

RAPPORT LNR 4252-2000

Utslipp av kvikksølv til
Sørfjorden som følge av
uhell ved Norzink AS
vinteren 1999 - 2000

Vurdering av utslippets
størrelse

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

9296 Tromsø
Telefon (47) 77 75 03 00
Telefax (47) 77 75 03 01

Tittel Utslipp av kvikksølv til Sørfjorden som følge av uhell ved Norzink AS vinteren 1999-2000. Vurdering av utslippets størrelse.	Løpenr. (for bestilling) 4252-2000	Dato 16.6 2000
	Prosjektnr. Undernr. 20078	Sider Pris 26
Forfatter(e) Jarle Molvær	Fagområde Miljøgifter sjøvann	Distribusjon
	Geografisk område Hordaland	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Norzink AS, 5750 Odde	Oppdragsreferanse
---	-------------------

Sammendrag
Vinteren 1999-2000 var det ekstra store utslipp av kvikksølv til Sørfjordens indre del pga. et uhell ved Norzink as. Med grunnlag i beregninger av sirkulasjon og oppholdstid for brakkvannslaget innenfor Tyssedal samt målte konsentrasjoner av kvikksølv i brakkvannslaget er det gjort estimat av utslippets størrelse. Datagrunnlaget er spinkelt, men beregninger for januar og mars tyder på at fjorden ved begge anledninger ble tilført 400-500 gram kvikksølv pr. døgn.

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> Sørfjorden Norzink Kvikksølv Vann 	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> Sørfjord Norzink Mercury Water
---	--


Prosjektleder


Forskningsleder
ISBN 82-577-3877-8


Forskningssjef

20078

**Utslipp av kvikksølv til Sørfjorden som følge av uhell
ved Norzink AS vinteren 1999-2000.**

Vurdering av utslippets størrelse

Forord

Vinteren 1999/2000 ble det registrert uvanlig høye konsentrasjoner av kvikksølv i sjøvannsprøver innsamlet i Sørfjordens overflatelag. Norzink a.s. fant at dette kunne skyldes lekkasje fra en pumpesump, og denne ble tettet 25.2 2000.

I ettertid er det uvisst hvor mye kvikksølv som ble sluppet ut, og i e-post fra Norzink den 28.2 2000 ble NIVA bedt om å gjennomføre beregninger for å anslå hvor mye kvikksølv som kunne være sluppet ut.

Prosjektet er gjennomført av Jens Skei og Jarle Mølvær, begge ved NIVA, Oslo. Sistnevnte har vært saksbehandler og har utført beregningene av vannsirkulasjon, fortykning og størrelsen av forventede kvikksølvutslipp.

Oslo, 16.6 2000

Jarle Mølvær

Innhold

Sammendrag	7
1. Innledning	8
2. Kort beskrivelse av Sørfjordens indre del	8
2.1 Topografi	8
2.2 Ferskvannstilførsel	9
2.3 Vannmasser og vannsirkulasjon	10
3. Metodikk og data	11
3.1 Modellen SMS/RMA-2	11
3.2 Data for bruk i SMS-modellen	13
3.3 Modell for beregning av kvikksølvkonsentrasjon i brakkvannslaget	14
4. Beregninger av vannsirkulasjon og av kvikksølvkonsentrasjon i Sørfjordens brakkvannslag	15
4.1 Sirkulasjon	15
4.1.1 Utstrømming av 20 m ³ /s og uten tidevann	15
4.1.2 Sirkulasjon under prøvetaking den 25.1 og 21.3.00	16
4.2 Estimat av størrelsen av kvikksølvutslippet	18
4.2.1 Estimat basert på modellen Plumes	18
4.2.2 Estimat basert på målt konsentrasjon i brakkvannslaget	19
5. Diskusjon og konklusjoner	21
6. Litteratur	22
Vedlegg A.	23

Sammendrag

Vannprøver innsamlet i Sørfjorden i forbindelse med statlig program for forurensningsovervåking i desember 1999 avslørte økning i tilførslene av kvikksølv til overflatelaget i Sørfjorden. Nye prøver i januar og februar 2000 innsamlet i forbindelse med den månedlige overvåkingen bekreftet at det dreide seg om et større uhellsutslipp og Norzink as fant årsaken i slutten av februar. Lekkasje fra en sump som samler opp kvikksølvholdig vann var årsaken og skaden ble utbedret 25.02.00.

Størrelsen av utslippet var imidlertid ukjent og av Norzink fikk NIVA derfor i oppdrag å forsøke å beregne en sannsynlig størrelse. Dette er gjort ved bruk av modeller og stoffbudsjett:

- Det er utarbeidet en matematisk modell som beskriver strømforholdene i Sørfjordens brakkvannslag ved varierende ferskvannstilførsel og ved ulike tidevannsfaser. Denne modellen er benyttet i en generell forståelse av hvordan et kvikksølvutslipp kan fordele seg i fjordens brakkvannslag, og for å bedømme forholdene da kvikksølvprøver ble innsamlet.
- For teoretisk å bedømme hvordan et utslipp av kvikksølv til overflata i Eitheimsvågen vil fortynnes i fjorden og hvilke konsentrasjoner som kan forventes, ble brukt en fortynningsmodell utgitt av EPA, USA
- Målinger av kvikksølv i Sørfjordens brakkvannslag ble brukt til å anslå mengden av kvikksølv som den 25. januar 2000 og 21.mars 2000 befant seg i brakkvannslaget innenfor Tyssedal. Jevnført med oppholdstiden for brakkvannslaget for disse to tidspunktene fant man at tilførselen ved begge anledninger sannsynligvis var omkring 400-500 g kvikksølv pr. døgn.

Datagrunnlaget for disse beregningene var spinkelt og det måtte gjøres en rekke forutsetninger. Vi mener likevel at resultatene gir en riktig størrelsesorden for utslippet.

1. Innledning

Innen Statlig program for forurensningsovervåking gjennomfører NIVA overvåking av kvikksølvkonsentrasjonen i Sør fjordens overflatelag. Vinteren 1999/2000 har Norzink hatt en lekkasje av kvikksølv som har medført høye konsentrasjoner i fjordens overflatelag (Skei og Knutzen 2000). Man kjenner imidlertid ikke mengden kvikksølv som har lekket ut.

Formålet med dette prosjektet er å simulere sirkulasjonen og beregne oppholdstiden for Sør fjordens overflatelag, samt benytte resultatene sammen med målte kvikksølvkonsentrasjoner til estimat av mengden kvikksølv som har lekket ut.

2. Kort beskrivelse av Sør fjordens indre del

2.1 Topografi

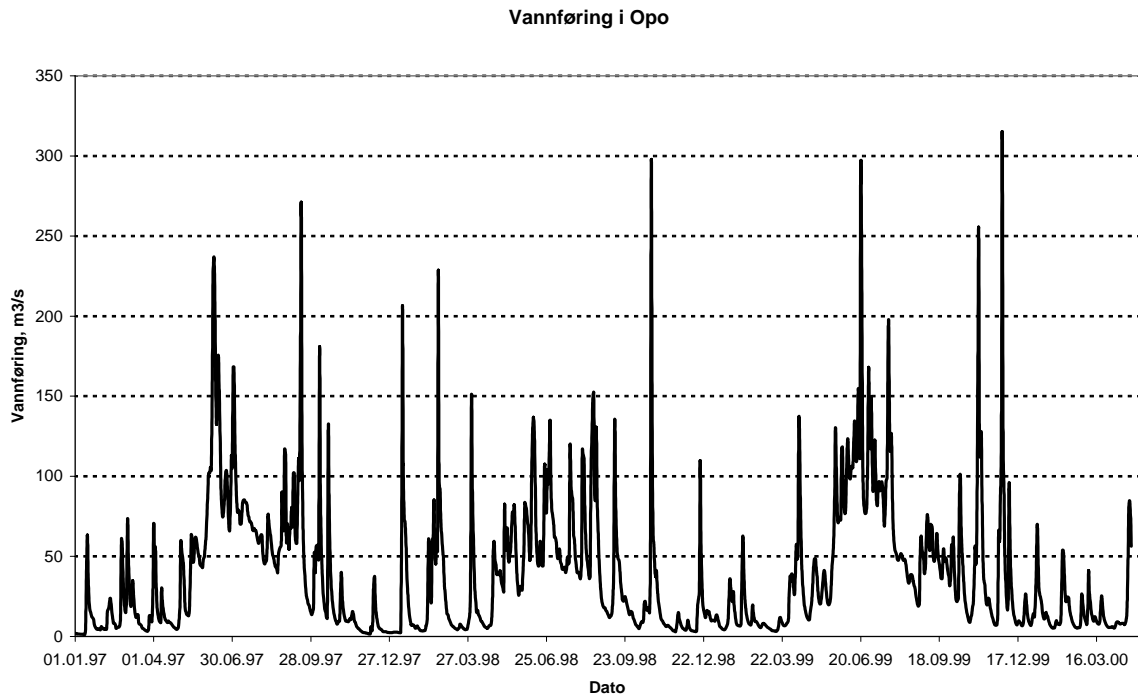
Sør fjorden er ca. 38 km lang, rett og relativt smal (**Figur 1**). Denne studien er konsentrert om de innerste 10 km av fjorden (**Figur 1**, høyre del). Innenfor Lindenes er fjorden relativt grunn, med omkring 40-45 m dyp i havnebassenget og økende til omkring 60 m dyp ved Lindenes. Videre utover øker dypet raskt og når 200 m litt nord for Tyssedal og 300 m dyp litt nord for Digranes. Mellom Digranes og Børve er et langstrakt område der har fjorden sitt største dyp på 385-387 m.



Figur 1. Sør fjorden. På figurens høyre side er vist stasjoner fra det lokale overvåkingsprogrammet i 1995-99.

2.2 Ferskvannstilførsel

Den indre delen av Sørfjorden får i hovedsak sin ferskvannstilførsel fra Opo, der middelvannføringen over året er ca. $50 \text{ m}^3/\text{s}$. **Figur 2** viser tidsforløpet i tidsrommet 1.1.1997-25.4.2000. Variasjonene var svært store, fra under $5 \text{ m}^3/\text{s}$ til ca. $315 \text{ m}^3/\text{s}$. Middelvannføringen for dette tidsrommet var $39.2 \text{ m}^3/\text{s}$, mens medianen var $23.5 \text{ m}^3/\text{s}$.



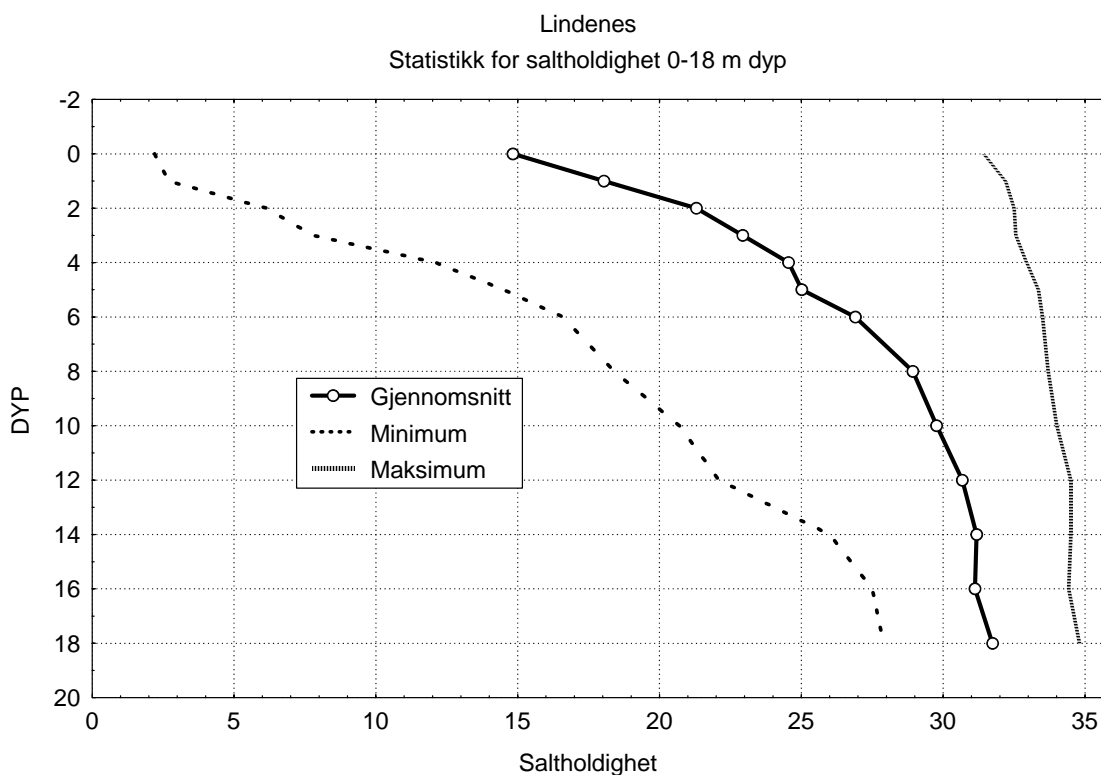
Figur 2. Vannføring i Opo ved utløp fra Sandvinvatnet, for tidsrommet 1.1 1997 – 25.4.00. (data fra NVE).

2.3 Vannmasser og vannsirkulasjon

Innenfor Lindenes vil den vertikale inndeling av vannmassene være bestemt av ferskvannstilførselen, vannutvekslingen med den nordre del av Sørfjorden samt selve Hardangerfjorden, og topografien. Man kan skjelle mellom tre vannmasser:

- Overflatelaget (brakkvannslaget), som består av en blanding av ferskvann og sjøvann. Tykkelsen av laget er oftest mellom 1 m og 4 m og saltholdigheten mellom ca. 6 og 25. I sommerhalvåret kan laget bli opptil 10 m tykt og saltholdigheten bli så lav som 2-3. På den annen siden kan liten ferskvannsavrenning kombinert med vind som øker blandingen mellom ferskvann og sjøvann, føre til situasjoner med saltholdighet over 30.
- Mellomlaget, som omfatter vannmassen mellom overflatelaget og bunnen av havnebassenget (40-50 m dyp). Øvre del av denne vannmassen kan inneholde en betydelig andel av brakkvann fra selve Hardangerfjorden.

Nederst ligger bassengvannet, som omfatter vannmassen ned til mer enn 100 m i bassenget utenfor Lindenes. Mellom overflata og 18 m dyp (overflatelag og øvre del av mellomlag) vil det være store variasjoner i saltholdighet som vist i **Figur 3**.



Figur 3. Lindenes. Figuren viser vertikallprofiler for saltholdighet mellom overflata og 18 m dyp, med henholdsvis laveste (Minimum), gjennomsnittlig (Gjennomsnitt) og høyeste (Maksimum) målt saltholdighet i hvert dyp over tidsrommet 1995-99. Prøvetakingspunktene er vist på kurven for Gjennomsnitt.

Vi kjenner ferskvannstilførselen og saltholdigheten i 1 m dyp for de fleste tidspunktene da det ble innsamlet vannprøver kvikksølvmålinger (Skei og Knutzen 2000).

3. Metodikk og data

3.1 Modellen SMS/RMA-2

Forkortelsen SMS står for "Surface Water Modelling System", som inneholder den numeriske modellen RMA-2. SMS er laget ved Brigham Young University i samarbeid med U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, og U.S. Federal Highway Administration (ECGL, 1995). RMA-2 er en dynamisk, todimensjonal, dybde-integrert numerisk modell med fri overflate. Modellen beregner løsninger ved hjelp av endelig-element metoden.

Ligninger:

Gruntvannsligningene i RMA-2 er Navier-Stokes ligninger for bevarelse av bevegelsesmengde og volum (volumkonservering).

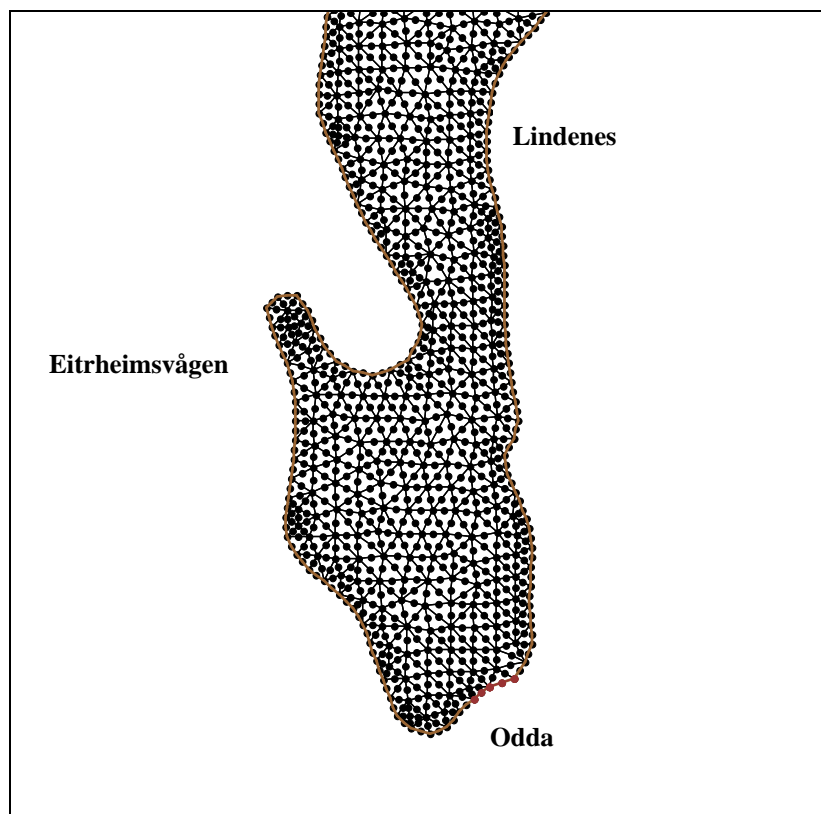
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_0}{\partial x} \right) + fv - \frac{\varepsilon_{xx} \partial^2 u}{\rho \partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy} \partial^2 u}{\rho \partial y^2} + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_0}{\partial y} \right) - fu - \frac{\varepsilon_{yx} \partial^2 v}{\rho \partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy} \partial^2 v}{\rho \partial y^2} + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

x =	Distanse i x-retning (positiv mot øst)
y =	Distanse i y-retning (positiv mot nord)
u =	Horisontal strømningshastighet i x-retning
v =	Horisontal strømningshastighet i y-retning
t =	Tid
g =	Tyngdens akselerasjon
h =	Vanddybde
ρ =	Væskens tetthet
ε_{xx} =	Normal turbulent utvekslingskoeffisient i x-retning
ε_{xy} =	Tangensial turbulent utvekslingskoeffisient i x-retning
ε_{yx} =	Tangensial turbulent utvekslingskoeffisient i y-retning
ε_{yy} =	Normal turbulent utvekslingskoeffisient i y-retning
C =	Chezy ruhetskoeffisient (Beregnet ut fra Mannings n)
f =	Coriolis parameter

Modelleringen begynner med konstruksjon av et nettverk (grid) med diskrete punkter (dvs. data over posisjon og dyp for punktene i et nettverk, som siden interpoleres til et grid i SMS). **Figur 4** illustrerer nettverket som ble benyttet for beregningene.



Figur 4. Nettverket eller gridet i RMA2-modellen for indre del av Sjøfjorden. I hver node (avmerket som svart punkt) beregnes høyden over referansedypet, strømretning og strømhastighet.

Modellen må videre gis verdier for de turbulente utvekslingskoeffisientene (her ble de valgt i intervallet 2000-10000 m^2/s), og for bunnfriksjons-koeffisienten Manning's n . Turbulens og friksjon varierer med strøm- og bunnforholdene, og er samtidig en egenskap ved selve bevegelsen. De er følgelig svært vanskelige å bestemme nøyaktig. Oppgitte størrelser på koeffisientene varierer med flere størrelsesordener (ECGL, 1995), uten at beregningsresultatene endrer seg tilsvarende mye.

Man må tilegne nettverket en initialtilstand. Dette gjøres ved å legge en horisontal, plan overflate over hele nettverket. Modellen trenger så en del tid ("spin up") på å finne representative løsninger.

Ved hjelp av de topografiske dataene, grenseflatebetingelsene og initialbetingelsene beregner RMA-2 løsninger for hvert tidssteg. Modellen beregner verdier for fart, retning og vannstand i hvert av punktene i gridet der det er lagt inn posisjon og dyp.

En slik type modell egner seg til å beskrive sirkulasjonen i brakkvannslaget i Sjøfjorden, når man betrakter dette som en vertikal homogen vannmasse over en horisontal, flat bunn. Spesielt vil modellen framheve områder med bakevjer og svak strøm. Videre vil beregningene gi grunnlag for å sammenligne strømstyrke og bakevjedannelse i forskjellige områder ved forskjellig ferskvannstilførsel og tidevannspåvirkning. Derimot må man være forsiktig med å tolke strømhastighetene absolutt, både fordi det er lagt inn en rekke forutsetninger i modellen og fordi strømhastighet og retning i Sjøfjordens overflatelag også påvirkes av varierende vindforhold.

3.2 Data for bruk i SMS-modellen

Det blir simulert strøm i et 2-3 meter tykt overflatelag. Bunnfriksjonen (Manning's n) er satt lik 0.015 (tilsvarer relativt liten "friksjon" mot dypvannet og sider). Strømforholdene i overflatelaget vil oftest være bestemt av ferskvannstilførsel, tidevann og vind. Vannføringen i Opo for de 6 datoene da det ble innsamlet vannprøver i Sørfjorden var ikke spesielt høy ved noen av datoene (**Tabell 1**).

Tabell 1. Vannføring (som m³/s) i Opo den dagen prøver ble innsamlet (uthevet) samt de to foregående dagene (data fra NVE).

Dato	m ³ /s	Dato	m ³ /s	Dato	m ³ /s	Dato	m ³ /s	Dato	m ³ /s	Dato	m ³ /s
14.11.99	24	12.12.99	15	23.1.00	7	20.2.00	7	6.3.00	19	19.3.00	8
15.11.99	20	13.12.99	13	24.1.00	7	21.2.00	6	7.3.00	41	20.3.00	10
16.11.99	17	14.12.99	10	25.1.00	6	22.2.00	6	8.3.00	28	21.3.00	21

Ifølge Tidevannstabeller fra Norges Sjøkartverk er forskjellen mellom høyvann og lavvann i Odda i gjennomsnitt ca. 0.9 m, mens forskjellen mellom spring høyvann og spring lavvann er ca. 1.2 m. Ved de fire prøvetakingene i 2000 var tidevannsforskjellen mellom ca. 120 cm og 135 cm (**Tabell 2**).

Tabell 2. Tidspunkt for lavvann, høyvann samt tidevannsforskjell og klokkeslett for første prøvetaking ved de fire prøveseriene i 2000.

Dato	Lavvann	Høyvann	Tidevannsforskjell (cm)	Start målinger
25.1.00	0750	1420	117	0810
22.2.00	0723	1356	123	0810
8.3.00	0626	1245	131	ca. 07
21.3.00	0550	1210	134	0704

Tidevannet er halvdaglig og modellen beskriver sirkulasjonen både ved utstrømmende og innstrømmende tidevann. Ved synkende vannstand vil utstrømmingen være maksimal, mens ved stigende vannstand vil innstrømmingen være mindre fordi utstrømmende brakkvann og innstrømmende tidevann er motsatt rettet. Ved de fire tidspunktene ble prøvene tatt kort tid etter lavvann.

Innstrømming og utstrømming av tidevann er ikke begrenset til brakkvannslaget, men fordeler seg over vannmassen mellom overflate og bunn. Bunn-dypet ved Tyssedal er ca. 200 m og innenfor Lindenes varierer det mellom ca. 40 m og 100 m dyp. Ved økende dyp avtar tverrsnittsarealet som vannet strømmer gjennom. Vårt estimat er at for området innenfor Lindenes vil 10-15% av tidevannsutskiftningen foregå i brakkvannslaget.

Ut fra disse data velger vi 25.1.00 og 21.3.00 som utgangspunkt for beregningene, fordi disse datoene både gir en spennvidde både mht. ferskvannstilførsel og tidevannsvariasjon. Saltholdigheten i 0.5 m dyp innenfor Lindenes ved disse to anledningene var henholdsvis ca. 16 og 19. Vi kjenner ikke den nøyaktige saltholdigheten i det underliggende sjøvannet, men antas 30 som en typisk saltholdighet får vi at brakkvannsstrømmen ut fjorden ved Lindenes ved disse to anledningene kunne være henholdsvis ca. 18 m³/s og ca. 55 m³/s.

3.3 Modell for beregning av kvikksølvkonsentrasjon i brakkvannslaget

For å beregne konsentrasjonen av kvikksølv anvendes datamodellen PLUMES (Baumgartner et al. 1994) som er utgitt av det amerikanske miljøverndirektoratet (EPA). Konsentrasjonen i en gitt avstand fra utslippet beregnes ved bruk av vannmengden som lekker ut, konsentrasjonen i dette vannet, bakgrunnskonsentrasjonen i sjøvannet, den turbulente diffusjonskoeffisienten, sjiktningen i vannmassen og strømhastigheten. Modellen benytter resultater for hastighet og strømbaner som er gitt av SMS, og er anvendt for å beregne konsentrasjonen over distanser på inntil 2000 m fra utslippspunktet. Denne distansen er valgt fordi SMS-modellen tyder på at ved halvdaglig tidevann og synkende vannstand kan en typisk strømhastighet i brakkvannslaget være 5-15 cm/s. Er gjennomsnittshastigheten lik 5 cm/s, vil en "vannpakke" forflytte seg ca. 1000 m i løpet av 6 timer med utstrømmende tidevann, og ca. 2000 m hvis gjennomsnittshastigheten er 10 cm/s.

Til sammenligning nevnes at i juni 1972 utførte Universitetet i Bergen strømmålinger i 1.5 m dyp ved Lindenes og i havnebassenget (Svendsen 1973). Originaldataene er ikke gjengitt i den rapporten, men av figurene kan en se følgende:

- Vannføringen i Opo var relativt stor og varierte mellom ca. 50 m³/s og ca. 300 m³/s.
- Ved Lindenes viste målingene at strømmen vanligvis var rettet ut fjorden, med 0-ca.20 cm/s som et typisk variasjonsintervall.
- På stasjonen i havnebassenget var strømrretningen meget varierende og i hovedsak sørover, dvs. rettet inn fjorden. Strømhastigheten var svakere enn ved Lindenes og mer varierende. Typisk variasjonsintervall synes å være ca. 0-10 cm/s. Målingene synes å være utført i den virvelen som opptrer i havnebassenget (se til eksempel **Figur 6**).

For å beskrive den turbulente blandingen mht. stoff er brukt koeffisienten 0.000453 cm^{2/3}/s som Baumgartner et al. (1994) anbefaler for kystområder med relativt god fortykning. Den turbulente blandingskoeffisienten er her proporsjonal med radius av skyen av fortynnet avløpsvann opphøyd i 4/3, og vil altså øke ettersom tiden går.

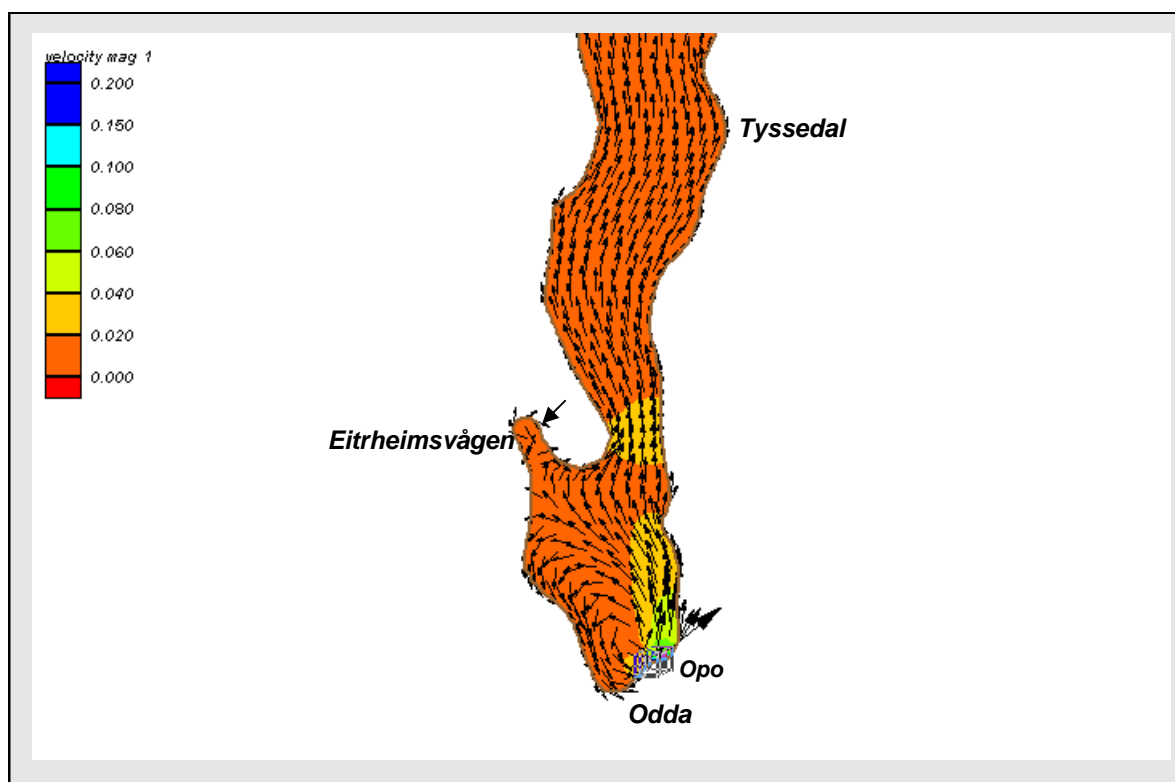
Det kvikksølvholdige vannet som lekket ut ved Norzink ble tilført på østsiden av Eitrheimsvågens innerste del (**Figur 5**). Verken mengde eller kvikksølvkonsentrasjonen i lekkasjevannet er kjent, men man har et lite holdepunkt i at Norzink i slutten av februar 2000 registrerte over 100.000 ngHg/l i vannoverflata nær strandområdet der uhellet skjedde. Dette vannet fortynnes i det omkringliggende brakkvannet og NIVAs tidligere målinger fra nordre deler av Sørfjorden og selve Hardangerfjorden tyder på at 5 ngHg/l kan være en typisk bakgrunnskonsentrasjon i dette "fortynningsvannet", som dels er ferskvann og dels er sjøvann fra selve Hardangerfjorden. Vinteren 1999/2000 hadde imidlertid "fortynningsvannet" i Sørfjordens indre del en betydelig høyere konsentrasjon av kvikksølv (Skei og Knutzen, 2000, og Vedlegg A).

4. Beregninger av vannsirkulasjon og av kvikksølvkonsentrasjon i Sørfjordens brakkvannslag

4.1 Sirkulasjon

4.1.1 Utstrømming av 20 m³/s og uten tidevann

Figur 5 viser en simulering av sirkulasjonen i overflatelaget fra Odda og forbi Tyssedal ved utstrømming av 20 m³/s i et 2 m tykt brakkvannslag, som kan tilsvare en ferskvannstilførsel på i størrelsesorden 10 m³/s. Som ventet er strømhastighet relativt lav. Til sammenligning nevnes at ved Eitrheimsneset er fjorden ca. 500 m bred og med brakkvannslag som er 2 m tykt betyr det at utstrømmingen skjer gjennom et tverrsnitt på 1000 m². Gjennomsnittshastigheten i dette tverrsnittet blir da 0.02 m/s.



Figur 5. Simulering av overflatesirkulasjonen Sørfjorden innenfor Tyssedal – uten tidevann og med utstrømming av 20 m³/s i et 2 m tykt brakkvannslag. Tallverdiene knyttet til fargeskalaen har enheten m/s. Utslippsstedet i Eitrheimsvågen er antydnet med en pil.

Man skal merke seg den store langsomme virvelen i havnebassenget – men også at den langsomme bevegelsen her lett ”brytes opp” av varierende tidevann og av vind. Fordi virvelen skapes av ferskvannet som tilføres av Opo vil den også være påvirket av vannføringen i elva. Det er videre grunn til å merke seg at utenfor havnebassenget ikke framstår virvler av betydning – når vind og tidevann ikke er tatt med. Betydningen av tidevann behandles i neste kapittel.

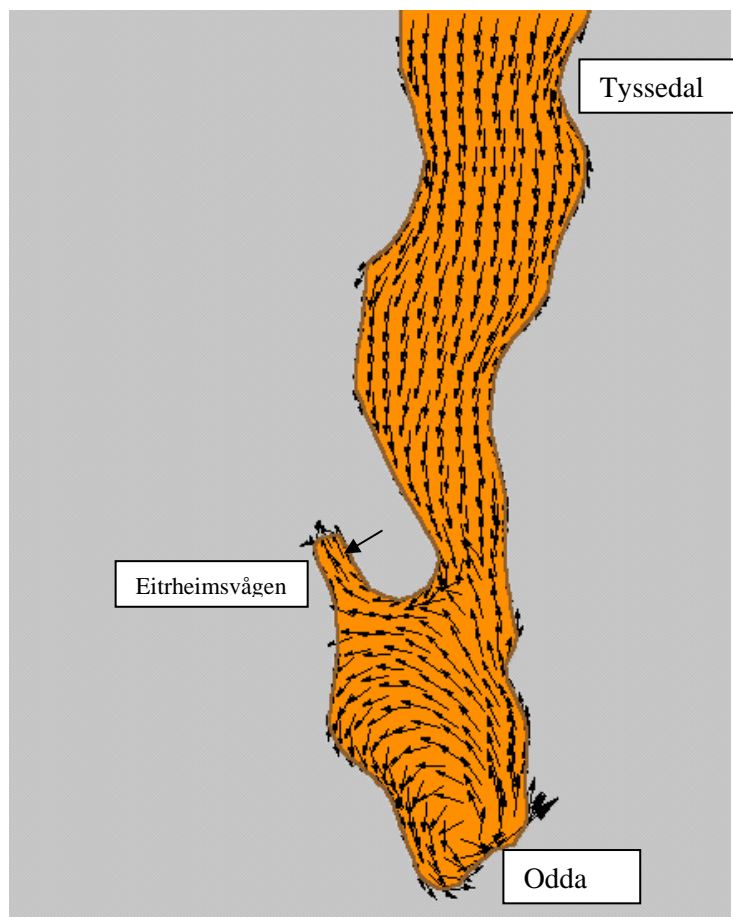
Strømbildet ved utstrømming av 50 m³/s er i hovedsak det samme, men med noe større hastighet og med tykkere brakkvannslag

4.1.2 Sirkulasjon under prøvetaking den 25.1 og 21.3.00

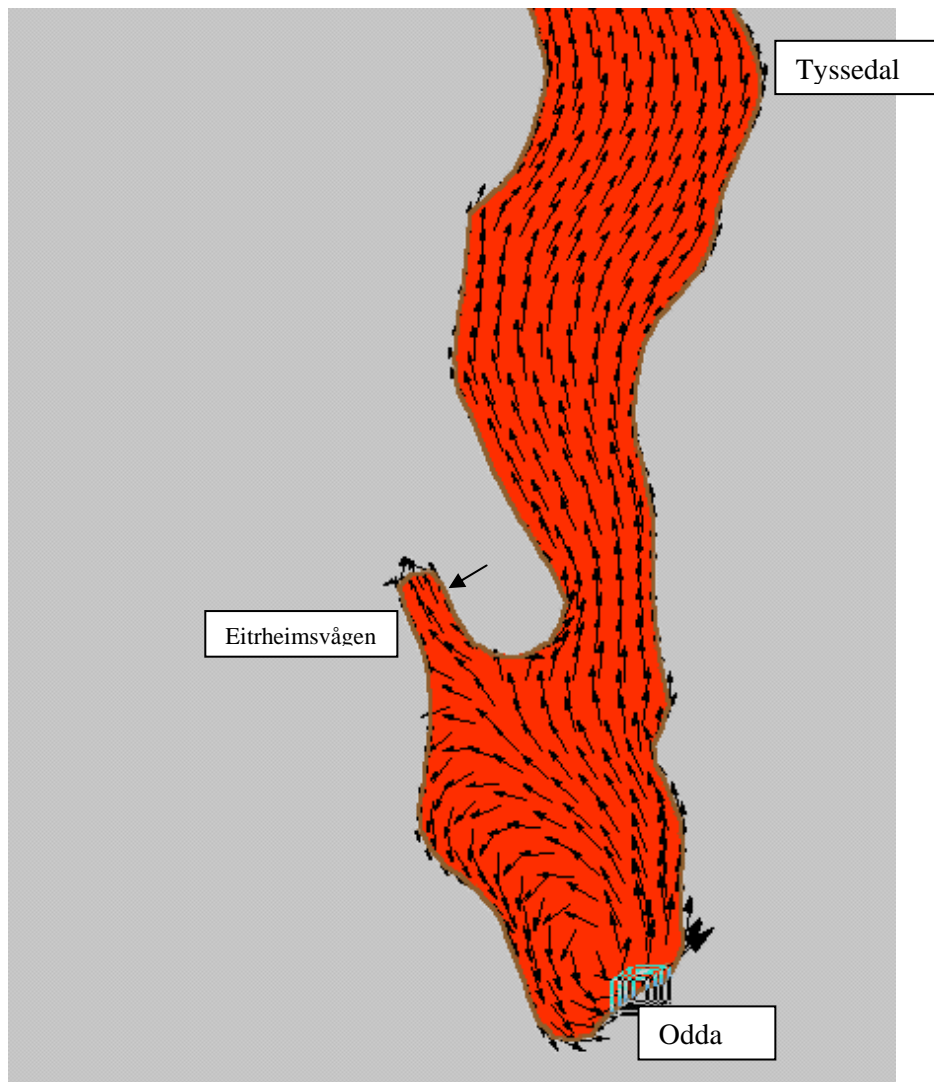
Modellen SMS/RMA2 er brukt for å simulere sirkulasjonen i brakkevannslaget om morgenen den 25.1.00 og 21.3.00, ved påvirkning av ferskvann fra Opo og tidevann. Virkning av lokal vind er ikke inkludert i modellen, og dette kan være et problem for vurdering av resultatene fra 21.3.00 da det på feltskjemaet fra Alex Stewart Env. Services er notert "kraftig vind med snøkast og regn".

Vindretningen og vindstyrken er ikke kjent, og heller ikke varigheten av slike vindforhold før prøvene ble tatt. Resultatene er vist på **Figur 6** og **Figur 7**. Ved det første tidspunktet strømmer tidevannet inn fjorden og tyder på at ved såpass liten vannføring i Opo har tidevannet relativt stor innvirkning på strømforholdene i brakkevannslaget. Den 21.3 strømmet brakkevannet fortsatt ut fjorden, noe som kan skyldes at ved såpass stor ferskvannstilførsel vil strømretningen snu først noe senere i tidevannsperioden.

Man kan merke seg den store, langsomme virvelen i havnebassenget og at det vannet som ved synkende vannstand strømmer ut og rundt Eitrheimsneset ved innstrømmende vann (sterkt fortynnet) kommer tilbake. Det betyr i praksis at de høyeste konsentrasjonene av kvikksølv vil være å finne på fjordens vestside og fjordens midtre del.



Figur 6. Simulering av overflatesirkulasjonen i Sør fjorden innenfor Tyssedal ved prøvetaking om morgenen den 25.1.00. Ferskvannstilførselen er liten (ca. $7 \text{ m}^3/\text{s}$) og tidevannet har akkurat begynt å strømme inn fjorden. Utslippsstedet er antydnet med pil.



Figur 7. Simulering av overflatesirkulasjonen i Sør fjorden innenfor Tyssedal ved prøvetaking om morgenen den 21.3.00, ca. 1-2 timer etter lavvann. Ferskvannstilførselen er ca. $20 \text{ m}^3/\text{s}$ og brakkvannet strømmer ut fjorden. Utslippsstedet er antydnet med pil.

4.2 Estimat av størrelsen av kvikksølvutslippet

4.2.1 Estimat basert på modellen Plumes

En beskrivelse av metodikken er gitt i kapittel 3.3. Vi kjenner ikke mengde sigevann eller kvikksølvkonsentrasjonen i dette, og som data til modellen antar vi derfor:

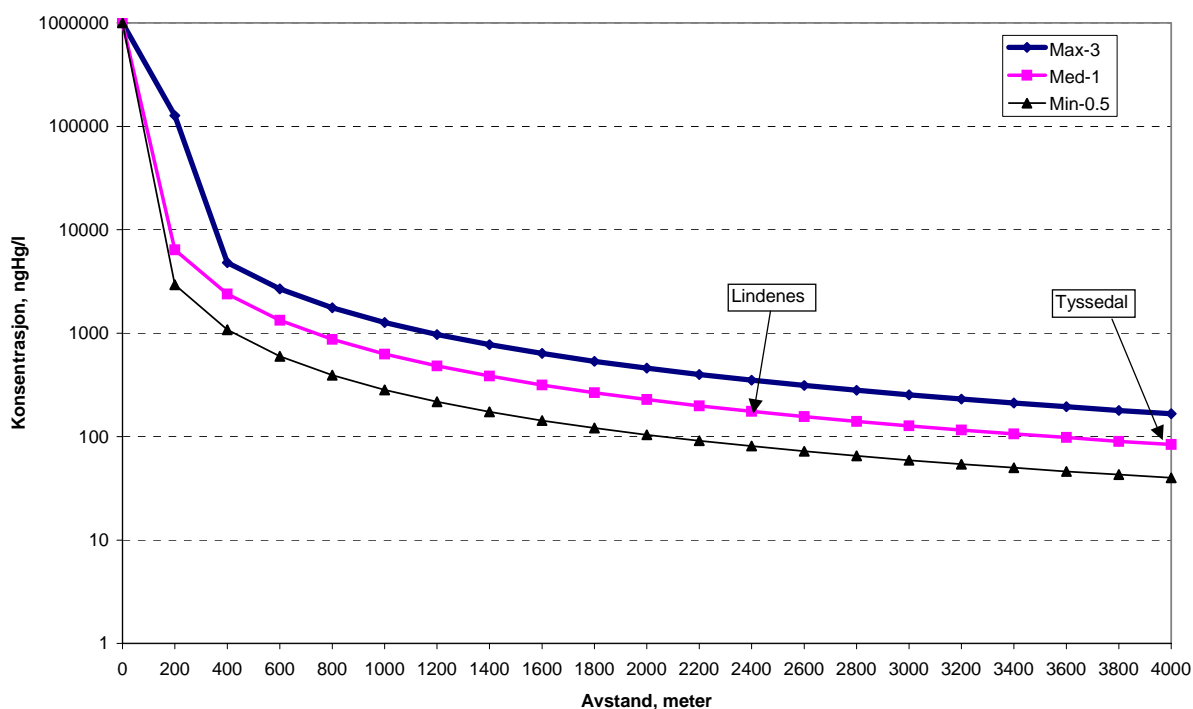
- Tre sigevannsmengder: 0.5, 1 og 3 l/s
- Konsentrasjon i sigevann: 1.000.000 ngHg/l, dvs. 1 mgHg/l.

Dette tilsvarer en lekkasje av 50-300 g kvikksølv pr. døgn.

Som beskrevet i kapittel 4 vil både strømretning og strømhastighet variere mye med tiden, og fra område til område. I beregningene legger vi en fast strømhastighet på 5 cm/s til grunn.

Resultatene av beregningene for de tre vannmengdene er vist i **Figur 8** og i sin helhet i Vedlegg B. Forutsetningene er så usikre at figuren IKKE må tolkes bokstavelig, men sammen med simuleringene av strømforholdene i kapittel 4 er den en illustrasjon av at utlekking av kvikksølv til Eitrheimsvågen kan medføre høye konsentrasjoner i overflatelaget helt ut til Tyssedal. Dette er i samsvar med målte konsentrasjonene (Vedlegg A)

I neste kapittel blir det gjort forsøk på å bedømme mengdene av kvikksølv som lekket ut i Eitrheimsvågen.



Figur 8. Beregning av kvikksølvkonsentrasjon i brakkvannslaget i sentrum av en "sky" med kvikksølvholdig sigevann, i avstander opp til 4000 m fra utslippet. Beregningen gjelder sigevann av henholdsvis 0.5, 1 og 3 l/s med konsentrasjon 1.000.000 ngHg/l til Eitrheimsvågens overflatelag. Til sammenligning er bakgrunnskonsentrasjonen for sjøvann omkring 1-2 ng/l.

4.2.2 Estimat basert på målt konsentrasjon i brakkvannslaget

Ved 6 anledninger i tidsrommet 16.11.99 – 21.3.00 ble konsentrasjonen av kvikksølv i Sørkjordens brakkvannslag målt på en rekke stasjoner fra Eitrheimsvågen til Urdheim i nord. Resultatene fra disse målingene kan bidra til et estimat av hvilke mengder kvikksølv som har blitt tilført fjorden, og en tar utgangspunkt i likningen

$$C_{Hg} = \frac{Hg_{ut}}{Q_b} \quad (\text{lign. 1})$$

der Hg_{ut} : utslipp av kvikksølv ($\mu\text{g}/\text{døgn}$)
 C_{Hg} : målt konsentrasjon av kvikksølv i brakkvannslaget ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 Q_b : beregnet vannutskiftning i brakkvannslaget ($\text{m}^3/\text{døgn}$)

Vannutskiftningen Q_b i brakkvannslaget er summen av flere hydrofysiske prosesser, der de viktigste er

$$Q_b = Q_e + Q_t + Q_m \quad (\text{lign.2})$$

der Q_e : det utstrømmende brakkvannet, drevet av tilført ferskvann innerst i fjorden
 Q_t : halvdaglig tidevann strømmer inn og ut fjorden, og bidrar til den netto vannutskiftningen
 Q_m : et varierende bidrag fra vind og varierende lufttrykk

Q_e kan beregnes ut fra opplysninger om ferskvannstilførsel samt saltholdigheten (forholdet mellom ferskvann og sjøvann) i brakkvannslaget og det underliggende sjøvann. Til dette brukes ligningen:

$$Q_e = \frac{S_s}{S_s - S_b} * F \quad (\text{lign. 3})$$

der F : ferskvannstilførsel, dvs. vannføring i Opo ($\text{m}^3/\text{døgn}$)
 S_s : sjøvannets saltholdighet. Denne ble ikke målt i forbindelse med prøvetakingen og vi velger derfor en typisk saltholdighet (ca. 30) i 8 m dyp for denne parameteren, jfr. Figur 3.
 S_b : brakkvannslagets saltholdighet, her saltholdighet i 1 m dyp.

De enkelte bidragene til vannutskiftningen i brakkvannslaget fra tidevann og varierende vind og lufttrykk har vi ikke grunnlag for å beregne, og må anslås for å få den samlede vannutskiftningen Q_b . Vi vil beregne Hg_{ut} på grunnlag av målte kvikksølvkonsentrasjoner ut til Tyssedal samt anslått Q_b for samme området, og gjør det for et 2 m tykt brakkvannslag den 25.1.00 og 21.3.00. Dataene som brukes i ligning 1 og ligning 3 kan sammenfattes i **Tabell 3**.

Tabell 3. Grunnlag for beregninger av vannutskiftning i brakkvannslaget omkring 25.1.00 og 21.3.00. Etter skjønn er den samlede ferskvannstilførselen F til innerste del av Sørkjorden satt noe høyere enn vannføringen i Opo for prøvedato og den foregående dagen.

Dato	F m^3/s	S_s	S_b	Q_e m^3/s	Q_e $10^6 \text{m}^3/\text{d}$
25.1.00	8	30*	15	16	1.4
21.3.00	20	30*	20	60	5.2

*) Denne størrelsen er ikke målt, men er antatt.

Innenfor Tyssedal er volumet av et 2 m tykt brakkvannslag ca. $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ og av **Tabell 3** ser vi at brakkvannsstrømmen alene kan bidra til rask utskiftning av denne vannmassen. I tillegg vil det halvdaglige tidevannet og eventuelt også vind bidra til å øke vannutskiftningen. Vi har ikke grunnlag for noen nøyaktig bedømmelse av størrelsen av bidraget fra vind, men skal gjøre et estimat for tidevannet. Forskjellen mellom høyvann og lavvann for de to aktuelle datoene var 1.17m og 1.34 m (**Tabell 2**), og over et døgn (2 tidevannsperioder) blir tidevannsvolumet henholdsvis ca. $19 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ og $21 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Innstrømming og utstrømming er imidlertid ikke begrenset til brakkvannslaget, men fordeler seg over storparten av vannmassen mellom overflate og bunn. Som nevnt i kap. 3.2 er vårt estimat at for området innenfor Lindenes vil 10-15% av tidevannsutskiftningen foregå i brakkvannslaget.

Det er ikke 100% fornyelse av tidevannet for hver tidevannssyklus, dvs. av noe av det tidevannet som strømmet ut fjorden med fallende vannstand kommer tilbake ved stigende vannstand (jfr. **Figur 6**). Den prosentvise andelen er ukjent, men vårt estimat blir 50% og dermed grovt regnet en netto tidevannsutskiftning av $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{døgn}$ ved begge datoer. Sammenlignet med størrelsen av Q_e i **Tabell 4** utgjør tidevannet en stor del av vannutskiftningen den 25.1 og relativt lite den 21.3.

I hovedsak blåser vinden i fjordens lengderetning og vind fra sør vil øke utskiftningen i brakkvannslaget (men kanskje ikke i selve Eitrheimsvågen), mens vind fra nord kan redusere hastigheten i det utstrømmende brakkvannet og dermed også redusere vannutskiftningen. Vindstyrke og varighet av en vindsituasjon er avgjørende for hvordan vannutskiftningen påvirkes. Denne vekslende effekten har vi ikke grunnlag for å bedømme og velger å se bort fra den. I samsvar med ligning 2 setter vi $Q_b = 2.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ og $Q_b = 6.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ for henholdsvis 25.1.00 og 23.1.00. Dermed får vi at oppholdstiden for brakkvannslaget innenfor Tyssedal ved disse to datoene var henholdsvis ca. 3 døgn og ca. 1.2 døgn.

Ut fra målte konsentrasjoner av kvikksølv i brakkvannslaget kan man gjøre et estimat av mengden kvikksølv som de to aktuelle datoene befant seg i brakkvannslaget sør for Tyssedal (**Tabell 4**). Sammenholdt med beregningene av oppholdstid får en at den 25.1.00 utgjorde mengden kvikksølv tilførsler over ca. 3 døgn, dvs. antyder et utslipp på 300-800 g/døgn. Den 21.3.00 var oppholdstiden langt kortere og tallene tyder på tilførsel av 400-600 g/døgn. Denne datoene var kvikksølvkonsentrasjonen ved Digraneset (Figur 1) så høy som 54 ng/l, og viser dermed at det også var en stor mengde kvikksølv utenfor Tyssedal (Vedlegg A).

Tabell 4. Beregninger av kvikksølv mengde i brakkvannslaget ut til Tyssedal (tall for konsentrasjoner er hentet fra Skei og Knutzen, 2000).

Område	Areal 10^6 m^2	Volum 10^6 m^3	Dato: 25.1.00		Dato: 21.3.00	
			C_{Hg} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Hg gram	C_{Hg} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Hg gram
Til Lindenes	2.7	5.4	200-300	1080-1620	50-100	270-540
Lindenes-Tyssedal	1.3	2.6	50-250	130-650	80	208
Sum	4.0	8.0		ca. 1200-2300		ca. 480-750

Som nevnt ble bakgrunnskonsentrasjonen satt til 5 ngHg/l. Vannprøver viser imidlertid at konsentrasjonen i brakkvannslaget nord for Tyssedal oftest var 3-5 ganger høyere enn dette (Skei og Knutzen, 2000). Dette kvikksølvholdige vannet ble ført sørover til Lindenes-Havnebasenget ved innstrømmende tidevann og utgjorde dermed en del av det vannet som utslippet ble fortynnet i. Tar man hensyn til denne resirkuleringen vil den direkte konsentrasjonsøkningen fra utslippet bli mindre og estimatene for utslippsmengdene følgelig redusert med omkring 25-50 gHg/døgn.

5. Diskusjon og konklusjoner

Ved å bruke modeller for sirkulasjon, spredning og fortykning i overflatelaget i Sørfjordens indre del – samt data for målte konsentrasjoner av kvikksølv - har vi forsøkt å anslå størrelsen av lekkasjen av kvikksølv til Eitrheimsvågen.

På grunn av varierende tidevann, varierende vannføring i Opo og skiftende påvirkning fra vind vil både sirkulasjon og oppholdstid for brakkvannslaget i Sørfjorden variere mye med tiden. Dette fører til at også konsentrasjonen av kvikksølv vil variere mye i tid og i rom – uansett om tilførselen til fjorden er konstant eller varierende. Slike variasjoner sees også av målingene som er utført.

Datagrunnlaget er forholdsvis svakt, og beregningene bygger dermed på flere antakelser og forutsetninger, som det er redegjort for underveis. For to datoer: 25.1.00 og 21.3.00 har en oppstilt stoffbudsjetter og regnet tilbake til mulige mengder kvikksølv som har blitt tilført. Den første datoen viser målingene at det i brakkvannslaget innenfor Tyssedal befant seg mellom 1-2 kg kvikksølv, mens mengden i mars var omkring tredjeparten. Samtidig tyder beregninger på at oppholdstiden for brakkvannslaget ved den første anledningen var omkring 3 døgn, mot 1-1.5 døgn den siste datoen. Samlet sett tyder dermed beregningene på en tilførsel av kvikksølv i størrelsesorden 400-500 g/døgn i tiden omkring begge disse to datoene.

Erfaringsmessig vil en andel av kvikksølvet som lekker ut til sjøvannet og som senere fordeles i sjøvannet være bundet i partikler som etterhvert vil synke til bunns. Denne effekten er ikke forsøkt beregnet, og fra den synsvinkel vil estimat basert på målte konsentrasjoner kunne gi for lave tall for utslippet.

Estimatet av brakkvannslagets tykkelse på 2 m er en usikkerhet, med betydning for volumet av brakkvannslaget og dermed for estimatet av mengden kvikksølv i dette. Utenom måling av saltholdighet i 0.5-1 m dyp har vi ikke data å støtte oss til. Vannprøvene for bestemmelse av kvikksølvkonsentrasjon ble tatt i samme dyp. Ved lav ferskvannstilførsel den 24. januar er det tenkbart at tykkelsen var mindre enn 2 m. Da var samtidig betydningen av tidevannsutskiftningen relativt stor og fordi virkningen av denne er mer jevnt fordelt nedover i vannsøylen er det ikke sikkert at oppholdstiden for vannmassen i 0-2 m dyp ble nevneverdig feil. Usikkerheten om vannprøven fra 0-5-1 m dyp var representativ for en 2 m tykk vannsøyle kan være tilsvarende utslagsgivende for beregningene.

De to datoene gav en god spennvidde mht. ferskvannstilførsel fra Opo og tidevannsvariasjon. Vi har ikke forsøkt å gjøre tilsvarende beregninger for de øvrige fire tidspunktene da det har blitt innsamlet vannprøver.

6. Litteratur

Baumgartner, D.J., Frick, W.E. and Roberts, P.J.W., 1994. Dilution models for effluent discharges (Third Edition). Center for Exposure Assessment Modeling. US.EPA, Environmental Research Laboratory. Athens, Georgia. 189 pp.

ECGL 1995: Surface water modeling system, Reference manual. Brigham Young University. Engineering Computer Graphics Laboratory. 368B CB, Provo, Utah, USA. 170 sider.

Skei, J. og Knutzen, J., 2000. Utslipp av kvikksølv til Sørfjorden som følge av uhell ved Norzink as vintern 1999-2000. Miljømessige konsekvenser. NIVA-rapport nr. 4234-2000. 12 sider.

Svendsen, H., 1973. Oseanografiske undersøkelser i Sørfjorden 1972. I Miljøvernkomiteen i Odda: "Resipientundersøkelser i Sørfjorden 1972".

Vedlegg A.

Tabell 5. Resultater av vannanalyser (ng/l Hg) i perioden november 1999 og mars 2000 (fra Skei og Knutzen, 2000).

Stasjon	16.11.1999	14.12.1999	25.01.2000	22.02.2000	08.03.2000	21.03.2000
Ålvik					5,5	
Utløpet Granvinfj.					6,0	
Steinkrossen (Hardfj.)					5,0	
Urdheim	<1	14,5	35,8	12,0	13,5	10,5
Børve	2,0	21,0	36,0	17,0	17,5	18,0
Digraneset	5,0	14,5	17,0	17,0	30,5	54,0
Tyssedal	8,0	29,5	48,5	102,0	25,0	79,5
Lindeneset	10,5	26,0	276,0	80,0	53,5	83,0
Eitrheim øst	11,0	16,5	286,0	54,0	40,0	64,5
Eitrheim syd	11,0	20,5	460,0	72,5	94,5	95,0
Havnebassenget	10,0	11,0	172,0	30,5	28,0	44,5
Eitrheimsvågen	17,5	78,5	1130,0	2090,0	433,0	112,0

Vedlegg B.

```

May 29, 2000, 16:28:26 WED PROGRAM PLUMES, Ed 3.1, 8/7/95 Case: 1 of 4
Title Norzink - rel. stor utlekking til strandomraadet nonlinear
tot flow # ports port flow spacing effl sal effl temp far inc far dis
0.003 4 0.0007500 0.5 0 5 200 5000
port dep port dia plume dia total vel horiz vel vertl vel asp coeff print frq
0.2 0.1 0.1000 0.09549 0.09549 0.000 0.10 500
port elev ver angle cont coef effl den poll conc decay Froude # Roberts F
1 0.0 1.0 0.0303133 1000000 0 1.026 0.9626
hor angle red space p amb den p current far dif far vel K:vel/cur Stratif #
90 0.5000 8.85778 0.05000 0.0003 0.05 1.910 -0.1806
depth current density salinity temp amb conc N (freq) red grav.
1 0.05 12.0457 15 1.5 5 -0.3936 0.08657
4 0.05 24.0006 30 2 5 buoy flux puff-ther
4 5 0.0001299 0.1165
jet-plume jet-cross
0.09662 0.1693
plu-cross jet-strat
0.5194 0.1466
plu-strat
0.1806
CL conc>=
    
```

CORMIX1 flow category algorithm is turned off.
 0.0003 m²/3/s 0.0001 to 0.0005 m²/3/s range

Help: F1. Quit: <esc>. Configuration:ATNO0. FILE: NORZ.VAR;

UM INITIAL DILUTION CALCULATION (nonlinear mode)

```

plume dep plume dia poll conc dilution hor dis
m m m
0.2000 0.1000 1000000 1.000 0.000
    
```

0.05631 0.1678 346300 2.872 0.1997 -> surface hit

Plumes not merged, Brooks method may be invalid.

FARFIELD CALCULATION (based on Brooks, 1960, see guide)

Farfield dispersion based on wastefield width of 1.668m

```

--4/3 Power Law-- --Const Eddy Diff--
conc dilution width conc dilution width distance time
m m m m m m sec hrs
22000 45.4 36.5 104000 9.63 7.73 200 4000 1.1
8590 116 93.5 74200 13.5 10.8 400 8000 2.2
4840 207 166 60800 16.4 13.2 600 12000 3.3
3200 313 251 52800 18.9 15.2 800 16000 4.4
2320 433 347 47300 21.1 17.0 1000 20000 5.6
1780 565 453 43200 23.1 18.6 1200 24000 6.7
1420 708 568 40000 25.0 20.0 1400 28000 7.8
1170 862 691 37500 26.7 21.4 1600 32000 8.9
981 1030 823 35300 28.3 22.7 1800 36000 10.0
840 1200 961 33500 29.8 23.9 2000 40000 11
730 1380 1110 32000 31.2 25.1 2200 44000 12
642 1570 1260 30600 32.6 26.2 2400 48000 13
571 1770 1420 29400 34.0 27.3 2600 52000 14
512 1970 1580 28400 35.2 28.3 2800 56000 16
463 2180 1750 27400 36.5 29.3 3000 60000 17
421 2400 1930 26500 37.7 30.2 3200 64000 18
385 2630 2110 25800 38.8 31.2 3400 68000 19
354 2860 2300 25000 39.9 32.1 3600 72000 20
327 3100 2490 24400 41.0 32.9 3800 76000 21
303 3350 2690 23800 42.1 33.8 4000 80000 22
    
```

May 29, 2000, 16:28:38 WED PROGRAM PLUMES, Ed 3.1, 8/7/95 Case: 2 of 4
Title Norzink - middels utlekking til strandomraadet nonlinear
 tot flow # ports port flow spacing effl sal effl temp far inc far dis
 0.001 3 0.0003333 0.5 0 5 200 5000
 port dep port dia plume dia total vel horiz vel vertl vel asp coeff print frq
 0.2 0.1 0.1000 0.04244 0.04244 0.000 0.10 500
 port elev ver angle cont coef effl den poll conc decay Froude # Roberts F
 1 0.0 1.0 0.0303133 1000000 0 0.4562 2.166
 hor angle red space p amb den p current far dif far vel K:vel/cur Stratif #
 90 0.5000 8.85778 0.05000 0.0003 0.05 0.8488 -0.1806
 depth current density salinity temp amb conc N (freq) red grav.
 1 0.05 12.0457 15 1.5 5 -0.3936 0.08657
 4 0.05 24.0006 30 2 5 buoy flux puff-ther
 0.05 0.00005771 0.05177
 jet-plume jet-cross
 0.04294 0.07523
 plu-cross jet-strat
 0.2308 0.09775
 plu-strat
 0.1475
 CL conc>=

CORMIX1 flow category algorithm is turned off.
 0.0003 m2/3/s 0.0001 to 0.0005 m2/3/s range

Help: F1. Quit: <esc>. Configuration:ATNO0. FILE: NORZ.VAR;

UM INITIAL DILUTION CALCULATION (nonlinear mode)

plume dep	plume dia	poll conc	dilution	hor dis
m	m			m
0.2000	0.1000	1000000	1.000	0.000

0.05084 0.1548 244900 4.058 0.1202 -> surface hit

Plumes not merged, Brooks method may be invalid.

FARFIELD CALCULATION (based on Brooks, 1960, see guide)

Farfield dispersion based on wastefield width of 1.155m

--4/3 Power Law--			--Const Eddy Diff--					
conc	dilution	width	conc	dilution	width	distance	time	
		m			m	m	sec	hrs
11200	88.9	35.0	65200	15.3	6.02	200	4000	1.1
4310	232	91.4	46600	21.4	8.43	400	8000	2.2
2410	416	163	38200	26.2	10.3	600	12000	3.3
1590	631	248	33100	30.2	11.9	800	16000	4.4
1150	875	344	29700	33.7	13.3	1000	20000	5.6
879	1140	450	27100	36.9	14.5	1200	24000	6.7
702	1440	564	25100	39.8	15.7	1400	28000	7.8
577	1750	687	23500	42.6	16.7	1600	32000	8.9
485	2080	818	22100	45.1	17.8	1800	36000	10.0
416	2430	957	21000	47.6	18.7	2000	40000	11
362	2800	1100	20000	49.9	19.6	2200	44000	12
319	3190	1250	19200	52.1	20.5	2400	48000	13
283	3590	1410	18400	54.2	21.3	2600	52000	14
254	4010	1580	17800	56.3	22.1	2800	56000	16
230	4440	1750	17200	58.2	22.9	3000	60000	17
209	4890	1920	16600	60.1	23.7	3200	64000	18
192	5360	2110	16100	62.0	24.4	3400	68000	19
176	5830	2290	15700	63.8	25.1	3600	72000	20
163	6320	2490	15300	65.5	25.8	3800	76000	21
152	6820	2680	14900	67.2	26.4	4000	80000	22

May 29, 2000, 16:28:50 WED PROGRAM PLUMES, Ed 3.1, 8/7/95 Case: 3 of 4
 Title Norzink liten utlekking til strandomraadet nonlinear
 tot flow # ports port flow spacing effl sal effl temp far inc far dis
 0.0005 2 0.0002500 0.5 0 5 200 5000
 port dep port dia plume dia total vel horiz vel vertl vel asp coeff print frq
 0.2 0.1 0.1000 0.03183 0.03183 0.000 0.10 500
 port elev ver angle cont coef effl den poll conc decay Froude # Roberts F
 1 0.0 1.0 0.0303133 1000000 0 0.3421 2.888
 hor angle red space p amb den p current far dif far vel K:vel/cur Stratif #
 90 0.5000 8.85778 0.05000 0.0003 0.05 0.6366 -0.1806
 depth current density salinity temp amb conc N (freq) red grav.
 1 0.05 12.0457 15 1.5 5 -0.3936 0.08657
 4 0.05 24.0006 30 2 5 buoy flux puff-ther
 0.00004328 0.03882
 jet-plume jet-cross
 0.03221 0.05642
 plu-cross jet-strat
 0.1731 0.08465
 plu-strat
 0.1372
 CL conc>=

CORMIX1 flow category algorithm is turned off.
 0.0003 m2/3/s 0.0001 to 0.0005 m2/3/s range

Help: F1. Quit: <esc>. Configuration:ATNO0. FILE: NORZ.VAR;

UM INITIAL DILUTION CALCULATION (nonlinear mode)

plume dep	plume dia	poll conc	dilution	hor dis
m	m			m
0.2000	0.1000	1000000	1.000	0.000

0.05825 0.1612 189500 5.242 0.1145 -> surface hit

Plumes not merged, Brooks method may be invalid.

FARFIELD CALCULATION (based on Brooks, 1960, see guide)

Farfield dispersion based on wastefield width of 0.6612m

--4/3 Power Law--			--Const Eddy Diff--			time		
conc	dilution	width	conc	dilution	width	distance	sec	hrs
		m			m	m		
5240	191	33.3	42200	23.7	4.13	200	4000	1.1
1960	511	89.1	30000	33.3	5.80	400	8000	2.2
1090	922	161	24600	40.6	7.09	600	12000	3.3
716	1410	245	21300	46.9	8.17	800	16000	4.4
517	1950	340	19100	52.4	9.13	1000	20000	5.6
396	2560	446	17400	57.3	10.00	1200	24000	6.7
316	3210	560	16100	61.9	10.8	1400	28000	7.8
260	3920	683	15100	66.2	11.5	1600	32000	8.9
219	4670	814	14200	70.2	12.2	1800	36000	10.0
188	5460	952	13500	74.0	12.9	2000	40000	11
164	6290	1100	12900	77.6	13.5	2200	44000	12
145	7160	1250	12300	81.0	14.1	2400	48000	13
129	8070	1410	11900	84.3	14.7	2600	52000	14
116	9010	1570	11400	87.5	15.3	2800	56000	16
105	9990	1740	11000	90.5	15.8	3000	60000	17
95.9	11000	1920	10700	93.5	16.3	3200	64000	18
88.0	12000	2100	10400	96.4	16.8	3400	68000	19
81.2	13100	2290	10100	99.2	17.3	3600	72000	20
75.3	14200	2480	9810	102	17.8	3800	76000	21
70.1	15400	2680	9560	105	18.2	4000	80000	22