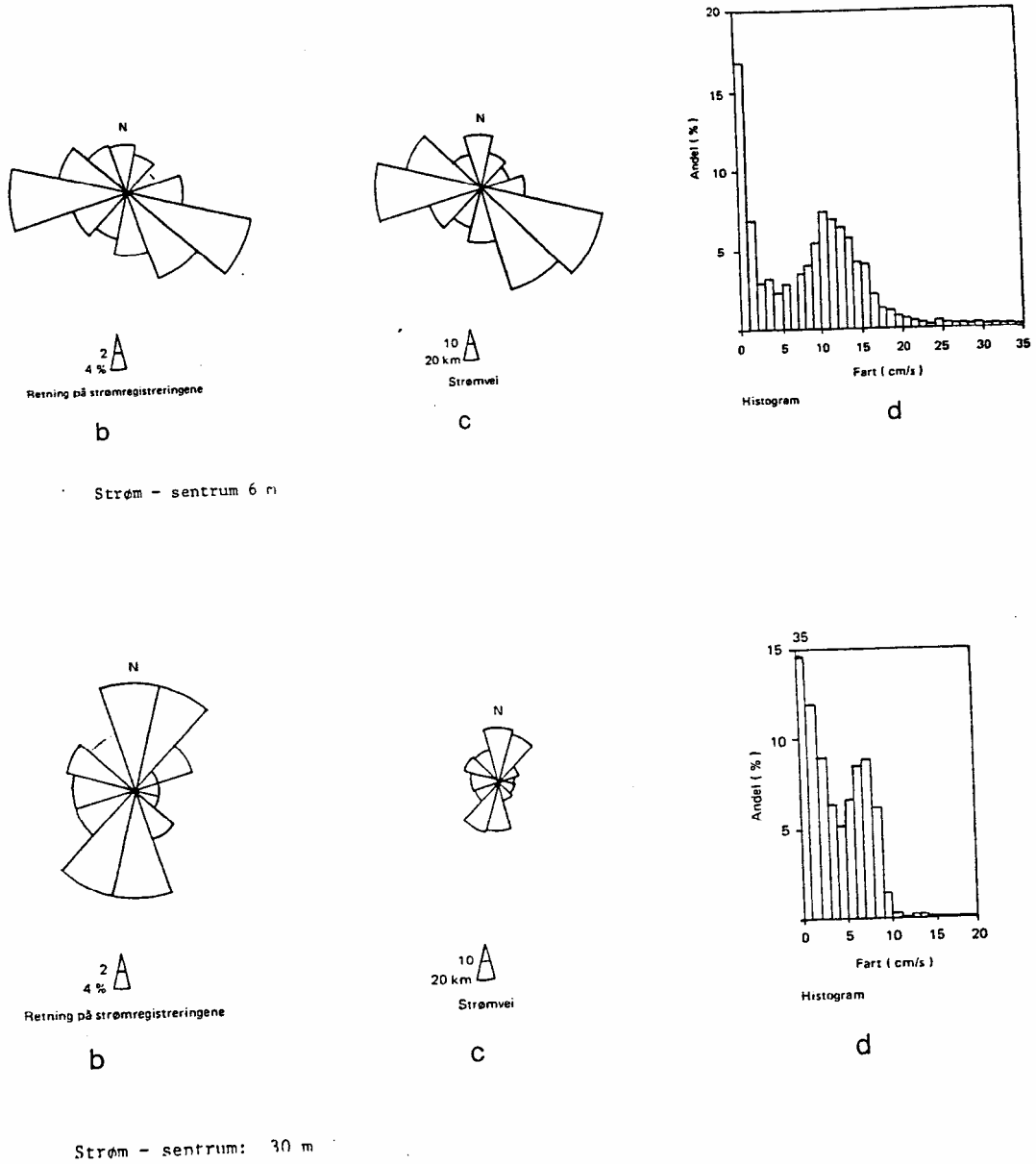


Vindretning mot (%)

Midlere fart (m/s)

Vindvei (%)

Figur 3.5 Vindobservasjoner på Sundøya i Kroksund 11. Juni-16. september 1998.



Figur 3.6 Strømobservasjoner i sentrum av Tyrifjorden

4. UTBREDELSESMØNSTER AV KOLIFORME BAKTERIER I TYRIFJORDEN

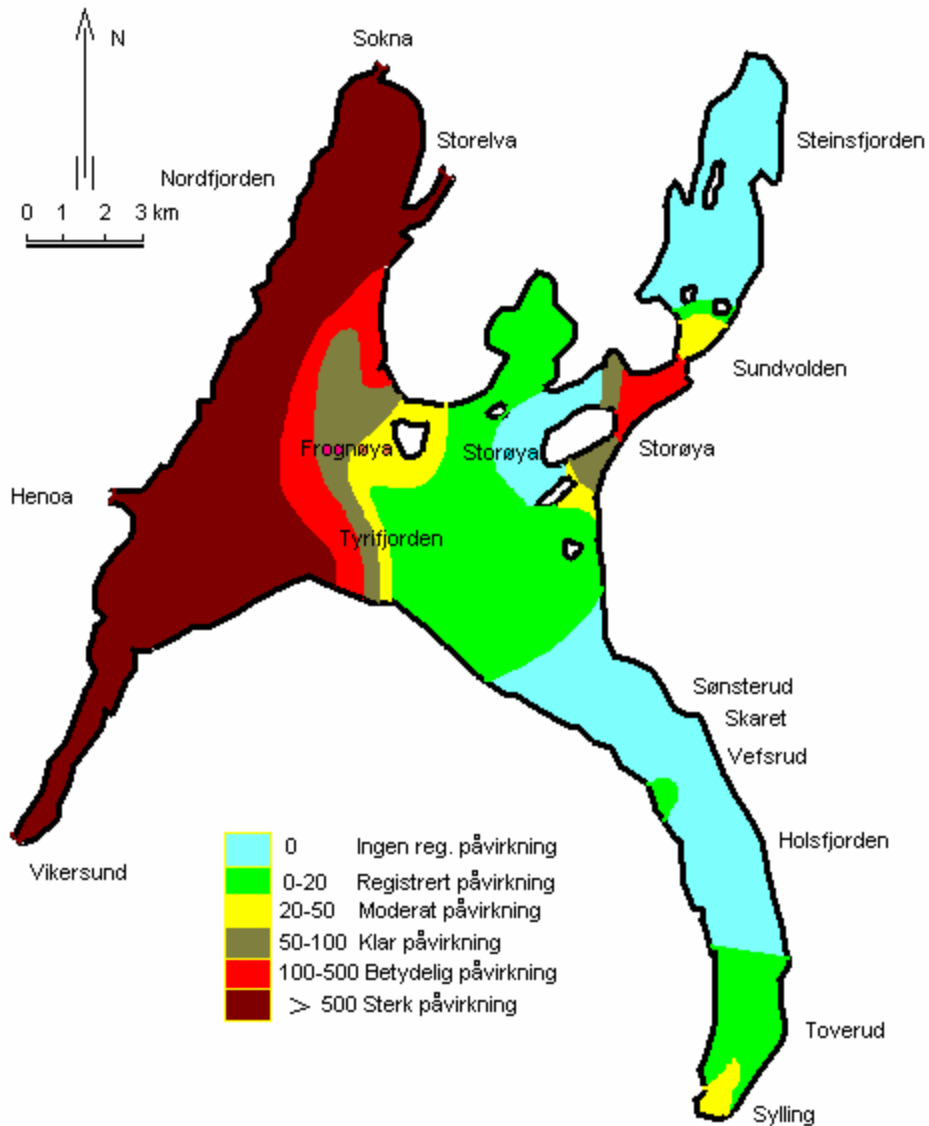
Naturlig forekommende bakterier er et viktig ledd i omsetningen av organisk materiale i innsjøer. De finnes i alle typer innsjøer, selv små upåvirkede lokaliteter. Det finnes imidlertid også bakterier som er fremmede for det vandige miljø, deriblant de såkalte tarmbakterier (koliforme bakterier) som stammer fra menneskers og dyrs avføring. Disse bakteriene er ikke tilpasset et liv i vann og vil ha en begrenset levetid. De dør vanligvis nokså raskt, noe som gjør at bakteriene kan brukes som indikator på fersk forurensning. Siden disse bakteriene i hovedsak tilføres via kloakkutslipp og andre punktkilder, kan de også brukes til å spore forurensningens "vei" gjennom innsjøen.

Statens Institutt for Folkehelse (SIFF) gjorde undersøkelser på 75 stasjoner i Tyrifjorden fra 1975-1980. Prøver ble tatt 2 ganger per år fra overflaten og helt ned til 100m. De som ledet undersøkelsene, Jan Riise (nå EnCo AS) og Harald Solberg (nå SFT), sluttet imidlertid før undersøkelsene var avsluttet og noen ordentlig rapport ble aldri skrevet, med unntak av fra det første året. Ellers er det eneste som er rapportert fra disse undersøkelsene det som ble presentert i Tyrifjordundersøkelsens sluttrapport (Riise og Solberg 1983). Et sammendrag av dette gjengis her.

Det er under sirkulasjonsperiodene at det forurensede overflatevannet kan bringes ned i dypet hvor drikkevannsinntaket skal ligge. I disse periodene vil de horisontale vinddrevne strømmene være mindre enn i den sjiktede periode. Særlig om sommeren kan forurenset vann fra Hønefossområdet transporteres langt innover i Holsfjorden, men kommer da ikke ned i dypet pga. temperatur-sprangsjiktet. I Figur 4.1 er det fremstilt midlere konsentrasjon av total koliforme bakterier (37 °C) under vårsirkulasjonen.

Storelva er viktigste forurensningskilde til bakteriologisk forurensning av Tyrifjorden, og forurensningen herfra dominerer fullstendig den vestre del av Tyrifjorden. Strekningen Bønsnestangen - Frognoya - Dignestangen danner bakteriologisk sett en grenselinje mot resten av fjorden. Vest for denne linjen må innsjøen karakteriseres som betydelig bakteriologisk forurenset. Utover mot de sentrale deler, og spesielt nedover Holsfjorden bedrer de bakteriologiske forholdene seg betydelig. I sommerhalvåret brer det seg en "tunge" av bakterieforurensning fra Nordfjord-Vikersund bassenget rundt Gulsrudtangen og lengere eller kortere nedover i Holsfjorden. Bassengform og jordrotasjonens avbøyende kraft gjør at det forurensede vann holder seg langs vestsiden av Holsfjorden. En av årsakene til at bakterietungen ikke er registrert lenger syd enn til Kimmerud, er at bakteriene dør, sedimenteres ut, eller spises av ciliater, hjuldyr og krepsdyrplankton. Simuleringer ved hjelp av spredningsmodeller viste

at ved å tillegge bakteriene en normal dødsrate og samholde dette med registrerte og beregnede strømhastigheter, så ville ikke bakterier fra Storelva under noen værforhold komme mer enn halvveis inn i Holsfjorden.

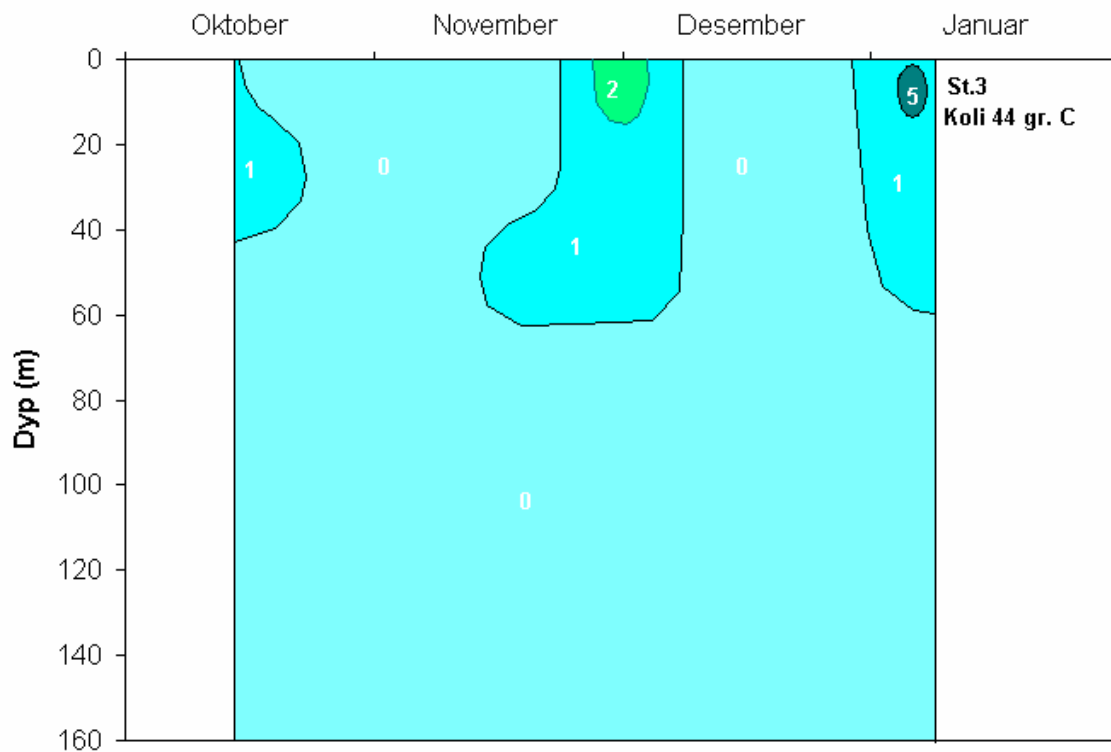


Figur 4.1 Midlere konsentrasjon (antall/l) av total koliforme bakterier (37 °C) i sjiktet 0-100 meters dyp i Tyrifjorden under vårsirkulasjonen i mai 1980 (etter Riise og Solberg 1983).

Ved siden av Storelva og bebyggelsen langs Tyrstrand er det ytterligere 2 områder med markert påvirkning, nemlig ved Svangstrand i Sylling og på strekningen Sundvollen - Nes. På denne siste strekningen er det tydelig påvirkning fra turistaktiviteten i tillegg til den spredte bebyggelsen. Bebyggelsen og camping-

plassen på denne strekningen er nå avkloakkert og avløpet føres til Hole RA ved Helgelandsmoen. Det er derfor sannsynlig at de bakteriologiske forholdene her har bedret seg. Fra Sønsterud og sydover i Holsfjorden er fjorden lite bakteriologisk forurenset før helt syd ved Svangstrand i Sylling.

Tilførselene av sanitæravløp til Tyrifjorden er betydelig redusert siden 1980 og VAV's undersøkelser i Holsfjorden høsten 1999 og vinteren 2000 (Berge m.fl. 2000), viste at den bakteriologiske situasjonen er bedre nå enn det resultatene i utbredelsesfiguren viser. Da det kun var Holsfjordarmen som ble undersøkt ved siste undersøkelse gir disse dataene ikke empirisk grunnlag for å tegne et oppdatert utbredelsesmønster for bakterier i hele fjorden. Man må imidlertid kunne anta at mønsteret er noenlunde det samme, men med noe lavere konsentrasjoner.



Figur 4.2 Innhold av termotolerante koliforme bakterier (TKB 44 °C) per 100 ml vann i Holsfjorden utenfor Vefsrud under sirkulasjonsperioden høst/vinter 1999/2000 (Berge m.fl 2000).

PS! Resultatene i figur 4.1 og 4.2 er ikke direkte sammenliknbare, da det i førstnevnte figur dreier seg om totalkoliforme bakterier (antall/l), mens det i sistnevnte er termotolerante koliforme bakterier (antall/100 ml).

5. NYE STRØM OG SPREDNINGSSIMULERINGER

Som nevnt innledningsvis var hensikten med de nye simuleringene å se om de fremtidige skisserte økninger i vannuttak fra Holsfjorden ville påvirke strømningsforholdene, samt spredning av bakterier inn til Holsfjorden fra de mer forurensede deler av Tyrifjorden.

Vi har benyttet en matematisk strøm- og spredningsmodell (Tjomsland 1980) for å simulere karakteristiske strømmer og spredningsscenarier for bakterier. Modellen er opprinnelig utviklet for de store sjøene i USA og Canada (Simons 1976), og er kalibrert mot reelle observasjoner av strøm og bakterier, samt sporstofftilsetninger til Tyrifjorden under den store Tyrifjordundersøkelsen i 1977-81 (Tjomsland 1980, 1983). Modellen ble funnet å kunne simulere de observerte strøm og spredningsforhold i Tyrifjorden meget godt.

De første simuleringene gjaldt de vanligst forekommende vindretningene og vindstyrker. Deretter har vi utført simuleringer ved sterk vind i ulike retninger, samt under vindstille forhold, hvilket også representerer en vintersituasjon med islagt innsjø. De presenterte strømkartene viser forholdene etter 12 timer med konstant vind. Kartene med bakteriekonsentrasjonene representerer en likevektsituasjon, dvs. maksimal utbredelse ved det gitte strømningsmønsteret.

Det ble antatt følgende tilløpsvannføringer: Storelva/Sokna/Skjærdalselva/Henoa i Nordfjorden $160 \text{ m}^3/\text{s}$, til Steinsfjorden $2 \text{ m}^3/\text{s}$ og til Holsfjorden $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Vannuttaket i Holsfjorden ble satt lik $12 \text{ m}^3/\text{s}$, det vil si lik maksimum fremtidig uttak. Uttaket ble lagt til 100 meters dyp. Vannføringen ved utløpet ved Vikersund ble satt lik $152 \text{ m}^3/\text{s}$ slik at sum tilløp ble lik sum avløp. Vannføringene representerer en situasjon nær midlere årsavløp.

I modellkjøringene ble det antatt at 80% av de totale bakterietilførselene til Tyrifjorden kom via Storelva/Sokna, 10% ved Tyristrand (Skjærdalen/Henoa), 7% nær Sundvollen og 3% i sørenden av Holsfjorden (Svangstrand). Konsentrasjonen i Storelva ble satt lik 400 termotolerante koliforme bakterier per liter ved $44 \text{ }^\circ\text{C}$, hvilket er et høyt anslag, dvs. tilsvarer de høyeste årsmidler som er observert under overvåkingen (Berge 1986). Bakteriene kan kun formere seg i tarmene hos mennesker og varmblodige dyr og vil følgelig etter hvert dø ut. I modellkjøringene har vi gitt bakteriene stor overlevelsessevne med en spesifikk forsvinningsrate tilsvarende 1 halvering per døgn.

Ved simuleringene ble innsjøen inndelt i celler. I horisontalplanet på 580 m * 580 m, og i dybderetningen adskilt av nivåflater på 12, 24 og 90 meters dyp.

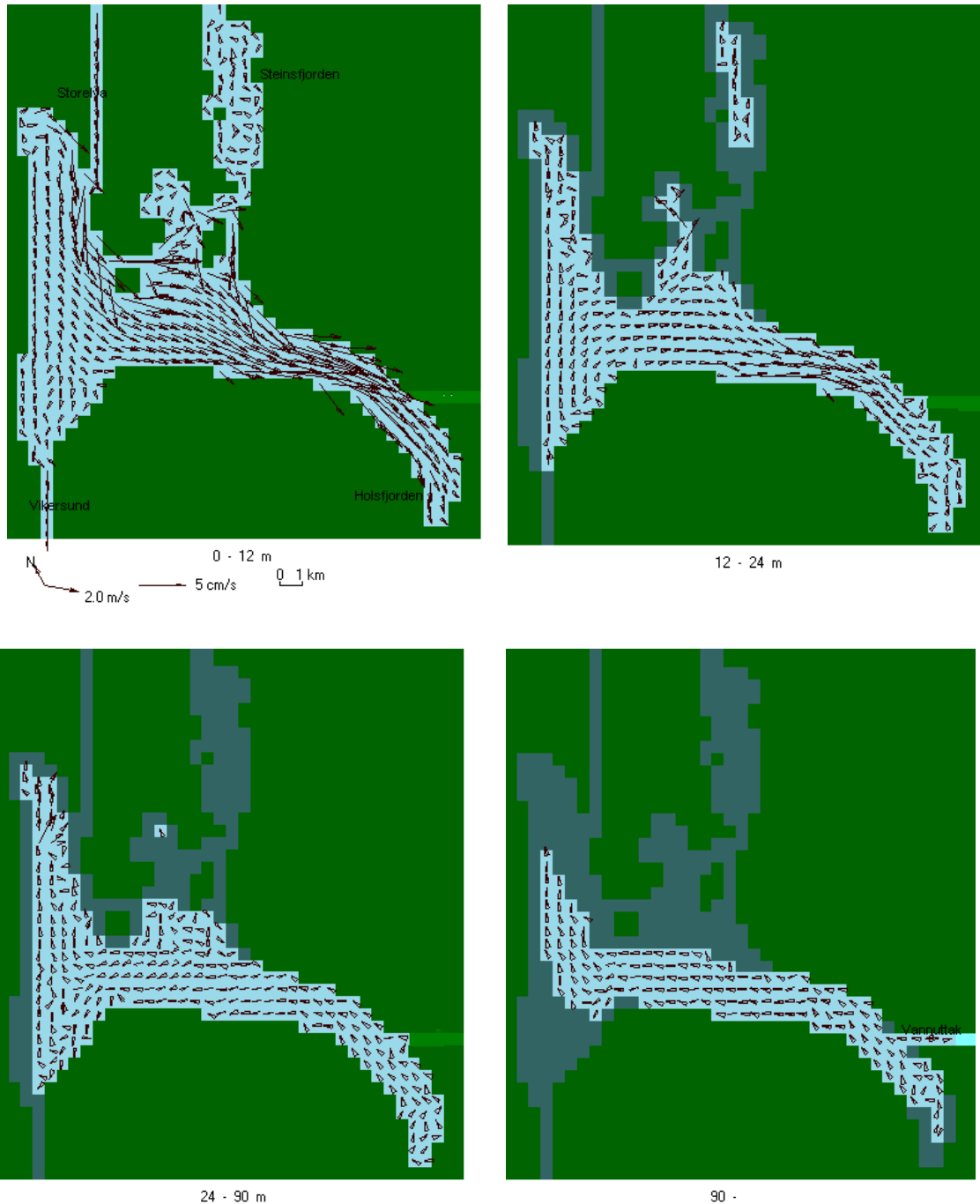
Den første simuleringen ble utført for vind mot sørøst på 2 m/s over en innsjø med et utviklet sprangsjikt, det vil si den mest vanlig forekommende sommersituasjonen. I overflatelagene (0-24 m) strømmet vannet noenlunde i vindretningen fra sentrum og innover Holsfjorden, se Figur 5.1. Dypere ned var strømmene motsatt rettet. Bakteriene ble i stor grad spredt innen overflatelaget (0-12 m) fra Storelva og fra Sundvollen mot Holsfjorden uten å nå langt nok til å påvirke vannuttaksområdene, Figur 5.2. Bakteriene som ble tilført i sørenden av Holsfjorden ble ført utover fjorden på dypere vann (12-24 m) uten å nå så langt som til vannuttakene. Uten sprangsjikt ble strømmene i overflatelagene i mindre grad rettet innover Holsfjorden, Figur 5.3, slik at denne delen dermed ble mindre utsatt for bakteriepåvirkning fra hovedbassenget, Figur 5.4.

Vind mot vest på 2 m/s over en innsjø med et utviklet sprangsjikt representerer den nest mest vanlige sommersituasjonen. I overflatelagene strømmet vannet stort sett fra Holsfjorden og utover mot de sentrale delene av Tyrifjorden, Figur 5.5. Simulering uten sprangsjikt viste tilsvarende resultater, Figur 5.6. Holsfjorden ble ikke påvirket av bakterier fra Storelva, Tyristrand og Sundvollen, Figur 5.7. Bakterier fra sørenden av Holsfjorden ble spredt til overflatelaget i nærheten av vannuttakene (dvs. forbi Toverud, men ikke så langt som til Vevsrud) uten å påvirke selve vannuttakene på dypt vann.

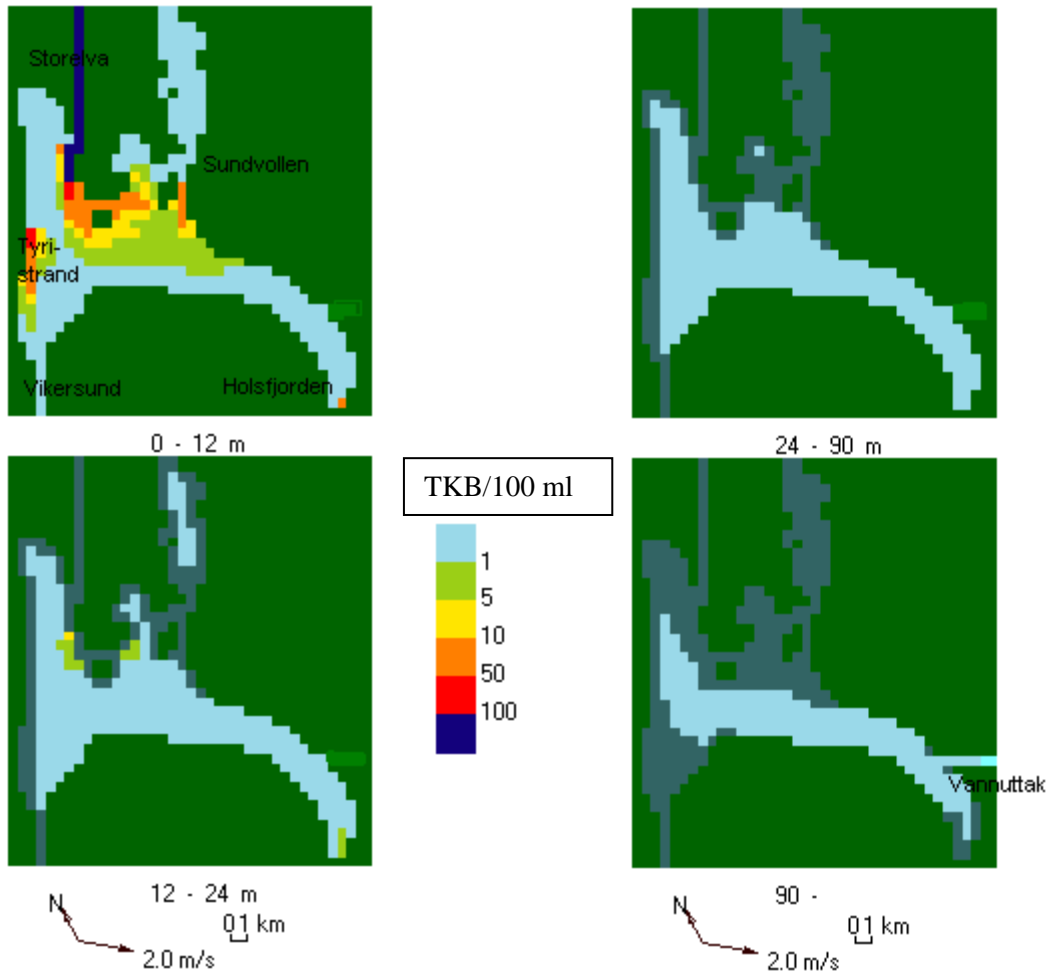
Vi ønsket så å se på virkningen av økt vindstyrke. Det ble simulert strøm for sterk vind 6 m/s mot nord, mot sør, mot øst og mot vest. Resultatene av strømsimuleringene for vind mot nord og sør er vist i Figur 5.8 og Figur 5.9. Konsentrasjonskartene for alle simuleringene er vist i Figur 5.10, (se vindretningen på kartet). Ingen av simuleringene viste bakteriell påvirkning av lagene 24-90 m og under 100 m. Kun ved vind mot øst ble bakteriene spredt innover i Holsfjorden fra hovedbassenget og da kun i overflatelaget. Dypere ned ble konsentrasjonene neglisjerbare på grunn av fortykning eller at bakteriene døde før de nådde fram. Utslipp i sørenden av Holsfjorden ble kun spredt utover i betydelig grad nær overflaten ved vind mot nord og mot vest. Simuleringer uten sprangsjikt ga liknende resultater. Det ble også utført tilsvarende simuleringer uten å ta ut vann i Holsfjorden. Med unntak av cellen like ved tunnelåpningen angående strøm var simuleringresultatene identiske. Det vil si at vi ikke kunne påvise effekter nær vannuttaket, hverken på strømningsmønsteret eller spredning av bakterier.

I vindstille vær eller ved islagt innsjø strømmet vannet stort sett mot utløpet i Vikersund fra hele innsjøen, Figur 5.11. Typisk fart var noen mm/s eller lavere. Den mest markerte strømmen fant sted mellom Storelva og utløpet. Vi laget så et tenkt tilfelle hvor hele avløpet fra Tyrifjorden ble tappet ut gjennom vannuttaket i Holsfjorden. Det vil si at det naturlige avløpet ved Vikersund ble stengt og vannuttaket på 100 meters dyp satt lik 152 m³/s. I dette tilfellet strømmet vann fra hele innsjøen mot dette uttaket, Figur 5.12. Den bakterielle spredningen ble imidlertid tilnærmet den samme for begge scenariene, Figur 5.13. De strømmene som ble forårsaket av inn- og utløpsvannføringene var så lave at

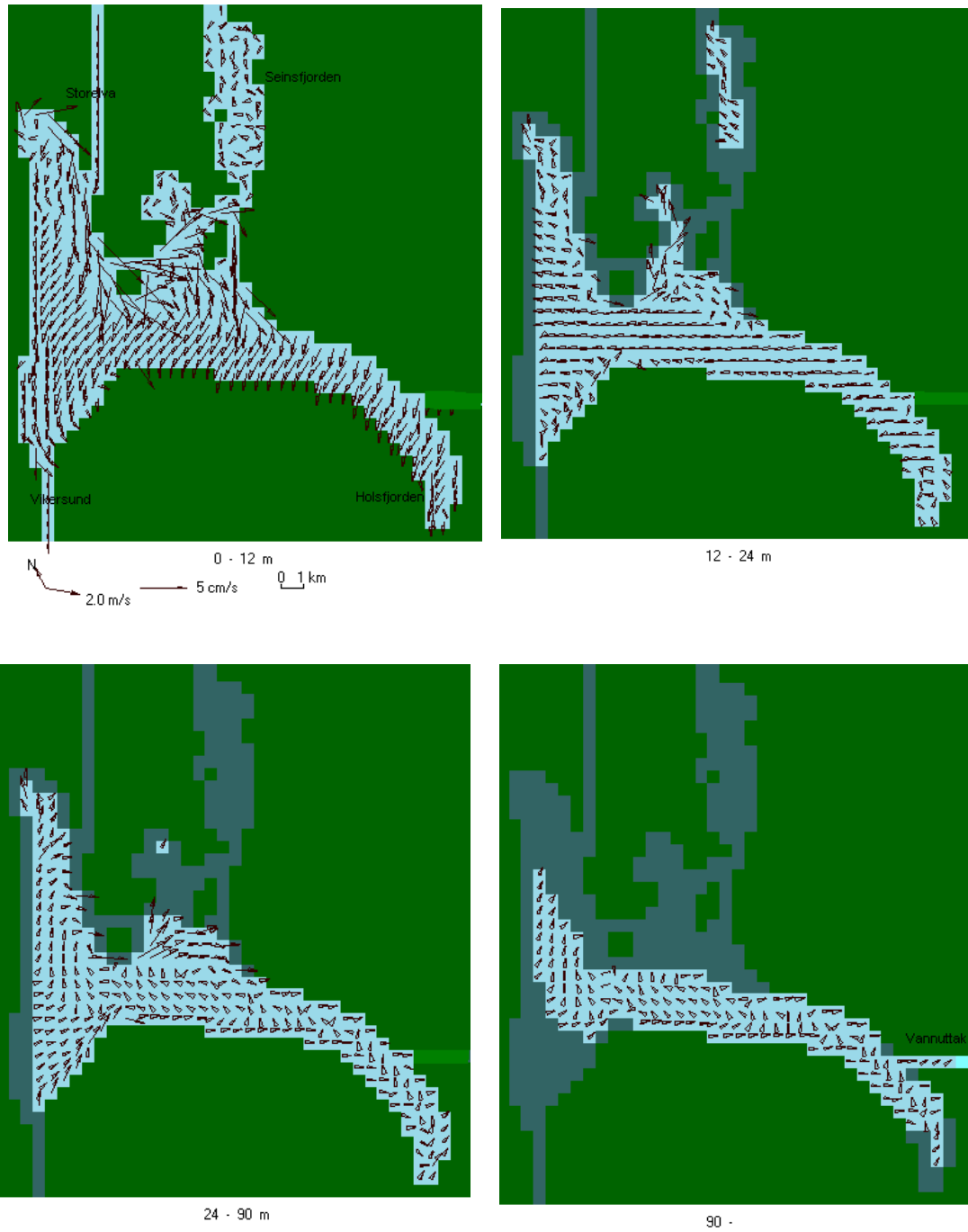
bakteriene døde i området nær der de blir tilført innsjøen. Det vil si at endret vannuttak neppe får påviselige effekter for utbredelsen av bakterier som blir tilført Tyrifjorden, selv på islagt innsjø.



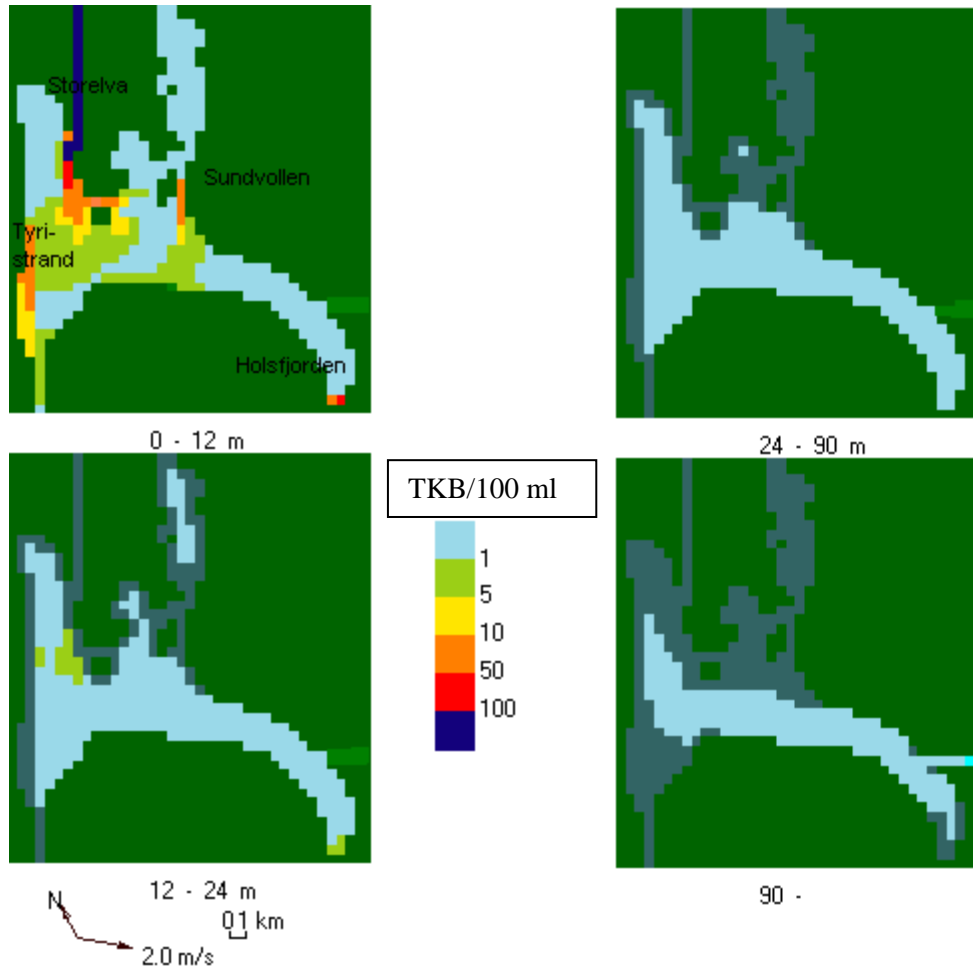
Figur 5.1 Simulert strøm. Vind 2 m/s mot SØ, dvs. midlere vindstyrke om sommeren i den mest vanlige vindretningen. Vannuttak 12 m³/s i Holsfjorden på 100 meters dyp - med sprangsjikt.



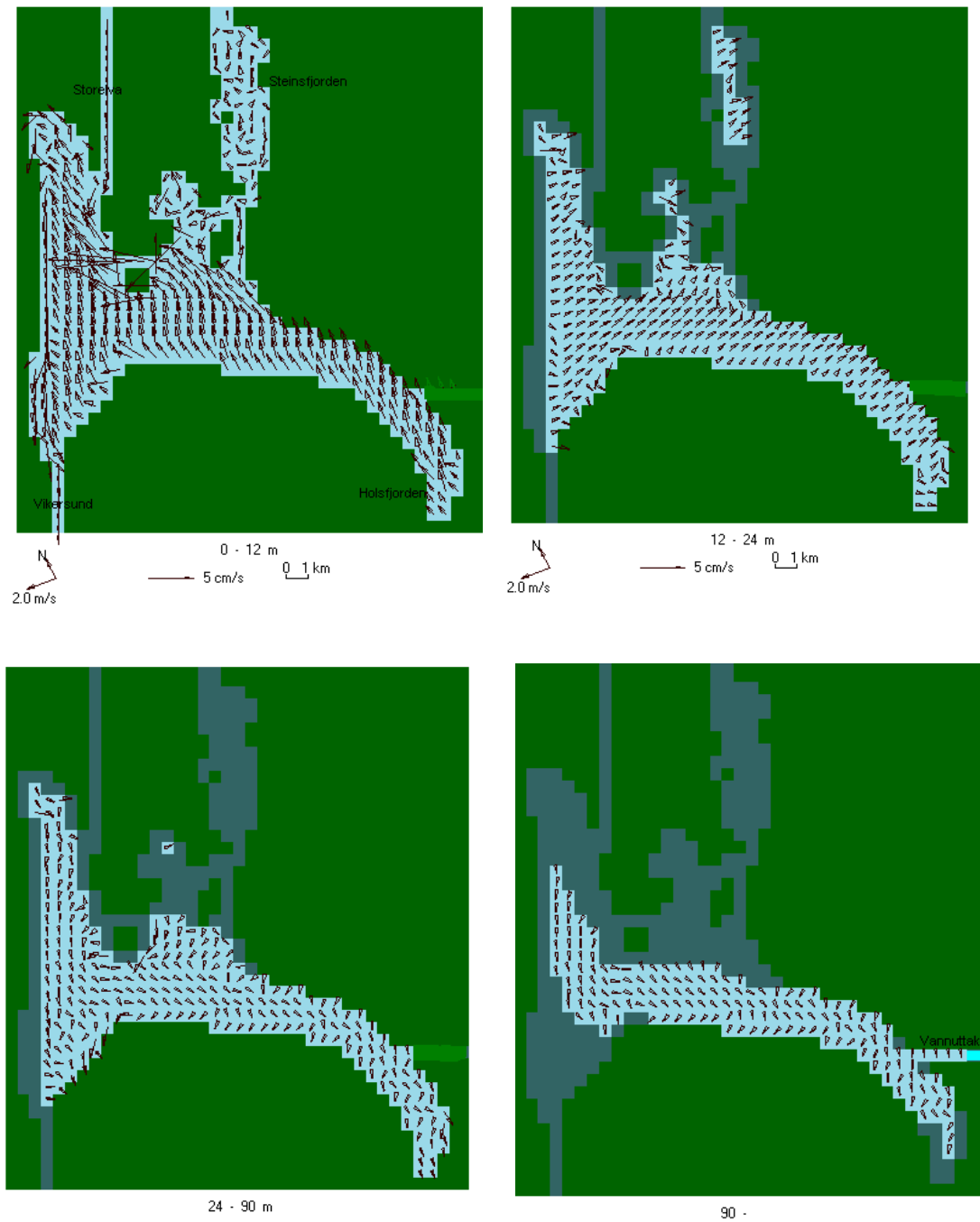
Figur 5.2 Termostabile koliforme bakteriekonsentrasjoner (TKB). Vind 2 m/s mot SØ, vannuttak 12 m³/s i Holsfjorden på 100 meters dyp - med sprangsjikt



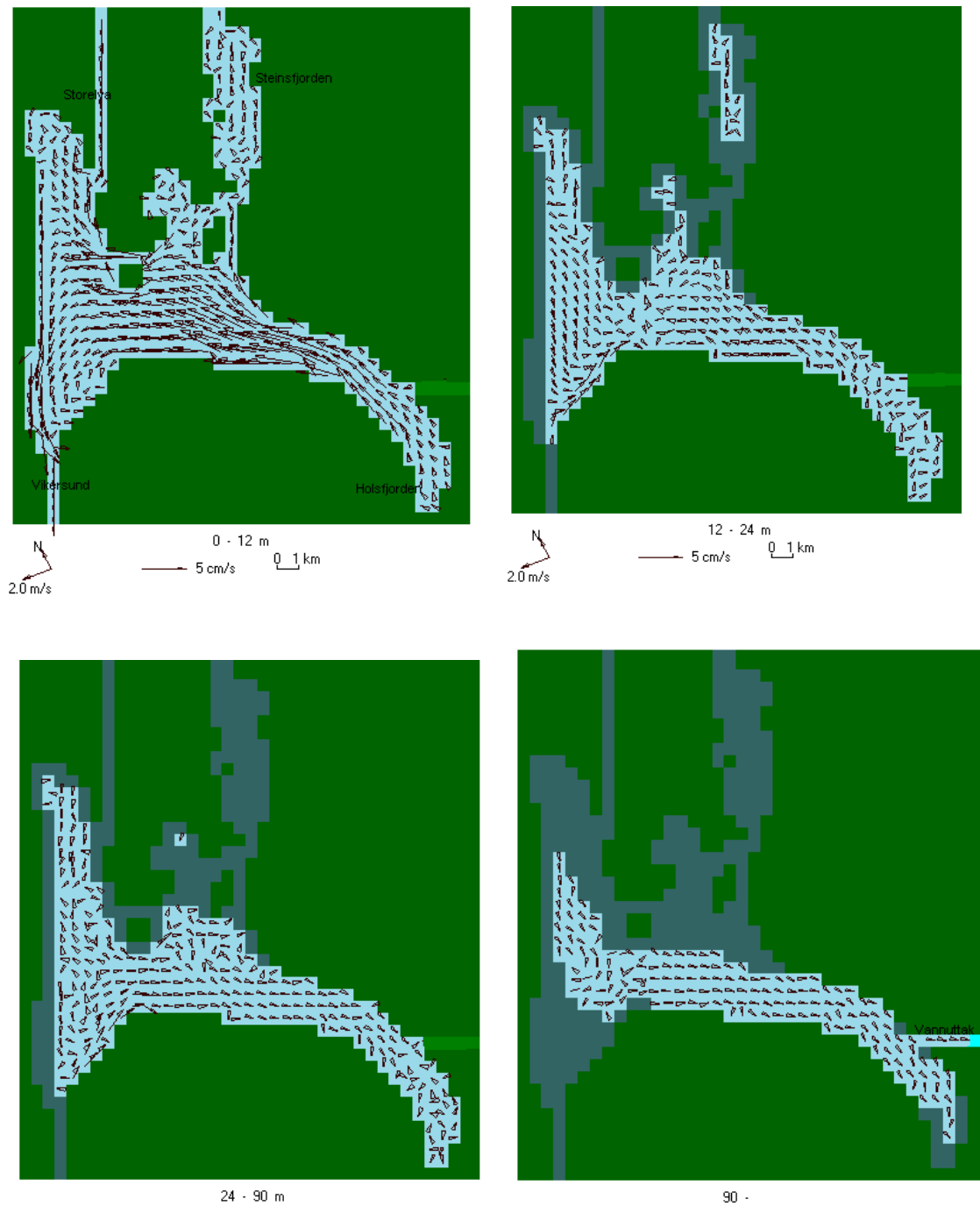
Figur 5.3 Simulert strøm. Vind 2 m/s mot SØ, vannuttak $12 \text{ m}^3/\text{s}$ i Holsfjorden på 100 meters dyp - ikke sprangsjikt.



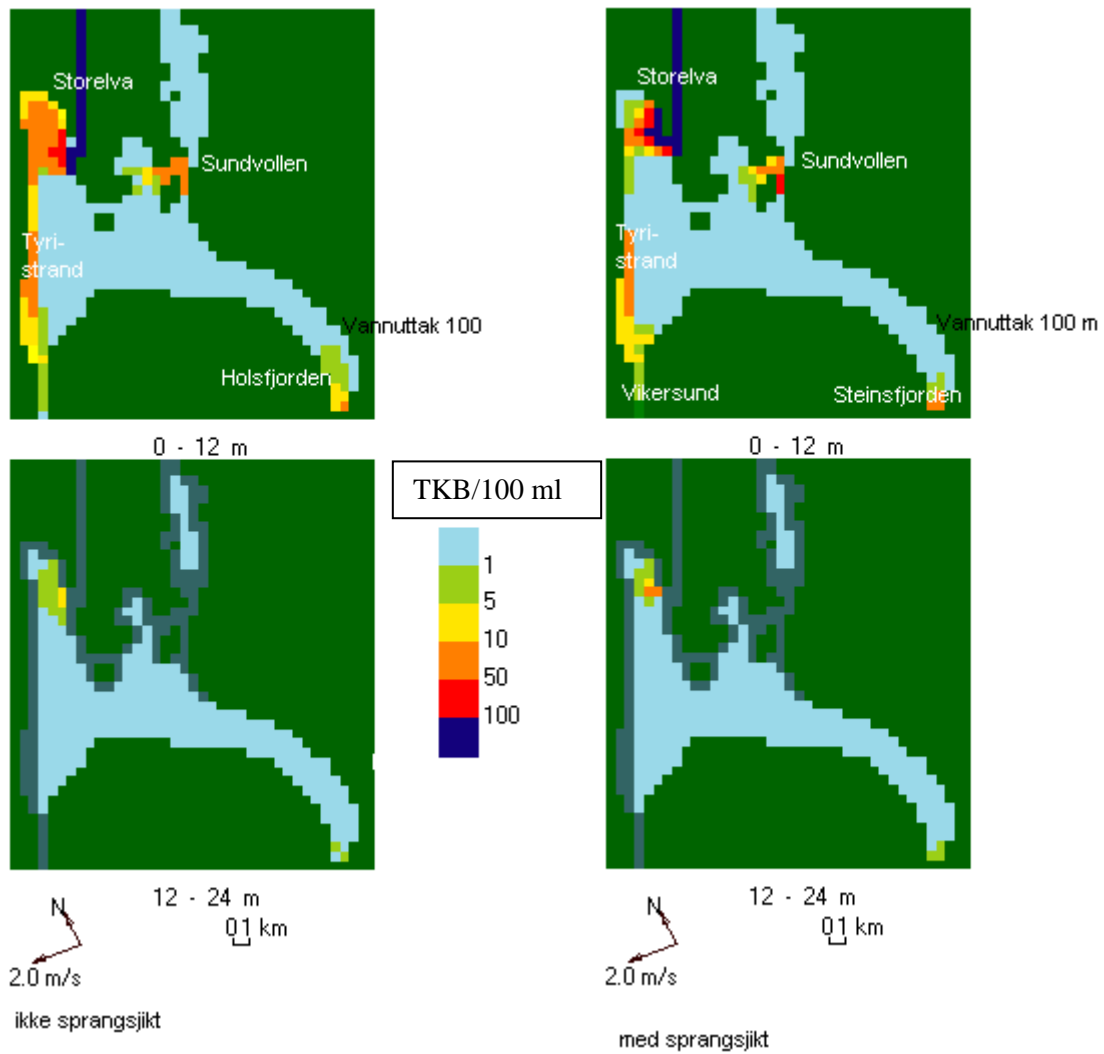
Figur 5.4 Termostabile koliforme bakteriekonsentrasjoner (TKB). Vind 2 m/s mot SØ, vannuttak 12 m³/s i Holsfjorden på 100 meters dyp - ikke sprangsjikt.



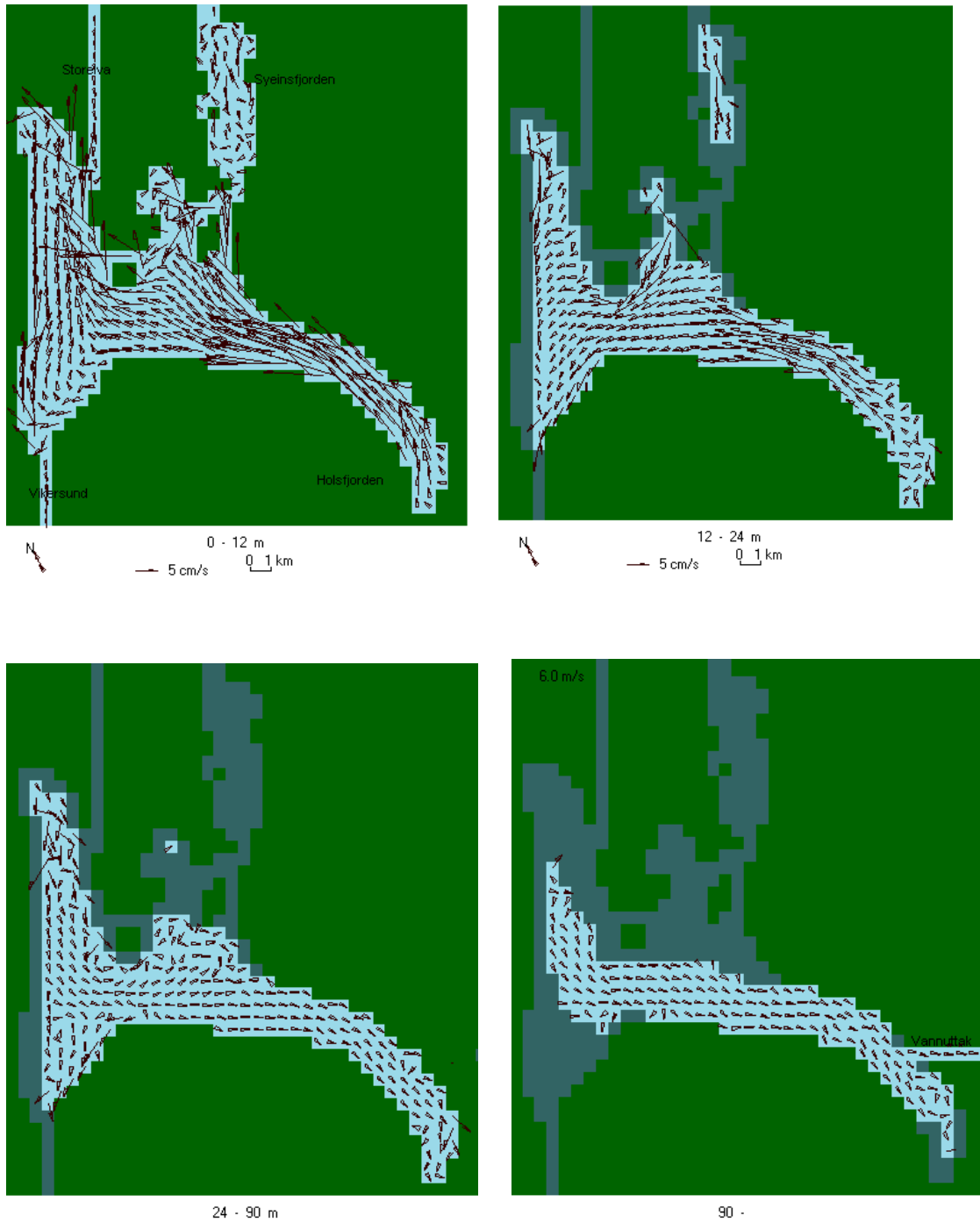
Figur 5.5 Simulert strøm. Vind 2 m/s mot vest, vannuttak 12 m³/s i Holsfjorden på 100 meters dyp - ikke sprangsjikt.



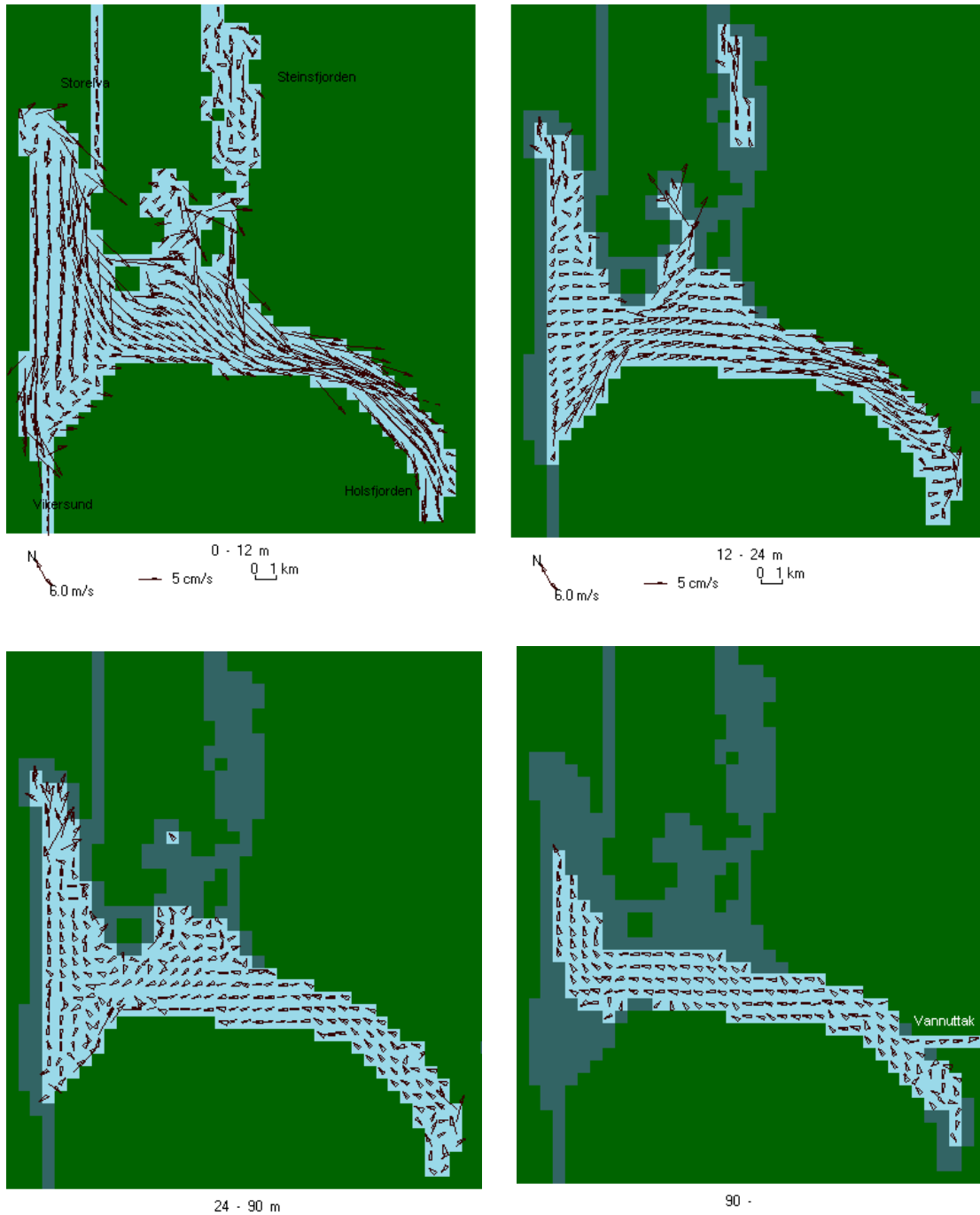
Figur 5.6 Simulert strøm. Vind 2 m/s mot vest, vannuttak 12 m³/s i Holsfjorden på 100 meters dyp - med sprangsjikt.



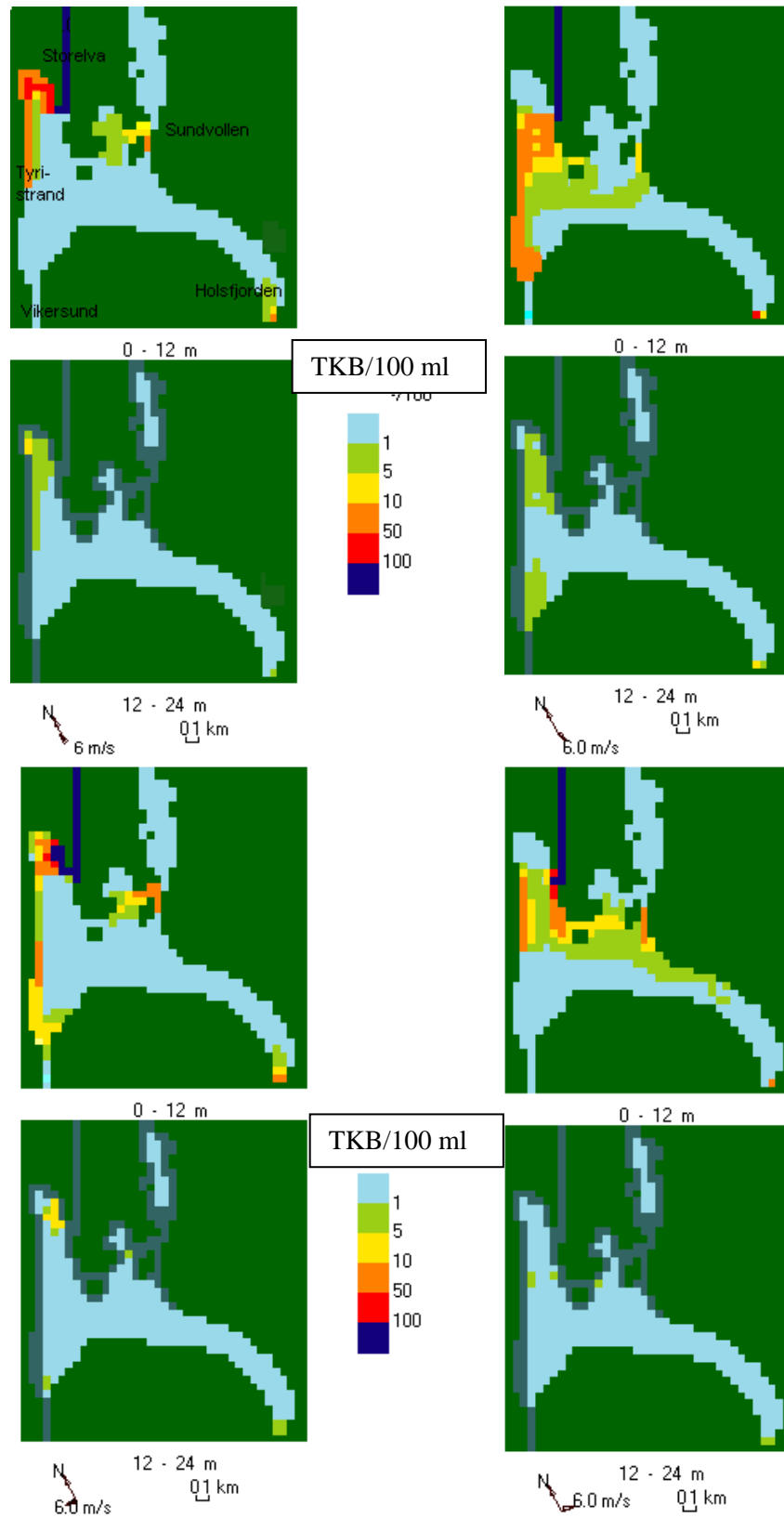
Figur 5.7 Simulerte konsentrasjoner av termotolerante koliforme bakterier (TKB).
Vind 2 m/s mot vest, vannuttak 12 m³/s i Holsfjorden på 100 meters dyp



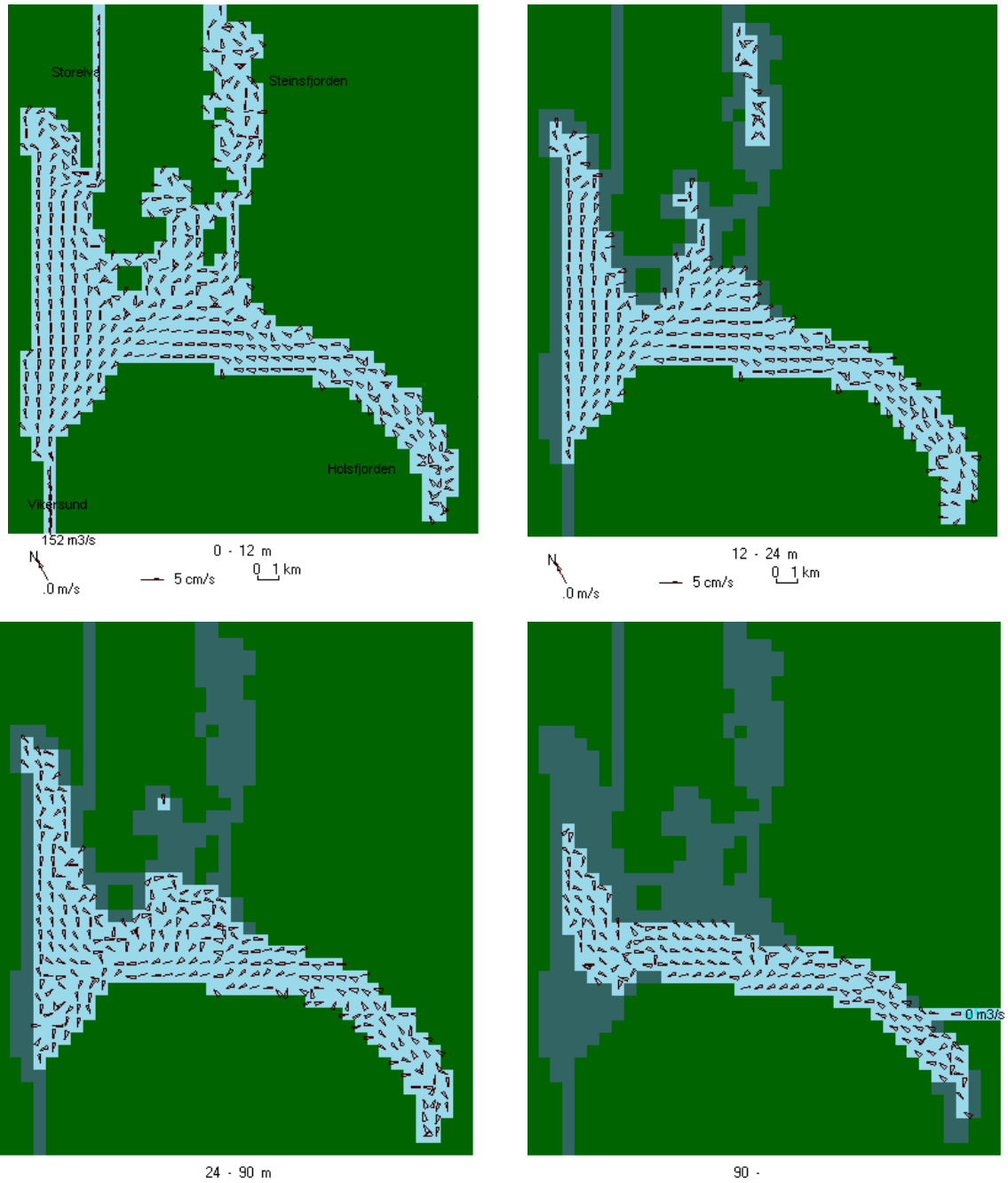
Figur 5.8 Simulert strøm. Sterk vind (6 m/s) mot nord - vannuttak $12 \text{ m}^3/\text{s}$ i Holsfjorden på 100 meters dyp - sprangsjikt.



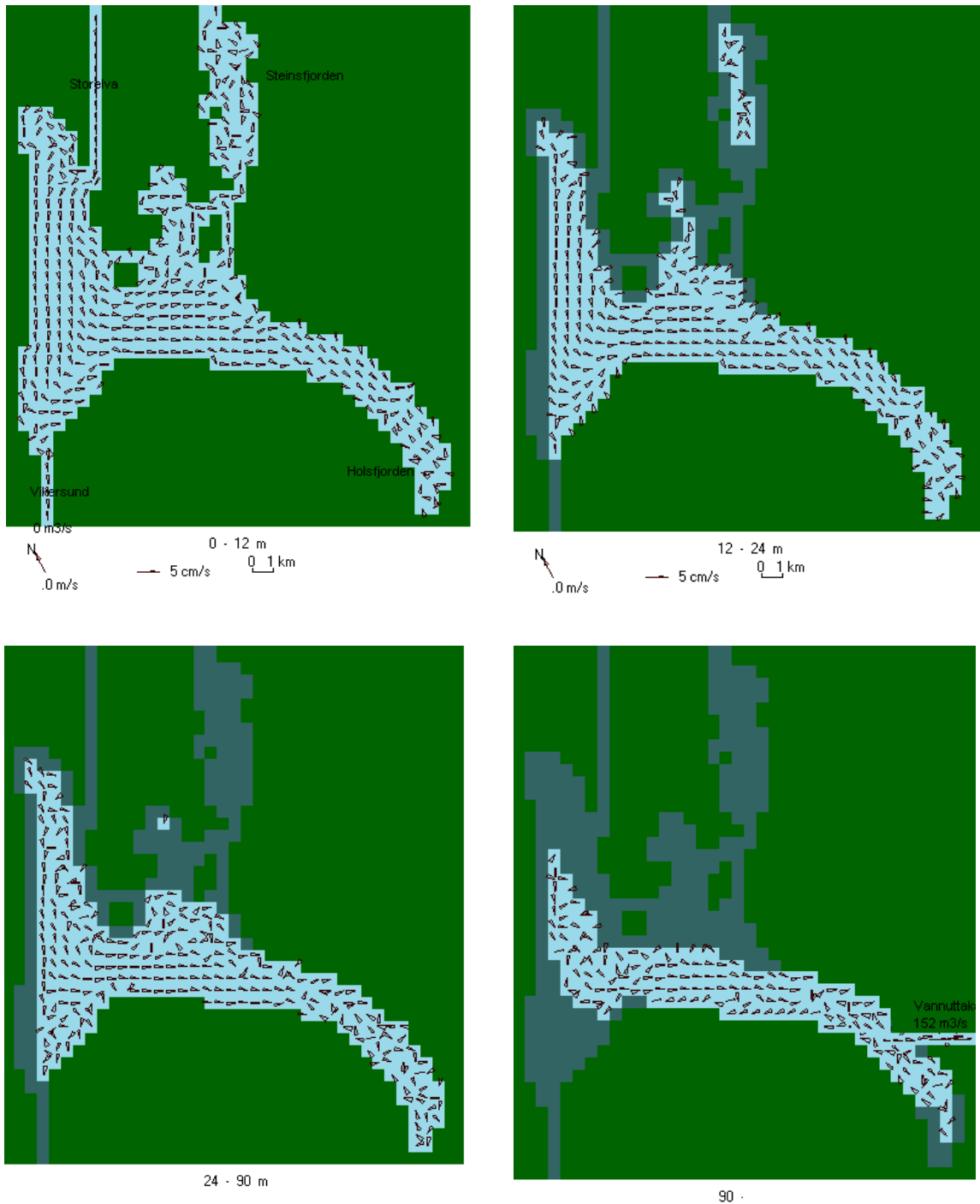
Figur 5.9 Simulert strøm. Sterk vind (6 m/s) mot sør - vannuttak 12 m³/s i Holsfjorden på 100 meters dyp - sprangsjikt.



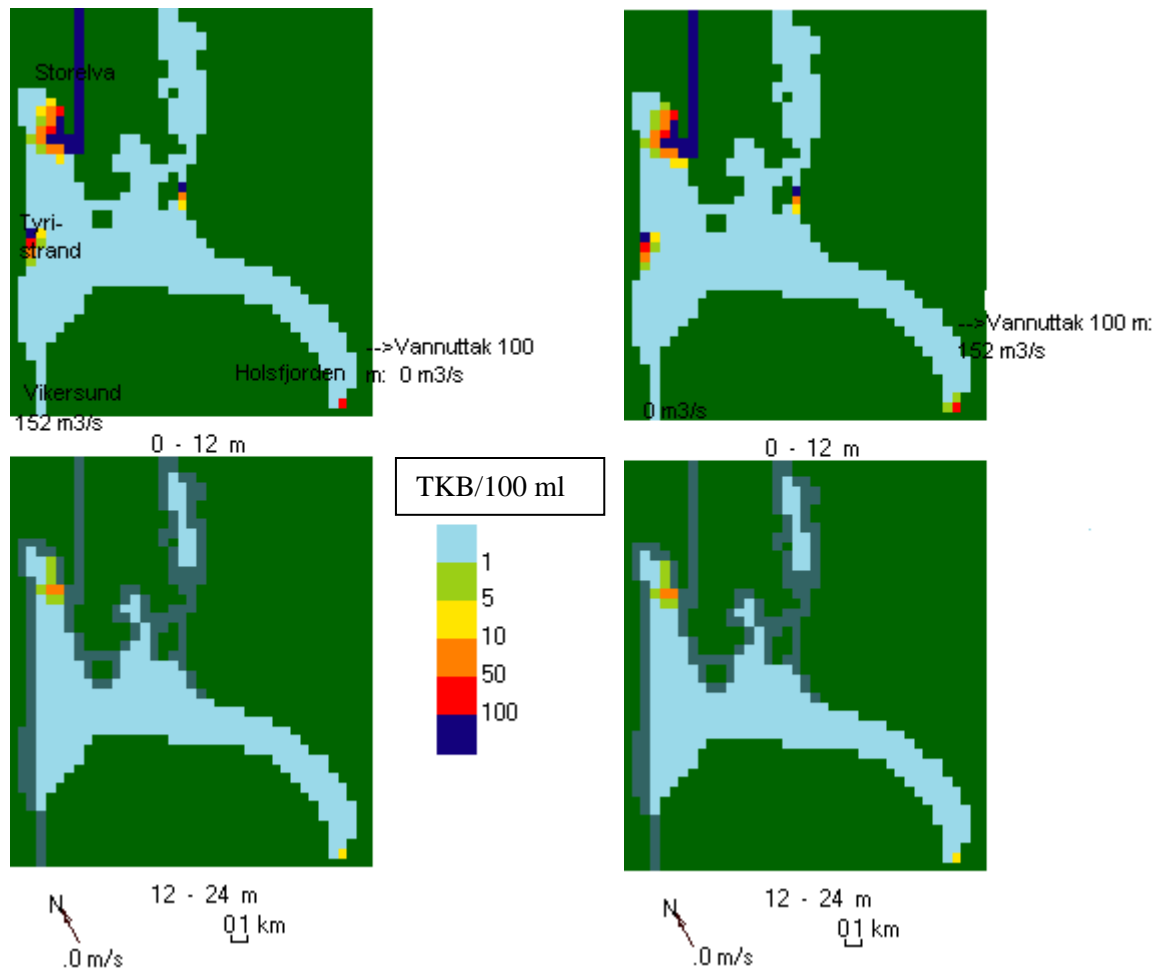
Figur 5.10 Simulerte konsentrasjoner av termotolerante koliforme bakterier (TKB) ved vind 6 m/s mot nord, sør, øst og vest (se vindretningen på figuren), vannuttak 12 m³/s i Holsfjorden på 100 meters dyp, med sprangsjikt.



Figur 5.11 Naturlig strøm i vindstille vær.



Figur 5.12 Gjennomstrømning hvor alt vannet ledes til vannuttaket i Holsfjorden



Figur 5.13. Simulerte konsentrasjoner av TKB er i meget liten grad påvirket av vannuttak ved vindstille vær hvor vannføring i innløp og utløp styrer strømningsbildet. Venstre figur : Naturlig utløp ved Vikersund 140 m³/s, vannuttak Holsfjorden 12 m³/s. Høyre figur : Naturlig utløp ved Vikersund 0 m³/s, vannuttak Holsfjorden 152 m³/s

6. KONKLUSJONER OG DISKUSJON

Det var ikke mulig ved bruk av modellen å se endring i strømningsmønsteret som følge av økt dypvannsutttak. Normalt årlig vannuttak er anslått til mellom 1.0 - 2.5 m³/s. Maksimalt planlagt vannuttak er opptil 12 m³/s. Vannuttaket vil føre til at noe av vannet i Holsfjorden vil strømme mot tunnelåpningen. Ved maksimalt vannuttak på 12 m³/s lokalisert til kun ett vannuttak blir strømhastighetene i tunnelåpningen 1.2 m/s og 0.2 m/s ved en tunneldiameter på henholdsvis 3.5 m og 8 m. Antar vi at vannet strømmer mot åpningen fra sektor i horisontalplanet på 180 grader og en tykkelse på noe over tunneldiameteren blir strømhastighetene noen få 10-metere fra tunnelåpningen ned på mm/s-nivå. Slike strømhastigheter vil ikke skille seg ut i fra de naturlige forekommende i omgivelsene. Vinddrevne strømmer kan komme opp i hastigheter på over 20 cm per sekund i et tverrsnitt over fjorden (epilimnion) i kraftige vindperioder, altså av en helt annen størrelsesorden.

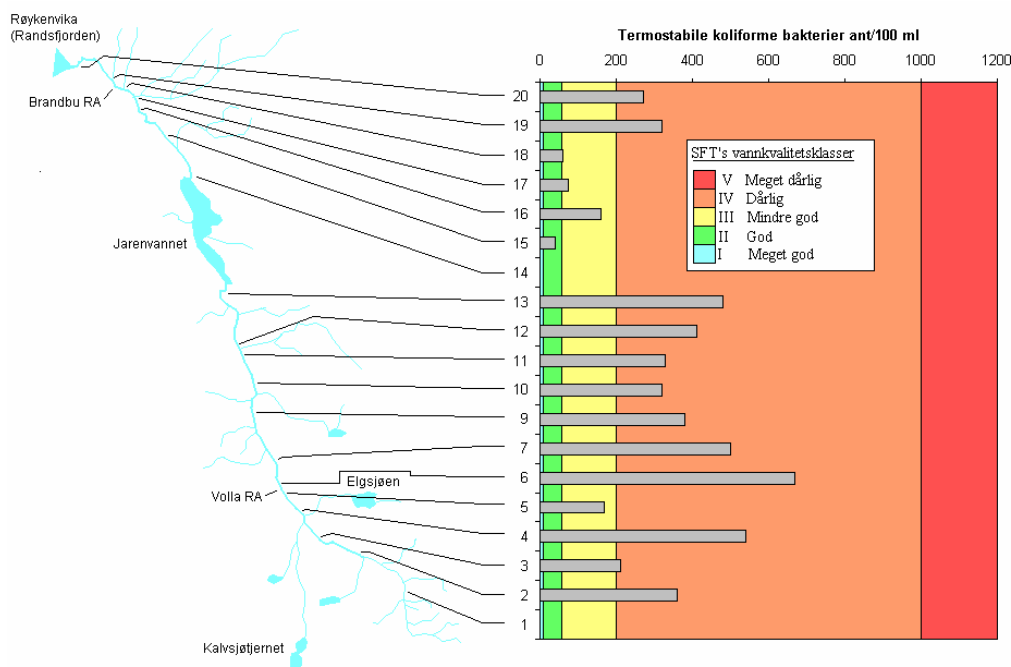
Vannutskiftningen i Holsfjorden skjer hovedsaklig i form av vinddrevne strømmer. Vinddrevne strømmer på 5 cm/s (en svært vanlig forekommende verdi) inn i Holsfjorden gjennom et tverrsnitt tilsvarende en bredde på 2 km og en dybde på 10 m, gir en vannføring på 1000 m³/s. Reelle verdier vil selvfølgelig variere mye, men vil, i alle fall i den isfrie delen av året, være av en helt annen størrelsesorden enn vannuttaket, og vil fullstendig dominere over bidraget fra vannverksuttaket.

Middelvannføring til Tyrifjorden er på ca. 170 m³/s. Et vannuttak på 12 m³/s utgjør følgelig 7 % av totalen. Vannverksuttaket vil følgelig påvirke en meget liten del av den totale gjennomstrømningen i Tyrifjorden. Forskjellen blir at den delen som skyldes vannverksuttaket strømmer til Holsfjorden i stedet for til utløpet ved Vikersund. Den reduserte gjennomstrømningen til Vikersund på 7 % vil ligge godt innenfor normale årsvariasjoner og vil ikke føre til målbare forskjeller med hensyn til vannkvalitet.

Vann fra de sentrale stedene av Tyrifjorden vil nødvendigvis trekkes mot vannuttaket tilsvarende vannuttakets størrelse selv om hastighetene ikke vil være målbare. Imidlertid vil dette ikke influere på bakterienes spredningsforløp. De vil uansett dø eller sedimentere på praktisk talt det samme stedet i innsjøen med eller uten vannuttak. Simuleringene under vindstille forhold hvor hele avløpet fra Tyrifjorden (170 m³/s) ble tenkt ledet til vannuttaket i Holsfjorden uten å endre spredningsforløpet, viste dette tydelig. Hvis man tenker seg at strømmene i innsjøen bare var påvirket av vannføringen i innløp og utløp (permanent islagt situasjon), og hele utløpet ville gå ut i Sylling, ville vannet bruke i snitt 2.7 år for å komme innerst i Holsfjorden. En så lang tur ville ikke bakteriene overleve.

Til og med innsjøer med mye kortere oppholdstid er meget effektive til å fjerne koliforme bakterier. Dette vises klart i [Figur 6.1](#) fra Viggavassdraget i september 2000 (i første del av den kraftige høstflommen dette året). Ved innløpet av Jarenvannet var konsentrasjonen av termotolerante koliforme bakterier (TKB) i middel 600 bakt. per 100 ml, mens det i utløpet av innsjøen ble registrert maks 4 bakt. per 100 ml. Mer enn 95% av vanntilførselen kommer inn i innløpselven. Antar man at de 4 bakteriene i utløpet er rester fra innløpet, har renseeffekten her vært 99,3%. Nå er det en del bebyggelse langs vannet, så det kan godt hende at de 4 bakteriene i utløpet kommer derfra. I så fall blir renseeffekten gjennom innsjøen enda bedre. Oppholdstiden på vannet i Jarenvannet er bare et par mnd i middel. I Tyrifjorden er det ikke lett å lage et slikt budsjett på forskjellen Storelva - Drammenselva fordi det er flere forurensede tilløpselver langs Nakkerudkysten (Sokna, Skjærdalselva, Henoa, samt flere bekker, og langs nedre del av fjorden og utløpet ligger Vikersund tettsted). Men om Tyrifjorden (oppholdstid på 2,7 år) hadde rent ut i Sylling, ville renseeffekten vært nær 100% for bakterier.

Hverken strømningsforholdene eller den bakteriologiske vannkvaliteten i Holsfjorden vil bli endret som følge av økt vannuttak opptil 12 m³/s. Med dagens tilførsler anser vi det som meget lite sannsynlig at dypvannsuttakene i Holsfjorden vil bli nevneverdig påvirket av bakterier fra de mer forurensede delene av Tyrifjorden.



Figur 6.1 Eksempel på innsjøers evne til å rense bakterier. Fra Viggavassdraget på Hadeland nå i september 2000 (høy vannføring). Sammenlikn stasjon 13 (innløp) og 14 (utløp). Fra Kjellberg (2000).

Strøm- og spredningsberegningene representerer karakteristiske situasjoner. I virkeligheten vil vinden stadig endres både i styrke og retning og strømmene vil også endres i mange døgn selv ved stabil vind. Videre er resultatene enkelte steder avhengig av lagdelingen vi har foretatt i modellen, valg av koeffisienter som beskriver turbulens m.m. Vi må følgelig ikke legge avgjørende vekt på hver detalj i resultatene. Imidlertid mener vi at simuleringene viser karakteristiske trekk som gir nyttig informasjon om i hvilken grad uttaket av vann fra Holsfjorden vil påvirke strømningsmønsteret, og hvordan ulike utslipp kan forventes å påvirke vannet i Holsfjorden og Tyrifjorden for øvrig. Det er i overflaten man har de største strømhastighetene som gjør det mulig med transport over lange strekninger før bakteriene dør, og det er lite sannsynlig at man skal kunne få nevneverdige bakteriekonsentrasjoner i dypvannet i Holsfjorden.

Det er to spredningsmekanismer som modellen ikke tar fullgodt hensyn til. Det er indre bølger/seicher, og sirkulasjon av vannmassene vår og høst. Seichene forflytter mye vann på kort tid. Det kan være snakk om betydelig større hastigheter enn de som skyldes ren vindstrøm som vi har simulert. Det vil si at særlig om sommeren når det er et velutviklet sprangsjikt kan det tenkes at seichene kan bidra til å transportere bakterier lenger enn det simuleringene antyder. Seichene forflytter seg mellom Nordfjorden og Holsfjorden, d.v.s. en uheldig retningen med hensyn til transport mot vannuttaket i Holsfjorden. En seiche kan tenkes å bruke omlag 20 timer fra den ene enden til den andre, deretter vil transporten gå i motsatt retning. Bakterier som tar del i denne bevegelsen vil følgelig bli godt blandet og spredt over et stort område fortrinnsvis nær sprangsjiktet. Typiske seicher er modellert i Holsfjorden og vist i Figur 3.3. Tetthetsprofilen i dybderetningen om sommeren motvirker transport mot dyplagene. Observasjoner gjort høsten 1999 og vinteren 2000 (Berge m.fl. 2000) indikerer imidlertid at spredning av bakterier som ikke kan modelleres med den anvendte modell har liten praktisk betydning.

Simuleringene tar hensyn til vertikal transport på grunn av vindpåvirkning og tar også hensyn til endret vertikalt strømningsmønster når det er lite stabile vannmasser i perioder med lik temperatur fra overflate til bunn. Men modellen beregner ikke varmeutveksling mellom atmosfære og innsjø. Det vil si at vår og høst i perioder med svært små vertikale temperaturforskjeller vil varmeutveksling med atmosfæren sette igang vertikale sirkulasjonsbevegelser (konveksjonsstrømmer) i vannmassene som kan gå fra overflaten og eventuelt helt til bunnen. I slike perioder vil dette bidra til å transportere bakterier til dypt vann.

Dersom hele Tyrifjorden sirkulerer vil bakterier som tilføres bli blandet inn i en stor del av dybdeprofilen og dermed bli fortynnet usedvanlig godt. Den delen av bakterietilførselene som måtte bli ført ned på dypt vann vil neppe oppnå tilstrekkelig horisontal bevegelse til å bli transportert fra f.eks. Storelva til Holsfjorden. Simuleringene tydet på at de lokale tilførselene fra Sylling ved spesielle vindforhold nesten nådde fram til overflaten ved vannuttaket. Det kan

følgelig tenkes at bakterier også kan nå dypvannsuttaget dersom vannmassene sirkulerer. Imidlertid er disse tilførselene såpass små at de etter fortykning neppe kan betegnes som forurensende. Vi tror derfor at det er lite sannsynlig at vannuttaket på 100 meters dyp vil bli påvirket av bakterier selv i sirkulasjonsperiodene vår og høst.

I 1980 ble det påvist bakterier i de sentrale delene av Tyrifjorden ned til 100 m under vårsirkulasjonen (Riise og Solberg 1983). En liknende undersøkelse på sommeren, da det var et velutviklet sprangsjikt, viste at bakteriene da spredte seg lenger inn i Holsfjorden og da fortrinnsvis over sprangsjiktet. Sommersituasjonen stemmer bra med simuleringresultatene. For sirkulasjonsperioden vil det være nødvendig å korrigere for økt spredning i dypet og reduserte konsentrasjoner nær overflaten. Bakterietilførselene er i dag betydelig redusert i forhold til i 1980. Observasjoner høsten 1999 og vinteren 2000 støtter opp om at simuleringene viser realistiske verdier (Berge m.fl. 2000). Selv om vannuttakene fra Holsfjorden skulle øke opp mot $12 \text{ m}^3/\text{s}$, er det lite sannsynlig at bakterier og alger fra Nordfjorden og Sundvollen vil påvirke vannkvaliteten i Holsfjorden i betydelig grad og enda mindre sannsynlig at vannuttaket på 100 meters dyp vil bli påvirket.

7. LITTERATUR

- Berge, D. 1980. Limnologiske undersøkelser i de frie vannmasser. Tyrifjordundersøkelsen-årsrapport for 1979. Tyrifjordutvalget, Drammen., 46 sider.
- Berge, D. 1981. Limnologiske undersøkelser i de frie vannmasser. Tyrifjordundersøkelsen-årsrapport for 1980. Tyrifjordutvalget, Drammen., 42 sider.
- Berge, D. 1983 (Red): Tyrifjorden. Sammenfattende sluttrapport fra undersøkelsene i 1978-81. Tyrifjordutvalget, Fylkeshuset, Drammen. ISBN 82-90356-31-5.
- Berge, D. 1986. Overvåking av Tyrifjorden og Steinsfjorden 1982-85. Sluttrapport. Overvåkingsrapport nr 283/86, NIVA-rapport O-8000214/Lnr 1879. 73 sider.
- Berge, D. og T. Tjomsland 1983: Fysisk/kjemisk vannkvalitet. Side 37-62 i Berge (Red) 1983: Tyrifjorden. Sammenfattende sluttrapport fra undersøkelsene i 1978-81. Tyrifjordutvalget, Fylkeshuset, Drammen. ISBN 82-90356-31-5.
- Berge, D., Efraimssen H., Lien L. og Bakketun Å. 2000: Holsfjorden som ny drikevannskilde for Oslo. Oppdaterende undersøkelse av bakterier og vannkemi i Holsfjorden, NIVA-rapport O-99081 / Lnr 4216-2000, 37 sider.
- Bratli, J.L., T. Tjomsland, B. Brørs, T. Källqvist og O. Skulberg 1999: Vannutskifting i Steinsfjorden. Mulige konsekvenser for vannutskifting, vannkvalitet og blågrønnalger ved åpning av vegfyllingene. Forprosjekt. Fellesrapport SINTEF/NIVA, NIVA Lnr 3952-98., 70 sider.
- Kjellberg, G. 2000: Biologisk befaringsundersøkelse i Viggavassdraget i Gran og Lunner kommuner 16. og 17. september 2000. NIVA-rapport Lnr 4305-2000., 40 sider.
- Olsen, N. R. B. and Tjomsland, T. (1998) "3D CFD modelling of wind-induced currents and radioactive tracer movements in a lake", 3rd. International Conference on Hydroscience and Engineering, Cottbus, Germany.

Riise, J. og H. Solberg 1983: Bakteriologisk forurensning. Side 130-135 i Berge, D. 1983 (Red): Tyrifjorden. Sammenfattende sluttrapport fra undersøkelserne i 1978-81. Tyrifjordutvalget, Fylkeshuset, Drammen. ISBN 82-90356-31-5.

Tjomsland, T. 1980. Strøm og spredningsstudier i Tyrifjorden, Rapport nr.1, løpenr. 1191, Norsk institutt for vannforskning, Oslo.