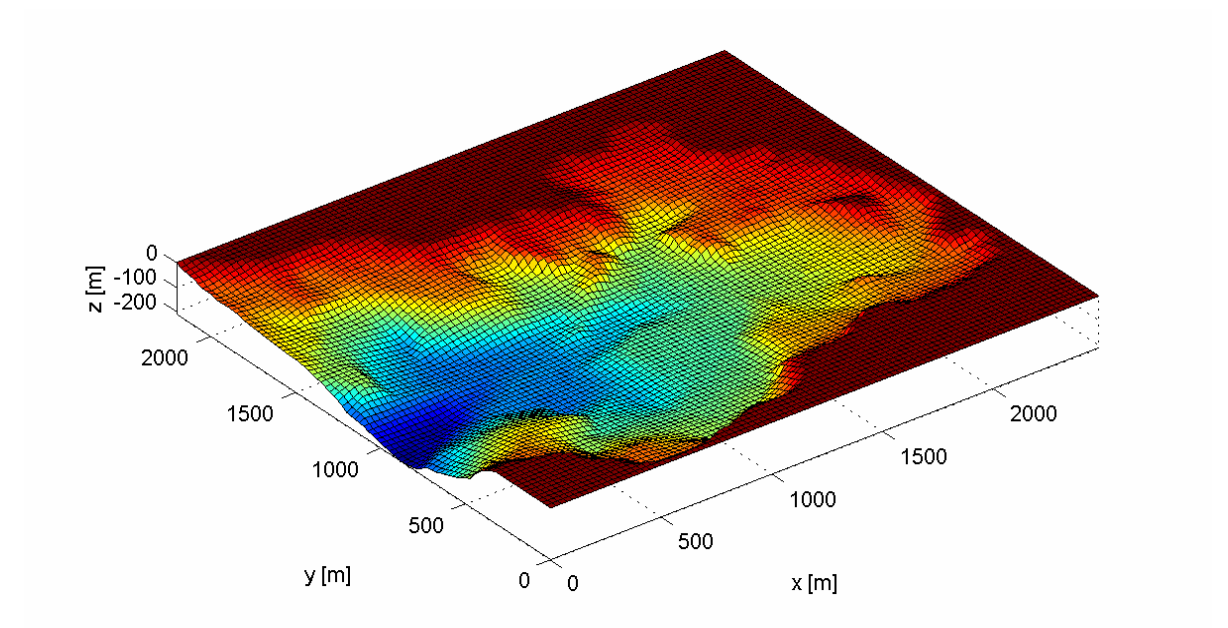




RAPPORT LNR 5060-2005

## **Strømmodellering i indre Saudafjorden**

Konsekvenser av kraftverk-  
utbyggingen ved Sønnå for  
isforhold og erosjon



**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  
5005 Bergen  
Telefon (47) 55 30 22 50  
Telefax (47) 55 30 22 51

**Midt-Norge**

Postboks 1266  
7462 Trondheim  
Telefon (47) 73 54 63 85 / 86  
Telefax (47) 54 63 87

Tittel Strømmodellering i indre Saudafjorden - Konsekvenser av kraftverkutbyggingen ved Sønnå for isforhold og erosjon	Løpenr. (for bestilling) 5060-2005	Dato 8. september 05
	Prosjektnr. Undernr. O-25242	Sider Pris 33
Forfatter(e) Petter Stenström Lars Golmen	Fagområde Oseanografi	Distribusjon
	Geografisk område Sauda	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Saudefaldene AS	Oppdragsreferanse
-------------------------------------	-------------------

**Sammendrag**

Saudefaldene skal etablere et utslippspunkt for vann fra en ny kraftstasjon i indre Saudafjorden. Utslagsstedet vil være dykket på omtrent 30 m dyp og erstatter nåværende overflateutslipp fra kraftstasjonen Sauda III. Maksimal vannføring vil øke fra 36 m<sup>3</sup>/s gjennom nåværende stasjon til 70 m<sup>3</sup>/s gjennom den nye stasjonen. Vannføringen i berørte elver vil minske. Denne rapport utreder konsekvenser av etableringen med hensyn til isdannelse og erosjon av forurensede sedimenter. Undersøkelsen er basert på analyse av eldre data og på simuleringer med tre forskjellige modeller: en todimensjonal strømningsmodell for å simulere sirkulasjonen i overflatelaget, en plummodell for å simulere spredning og innlagring av det dykkete utslippet, samt en ismodell for å simulere effekter av forandringene for isdannelsen i fjorden. Vi drar følgende konklusjoner av undersøkelsen:

- Stengingen av Sauda III vil føre til lavere strømhastigheter generelt i overflatevannet og et mer homogent strømningsmønster.
- Det dykkete utslippet vil innlagres på ett dyp straks under eller i sprangsjiktet.
- Den endring i densitetsprofilen som innlagringen av det dykkete utslippet gir opphav til har liten påvirkning på isleggingen. Isleggingsprosessen styres istedet i høy grad av forholdene i overflatelaget.
- Isdannelsen kommer mest sannsynlig til å minske som følge av de minskede overflateutslippene.
- Hvis de minskede overflateutslippene leder til vesentlig svekket sjiktning i indre Saudafjorden vil det dykkete utslippet kunne nå overflaten og då føre til vesentlig mindre is.
- Det dykkete utslippet vil ikke kunne forårsake økt erosjon av bunnsedimenter lengre ut i fjorden.
- Vi anbefaler en utslippsvinkel i intervallet 0-45° for å minimere risikoen for bakoverskridende erosjon.

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fjordsirkulasjon</li> <li>2. Dykket utslipp</li> <li>3. Erosjon</li> <li>4. Is</li> </ol>	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fjord circulation</li> <li>2. Submerged outlet</li> <li>3. Erosion</li> <li>4. Ice</li> </ol>
--	--



Petter Stenström  
Prosjektleder



Dominique Durand  
Forskningsleder



Øyvind Sørensen  
Prosjektleder



## **Strømmodellering i indre Saudafjorden**

Konsekvenser av kraftverketbyggingen ved Sønnå for  
isforhold og erosjon





## Forord

På oppdrag for Saundefaldene AS har NIVAs Vestlandsavdeling utført undersøkelser av konsekvenser av kraftverktbyggingen ved Sønnå i indre Saudafjorden for isforhold og erosjon. Undersøkelsene er i hovedsak grunnet på analyse av tilgjengelige data og på modellering.

Hos NIVA har følgende personer vært involvert i prosjektet: Lars Golmen (sammenstilling av hydrografidata og ismodellering), Frode Uriansrud (sammenstilling av sedimentdata), Petter Stenström (modellering, dataanalyse, rapportering og prosjektledelse). Dominique Durand har vært ansvarlig for faglig gransking og rapportredigering.

Kontaktperson for oppdragsgiver har vært Karl Erik Johansen, Envirocon.

NVE og UiB har vært behjelpelig med data.

Alle medarbeidere takkes for god innsats.

Bergen, 8. september 2005

*Petter Stenström*

---



# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>Summary</b>	<b>6</b>
<b>1. Innledning</b>	<b>7</b>
1.1 Mål, omfang og begrensninger	7
1.2 Allmenn beskrivelse av Saudafjorden	8
1.3 Tidligere studier	9
<b>2. Data og metode</b>	<b>11</b>
2.1 Avløp fra kraftstasjonen	11
2.2 Vannføring i elvene	12
2.2.1 Storelva	12
2.2.2 Åbødalselva (Nordelva)	13
2.2.3 Sagelva	13
2.3 Strøm	13
2.4 Saltholdighet og temperatur	15
2.5 Isforhold	17
2.6 Sedimenter og erosjon	19
<b>3. Resultater</b>	<b>21</b>
3.1 Generell sirkulasjon	21
3.2 Plumodynamikk	23
3.3 Isforhold	28
3.4 Erosjon	31
3.4.1 Erosjon av forurensede sedimenter	31
3.4.2 Erosjon lokalt ved utslippet	31
<b>4. Konklusjoner</b>	<b>32</b>
<b>5. Referanser</b>	<b>33</b>

---



# Sammendrag

Saudefaldene skal etablere et utslippspunkt for vann fra en ny kraftstasjon i indre Saudafjorden. Utslagsstedet vil være dykket på omtrent 30 m dyp og erstatter nåværende overflateutslipp fra kraftstasjonen Sauda III. Maksimal vannføring vil øke fra 36 m<sup>3</sup>/s gjennom nåværende stasjon til 70 m<sup>3</sup>/s gjennom den nye stasjonen. Vannføringen i berørte elver vil minske.

Denne rapport utreder konsekvenser av etableringen med hensyn til:

- Forandret isdynamikk i indre Saudafjorden.
- Nye strømmer som kan føre til resuspensjon og transport av forurensede bunnsedimenter.
- Lokale strømmer ved utslagsstedet som kan føre til erosjon og underminering i et område med ballaststein som er beskyttet av kulturminneloven.

Undersøkelsen er basert på analyse av eldre data og på simuleringer med tre forskjellige modeller: en todimensjonal strømningsmodell for å simulere sirkulasjonen i overflatelaget, en plummodell for å simulere spredning og innlagring av det dykkete utslippet, samt en ismodell for å simulere effekter av forandringene for isdannelsen i fjorden. Vi drar følgende konklusjoner av undersøkelsen:

- Stengingen av Sauda III vil føre til lavere strømhastigheter generelt i overflatevannet og et mer homogent strømningsmønster.
- Det dykkete utslippet vil ifølge våre beregninger innlagres på ett dyp straks under eller i sprangsjiktet. Resultatene følsomhet for forandringer i utslippsvinkel og utslippshastighet er små.
- Den endring i densitetsprofilen som innlagringen av det dykkete utslippet gir opphav til har liten påvirkning på isleggingen. Isleggingsprosessen styres istedet i høy grad av forholdene i overflatelaget.
- Minskingen av utløpene til overflaten kan ha flere forskjellige effekter: (i) De råker som elveutløpene i perioder har forårsaket kan forsvinne i og med at strømningsmønsteret blir mer homogent; (ii) Lavere strømhastigheter i overflatevannet og dermed lengre oppholdstid kan gi økt potensial for islegging; (iii) Høyere saltholdighet i overflatevannet senker frysepunktet og bør gi mindre islegging.
- Vi bedømmer at det mest sannsynlige scenariet er at isleggingen kommer til å minske som følge av de minskede overflateutslippene. Argumentet er at et meget tynt overflatelag lett vil blandes ned i underliggende saltere og varmere vann. Tidligere observasjoner viser også at isdannelse i Saudafjorden nesten uten unntak skjer etter en nedbørrik periode etterfulgt av klarvær og kulde, dvs etter en periode med stor tilførsel av ferskvann til fjorden. Disse perioder vil bli færre.
- Hvis de minskede overflateutslippene leder til vesentlig svekket sjiktning i indre Saudafjorden vil det dykkete utslippet kunne nå overflaten og da føre til vesentlig mindre is.
- Det dykkete utslippet vil ikke kunne forårsake økt erosjon av bunnsedimenter lengre ut i fjorden ettersom plumen stiger monotont fra utslippet og aldri kommer i kontakt med bunn.
- Erosjon lokalt i området med ballaststein kan eventuelt (men ikke trolig) inntreffe om utslippet skjer helt vertikalt. For de utslippsvinkler som vi har modellert – 0-30° mot horisontalplanet – og for utslippsvinkler opp til i det minste 45° finnes ingen slik risiko.
- Vi anbefaler en utslippsvinkel i intervallet 0-45°. Disse grenser er ikke definitive, men en meget brattere vinkel vil gi mindre spredning av utslippsplymen og sterkere lokale strømmer i utslippsområdet. Risikoen for bakoverskridende erosjon vil også øke med en brattere vinkel. En negativ vinkel (nedoverrettet utslipp) vil kunne gi erosjon på skråningen nedenfor utslagsstedet.

# Summary

Title: Circulation modeling in the inner Sauda fjord – Consequences of a new power plant at Sønnå for ice conditions and erosion

Year: 2005

Authors: Petter Stenström and Lars Golmen

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 82-577-4763-7

Saudefaldene is establishing a new outlet from a new power plant in the inner Sauda fjord. The outlet will be submerged at approximately 30 m depth and replaces the present surface outlet from the power plant Sauda III. Maximal discharge will increase from the present 36 m<sup>3</sup>/s to 70 m<sup>3</sup>/s. The discharge from the effected rivers will decrease.

This report examines the consequences of the establishment with regard to:

- Ice dynamics in the inner Sauda fjord.
- Resuspension and transport of polluted bottom sediments.
- Local erosion around the outlet.

The study is based on analysis of older data and on modeling with four different models: a two-dimensional circulation model for simulating currents in the surface water, a plume model for simulating spreading and trapping of the outlet plume, and an ice model for looking at the consequences for ice formation. We draw the following conclusions:

- The shutdown of Sauda III will cause lower current velocities and a more homogeneous current pattern in the surface water.
- The submerged outlet will be trapped at a depth just below the pycnocline. This result is due to the strong stratification in the Sauda fjord, and is relatively insensitive to discharge angle and initial velocity.
- The modification of the density profile that the trapping of the discharge gives has insignificant effect on ice formation. Ice formation is instead controlled by the conditions in the surface layer.
- The decrease in discharge to the surface layer may have several different effects: (i) The wake that the river discharge often produces in the fjord may disappear; (ii) Lower current velocities in the surface layer gives longer residence times and thus increased potential for ice formation; (iii) Higher salinity in the surface layer lowers the freezing point and should give less ice.
- The most likely effect is that there will be less ice in the inner fjord due to the decreased freshwater supply to the surface layer. This is because a very thin surface layer easily will be mixed with warmer and saltier underlying water due to wind shear.
- If the decreased discharge to the surface layer significantly weakens the stratification, the submerged outlet may reach the surface and cause significantly less ice.
- The submerged discharge will not cause increased erosion of polluted bottom sediments since the plume rises monotonically from the outlet and is never near erodible bottom areas.
- Local erosion at the slope above the outlet could possibly occur if the discharge angle is very steep (close to vertical). For less steep discharge angles, up to at least 45°, there is no such risk.
- We recommend a discharge angle in the interval 0-45° (measured against the horizontal). The limits are not definite, but a much steeper angle will cause less spreading of the plume, stronger local currents, and increased risk for erosion. A negative angle (downward discharge) could also lead to erosion at the slope beneath the outlet.

# 1. Innledning

## 1.1 Mål, omfang og begrensninger

Saudefaldene skal etablere et utslippspunkt for vann fra en ny kraftstasjon ved Sønnå i indre Saudafjorden (Figur 1). Utslagsstedet vil være dykket på omtrent 30 m dyp. Eksisterende overflateutslipp fra kraftstasjonen Sauda III innerst i fjorden vil opphøre når den nye stasjonen tas i drift. Etableringen innebærer:

- Endring fra overflateutslipp til dykket utslipp og flytting av utløpssted ca. 300 m ut i fjorden.
- Økt maksimal vannføring fra 36 m<sup>3</sup>/s gjennom nåværende stasjon til 70 m<sup>3</sup>/s gjennom ny stasjon.
- Forandringer i vannføring i berørte elver, fremst Åbødalselva (Nordelva), Storelva og Sagelva.

Denne rapport utreder konsekvenser av etableringen med hensyn til:

- Forandret isdynamikk i indre Saudafjorden. Det er et mål ved utbyggingen å minske forekomsten av is vinterstid.
- Nye strømmer som kan føre til resuspensjon og transport av forurensede bunnsedimenter.
- Lokale strømmer ved utslagsstedet som kan føre til erosjon og underminering i et område med ballaststein som er beskyttet av kulturminneloven. Dette gjelder strømmer både i forbindelse med sprengning ved utbygging og strømmer ved normal drift.

Utredningen om strøm baseres i hovedsak på modellering med to forskjellige numeriske modeller: Visual Plumes som er en en-dimensjonal spredningsmodell for dykkede utslipp og RMA2 som er en todimensjonal sirkulasjonsmodell. I tillegg har en enkel ismodell utviklet på NIVA blitt brukt sammen med overslagsmessige varmebalanseregninger for å vise forandringer i isdynamikk. Antagelser og begrensninger i modelleringen framgår av Kapittel 2. Modelleringene er geografisk begrensede til et område fra havnebassenget og ca 2.5 km ut i fjorden.

Foreliggende undersøkelse er ikke en fullstendig konsekvensvurdering av ovenstående forandringer. Vi har f. eks. ikke vurdert effektene på primærproduksjon og økologi.



**Figur 1.** Kart over Sauda og indre del av Saudafjorden med de viktigste tilførselselvene. Rød pil viser nåværende overflateutslipp og blå pil det nye dykkete utslippet.



## 1.2 Allmenn beskrivelse av Saudafjorden

Saudafjorden strekker seg i SW-NE retning og det er ca. 14 km fra den relativt smale munningen mot Sandsfjorden til fjordbunnen ved Sauda (Figur 2). Indre delen av fjorden er i gjennomsnitt ca. 2 km bred, mens den ytre delen fra Solandsneset og til munningen er smalere, ca. 1 km. Dypet øker monotont fra 20-50 m i havnebassenget ved Sauda til ca. 380 m ved Solandsneset. Deretter blir fjorden noe grunnere og er ved munningen ca. 220 m dyp (Figur 3).

Bortsett fra lengst inne ved Sauda så er fjorden omgitt av bratte åser. Den vesentligste delen av nedbørsfeltet drenerer til den innerste delen via elvene Storelva, Åbøelva (Nordelva) og Sagfossen (Figur 1), og via kraftverket Sauda III. Ferskvanntilførselen gir opphav til en 3-5 m tykk utgående brakkvannsstrøm i overflaten og en innovergående kompensasjonsstrøm i dypereliggende vannmasser (se Kapittel 2.3 for en utførligere beskrivelse). Verken innsnevringen eller oppgrunningen mot munningen er tilstrekkelig for å ha noen betydelig virkning på vannutskiftningen i fjorden (strømningen er med god marginal underkritisk).

Vinden i Saudafjorden blåser naturlig nok oftest langs fjorden, enten inn eller ut. Solgangsbris er vanlig om sommeren. Månedlig middeltemperatur i Sauda er 16 °C i juli og -2 °C i februar. Desember har mest nedbør med 250 mm og mai minst med 80 mm.

Uregulert nedslagsfelt til fjorden er på 298 km<sup>2</sup> mens 335 km<sup>2</sup> er med i Saudareguleringen.

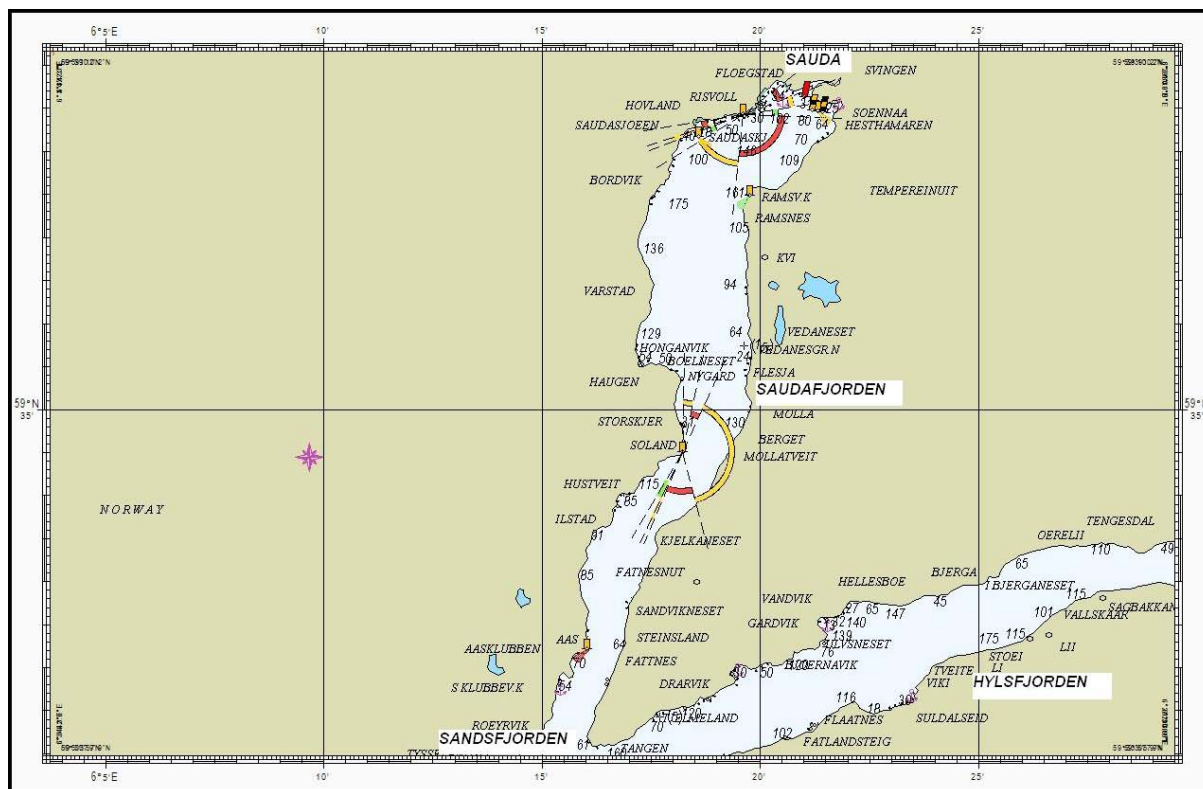
Ferskvanntilførselen til Saudafjorden er sterkt påvirket av reguleringen som begynte 1919 med kraftverket Sauda I. 1922 tilkom Sauda II og 1930 Sauda III. Deretter har ytterligere to kraftverk tilkommet – Sauda IV i 1968 og Svartkulp i 2001. Sauda III er beliggende lengst nede ved fjorden og er det største kraftverket. Vannet fra Sauda III slippes ut i overflaten lengst inn i fjorden.

Storelva er det største vassdraget innenfor utbyggingsområdet, og det er her det meste av utbyggingen har foregått, men også Åbødalelva (Nordelva) er påvirket av utbyggingen. Disse to elvene har felles utløp lengst inn i fjorden.

Bunnsedimentene i indre del av Saudafjorden er til dels svært forurenset av PAH og tungmetaller (Moy mfl. 2001, Uriansrud 2003a, b, c).



**Figur 2.** Oversiktskart over fjordene i indre Ryfylke.



Figur 3. Kart over Saudafjorden.

### 1.3 Tidligere studier

Det har ikke blitt foretatt nye målinger i foreliggende undersøkelse. Modelleringene og konklusjonene er isteden basert på eksisterende data og vurderinger.

Den største granskningen i området er "Ryfylkeundersøkelsene" i regi av universitetet i Bergen. Bakgrunnen for disse var Ulla-Førre reguleringen, med nytt utslipp fra kraftverk i Hylse som ble startet opp i 1980. Forut for dette ble det gjennomført et grundig treårig forprosjekt, 1972-1975 (Svendsen og Utne, 1979). Fokus var på Hylsfjorden-Sandsfjorden og koblingen mot fjordområdet lenger ut ved Nævøy og Boknafjorden. Saudafjorden var ikke i fokus, og ble kun dekket med sporadiske målinger. I de såkalt "Etterundersøkelsene", 1987-1989, ble fjordene oppmålt igjen, for å finne forskjeller og endringer i forhold til tilstanden før Ulla-Førre (Lie mfl. 1992). Igjen utgjorde Saudafjorden bare en perifer del av programmet.

Konsekvenser for is- og vanntemperatur i innsjøer, i elver og i Saudafjorden av Saudautbyggingen ble vurdert av NVE (Tvede og Hansen, 1992). I forbindelse med rapporten ble det målt saltholdighet og temperatur i flere stasjoner langs Saudafjorden over to år, 1991-1992. Disse målingene (se Vedlegg 2) er det hovedsaklige grunnlaget for vurderinger av sjiktning i foreliggende rapport sammen med målingene utført av universitetet i Bergen.

I sammenheng med NVE-rapporten ble også isutbredelse kartlagt av lokale observatører (se Vedlegg 3). Det ble også rapportert om utbyggingens effekter på vannføringen i de berørte vassdragen (Holmqvist, 1992).

I NVEs innstilling til konsesjonssøknaden (NVE, 2002) omtales "utredninger om lokalklimatiske forhold og virkningen på plankton/giftalger i fjorden". Vi har ikke funnet rapporten til disse utredninger. I samme innstilling omtales også isforhold i fjorden, og to forskjellige konklusjoner gis: "Dersom avløpet fra Sønnå blir tilstrekkelig dykket forventes det at Saudafjorden vil holde seg

tilnærmet isfri etter utbygging” (s. 16) og ”Det forventes ikke at isforholdene forverres” (s. 32 i innstillingens vedlegg 3). Vi har ikke funnet grunnlaget til disse konklusjoner.

Det er ellers utført en rad mindre og lokale undersøkelser i Saudafjorden rundt miljøstatus og sedimenter (Moy mfl., 2001; Uriansrud, 2003a, b, c).

I et pågående prosjekt måler NIVA strøm og vurderer potensial for spredning av forurensede sedimenter fra et mulig område for dumping av sprengningsmasser. Målingene gjøres med en profilerende strømmålere plassert på 120 m dyp i indre delen av fjorden.

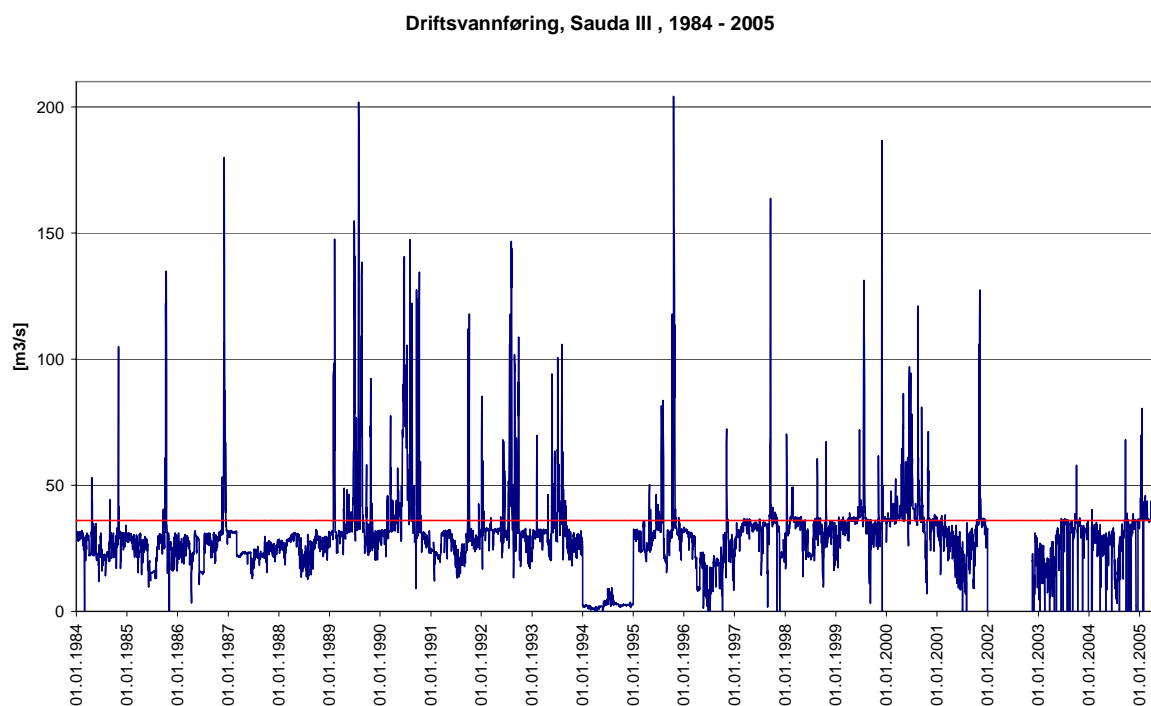
Vi kjenner ikke til strømmålinger utført i vintermånedene når det er størst risiko for isdannelse.

## 2. Data og metode

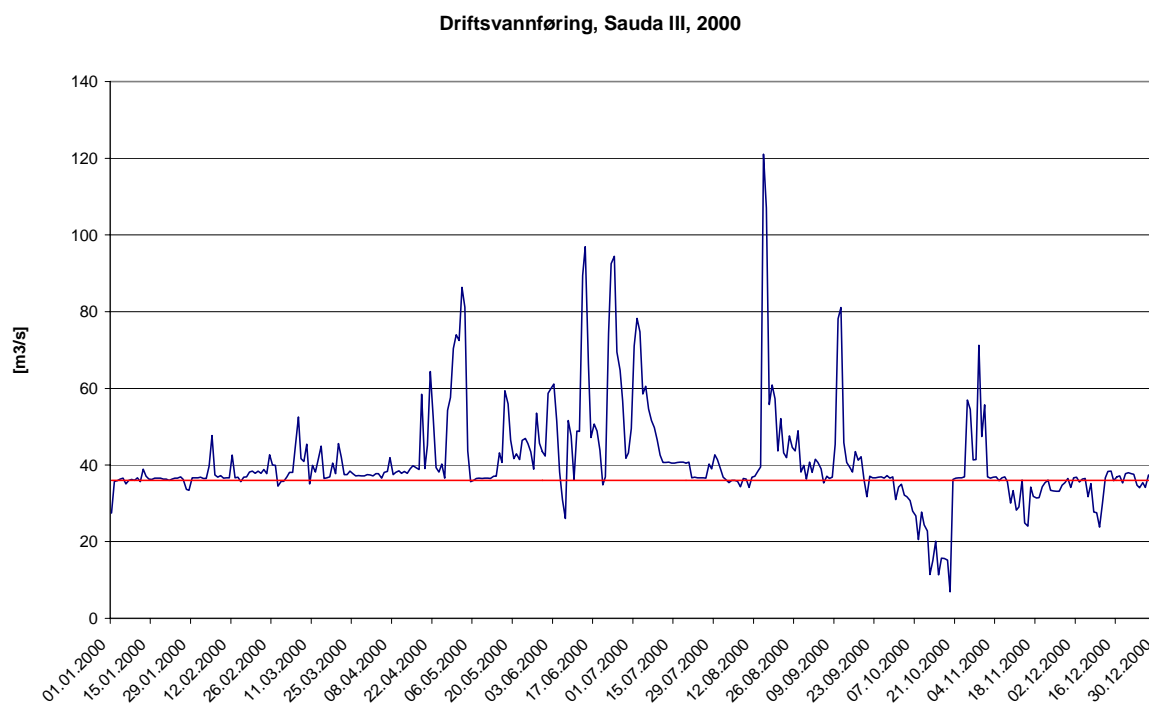
### 2.1 Avløp fra kraftstasjonen

Driftsvannføringen gjennom nåværende kraftverk Sauda III er i gjennomsnitt  $33 \text{ m}^3/\text{s}$  og maksimalt  $36 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vannet slippes til Saudafjorden som et overflateutslipp lengst inn i Sønnå havn. Når kapasiteten overskrides slippes overskuddsvannet til Storelva. I gjennomsnitt for perioden 1972-2005 var overløpet til Storelva  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figur 4). Figur 5 viser vannføringen under 2000, da nedbøren var stor. Overløpet til Storelva var da i gjennomsnitt  $6.0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Vannføringen gjennom den nye kraftstasjonen kommer til å være  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  kontinuerlig og ytterligere  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  under sammenlagt 4000 h/år ifølge forespørsel. Det betyr at en gjennomsnittlig vannføring på  $48 \text{ m}^3/\text{s}$ . Overflateutslippet fra Sauda III stenges etter utbyggingen. Utslagsstedet til den nye kraftstasjonen vil være dykket på omtrent 30 m dyp. Utslipet skjer i form av ett diffust utslipp med initial vannhastighet i størrelsesorden 1 m/s. Det er ikke avgjort hvilken vinkel utslippet vil ha. Vi gir noen synspunkter om dette i denne undersøkelsen.



**Figur 4.** Driftsvannføring og overløp for Sauda III 1984 – 2005. Den røde linjen viser maksimal vannføring gjennom kraftverket,  $36 \text{ m}^3/\text{s}$ . Overløpet går til Storelva.



**Figur 5.** Driftsvannføring og overløp for Sauda III. Detaljbilde for 2000.

## 2.2 Vannføring i elvene

Data om vannføring i elvene er av betydning for å bedømme dels den ”bakgrunnsstrøm” i fjorden som påvirker spredningen av det planlagte dykkede utslippet, dels eventuelle endringer i tilført ferskvann og varmemengde som kan gi endret isdynamikk. Det er gjort få målinger av vannføring i de store elvene i utbyggingsområdet

Nedenfor presenteres de data vi har funnet om de aktuelle elvene, sammen med planlagte minstevannføringer. Minstevannføring er den minste mengde vann som kraftverksoperatøren er pålagt å slippe til vassdraget. I flomperioder kan imidlertid vannføringen bli meget større. Det må antas at den maksimale vannføringen som kan inntreffe i elvene er samme som uten regulering. Dette motsvarer en situasjon med regn når magasinene er helt fulle og ikke har noen dempingskapasitet samtidig som turbinene av en eller annen grunn står stille.

### 2.2.1 Storelva

Storelva har over lang tid vært regulert og har en sterkt redusert vannføring. Det kan likevel forekomme høy vannføring i flomperioder. Det finnes en lang tidserie målinger av driftsvannføringen for Sauda III som inkluderer overløp til Storelva (Figur 4 og 5). I gjennomsnitt er overløpet til Storelva  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , men variasjonen er stor. Under lange perioder går alt vann gjennom turbinene. Vannføringen i Storelva er da lav. Under flomperioder kan ifølge data overløpet under korte perioder være over  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , men disse topper kan også være feilmålinger. I alle fall forekommer vannføringstopper på over  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , men kun under korte perioder.

I dag er ingen minstevannføring stipulert for Storelva. I pågående utbygging er planlagt minstevannføring (målt nedstrøms samløp med Tverrelva)  $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$  i sommermånedene (november – april) og  $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$  i vintermånedene (juni – september), med lineær overgang derimellom. Hyppigheten og størrelsen av overløpene vil bli reduserte.

## 2.2.2 Åbødalselva (Nordelva)

Åbødalselva bytter navn flere ganger og heter lengst ned mot utløpet til Saudafjorden Nordelva. Holmqvist (1992) viser en figur over middelvannføringen i Nordelva. Vannføringen er størst i mai, straks over 20 m<sup>3</sup>/s og minst i februar-mars, ca. 1 m<sup>3</sup>/s.

Vannføringen vil bli kraftig redusert etter utbygging. Beregnet restvannføring ved utløpet til fjorden er 42 %. Planlagt minstevannføring i Åbødalselva (målt ved Høllandsfossen) er 0.7 m<sup>3</sup>/s, eller så meget som mulig hvis den naturlige vannføringen er mindre enn dette.

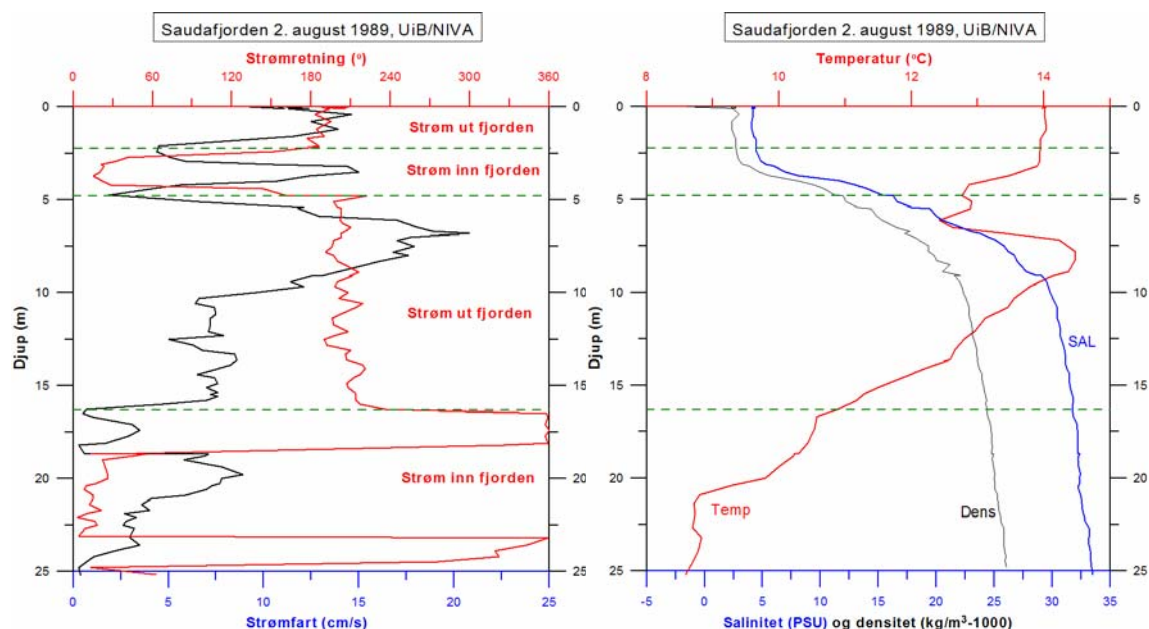
## 2.2.3 Sagelva

Sagelva får sterkt redusert vannføring etter utbygging. Beregnet restvannføring ved fjorden er 24 %. Planlagt minstevannføring i Sagelva (målt ved Sagfossen) er 0.3 m<sup>3</sup>/s i sommermånedene og 0.1 m<sup>3</sup>/s i vintermånedene.

## 2.3 Strøm

De fleste skildringene av strømforhold i Saudafjorden og lignende fjorder skisserer en tolags sirkulasjon i øvre lag, med utgående strøm i overflaten og en kompensasjonsstrøm under denne. Dypere ned er de igjen ofte en netto utgående strøm, fulgt av inngående strøm ved bunnen. Ferskvanntilførslene til fjorden er av størrelsesorden 50 – 100 m<sup>3</sup>/s, og medfører som oftest en moderat utgående strøm.

I perioder når Hylenkraftverket går for fullt (240 m<sup>3</sup>/s) og det er sterk nedbør/tilrenning, er det observert inngående overflatestrøm i Hylsfjorden (Golmen mfl., 1989). Dette kommer av at utslippet der går ned til 12 m dyp, og dermed skjer det ved slik kraftig fluks en initialblanding med sjøvann nær utløpet slik at blandingsvannet blir tyngre enn overflatevannet litt lenger ute. Ved slike tilfeller er det observert inngående overflatestrøm også i Saudafjorden, som følge av vannoppstuvning (høyere vannstand) i utløpet av Hylsfjorden og i Sandsfjorden. Dette er imidlertid neppe karakteristisk for normalsituasjonen verken i Hylsfjorden eller i Saudafjorden.



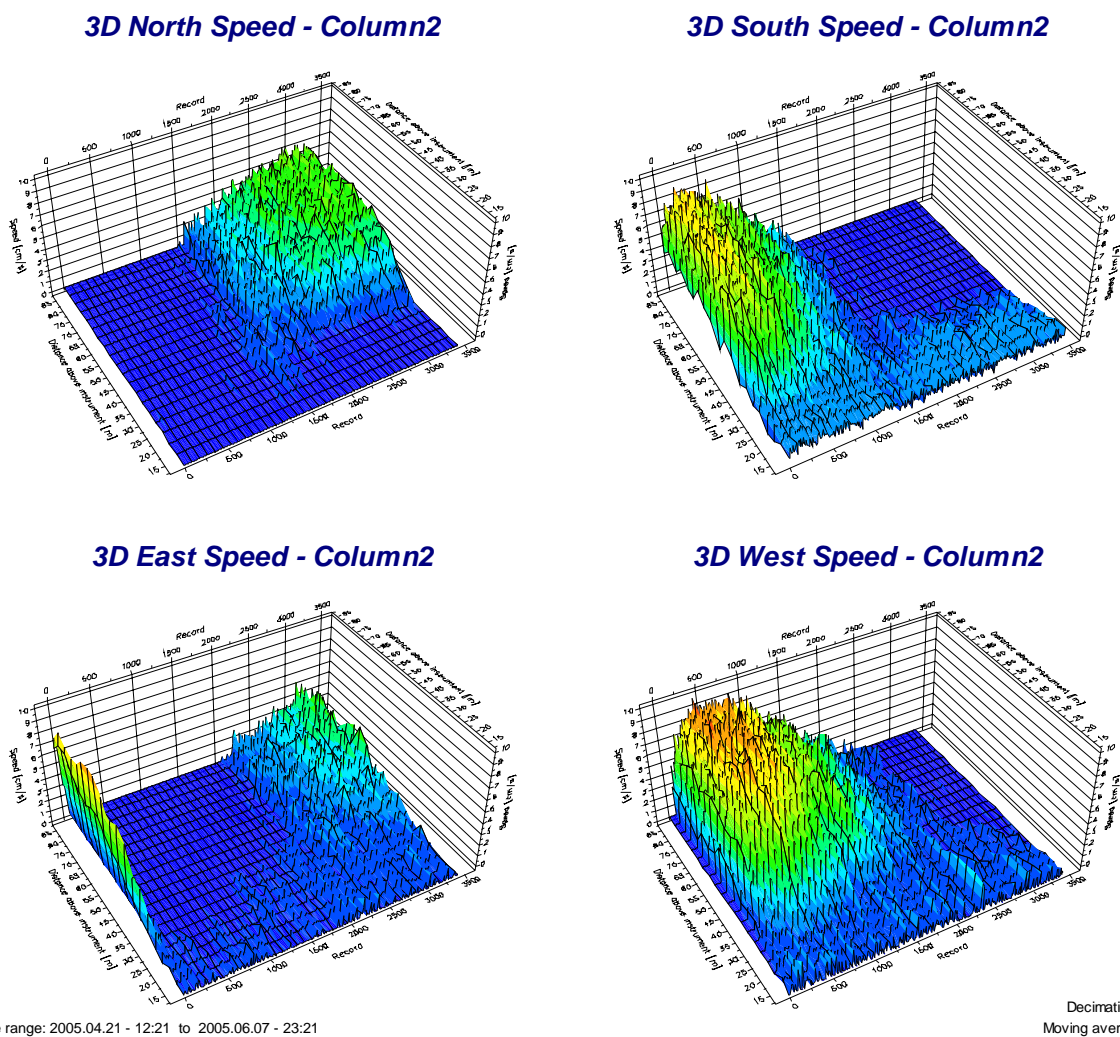
**Figur 6.** Til venstre: Målt vertikalfordeling av strøm midtveis ute i Saudafjorden 2. august 1989. Målt med Simtronix ultralyd strømmålere, firt ned med signalkabel fra båt, fortøyd i bøye (NIVA/UiB, upublisert data). Til høyre: Samtidig målt vertikalprofil av saltholdighet, temperatur og densitet.

Figur 6 viser målinger av strømmen midt i Saudafjorden 2. august 1989. Målingene er gjort fra båt med en nedsenkbar målesonde. Båten var fortøyd i en oppankret bøye. Målingene viser en

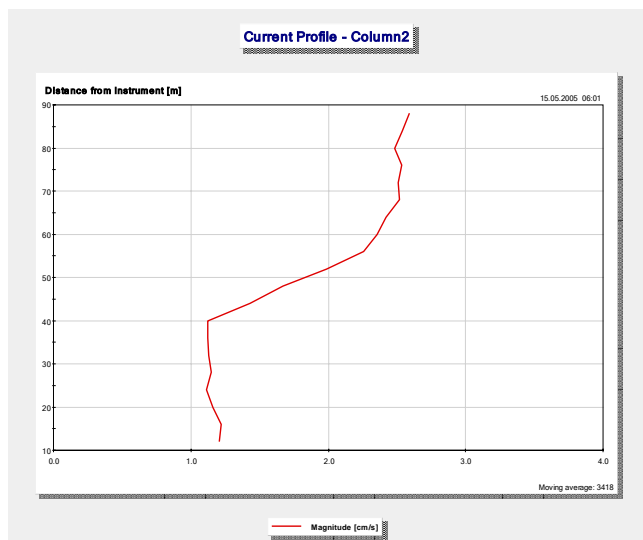


flerlagsstruktur i strømmen i de øverste 20-25 meterne. Øverst et ca. 2 m tykt lag med utgående strøm og derunder et like tykt lag med inngående strøm. Fra 5 m til 16-17 m var det igjen utgående strøm, med et maksimum (22 cm/s) i 7 m dyp. Fra 17 m og nedover var det så strøm inn fjorden. Slike detaljerte samtidige registreringer som illustrerer kompleksiteten i strømningsmønsteret var og er et sjeldent syn. Det finnes heller ikke modeller i dag som har løst opp et slikt mønster.

Som forstudie innfor dumping av sprengingsmassor i indre delen av fjorden gjennomførte NIVA strømmålinger med en akustisk strømprofilerer i perioden 21. april – 7. juni 2005 (Figur 7 og 8). Strømmålingene sier intet om strømforholdene i overflaten, men viser at strømhastighetene i området 40 – 80 m under overflaten er lave, mellom 2 og 8 cm/s og i gjennomsnitt straks under 3 cm/s. Nærmere bunn er hastighetene enda lavere. Under periodens første halvdel er strømmen stabil i sydvestlig retning (ut fjorden) og under periodens andre halvdel stabil i nordøstlig retning (inn fjorden). Strømmen ut fjorden er litt sterkere.



**Figur 7.** Strømhastighet målt over en to måneders periode fra 21. april til 7. juni 2005 med en Aanderaa RDCP600 akustisk strømmåler. Strømmåleren stod på bunnen på 120 m dyp og målte oppover ca. 80 m, dvs. til ca. 40 m under overflaten.



**Figur 8.** Middelverdi av absoluttbeløpet av strømhastigheten i Figur 7.

## 2.4 Saltholdighet og temperatur

Sjøvannet i Saudafjorden er markert lagdelt med lett brakkvann i overflaten over tyngre vann lenger ned. Figur 6 viser et eksempel på dette. De to øvre strømsjiktene lå ved måletidspunktet begge i det øvre brakkvannlaget, med nedre grenselag i pyknoklinen. Temperaturmaksimumet rundt 7 m falt sammen med maksimum i strømfart (retning ut fjorden).

Grenseflaten (sprangsjiktet, pyknoklinen) er oftest svært tydelig. Forskjellen i densitet mellom lagene er tilstrekkelig til å opprettholde stabil sjikting, med begrenset blanding av vann gjennom sprangsjiktet.

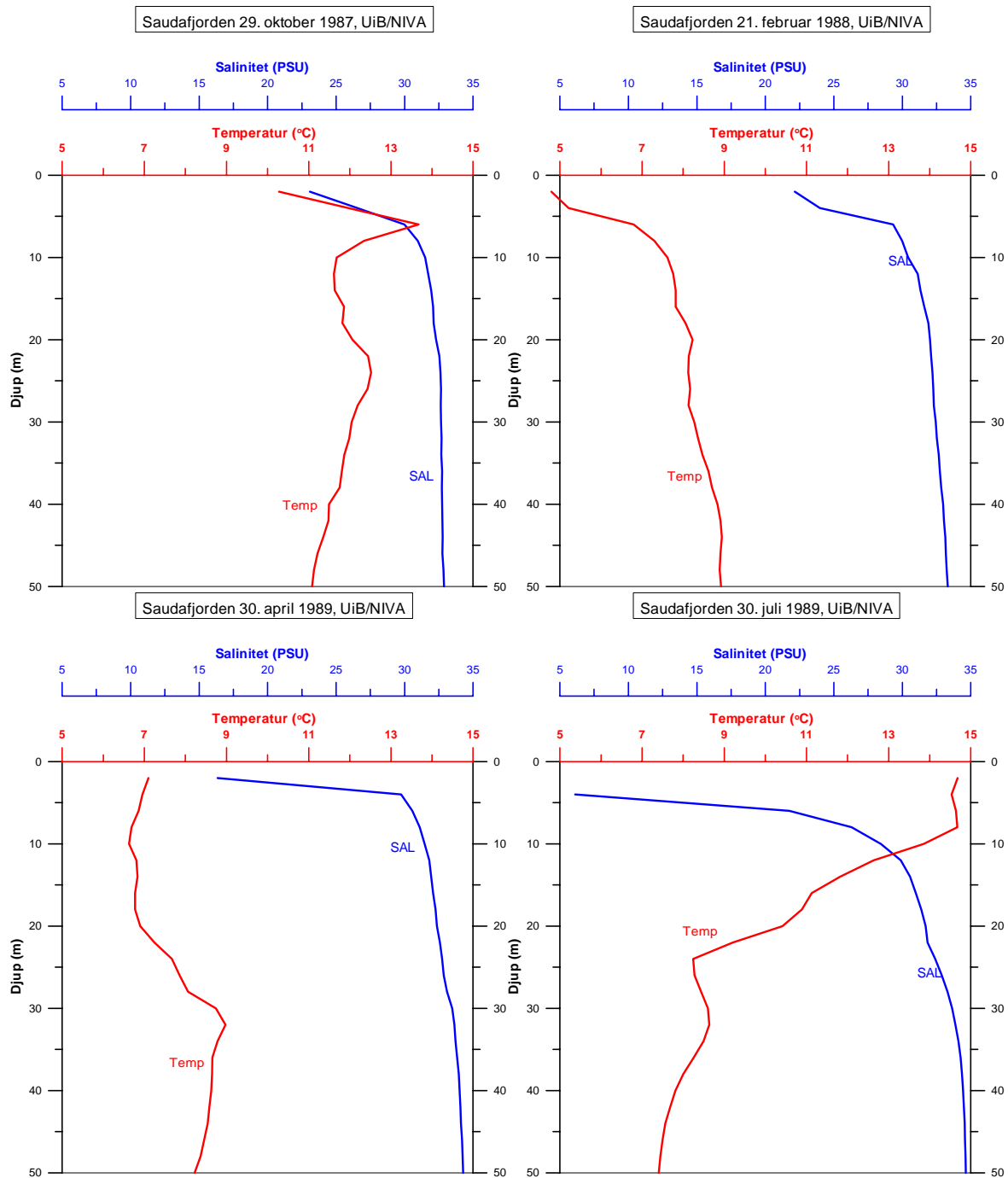
Overflatevannet i Saudafjorden er alltid mindre salt enn dypvannet, mens temperaturforskjellen er positiv om sommeren/høsten, og negativ om vinteren. Selv om avkjøling av sjøvannet om høsten medfører økt densitet, er denne langt fra stor nok til å skape ustabil vannsøyle.

Overflatesaltholdigheten varierer mellom 0 og 10 ppt, mens sjiktet rundt 15 m dyp oftest har en saltholdighet over 32 ppt. Dypere nede er vannet mer homogent, med kun svake gradienter vertikalt (Figur 10). Vann dypere enn terskeldypet (ca 220 m) vil være skjermet for normal horisontal utskifting, og således kunne ha en litt annen karakteristikk enn vannet like over.

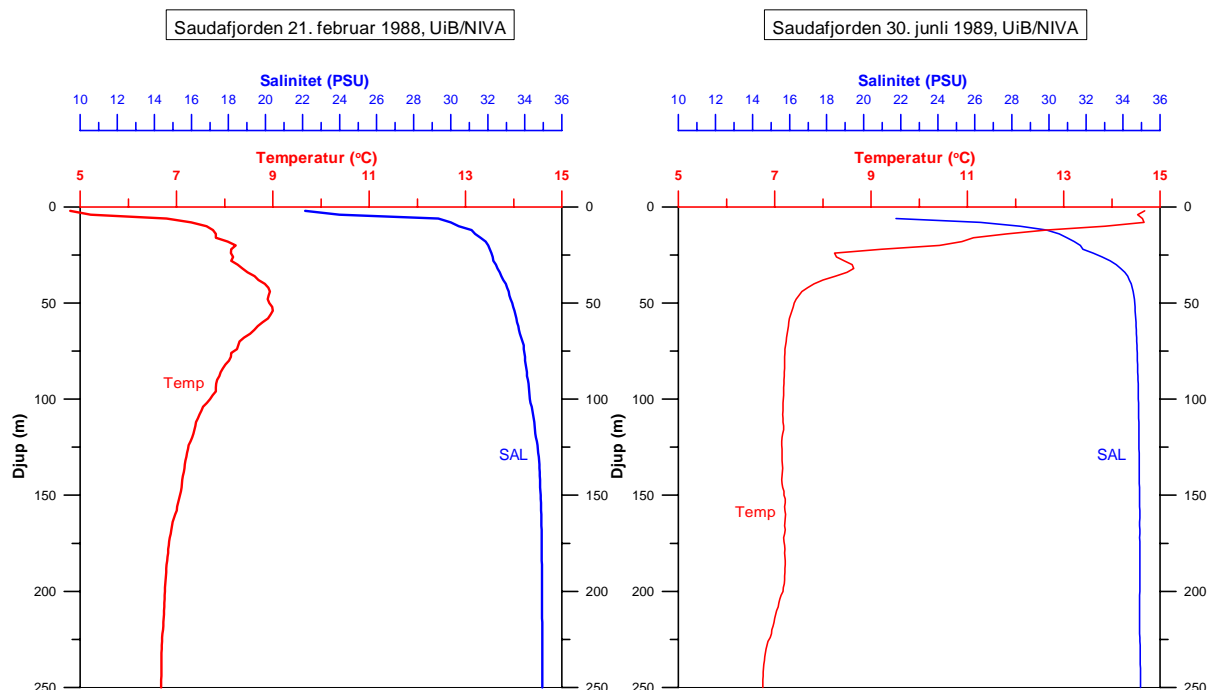
Figur 9 illustrerer hydrografiske variasjoner i de øvre 50 m i Saudafjorden over året. Perioden april-juli har mest markert sjikting med brakkvann på toppen. Sprangsjiktet ligger oftest mellom 3 og 6 meter. Et annet fenomen er "linsener" eller isolerte vannpakker i overflaten med annen T/S-karakteristikk enn omgivelsene. Disse er lite kartlagt, men modellresultatene for sirkulasjon i denne rapporten indikerer virvler som også sannsynligvis innebærer lokale T/S-anomalier.

Vedlegg 2 viser T/S-transekter langs fjorden fra NVEs målinger april 1992 til juni 1992. Originaldata for målingene har ikke blitt funnet, men transektene gir et godt bilde av årsvariasjonen i sjikting og bekrefter konklusjonen at vannsøylen er med god marginal stabil over hele året med en markert pyknoklin.





**Figur 9.** Vertikalprofiler av saltholdighet og temperatur til 50 m dyp i Saudafjorden (data frå UiB, Stasjon 58A). Noter at profilene er fra forskjellige år.



**Figur 10.** Vertikalprofiler av saltholdighet og temperatur til 250 m dyp i Saudafjorden (data frå UiB).

## 2.5 Isforhold

Før Ulla-Førre utbyggingen ble de ytre delene av Saudafjorden islagt hver vinter, mens hele fjorden ble islagt i kalde vintre. Isleggingen foregikk oftest samtidig med Hylsfjorden og Sandsfjorden. Utbyggingen av Ulla-Førre med økte ferskvannstilførsler til Hylsfjorden fra 1980 medførte redusert islegging der (Lie mfl., 1992), og så lenge kraftverket går, legger isen seg sjelden lenger inn enn midtveis inn i Hylsfjorden.

Tvede og Hansen (1992) har gjennomgått isregistreringer i Saudafjorden av lokale israpportører i perioden 1990-1992 (Vedlegg 3). De konkluderte med at:

- Isdannelse i Saudafjorden skjer hyppig.
- Isen ligger oftest 1-4 dager før den bryter opp.
- Lengste vedvarende isperiode var 23 dager.
- Isleggingen disse to årene forekom fra november til mars.
- Sum islagte perioder for hver vinter er av størrelsesorden 30 dager.
- Innerst ved elveutløpene og 1-2 km utover var det oftest isfri råk midt i fjorden.
- Isutbredningen i indre deler av fjorden er lite påvirket av Ulla-Førre utbygginga, mens denne kan ha medført mer is i fjordmunningen.

Tvede og Hansen (1992) mener også at isdannelse i Saudafjorden nesten uten unntak skjer etter en nedbørrik periode etterfulgt av klarvær og kulde. Fjorden får da et nesten ferskt overflatelag som flyter ovenpå det saltene underliggende vannet og som relativt lett kjøles ned.

Vi vurderer forandringer i isforhold i følgende steg:

1. Modellering med RMA2 for å bestemme det generelle strømningsmønsteret ("ambient current") i fjorden som inndata til Visual Plumes for et antall scenarier.
2. Oversiktlig analyse av strømmålinger og tidligere vurderinger for å vurdere dypvariasjon i "ambient current".
3. Modellering med Visual Plumes for å vurdere initialblanding, spredning og eventuelt innlagingsdyp (dersom plumen ikke når overflaten) for avløpet fra kraftstasjonen, og påfølgende påvirkning på sjiktningen.

4. Vurdering av effekter på sjiktningen av endret vannføring i elvene.
5. Modellering med NIVA sin ismodell for å vurdere forandringer i istilvekst.

Isdannelse er en kompleks prosess som styres av flere faktorer (se f. eks. Gjessing, 1968 og Golmen mfl., 2003). I Saudafjorden der sjiktningen alltid er sterk og overflatevannets saltholdighet er lav, vil isdannelsen fremmes av at den vertikalkonveksjon som oppstår når vannets densitet øker ved avkjøling er begrenset til et område nær overflaten. I vann uten sjiktning vil vertikalkonveksjonen kunne føre opp store mengder varmere bunnvann til overflaten og dermed utsette isleggingen.

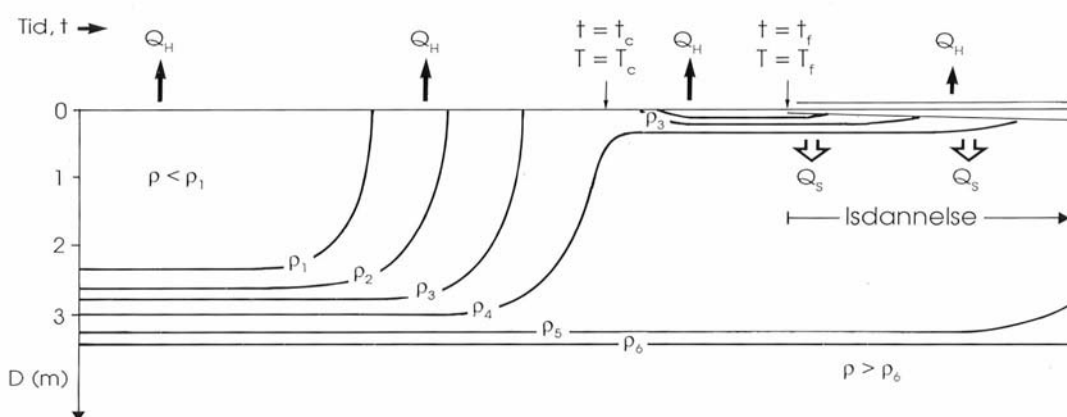
Vi har i første omgang simulert isdannelse basert på de hydrografiske profilene fra 1987-1989 (Figur 9 og 10). Kun februarmålingene er fra årstiden for is i henhold til registreringene i 1990-1992 (Vedlegg 3). Målingene fra oktober og april kan være en slags referanse for tilstanden før/etter islegging. Disse målingene har ikke data fra overflaten, men starter i 2 m dyp. Dette var en ofte benyttet prosedyre før, siden det ofte var mye støy i målingene i overflaten, og at måleopplegget primært var tilpasset tungt utstyr i åpent dyphav der det øvre blandete laget gjerne er 100 m dypt eller mer. For å få et realistisk scenario har vi lagt inn data for overflaten enten motsvarende verdiene i 2 m dyp, eller ekstrapolerte data.

Modellen blir i vårt tilfelle drevet av en varmekraft tilsvarende  $300 \text{ W/m}^2$ . Dette er et realistisk anslag for en vintersituasjon med klarvær i Vest-Norge, og fluksen tilsvarer et varmetap på ett døgn lik  $2.5 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2$ . Modellen kontrollerer hvor dypt konveksjonen kan drives som følge av et slikt varmetap over 1 døgn, og beregner hvor mye is som eventuelt må dannes for å oppnå dette.

Vi tar utgangspunkt i at eventuell mer is og lengre isleggingsperioder vil representere en negativ utvikling, selv om dette ikke er åpenbart fra alle aspekter.

Islegging blir i første rekke styrt av meteorologi. Det er gjerne i stille og kalde værperioder det er gunstige vilkår for isdannelse, forutsatt at de hydrografiske forhold i sjøen også er gunstige. Netto strålingsbalanse og direkte varmetap vil styre avkjølingen av overflatelaget. Vind og bølger vil oftest motvirke isdannelse, og bryte ned sjiktningen og eventuell eksisterende is. Disse meteorologiske faktorene blir neppe målbart endret som følge av eventuelt nytt utslipp. Indre del av fjorden er dessuten oftest helt eller delvis åpen i dag, slik at forskjellen ved enda mindre is blir liten. Vi bedømmer at forandringer i lokalklimatiske forhold pga. endring til dykket utslipp vil være ubetydelige.

Simuleringene med ismodellen blir isteden konsentrert på spørsmål om forandring i islegging og isleggingsmønster som følge av endringer i vannets egenskaper (sjiktning, overflatetemperatur og overflatestrøm).



**Figur 11.** Tidsforløpet for konveksjon i overflatelaget og dannelse av is under avkjøling.

Generelt kan man si at islegging får bedre vilkår når:

- Overflatevannets saltholdighet er lav.
- Sjiktningen er sterk, slik at vertikalkonveksjonen begrenses.
- Overflatestrømmen er svak, slik at oppholdstiden for overflatevannet er lang.

Teoretisk sett kan isleggingen øke som følge av utbyggingen, ettersom lavere vannføring i elvene vil gi lavere strømhastigheter i overflatevannet og dermed minsket blanding med underliggende vann og økt oppholdstid for overflatevannet. Dette gjelder imidlertid bare når vinden er meget svak.

## 2.6 Sedimenter og erosjon

Sedimentene i indre Saudafjorden er godt kartlagte (Uriansrud 2003a, b, c). Figur 12 viser konsentrasjonen av PAH, bly og kadmium i overflatesedimentene (0-2 cm) på forskjellige steder i indre delen av fjorden. Konsentrasjonene er høye eller meget høye på de fleste steder.

Kartet over kornstørrelsefordeling (Figur 12) viser en relativt stor andel finpartikler, også i grunne (10-20 m) områder nær land.

Figur 13 viser sammenhengen mellom vannhastighet og transport av sedimenter i forskjellige størrelsesklasser.

Ettersom fjordbunnen skråner bratt på alle sider, antas eventuell transport av sedimenter i første rekke å skje mot midten av fjorden og mot dypere områder lenger ut. Tilfeldige og lokale akkumulasjonsområder avhengig av strømningsmønster kan likevel forekomme.

Økt risiko for erosjon og transport av forurensede sedimenter foreligger hvis det dykkete utslippet leder til større strømhastigheter nær bunn og/eller svakere sjiktning. Andelen lett eroderbare finpartikler er også høy i de fleste deler.

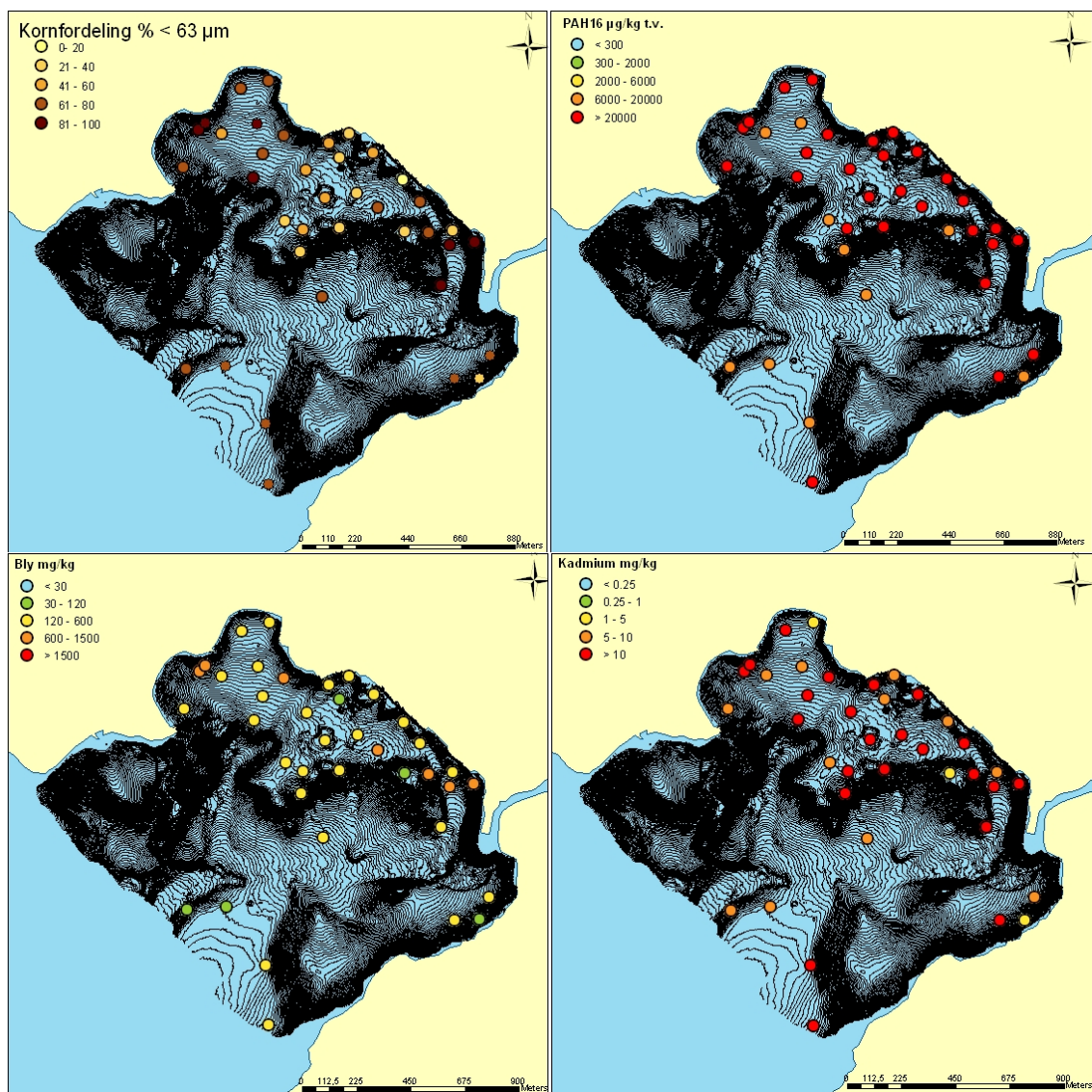
Vi vil bruke RMA2 for å vurdere strømbildet i overflatevannet til følge av elveutløpene. Dette gjøres for å gi et oversiktlig bilde av dagens situasjon og vise strømhastighetenes størrelsesordener. Foruten elveutløpet bidrar også tidevann og vind til strømbildet. RMA2 klarer ikke å ta hensyn til disse prosesser på en god måte, så overslagsmessige beregninger gjøres for å vurdere disses bidrag.

Visual Plumes vil bli brukt for å vurdere plumdynamikken og risikoen for at plumen gir erosjon i et eller annet område. Plumen fra det dykkete utslippet har innledningsvis en relativt høy hastighet og vil kunne gi opphav til sterk erosjon dersom den beveger seg langs bunn. Etter innlagring, eller når plumen når overflaten dersom sjiktningen er svak vil plumen også bidra til å forsterke strømmen på det aktuelle nivået.

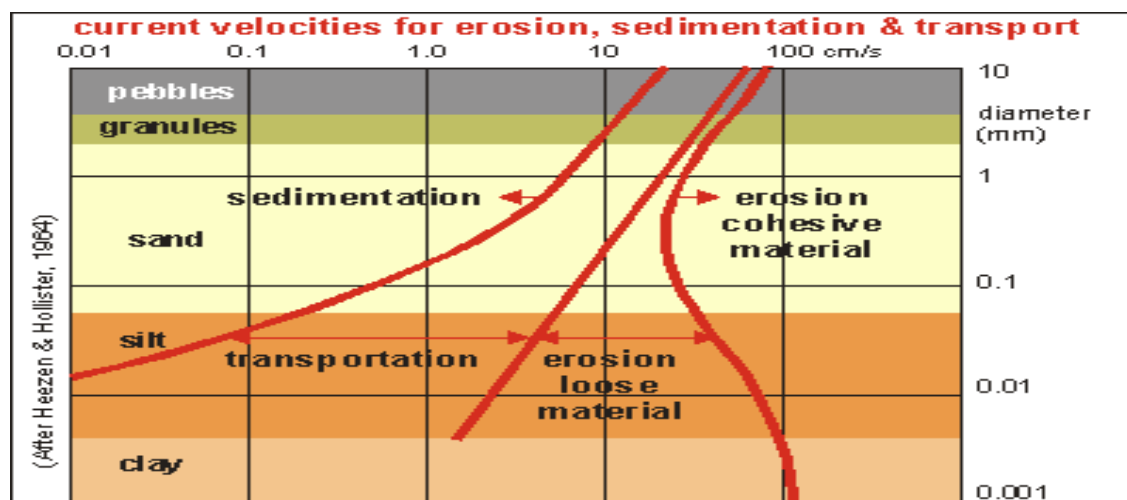
Erosjon lokalt ved utløpet kan skje dels i sammenheng med sprengning i konstruksjonsfasen, dels i driftfasen dersom utslippet har en retning mot eroderbare områder, eller dersom virvler oppstår ved utstrømningen som kan gi opphav til bakoverskridende erosjon.

Vurdering av eroderende krefter ved sprengning krever god kjennskap om framgangsmåten ved sprengning. Dette har vi ikke for øyeblikket. Vi vil likevel gi noen kommentarer om forutsetningene for erosjon ved sprengning.

Vurdering av eroderende krefter ved normal drift gjøres med utgangspunkt i simuleringene med Visual Plumes.



**Figur 12.** Resultater fra prøvtagninger i overflatesedimentene (0-2 cm) i indre Saudafjord. Fra Uriansrud (2003a). Klassifisert i henhold til Molvær mfl. (1997).



**Figur 13.** Sammenheng mellom erosjon av sedimenter (vist som kornstørrelse) og strømhastighet.

## 3. Resultater

### 3.1 Generell sirkulasjon

Resultatene for modelleringene med den todimensjonale strømmodeellen RMA2 vises i Figur 14-16.

Modelleringene med virkelig bunntopografi gir sterke virvler i det bratteste området i midten av fjorden (Figur 14). Disse er antagelig delvis effekter av at modellantagelsen om svake skråninger er gjort brudd på. Det er likevel mulig at slike virvler kan oppstå når elveutløpet interagerer med topografien. I Saudafjorden er imidlertid sjiktningen (som modellen ikke tar hensyn til) sterk, slik at overflatevannet som elveutløpet skjer til, er skjermet fra topografien. Modelleringen med virkelig topografi har derfor liten relevans for forholdene i Saudafjorden, men er medtatt som illustrasjon i forhold til de andre modelleringene med RMA2.

Figur 15 og 16 viser modelleringer for kun overflatelaget, som er antatt å være 2 m tykt. Et tykkere eller tynnere overflatelag vil ikke endre strømbildet, bare skalere om hastighetene (bruk av et 1 m tykt overflatelag i modellen vil resultere i dobbelt så store hastigheter).

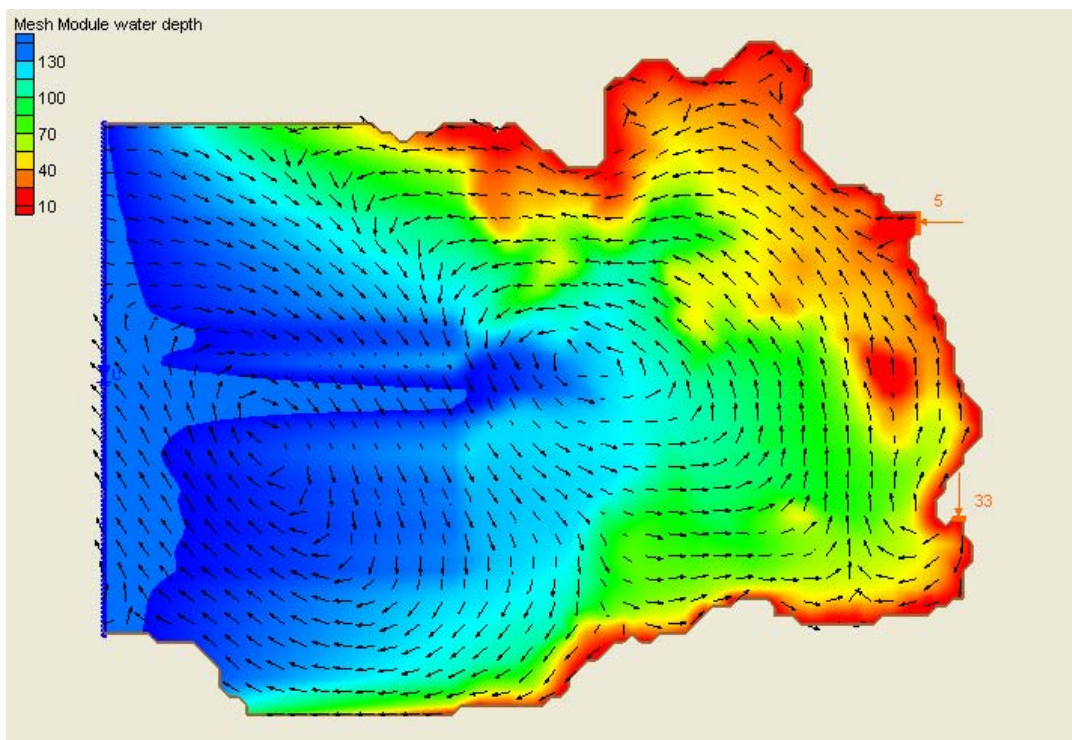
Figur 15 viser dagens situasjon med den strøm som utslippet fra Sauda III gir opphav til. Strømmen følger land frem til odden bortenfor Sagelva og fortsetter så ut mot midten av fjorden. Strømmen er forholdsvis sterk innledningsvis, 20-30 cm/s, men avtar ned mot 5 cm/s ute i fjorden. I området mellom utløpet fra Sauda III og utløpet fra Storelva og Nordelva oppstår virvler og "bakvann". Ifølge sedimentundersøkelsene (Figur 12) avsettes en stor andel finpartikler i dette området. Hvis utløpet fra Nordelva og Storelva øker, vil dette ha den effekten at strømmen fra Sauda III ikke kan vri seg inn mot midten av fjorden, men må følge land et lengre stykke ut fjorden. Størst risiko for erosjon i dagens situasjon vil være langs den strand som utslippet fra Sauda III følger.

Figur 16 viser situasjonen etter stenging av avløpet fra Sauda III. Vi har ikke tatt hensyn til det nye dykkete utslippet, men som beregningene nedenfor viser (Kapittel 3.2) så innlagres det dykkete utslippet under overflatelaget og har begrenset betydning for strømmingen i overflatelaget. Sagelva er ikke heller tatt med i simuleringen, men bidraget derifra til sirkulasjonen i fjorden er liten og kommer til å bli mindre etter utbygging. Modellsimuleringen viser at utløpet fra Storelva og Nordelva sprer seg jevnt over indre deler av fjorden. Virvler og bakvann oppstår ved Sønnå havn, slik at en kan forvente en viss sedimentasjon av suspenderte partikler i dette området, der tidligere utløpet fra Sauda III har holdt partikler i suspensjon. Vi har regnet med en forholdsvis lav vannføring i Storelva og Nordelva på ca. 5 m<sup>3</sup>/s til sammen. Vannføringen kan bli minst tidobbelte denne verdien i flomperioder, men dette påvirker ikke strømbildet i noen større grad, bare hastighetene.

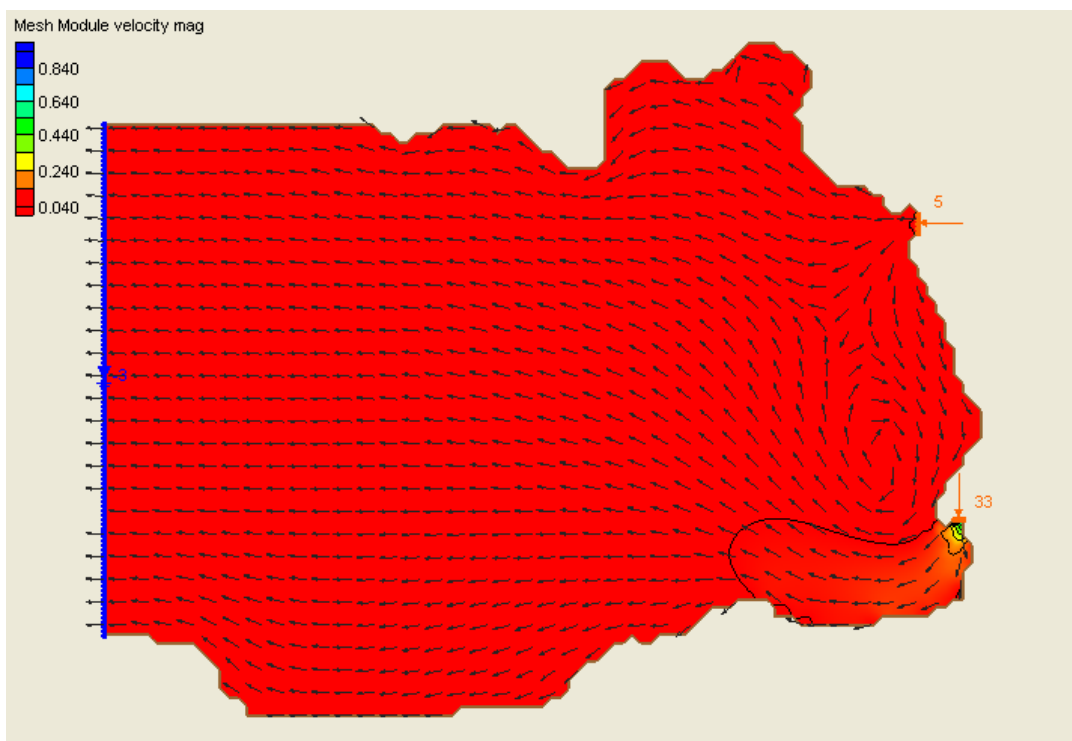
Vinden vil ha størst betydning for å modifisere det skisserte strømbildet. Dersom vinden er rettet inn fjorden så vil to forskjellige strømsystemer møtes, henholdvis det vindrevne ute fra fjorden og det fra elveutløpet. Det vil da oppstå virvler slik at innflytelsen av elveutløpet begrenses til et mindre område. Det vil også oppstå en vertikal sirkulasjon, slik at den innovergående vindrevne overflatestrømmen gir opphav til en kompensasjonsstrøm i underliggende vann. Dersom vinden er rettet ut fjorden vil de to strømsystemer samvirke, slik at hastighetene i overflatelaget ut fjorden blir større. Strømmen fra elveutløpet vil også spre seg mindre lateralt, og i høyere grad være konsentrert til midten av fjorden.

Vinden vil også gi en økt vertikal blanding, slik at overflatelaget blir tykkere.

Tidevannstrømmene er svært svake i indre del av Saudafjorden, men kan bidra til den vertikale blandingen.

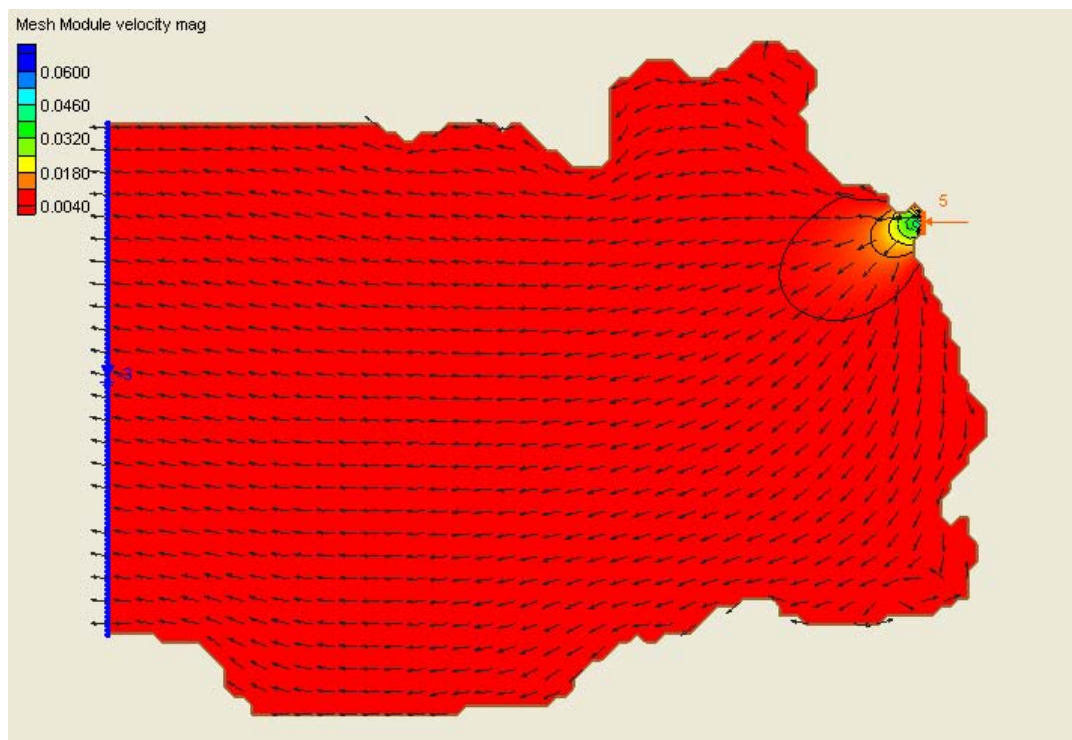


**Figur 14.** Resultat fra RMA2-modelleringene med virkelig bunntopografi. Modellen drives av ferskvanntilførsel  $33 \text{ m}^3/\text{s}$  fra Sauda III og  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  fra Nordelva/Storelva. De sterke virvlene er delvis spuriøse effekter av hardt presset modellantagelser (altfor bratte skråninger). Maksimal hastighet er ca.  $20 \text{ cm/s}$  (utenfor utløpet for Sauda III).



**Figur 15.** Resultat fra RMA2-modelleringene med flat bunn (konstant dyp 2 m). Modellen drives av ferskvanntilførsel  $33 \text{ m}^3/\text{s}$  fra Sauda III og  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  fra Nordelva/Storelva.





**Figur 16.** Samme som Figur 15, men med tilførselen fra Sauda III avstengt. Notere at fargeskalaen er forskjellig.

### 3.2 Plumdynamikk

Tabell 1 og 2 viser de forskjellige modelleringsscenariene som ble kjørt med Visual Plumes og gir et sammendrag av resultatene for disse. Vi har gjennomført simuleringer for to forskjellige utslagsvinkler,  $0^\circ$  (horisontalt utslipp) og  $30^\circ$  (svagt oppover), og for to forskjellige vannføringer,  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  og  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vi har antatt en og samme tverrsnittsareal for utslippsrøret, slik at hastigheten øker med økt vannføring. I virkeligheten vil antagelig utslagsstedet utformes med flere utslippsrør, men vi har ikke hatt nærmere informasjon om dette og har dessuten funnet at resultatene ikke er følsomme for dette. Effekten av å bruke et større antall hull (diffusor) vil være en større blanding med omgivende vann og dermed en dypere innlagring, men effekten er som sagt liten. Hastigheten ved utslagsstedet ble med vårt oppsett  $1.5 \text{ m/s}$  med den laveste vannføringen og  $3.5 \text{ m/s}$  med den høyeste. Resultatene er ikke heller spesielt følsomme for utslippsvinkelen. Innlagringsdypet (se nedenfor) påvirkes lite. Ikke heller med helt vertikalt utslipp fås noen betydelig forskjell i innlagringsdyp.

**Tabell 1.** Karakteristiske data for plum og omkringliggende vann ved innlagring for tre forskjellige modelleringsfall. Vinterforhold. (cf. Figur 17-19).

Vannføring [m <sup>3</sup> /s]	Vinkel [deg]	Innlagrings- dyp [m]	Temperatur Plum [°C]	Temperatur Omgivelse [°C]	Saltholdighet Plum [ppt]	Saltholdighet Omgivelse [ppt]
70	30	3.7	7.8	6.2	26.1	18.2
30	30	4.2	8.0	7.1	26.7	21.0
70	0	4.7	8.2	8.7	28.1	26.2



**Tabell 2.** Samme som Tabell 1, men sommerforhold. (cf. Figur 20-22).

Vannføring	Vinkel	Innlagrings- dyp	Temperatur Plum	Temperatur Omgivelse	Saltholdighet Plum	Saltholdighet Omgivelse
[m <sup>3</sup> /s]	[deg]	[m]	[°C]	[°C]	[ppt]	[ppt]
70	30	4.5	8.1	12.0	22.8	19.4
30	30	5.0	8.3	12.0	23.1	21.4
70	0	5.8	8.1	12.0	24.8	24.8

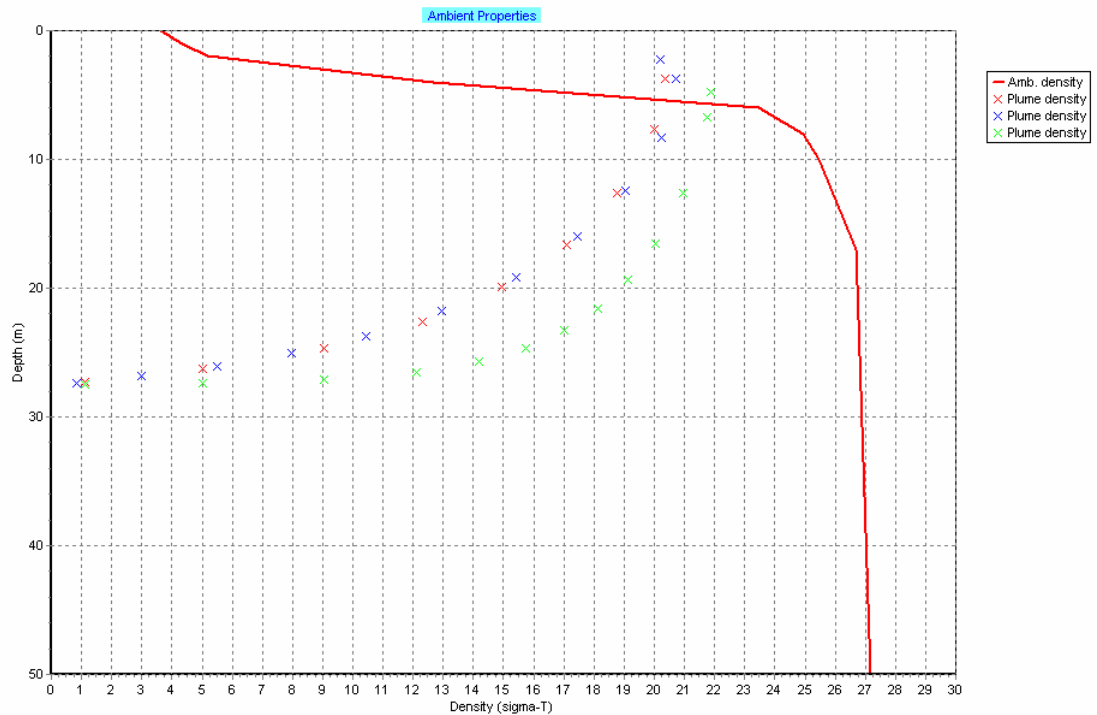
Resultatene fra simuleringene vises også i Figur 17-19 for vinterforhold og i Figur 20-22 for sommerforhold. Simuleringene for vinterforhold vil ha betydning for konklusjoner om islegging. Begge simuleringene vil ha betydning for konklusjoner om erosjon.

Vinterforhold representeres av temperatur og saltholdighetsprofilene fra 20. januar 1992 i Vedlegg 2. Sommerforhold representeres av profilene fra 25. juli 1991. Disse bedømmes å være representative. I begge tilfeller er moderate strømmer, 5-10 cm/s, antatt (med støtte i de todimensjonale modelleringene og i strømmålingene på større dyp), utovergående i overflatelaget og innovergående under pyknoklinen.

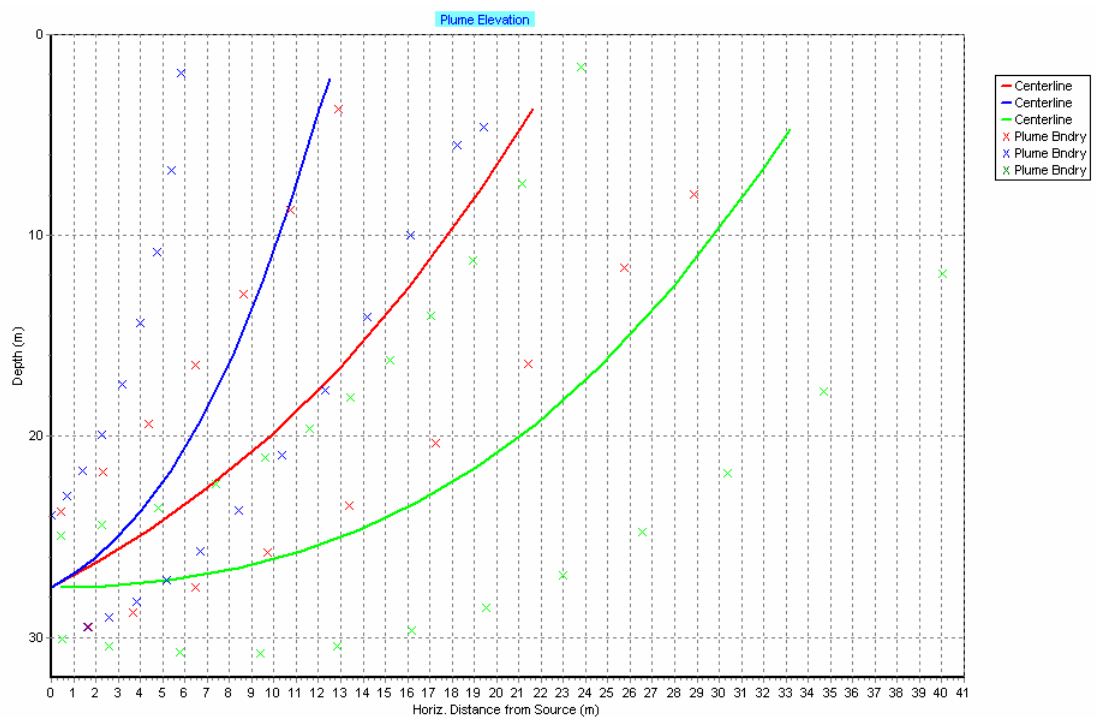
Figur 17 og 20 viser hvor densiteten i plumen øker grunnet innblanding av salt sjøvann når plumen stiger gjennom vannsøylen. Ettersom omgivende vanns densitet samtidig minsker mot overflaten i sjiktete vann, så vil plumen nå et nivå der den har samme densitet som omgivende vann. Plumen vil da innlagres på dette dyp. I svak sjiktning vil plumen kunne nå opp til overflaten, men samtlige modelleringer for typiske forhold i Saudafjorden viser på en innlagring mellom 3 og 6 m dyp. Det betyr ikke at plumen aldri vil merkes på overflaten. Ved høy vannføring i plumen vil den kunne danne en strøm på innlagringsdypet som blir merkbar også på overflaten pga. medrivningseffekter.

I begge figurene 17 og 20 skiller seg kurven med grønne kryss (70 m<sup>3</sup>/s, horisontalt utslipp) fra de andre kurvene i at densiteten øker hurtigere når plumen stiger gjennom vannsøylen. Dette kommer av at plumen går en lengre vei gjennom vannsøylen (cf. Figur 18 og 21) og blandingen med omgivende vann blir dermed større. Forskjellen er imidlertid liten og den har liten betydning for innlagringsdypet.

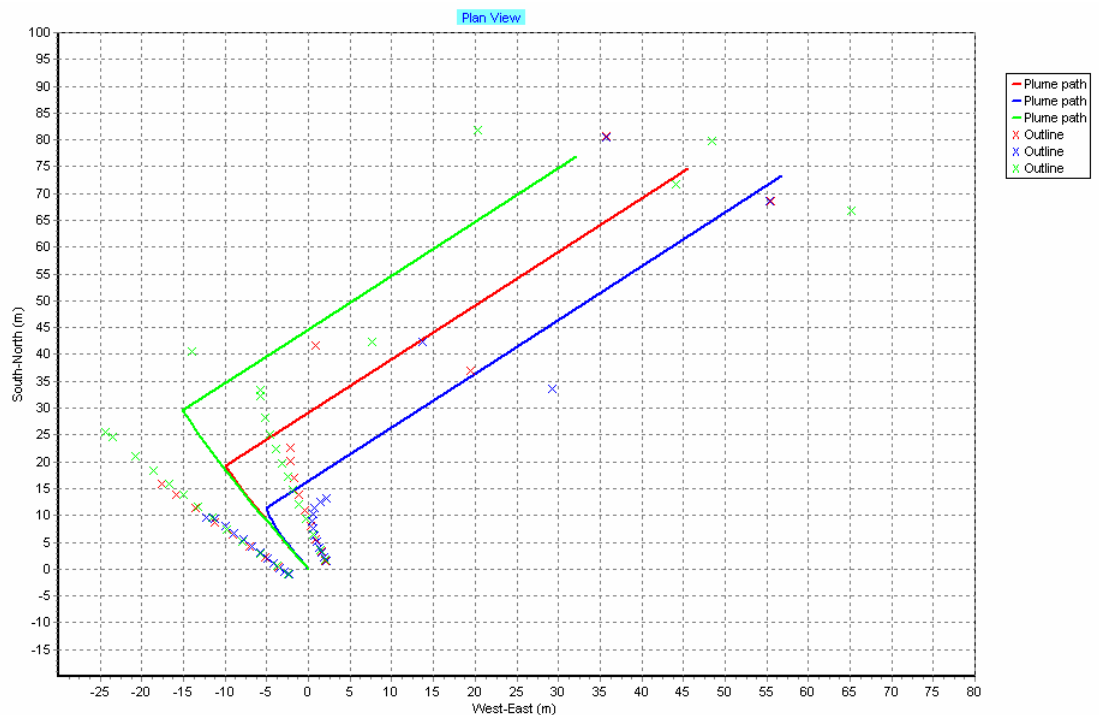
Figur 19 og 22 viser plumens vei i planet. Igjen er den største forskjellen at horisontal utslippsvinkel og høy vannføring begge gjør at plumen når lengre ut i fjorden før innlagring. Forskjellen er imidlertid kun noen titalls meter. Etter innlagring viker plumen tvert og følger med strømmen, i dette tilfelle innover mot havnen.



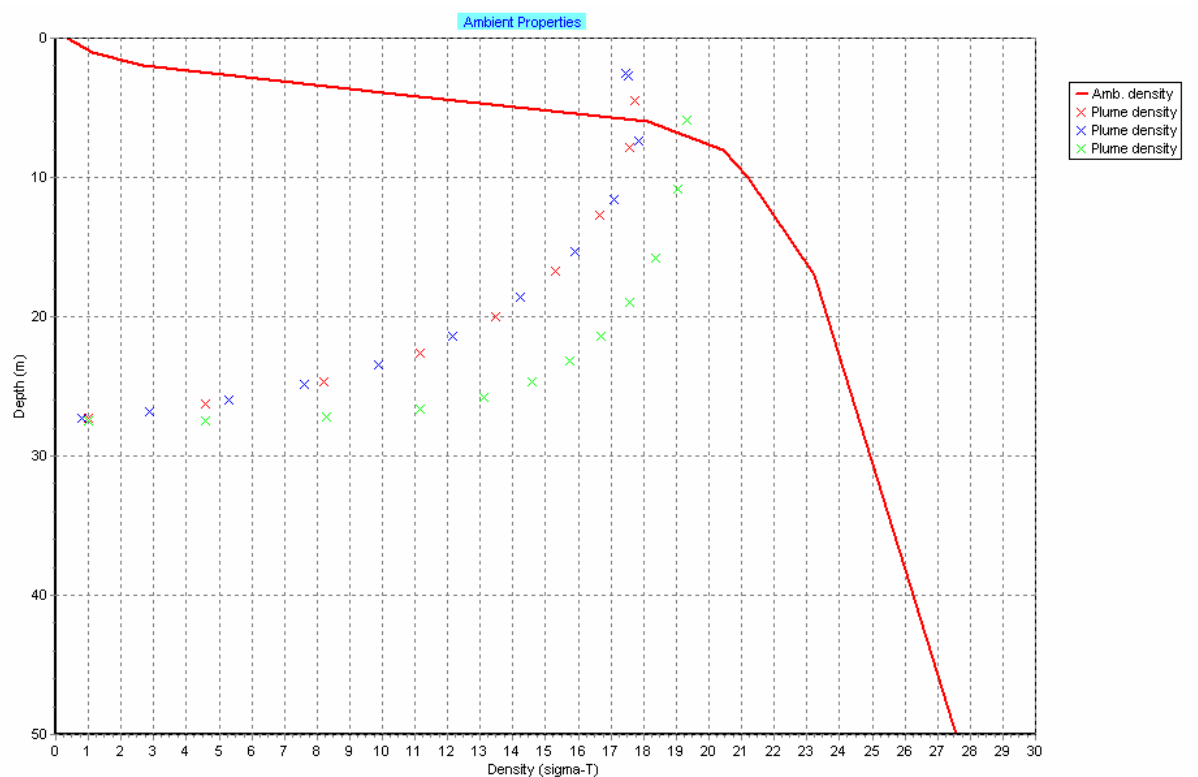
**Figur 17.** Resultat fra modelleringene med Visual Plumes. Kryssene viser hvor densiteten i plumen øker grunnet innblanding av sjøvann når plumen stiger fra utslippspunktet på 27.5 m dyp. Ved omtrent 5 m dyp har plumen samme densitet som sjøvannet og innlagring skjer. Røde kryss gjelder for 70 m<sup>3</sup>/s avløp og 30° utslippsvinkel mot horisontalplanet. Blå kryss gjelder for 30 m<sup>3</sup>/s og også 30° utslippsvinkel mot horisontalplanet. Grønne kryss gjelder for 70 m<sup>3</sup>/s og utslipp i horisontalplanet (0° vinkel). Den røde linjen viser sjøvannets densitet og motsvarer vinterforhold i Saudafjorden.



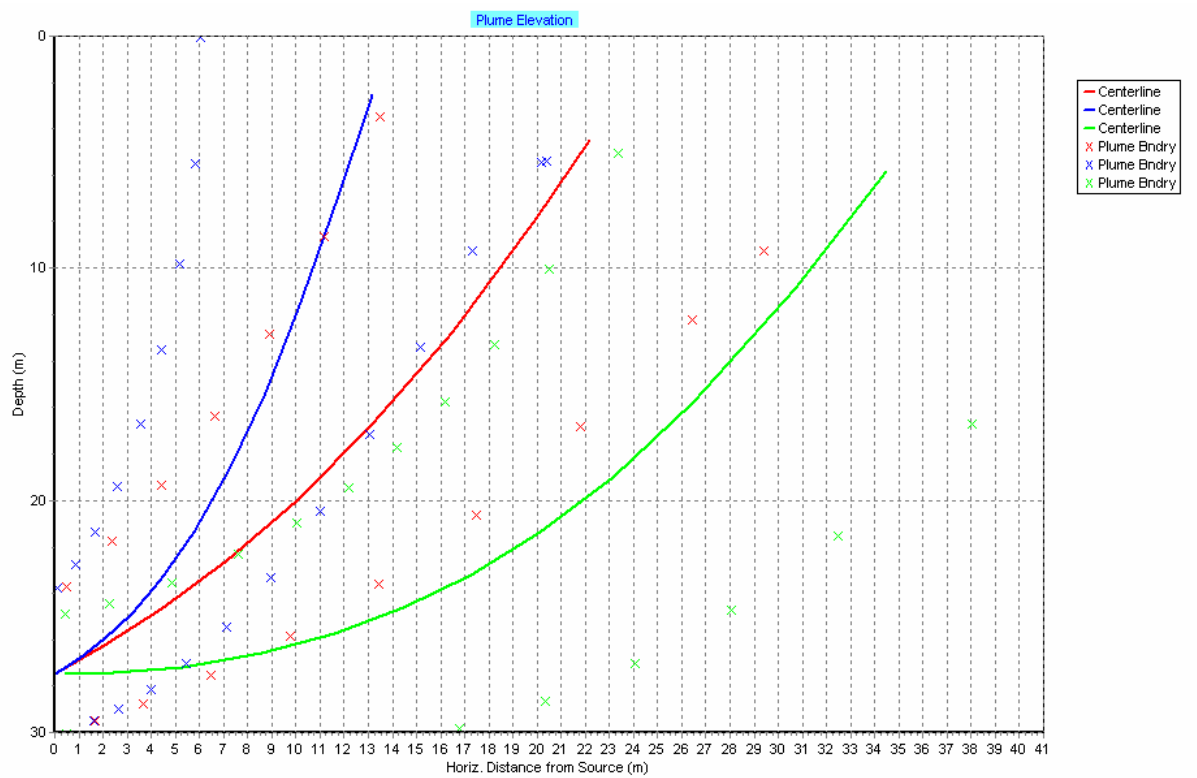
**Figur 18.** Samme modellering som i Figur 17. Linjene viser plumens vei til innlagringsdypet. Kryssene viser plumens grenser. Fargekodene er samme som i Figur 17.



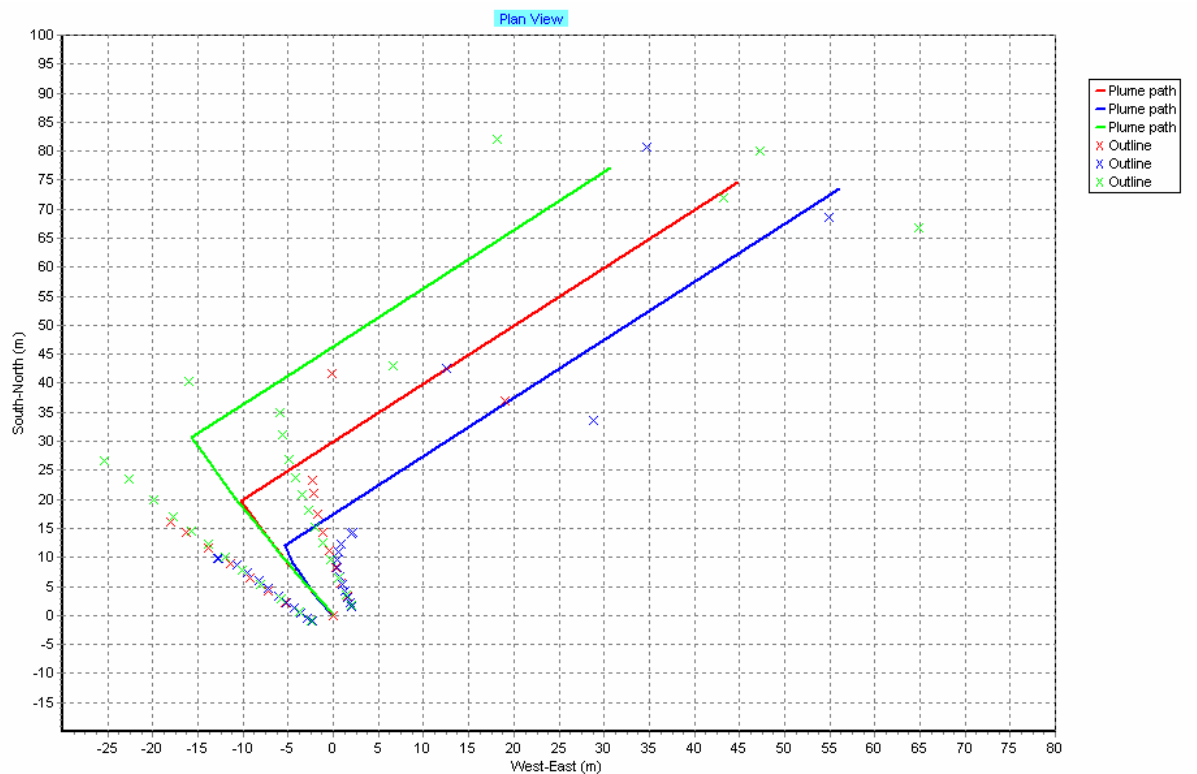
**Figur 19.** Samme modellering som i Figur 17 og 18. Linjene viser plumens vei i horisontalplanet. Kryssene viser plumens grenser. Etter innlagring svinger plumen tvert og følger med strømmen. Det er her antatt en innovergående strøm på innlagringsdypet, straks under pyknoklinen. Fargekodene er samme som tidligere.



**Figur 20.** Samme som Figur 17, men sjøvannets densitet (rød linje) tilsvare her sommerforhold. Fargekodene er samme som tidligere.



**Figur 21.** Samme som Figur 18, men for sommerforhold. Fargekodene er samme som tidligere.



**Figur 22.** Samme som Figur 19, men for sommerforhold. Fargekodene er samme som tidligere.

### 3.3 Isforhold

Vi har ikke tilstrekkelig isstatistikk for nåværende situasjon til å kunne kvantifisere eventuelle endringer, men vi kan indikere i hvilken retning endringene kan gå.

I samtlige modelleringer har vi antatt en varmekraft tilsvarende  $300 \text{ W/m}^2$  over et døgn. Ismodellen kontrollerer hvor dypt konveksjonen kan drives som følge av et slikt varmetap ( $2.5 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2$ ), og beregner hvor mye is som eventuelt må dannes for å oppnå dette.

Simuleringsresultater for data fra 21. februar 1988 med oppgitt pådriv er vist i Tabell 3, for overflatedata motsvarende verdiene i 2 m dyp. Overflatetemperaturen var  $3.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , mens frysepunktet lå på  $-1.42 \text{ }^\circ\text{C}$ . Det framgår at det aktuelle varmetapet ikke medførte isdannelse i dette tilfellet. Situasjonen er altså lite følsom i forhold til isdannelse og det trengs ikke å bli dannet is i det hele tatt for å få vannsøylen til å kvitte seg med den aktuelle varmemengden.

Vi har også kjørt ismodellen for samme profil fra 21. februar 1988, men med mer realistisk innsetting av overflatedata, dvs. ekstrapolerte verdier. Resultatene av dette er vist i Tabell 4. Det er bedre respons på avkjølingen, og med det angitte varmetapet, blir istykkelsen i dette tilfellet 5.7 cm. Ismodellen er med andre ord sterkt følsom for stratifisering i øvre lag. Videre ser vi at det er en kraftig barriere for konveksjon rundt 5 m dyp, d.v.s. her må det tilføres svært mye salt fra isfrysingen for å øke densiteten tilstrekkelig for at konveksjonen skal kunne fortsette.

Ismodellen er som nevnt mest følsom for sjiktningen i øvre laget, naturlig nok. Beregningene med Visual Plumes for det dykkete utslippet indikerte at dette innlagret seg rundt eller dypere enn 5 m dyp, dvs. under sprangsjiktet. Spørsmålet er da om det varmetapet som vi har lagt til grunn for beregningene er stort nok til å kunne berøre sjikt såpass dypt.

For å få en test på dette, har vi kjørt ismodellen for to situasjoner, uten og med neddykket utslipp. Utslippets effekt er å øke temperaturen og saltholdigheten på innlagingsdypet under overflatelaget (Figur 23). Datagrnnlaget er detsamme som for Visual Plumes-simuleringene, profilene fra 20. januar 1992, hentet fra konturplottene fra NVE (Vedlegg 2).

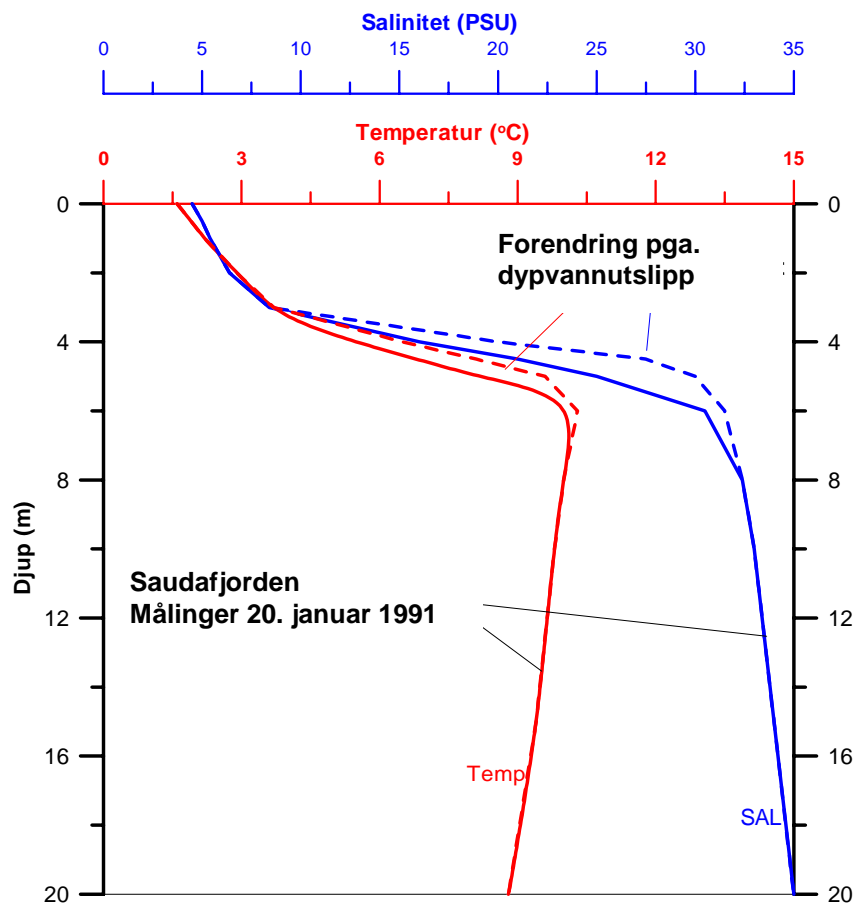
For å ta hensyn til at neddykket utslipp også medfører mindre ferskvannstilførsler til overflatelaget, har vi økt saltholdigheten for de øverste tre meterne med 1 ppt. Faktisk endring i saltholdighet kan kanskje bli større, men dette er i alle fall et utgangspunkt.

Resultatet for dagens situasjon vises i Tabell 5, og resultatet for framtidig situasjon med dykket utslipp i Tabell 6.

Det viser seg at istykkelsen blir den samme, dvs. 8.3 cm i begge tilfellene. Endring i sjiktning som følge av dykket utslipp kan ut fra dette se ut til å ha liten betydning for isdannelsen. Vi må ta forbehold om at modellen ikke gjenspeiler alle naturlige isdannelsesmekanismer og at vi ikke har kjørt på alle vinterprofilene, men vi bedømmer at dette resultatet er rimelig.

Det kan likevel være mulighet for økt islegging til følge av forandringene hvis minskingen i utslipp til overflaten gir en situasjon der ferskvannet fra elveutløpene og nedbør skaper et tynt sjikt som flyter ovenpå det saltere fjordvannet uten å blandes med dette. Strømhastighetene i et sånt lag vil være små dersom elveutløpet er enda drivkraften (cf. Figur 16) og oppholdstiden vil dermed være lang, slik at det blir god tid for nedkjøling av dette lag. Slike tilfeller vil forekomme, men med kun litt vind vil blanding oppstå.

Tvede og Hansen (1992) mener at islegging vil hindres av at det tynne overflatelaget flyter ovenpå et forholdsvis varmt og salt lag forårsaket av det dykkete utslippet. Vi mener at beregningene med Visual Plumes viser at utslippet ved vanlige vinterforhold i Saudafjorden vil innlagres under eller i pyknoklinen, slik at det ikke kommer i kontakt med det tynne overflatelaget.



Figur 23. Salt- og temperaturprofiler for ismodelleringen.

Tabell 3. Resultater for ismodellkjøring for data fra 21. februar 1988.

INITIALVERDIER FOR DET ØVERSTE LAGET FØR AVKJØLING:								
S: 15.508 (E-3), T: 3.216 (Deg-C) FRYSEPUNKT: -.84 (Deg-C), SIGMA: 12.350								
VERDIER FOR OVRE LAG SOM ETTER AVKJØLING/ISFRYSING GIR GJENNOBLANDING TIL NESTE LAG:								
DKONV (m)	T-MID (Deg-C)	S-MID (E-3)	DELTA-S (E-3)	QH (J/m <sup>2</sup> )	QF (J/m <sup>2</sup> )	DELTAICE (m)	HICETOT (m)	QTOT (J/m <sup>2</sup> )
1.	3.013	15.508	.000	.81E+06	.00E+00	.000	.000	.81E+06
2.	-.839	20.258	4.750	.34E+08	.16E+09	.623	.623	.20E+09
4.	-1.104	23.379	3.000	.87E+08	.33E+09	.653	1.276	.42E+09
6.	-1.275	27.645	4.150	.14E+09	.62E+09	1.100	2.375	.76E+09
8.	-1.516	28.875	1.050	.22E+09	.71E+09	.352	2.727	.93E+09
10.	-1.583	29.283	.250	.30E+09	.74E+09	.103	2.830	.10E+10
12.	-1.606	29.826	.400	.38E+09	.79E+09	.193	3.023	.12E+10
14.	-1.635	30.142	.200	.46E+09	.82E+09	.111	3.135	.13E+10
16.	-1.652	30.500	.250	.53E+09	.86E+09	.157	3.291	.14E+10

ISTYKKELSE= .000m VED NÅDD QTEST= .250E+08 J/m<sup>2</sup>

**Tabell 4.** Resultat for ismodellen for data fra 21. februar 1988. Overflatedata er ekstrapolert fra målinger dypere nede.

INITIALVERDIER FOR DET ØVERSTE LAGET FØR AVKJØLING:								
S: 10.000 (E-3), T: 2.000 (Deg-C) FRYSEPUNKT: -.54 (Deg-C), SIGMA: 7.983								
VERDIER FOR OVRE LAG SOM ETTER AVKJØLING/ISFRYSING GIR GJENNOMBLANDING TIL NESTE LAG:								
DKONV (m)	T-MID (Deg-C)	S-MID (E-3)	DELTA-S (E-3)	QH (J/m2)	QF (J/m2)	DELTAICE (m)	HICETOT (m)	QTOT (J/m2)
1.	-.552	15.500	5.500	.11E+08	.14E+09	.524	.524	.15E+09
2.	-.839	20.254	4.750	.29E+08	.30E+09	.623	1.147	.33E+09
4.	-1.104	23.377	3.000	.81E+08	.47E+09	.653	1.800	.55E+09
6.	-1.275	27.643	4.150	.14E+09	.76E+09	1.100	2.899	.90E+09
8.	-1.516	28.874	1.050	.22E+09	.85E+09	.352	3.251	.11E+10
10.	-1.583	29.283	.250	.30E+09	.88E+09	.103	3.354	.12E+10
12.	-1.606	29.825	.400	.37E+09	.93E+09	.193	3.547	.13E+10
14.	-1.635	30.141	.200	.45E+09	.95E+09	.111	3.659	.14E+10
16.	-1.652	30.499	.250	.53E+09	.10E+10	.157	3.816	.15E+10
<b>ISTYKKELSE= .057m VED NÅDD QTEST= .250E+08 J/m2</b>								

**Tabell 5.** Resultat for ismodellen for data fra 20. januar 1992 for dagens tilrenningssituasjon.

INITIALVERDIER FOR DET ØVERSTE LAGET FØR AVKJØLING:								
S: 5.500 (E-3), T: 2.200 (Deg-C) FRYSEPUNKT: -.30 (Deg-C), SIGMA: 4.380								
VERDIER FOR OVRE LAG SOM ETTER AVKJØLING/ISFRYSING GIR GJENNOMBLANDING TIL NESTE LAG:								
DKONV (m)	T-MID (Deg-C)	S-MID (E-3)	DELTA-S (E-3)	QH (J/m2)	QF (J/m2)	DELTAICE (m)	HICETOT (m)	QTOT (J/m2)
1.	-.311	6.500	1.000	.53E+07	.87E+08	.333	.333	.92E+08
2.	-.416	9.450	2.000	.25E+08	.43E+09	.899	1.652	.46E+09
3.	-.522	15.833	6.400	.43E+08	.89E+09	1.772	3.425	.94E+09
4.	-.859	20.525	4.650	.74E+08	.12E+10	1.198	4.623	.13E+10
5.	-1.115	24.228	3.650	.95E+08	.14E+10	.854	5.477	.15E+10
5.	-1.320	29.205	4.900	.12E+09	.17E+10	1.012	6.489	.18E+10
6.	-1.605	31.021	1.600	.17E+09	.18E+10	.369	6.858	.20E+10
8.	-1.715	31.616	.250	.27E+09	.18E+10	.075	6.933	.21E+10
10.	-1.745	32.693	.800	.37E+09	.19E+10	.289	7.222	.23E+10
15.	-1.815	33.728	.600	.61E+09	.20E+10	.313	7.535	.26E+10
<b>ISTYKKELSE= .083m VED NÅDD QTEST= .250E+08 J/m2</b>								

**Tabell 6.** Resultat for ismodellen for data fra 20. januar 1992, for framtidig tilrenningssituasjon med dykket utslipp.

INITIALVERDIER FOR DET ØVERSTE LAGET FØR AVKJØLING:								
S: 5.500 (E-3), T: 2.200 (Deg-C) FRYSEPUNKT: -.30 (Deg-C), SIGMA: 4.380								
VERDIER FOR OVRE LAG SOM ETTER AVKJØLING/ISFRYSING GIR GJENNOMBLANDING TIL NESTE LAG:								
DKONV (m)	T-MID (Deg-C)	S-MID (E-3)	DELTA-S (E-3)	QH (J/m2)	QF (J/m2)	DELTAICE (m)	HICETOT (m)	QTOT (J/m2)
1.	-.311	6.500	1.000	.53E+07	.87E+08	.333	.333	.92E+08
2.	-.416	9.450	2.000	.25E+08	.43E+09	.899	1.652	.46E+09
3.	-.512	19.583	*****	.43E+08	.98E+09	2.088	3.740	.10E+10
4.	-1.066	26.638	6.950	.82E+08	.13E+10	1.285	5.025	.14E+10
5.	-1.455	28.783	2.050	.11E+09	.14E+10	.388	5.413	.15E+10
5.	-1.576	30.105	1.200	.13E+09	.15E+10	.239	5.652	.16E+10
6.	-1.657	31.038	.700	.19E+09	.15E+10	.161	5.813	.17E+10
8.	-1.716	31.628	.250	.29E+09	.15E+10	.075	5.888	.18E+10
10.	-1.745	32.653	.750	.38E+09	.16E+10	.271	6.160	.20E+10
15.	-1.814	33.752	.650	.62E+09	.17E+10	.339	6.499	.23E+10
<b>ISTYKKELSE= .083m VED NÅDD QTEST= .250E+08 J/m2</b>								

## 3.4 Erosjon

### 3.4.1 Erosjon av forurensede sedimenter

Plumen fra utslippet stiger monotont gjennom vannsøylen (Figur 18 og 21). Plumen river med seg underliggende vann og plumens grense når derfor et par meter under utslagsstedets nivå ved horisontalt utslipp. Men ettersom bunn skråner bratt fra utslagsstedet så kommer plumen ikke i kontakt med bunn. Det er derfor ingen risiko for at plumen skal erodere forurensede sedimenter på vei mot innlagring.

Etter innlagring kan plumen forårsake en forsterket strøm på innlagringsdypet (3-6 m). For at denne strøm skal kunne gi erosjon kreves att den dreier seg inn mot land. Vi bedømmer imidlertid at den eventuelle forsterkingen av strømmen på så stor avstand fra utslagsstedet blir ubetydelig og antagelig ikke observerbar. Dessuten er tilgangen på løse og eroderbare sediment i strandkanten på dette dyp svært liten.

Det vil fra erosjonssynspunkt faktisk være mer gunstig med et horisontalt utslipp enn et vertikalt, ettersom dette vil bevege seg mot fjordens midte før innlagring, mens det vertikale utslippet vil innlagres nærmere land.

### 3.4.2 Erosjon lokalt ved utslippet

Erosjon lokalt ved utløpet kan skje dels i sammenheng med sprenging i konstruksjonsfasen, dels i driftfasen dersom utslippet har en retning mot eroderbare områder, eller dersom virvler oppstår ved utstrømningen som kan forårsake bakoverskridende erosjon.

Utslagsstedet er ifølge forespørselen lagt til en bratt skrent på en løsmassefri bergknaus. Det vil derfor ikke være risiko for bakoverskridende erosjon umiddelbart ved munningen til utslippstunnelen. Et viktig spørsmål ifølge forespørselen er om et parti med ballaststein definert som skipsfunn i utslagsområdet er i fare for erosjon. Ballaststeinen har sin nedre grense 15 m nærmere land fra utslagsstedet regnet, på 20 m dyp. Ved et helt vertikalt utslipp bedømmer vi at plumen kan komme til å påvirke dette området. De utslipp som vi har modellert (0° og 30° vinkel med horisontalplanet) vil være helt uten risiko for interferens med ballaststeinen.

Vi har bristende kjennskap om framgangsmåten ved sprenging og har vanskelig å bedømme mulige vannhastigheter i denne fase. Vi kan imidlertid notere at kombinasjonen av bratte skråninger og et utsatt sted for brytende bølger og utløpet fra Sauda III antagelig betyr at det er forholdsvis rent for finpartikler i dette området og at det derfor kreves forholdsvis høye strømhastigheter (cf. Figur 13).



## 4. Konklusjoner

Vi drar følgende generelle konklusjoner av undersøkelsen:

- Stengingen av Sauda III vil føre til lavere strømhastigheter generelt i overflatevannet og et mer homogent strømningsmønster.
- Det dykkete utslippet vil ifølge våre beregninger innlagres på ett dyp straks under eller i sprangsjiktet. Dette resultat virker å være stabilt og ikke spesielt følsomt for forendringer i initialhastighet og vinkel for utslippet. At resultatet er stabilt beror på at sjiktningen i Saudafjorden er svært sterk i normalsituasjonen.
- Det dykkete utslippet kan imidlertid ha en viss påvirkning på overflatestrømmen pga. medrivningseffekter.
- Den viktigste forskjellen mellom et horisontalt utslipp og et utslipp med en vinkel mot horisontalplanet (rettet oppover) er at det horisontale utslippet vil nå lengre ut i fjorden før innlagring. Innlagringsdypet blir omtrent det samme uavhengig av utslippsvinkel.
- Ved høy vannføring vil det dykkete utslippet også nå lengre ut i fjorden, men innlagringsdypet blir også her omtrent det samme.
- Resultatene gjelder også for større utslippsvikler enn de vi i første rekke har undersøkt (0 - 30°). Også et helt vertikalt utslipp vil få neutral densitet ved omtrent det samme dypet. Det helt vertikale utslippet vil dog ha noe bevegelsesmengde i behold ved innlagringsdypet og kan derfor fortsette et stykke forbi dette. Ved høy vannføring kan et helt vertikalt utslipp muligens nå overflaten.
- Vi anbefaler en utslippsvinkel i intervallet 0 - 45°. Disse grenser er ikke definitive, men en meget brattere vinkel vil gi mindre spredning av utslippsplymen og sterkere lokale strømmer i utslippsområdet. Risikoen for bakoverskridende erosjon vil også øke med en brattere vinkel (se nedenfor).

Spesifikt for isforhold konkluderer vi:

- Den endring i densitetsprofilen som innlagringen av det dykkete utslippet gir opphav til har liten påvirkning på isleggingen. Isleggingsprosessen styres isteden i høy grad av forholdene i overflatelaget.
- Minskingen av utløpene til overflaten kan ha flere forskjellige effekter: (i) De råker som elveutløpen i perioder har forårsaket kan forsvinne i og med at strømningsmønsteret blir mer homogent; (ii) Lavere strømhastigheter i overflatevannet og dermed lengre oppholdstid kan gi økt potensial for islegging; (iii) Høyere saltholdighet i overflatevannet senker fryspunktet og bør gi mindre islegging.
- Vi bedømmer at det mest sannsynlige scenariet er at isleggingen kommer til å minske som følge av de minskede overflateutslippen. Argumentet er at et meget tynt overflatelag lett vil blandes ned i underliggende saltene og varmere vann. Tidligere observasjoner viser også at isdannelse i Saudafjorden nesten uten unntak skjer etter en nedbørrik periode etterfulgt av klarvær og kulde, dvs etter en periode med stor tilførsel av ferskvann til fjorden. Disse perioder vil bli færre.
- Hvis de minskede overflateutslippen leder til vesentlig svekket sjiktning i indre Saudafjorden vil det dykkete utslippet kunne nå overflaten og då føre til vesentlig mindre is.
- Forventet regionale klimaendringer på Vestlandet med mildere vintrer vil kunne bidra til mindre is og kortere isleggingsperioder uansett hva effektene av utbyggingen blir.

Spesifikt for erosjon konkluderer vi:

- Det dykkete utslippet vil ikke kunne forårsake økt erosjon av bunnsedimenter lengre ut i fjorden ettersom plumen stiger monotont fra utslippet og aldri kommer i kontakt med bunn.

- Erosjon lokalt i området med ballaststein kan eventuelt (men ikke trolig) inntreffe om utslippet skjer helt vertikalt. For de utslippsvinkler som vi har modellert og for utslippsvinkler opp til i det minste 45° finns ingen slik risiko.

## 5. Referanser

- Frick, W. E., P. J. W. Roberts, L. R. Davis, J. Keyes, D. J. Baumgartner, and K. P. George, 2001: Dilution models for effluent discharges, 4th Edition (Visual Plumes). USEPA, Athens, Georgia.
- Gjessing, Y., 1968: On the relation between the meteorological conditions and the freezing of Lusterfjord. Norsk Geografisk Tidsskrift, Bind 22, Hefte 2, 200-208.
- Golmen, L. G., H. Svendsen og S. Mikki, 1989: Straumtilhøve og vassutskifting i Sandsfjorden og Hylsfjorden i Ryfylke. Norsk Fiskeoppdrett nr 11, 58-60.
- Golmen, L. G., J. Molvær og V. Bjerknes, 2003: Forprosjekt ny Loftesnesbru. Konsekvensvurdering for vasskvalitet i Barsnesfjorden ved endra utfylling i fjordmunningen. Rapport 4718-2003, 46 s.
- Holmqvist, E. 1992: Saudaprojektet. Hydrologiske forhold i utbyggingsområdet. Regulerings virkning på vannføringsforholdene i berørte vassdrag. Statkraft.
- Lie, U., H. Svendsen, S. Kaartvedt, S. Mikki, T. M. Johnsen, D. Aksnes, R. P. Asvall og L. G. Golmen, 1992: Vannkraft og fjorder. Fysiske og biologiske konsekvenser av Ulla-Førre Utbygginga. Rapport 4/92, SMR-UiB, 89s.
- Molvær, J., Knutzen, J., Magnusson, J., Rygg, B., Skei, J., Sørensen, J., 1997: Klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og kystfarvann. Veiledning. SFT-rapport TA 1467/1997, 36s, ISBN 82-7655-367-2.
- Moy, F., Næs, K. og Knutzen J., 2001: Miljøtilstanden i Saudafjorden 2001, NIVA-rapport 4446-2001, ISBN 82-577-4092-6.
- Norton, W. R., I. P. King and G. T. Orlob, 1973: A finite element model for Lower Granite Reservoir, prepared for the Walla Walla District, U.S. Army Corps of Engineers, Walla Walla, WA.
- NVE, 2002: Saudaprojektet. Søknad om ny tillatelse for eksisterende reguleringer og tillatelse til videre utbygging av vassdragene i Saudafjella. Godkjenning av konsekvensutredningen og NVEs instilling. NVE 200100140-x.
- Svendsen, H. og N. Utne (1979): Fysisk-oseanografisk undersøkelse i Ryfylkefjordene 1972-1975. Tekstbind og Databind. Rapp. Rådg. Utv. Fjordundersøkelser, NVE, Oslo.
- Tvede, A. M. og E. Hansen, 1992: Saudautbyggingen. Konsekvenser for is- og vanntemperaturforhold. NVE rapport 05 1992.
- Uriansrud, F., 2003a: Kartlegging av miljøtilstanden i indre deler av Saudafjorden, NIVA-notat til SFT, O-24141.
- Uriansrud, F., 2003b: Kartlegging av miljøtilstanden i overflatesedimentene ved mulig deponiområde og ROV-inspeksjon i området for planlagt utløp fra ny kraftstasjon ved Sagfossen, NIVA-notat til Elkem Saudafaldene, O-24175.
- Uriansrud, F., 2003c: Undersøkelse av miljøtilstanden i sone 2 og 3, indre del av Saudafjorden, NIVA-notat til Fylkesmannen i Rogaland, O-23235.



# Vedlegg 1. Beskrivelse av brukte modeller

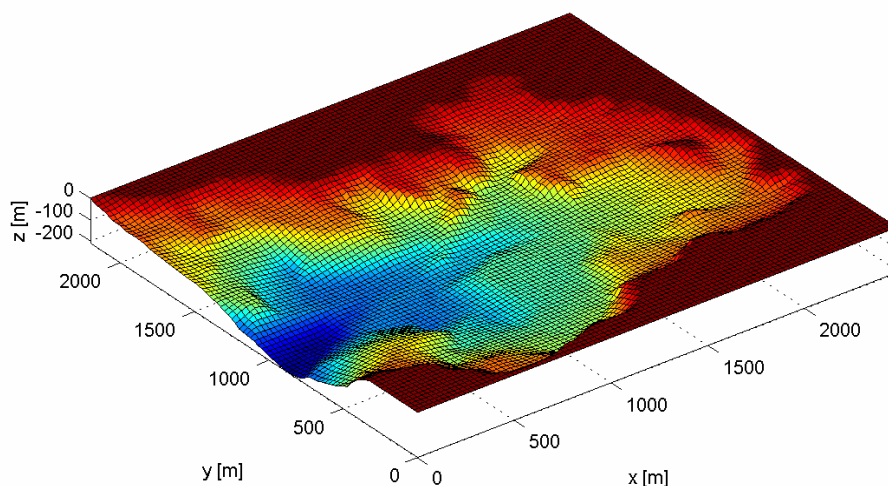
## SMS/RMA2

RMA2 er en todimensjonal strømningsmodell utviklet av US Army Corps of Engineers (Norton mfl., 1973). Modellen beregner vannstand og de horisontale hastighetskomponentene for underkritisk strømning med fri overflate. Modellen kan ta hensyn til varierende dyp, men kravet på at strømmingen skal være underkritisk gjør at skråningen på bunn må være svak. Dette kravet er ikke oppfylt i Saudafjorden som har bratte skråninger ned mot 120 m dyp i indre fjorden. Vi har gjennomført modelleringer med realistisk bunntopografi, men også modelleringer for kun overflatelaget, dvs. med en kunstig, flat bunn på pyknoklinens nivå.

Modellen drives av grensevilkår i form av enten foreskrevet vannstand eller foreskreven innstrømning. Vind kan også drive modellen, men generelt fungerer vinddrivning dårlig i todimensjonale modeller ettersom samspillet mellom vind og strøm er en fundamentalt tredimensjonal prosess.

RMA2 brukes i foreliggende undersøkelse dels (i) for å bestemme det generelle strømningsmønsteret i fjorden ("ambient current") som input til Visual Plumes og (ii) for å bestemme influensområde for de forskjellige elvene og kraftverkutslippet.

Figur A1 viser det numeriske nett (grid) som har blitt brukt i de todimensjonale modelleringene.



**Figur A1.** Numerisk nett (grid) for de todimensjonale strømmodellingene med RMA2. Nettet har 25 meters oppløsning og 100 x 89 noder.

## Visual Plumes

Visual Plumes er en enkel endimensjonal modell for spredning og innlagring av plumer i omkringliggende vann. Modellen er utviklet av US Environmental Protection Agency (Frick mfl., 2001).

Inndata til modellen gis i form av nøye beskrivelse dels av utslippet (rørdiameter, vannføring, saltholdighet og temperatur i utslippsvannet og eventuelt konsentrasjon av andre stoffer, samt dyp for utslippet), dels av omkringliggende vann (saltholdighet-, temperatur- og strømprofiler og eventuelt bakgrunnskonsentrasjon av andre stoffer).

Visual Plumes brukes i foreliggende undersøkelse for å bestemme spredning og innlagingsdyp for det dykkete utslippet og for å vise på effekter på sjiktningen i Saudafjorden.

## NIVAs ismodell

NIVA sin ismodell (Golmen mfl., 2003) er en endimensjonal modell som simulerer vertikale konveksjonsprosesser og isdannelse i densitetssjiktete vann som følge av varmeutveksling med atmosfæren. Varmetap fra overflaten mot luften driver modellen. In-situ densitet for sjøvannet blir nyttet i beregningene..

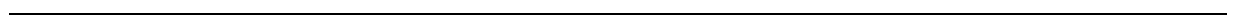
Avkjøling er simulert ved gradvis å redusere temperaturen i det øvre gjennomblandete laget. Avkjølingen medfører vertikal konveksjon, mens potensiell temperatur er konstant med dypet men får gradvis lavere verdi etter hvert som avkjølingen fortsetter (Figur 11). Når densiteten i det gjennomblandete laget med tykkelse  $H$  har nådd den målte densiteten i dypet  $H+dH$ , der  $dH$  er et lite dypinkrement, blir det antatt at laget med tykkelse  $H$  blir blandet sammen med laget under, slik at et nytt lag med tykkelse  $H+dH$  blir dannet. Vertikalblandingen er ikke-penetrerende, dvs. en antar langsomme prosesser.

Dersom avkjøling av blandingslaget tar temperaturen til frysepunktet, og den nye densiteten fremdeles er for lav til at videre konveksjon når til det neste dypet  $H+dH$ , er frysing av is i overflaten det neste steget i modellen. Dette blir simulert ved en gradvis øking i saltholdigheten i det øvre blandingslaget (fordi salt blir skilt ut i fryseprosessen) mens overflatetemperaturen blir holdt på aktuell frysepunktsverdi. Til slutt vil densiteten være høy nok til at videre konveksjon kan fortsette. Istykkelsen som samsvarer med den aktuelle saltholdighetsøken blir utregnet, ved å anta at isen holder tilbake salt motsvarende en konsentrasjon på  $5 \cdot 10^{-3}$ . For Saudafjorden og lignende fjorder kan denne verdien være litt høyt satt, men dette påvirker ikke resultatet nevneverdig. Varmetapet fra øverste laget til luft blir beregnet ved å bruke  $4 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^3$  som spesifikk varme for sjøvann, og varmetapet til luften som forårsaker isdannelse er beregnet ved å bruke verdien  $2.9 \cdot 10^{-8} \text{ J/m}^3$ .

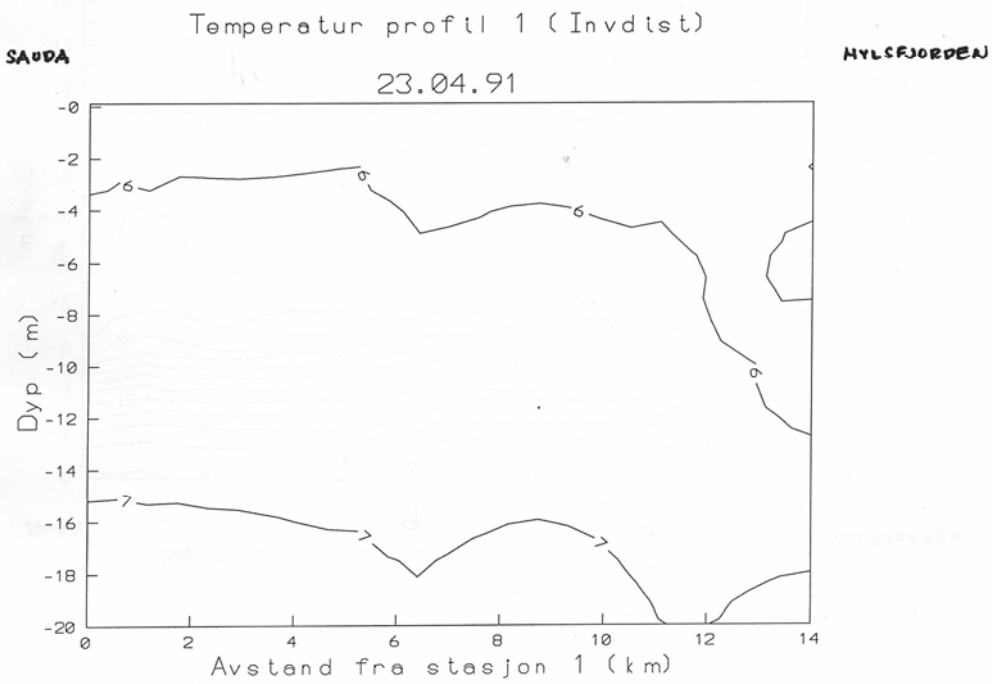
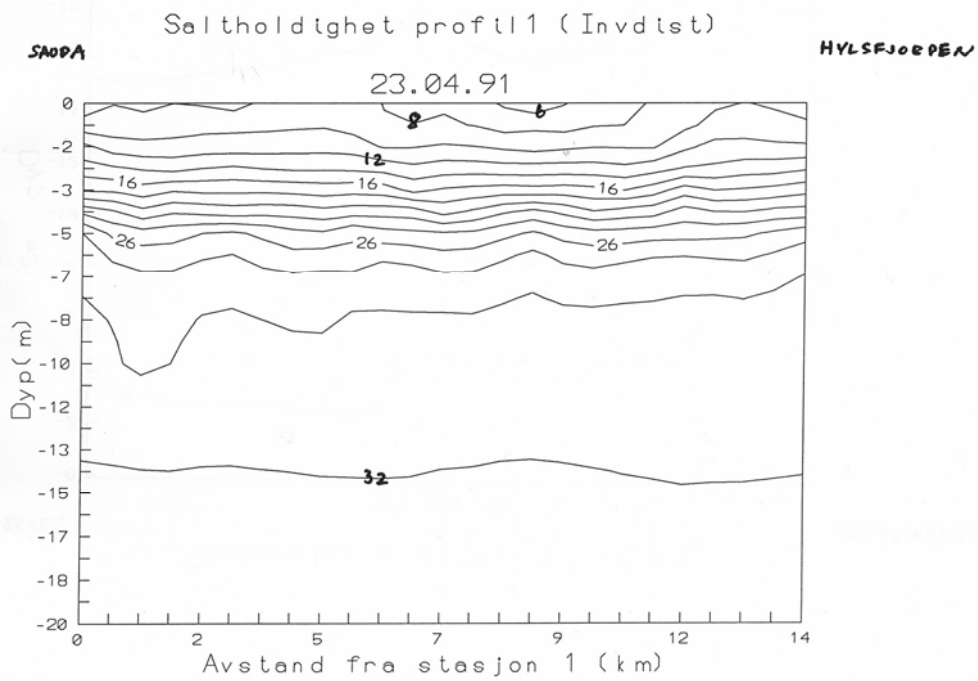
---

## **Vedlegg 2. Saltholdighet- og temperaturmålinger fra 1991 og 92 (NVE)**

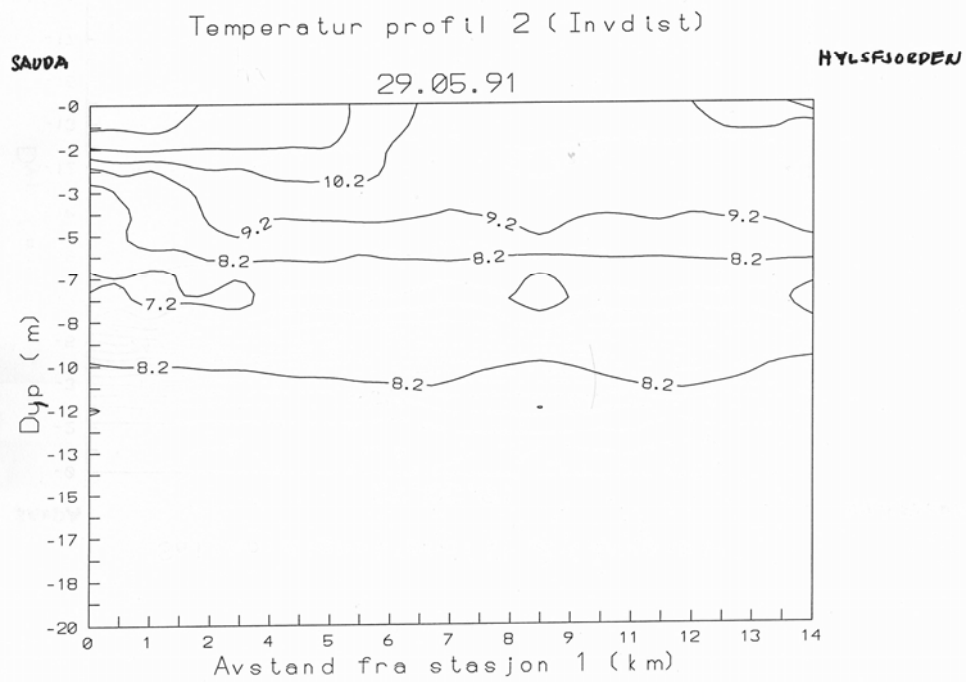
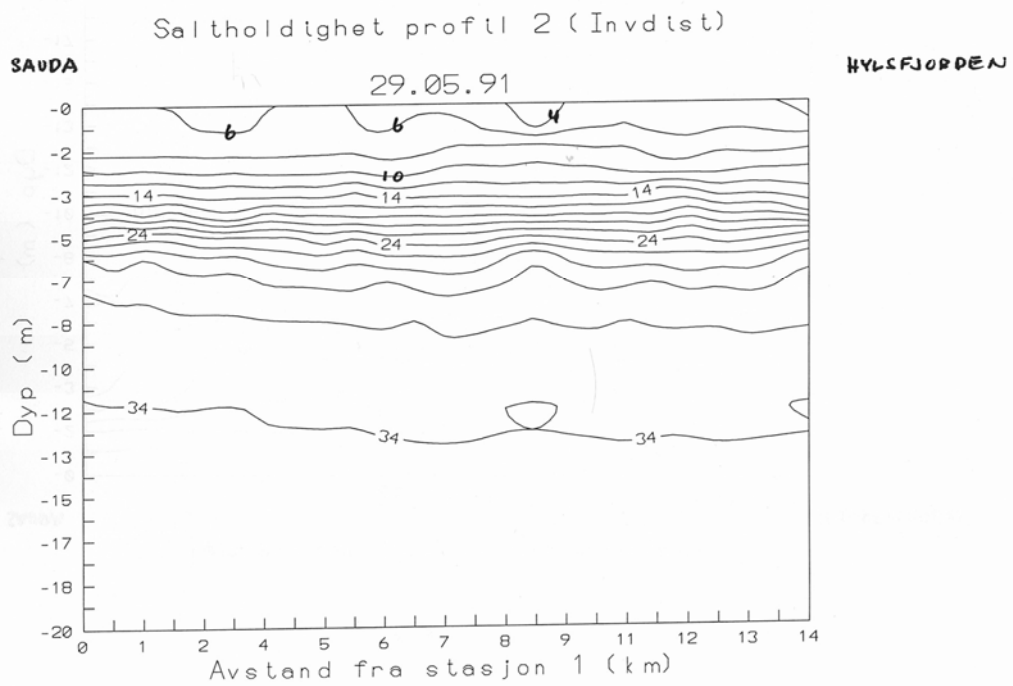
Bildene i dette vedlegg er skannete fra papirkopier fra NVE. Vi har ikke funnet originaldata.









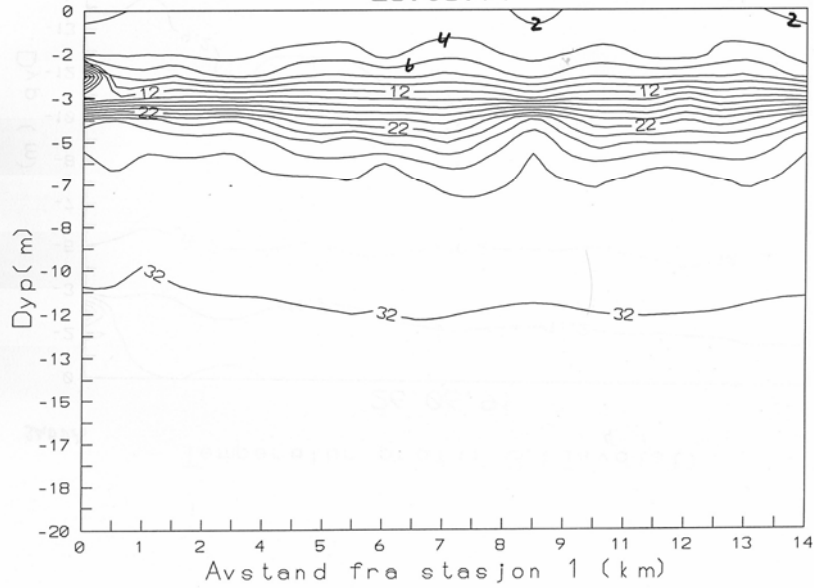


SANDA

Saltholdighet profil 3 (Invdist)

HVLSFJORDEN

26.06.91

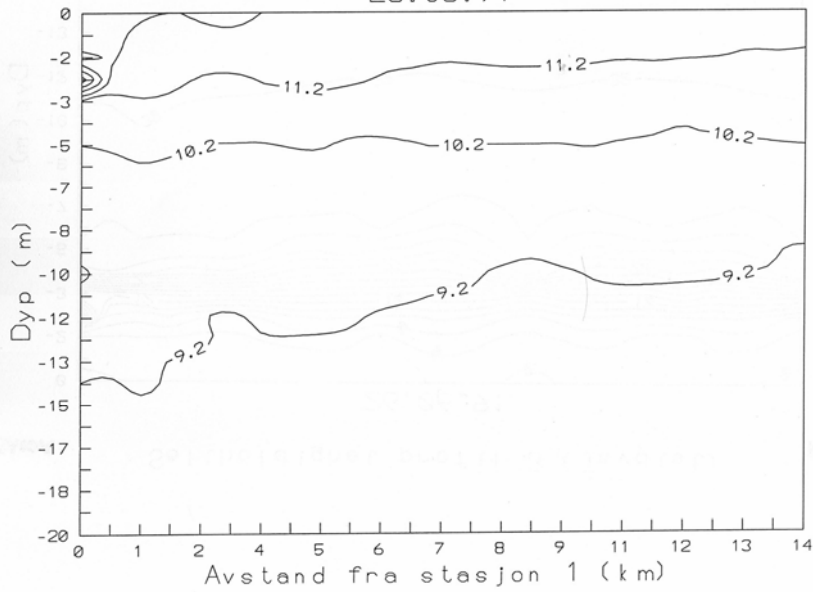


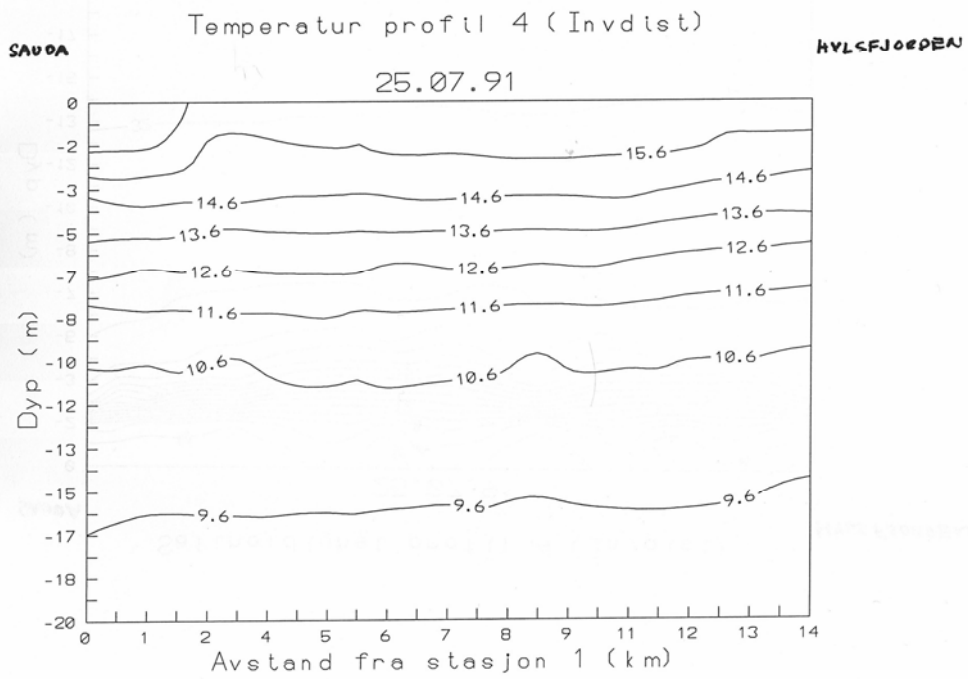
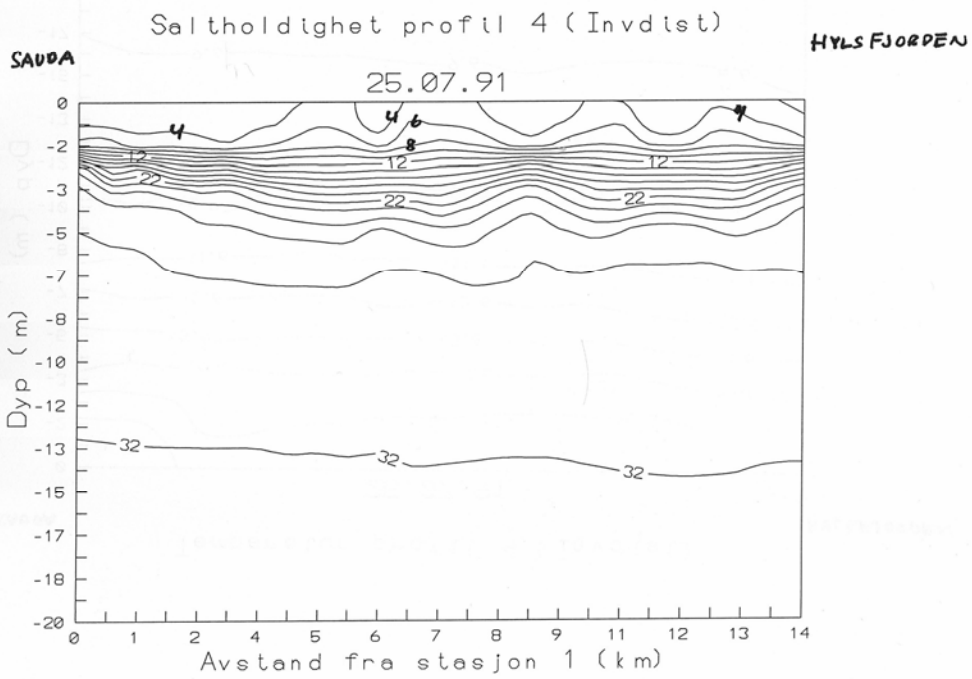
SANDA

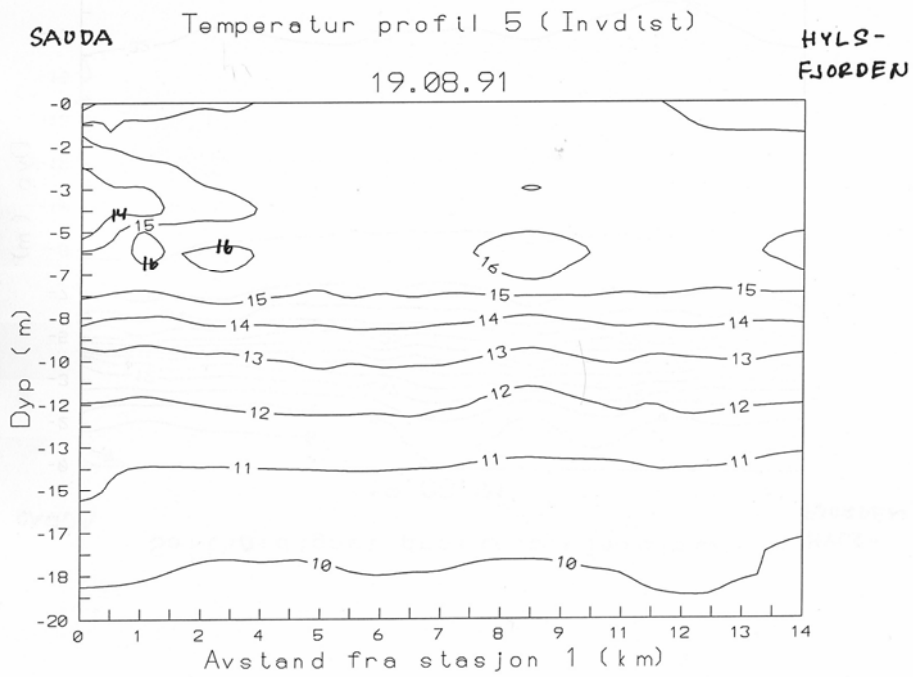
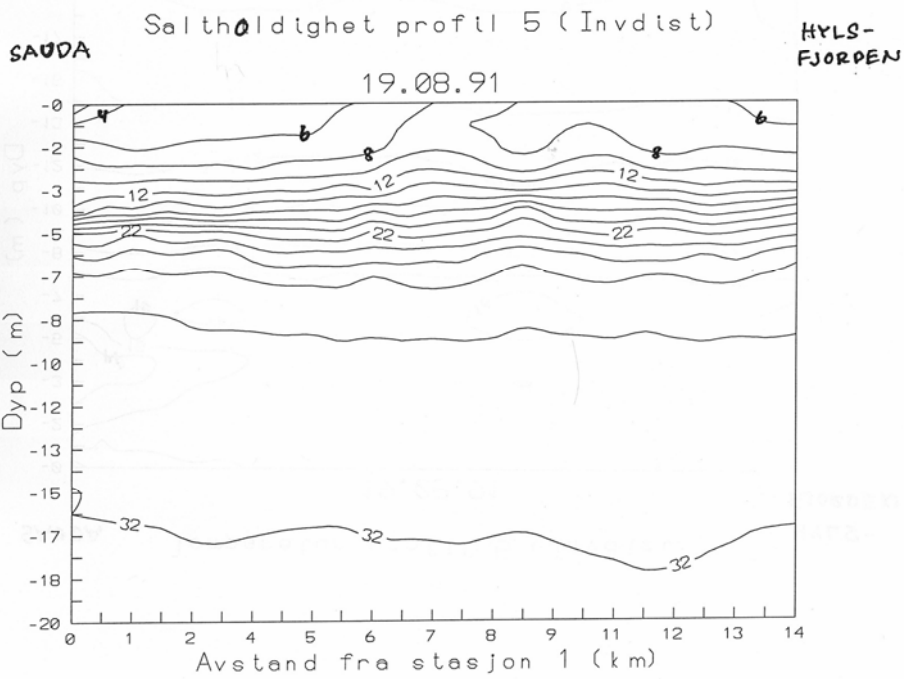
Temperatur profil 3 (Invdist)

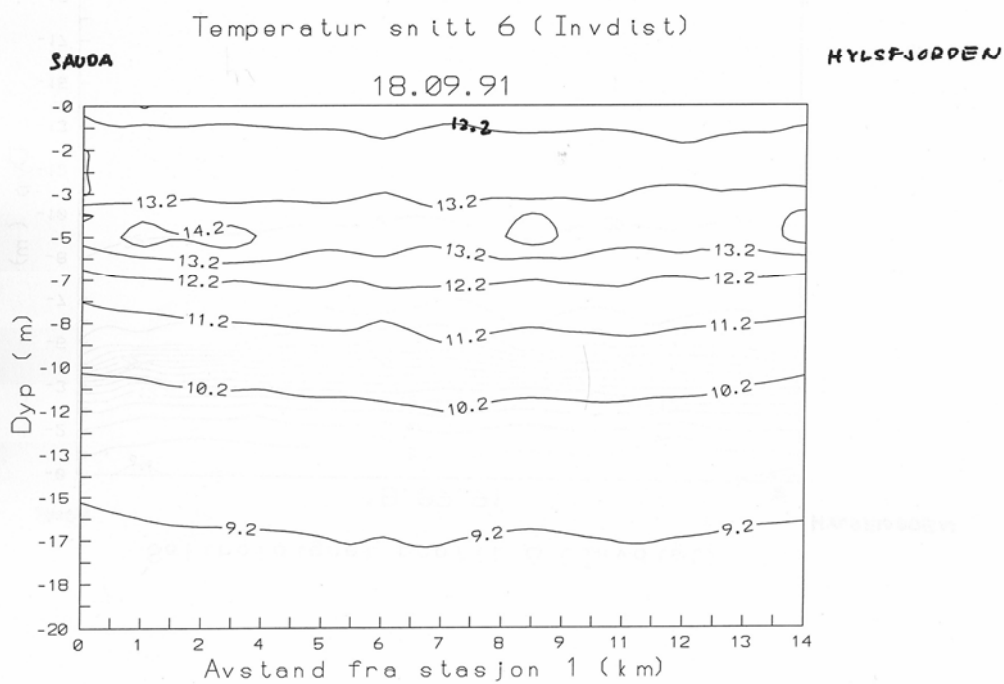
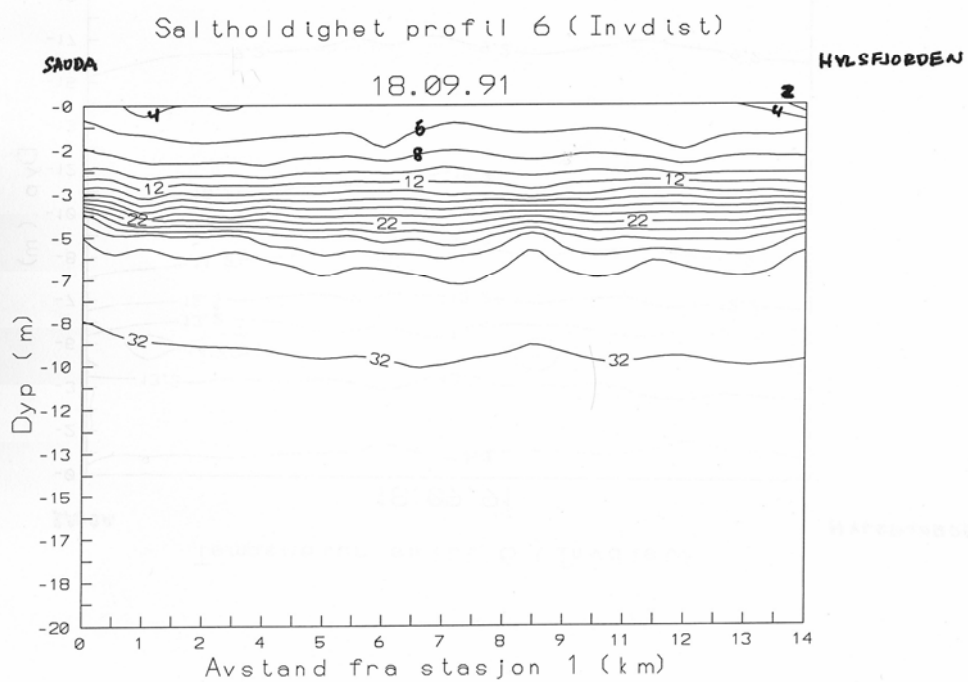
HVLSFJORDEN

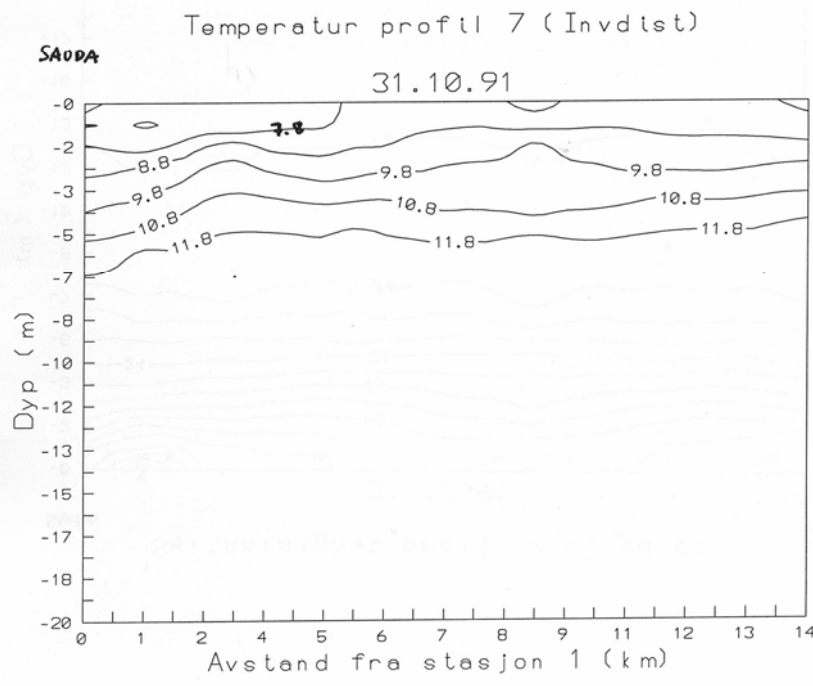
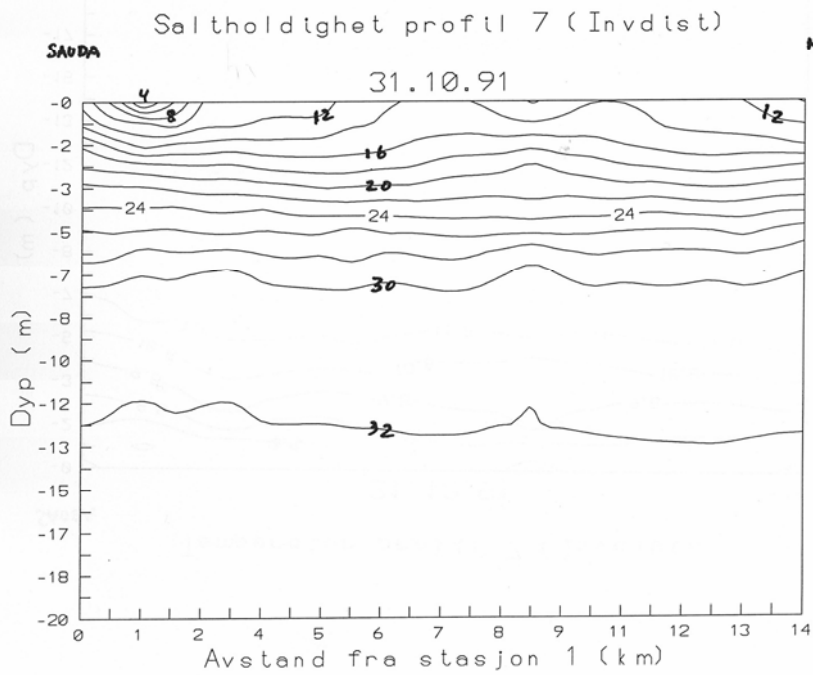
26.06.91

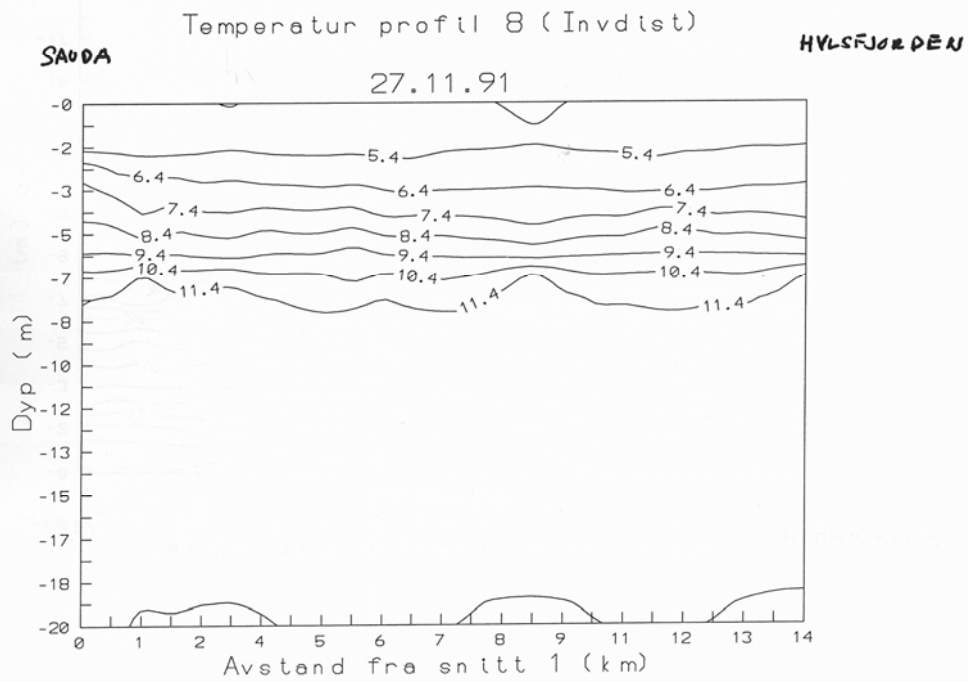
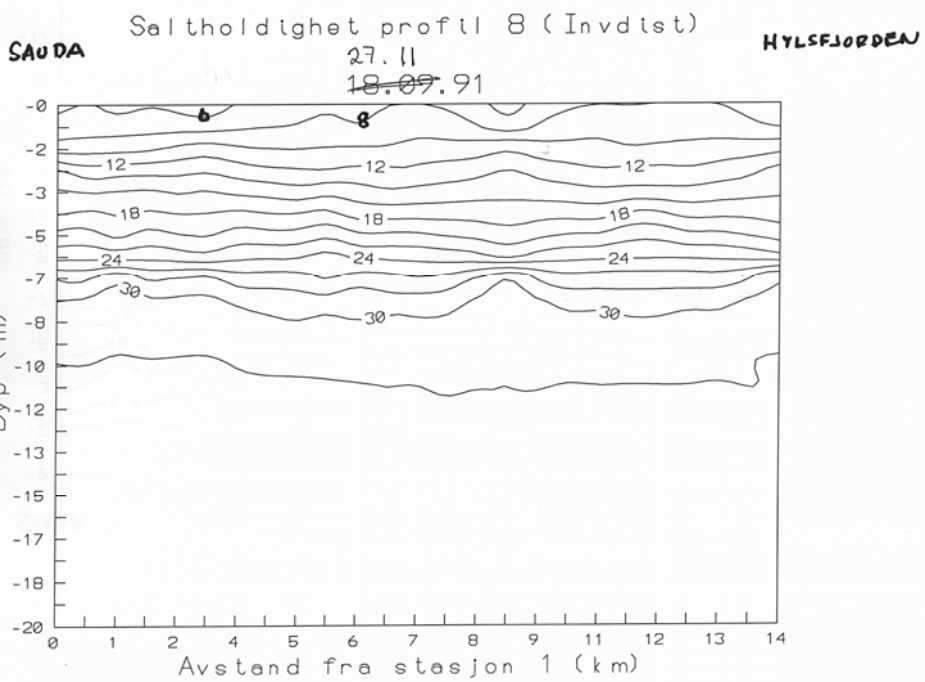


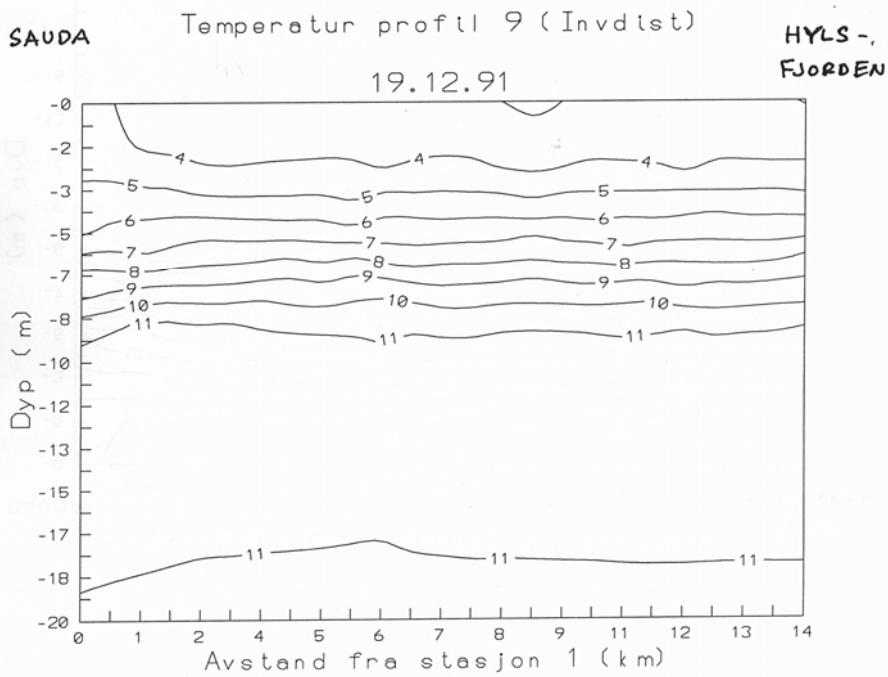
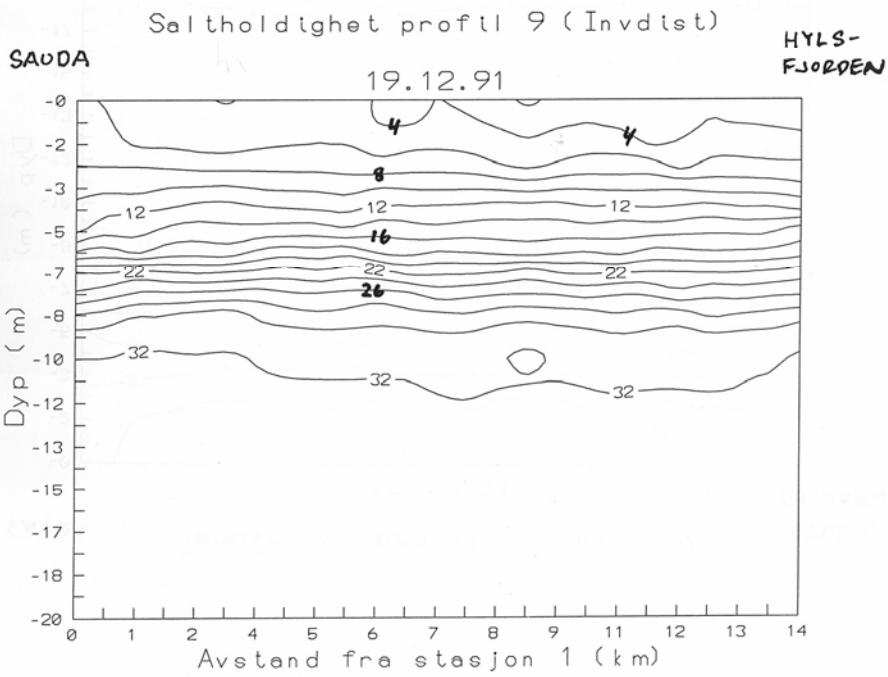




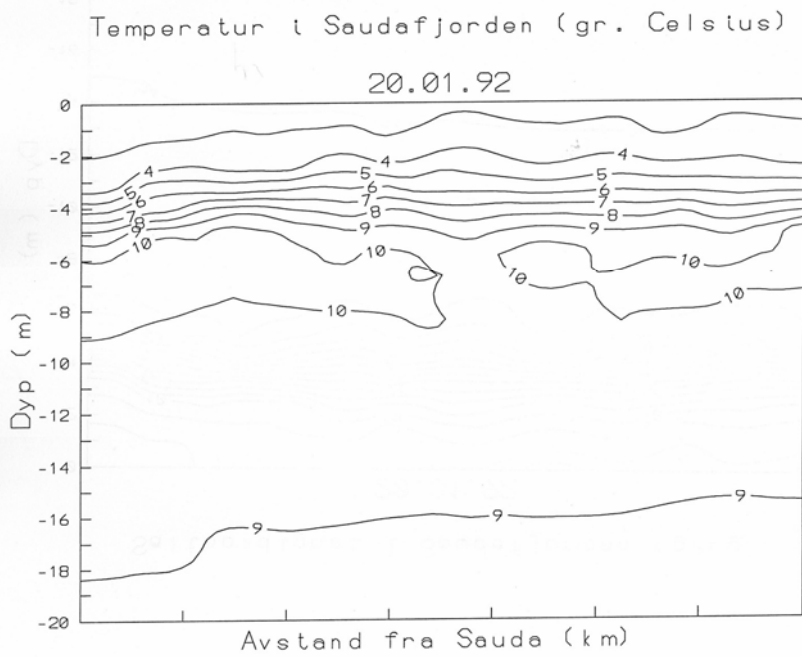
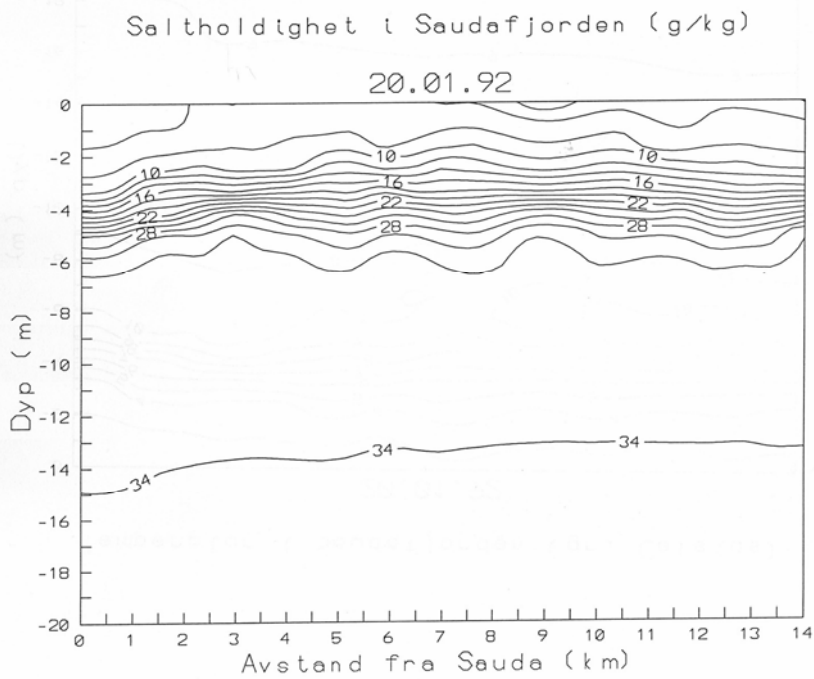






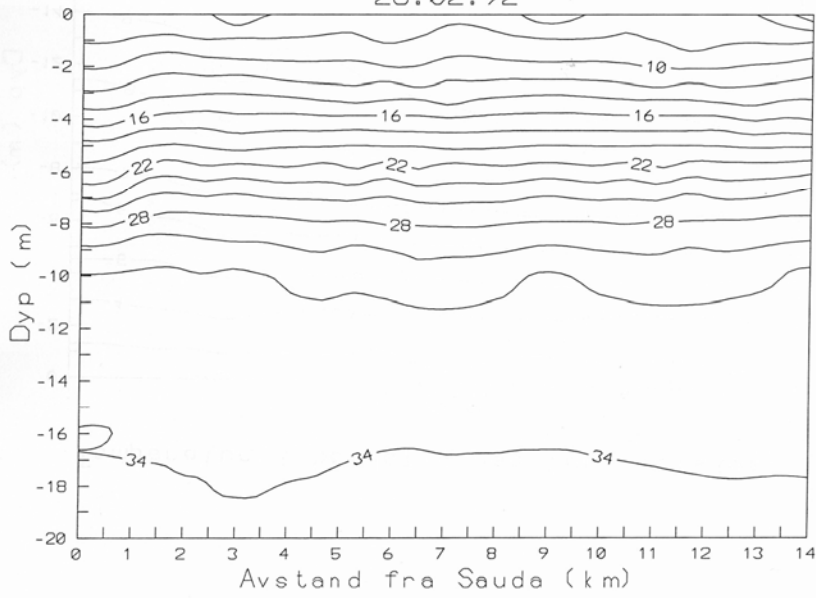






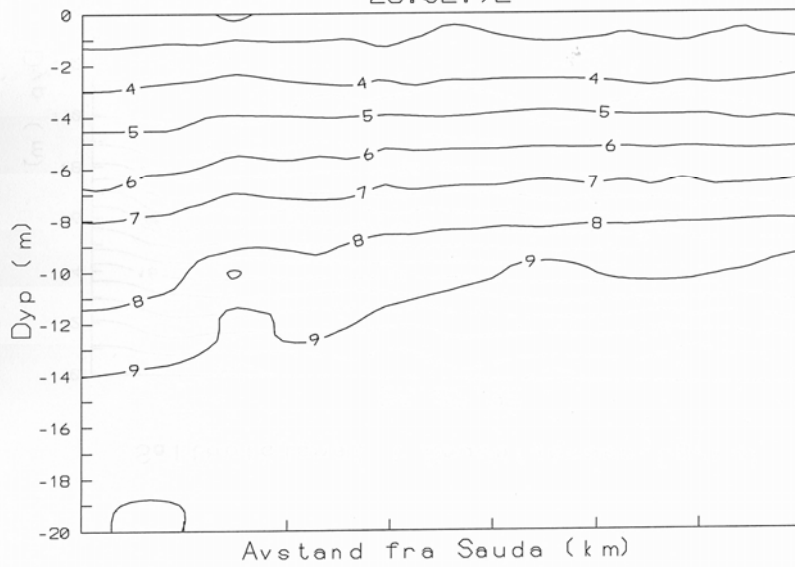
Saltholdighet i Saudafjorden (g/kg)

26.02.92



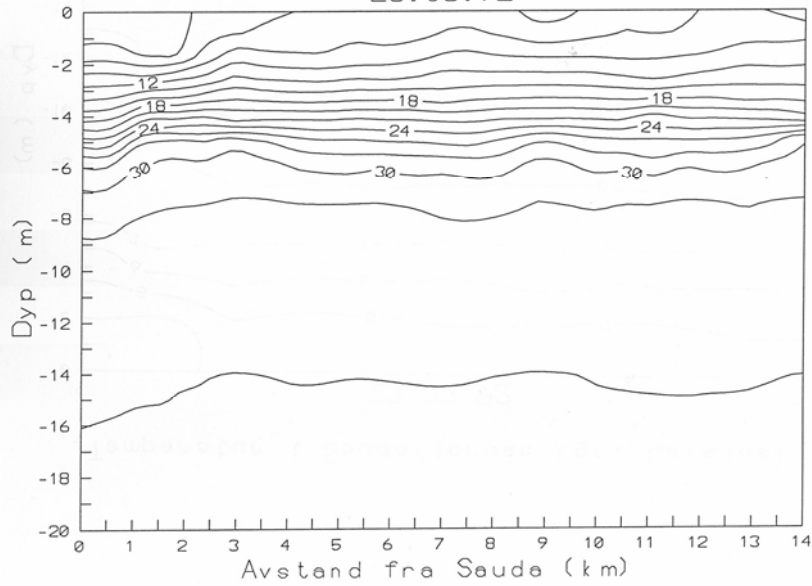
Temperatur i Saudafjorden (gr. Celstus)

26.02.92



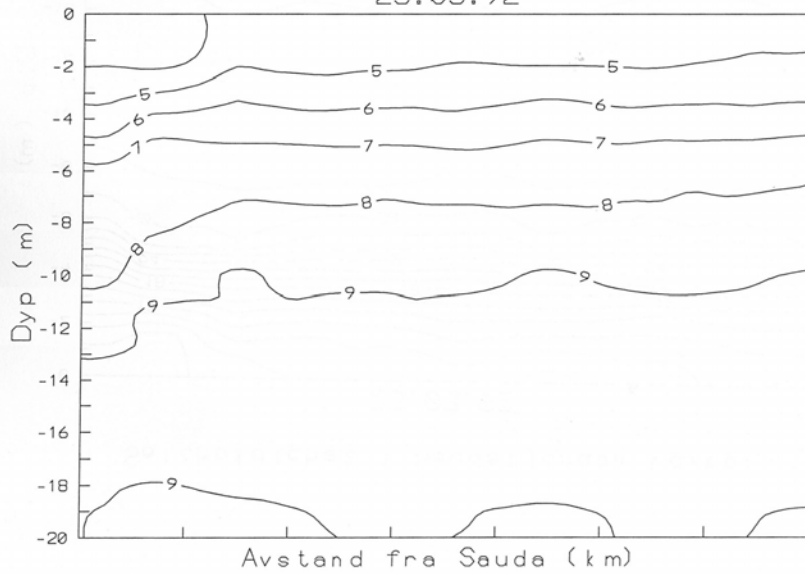
Saltholdighet i Saudafjorden (g/kg)

23.03.92



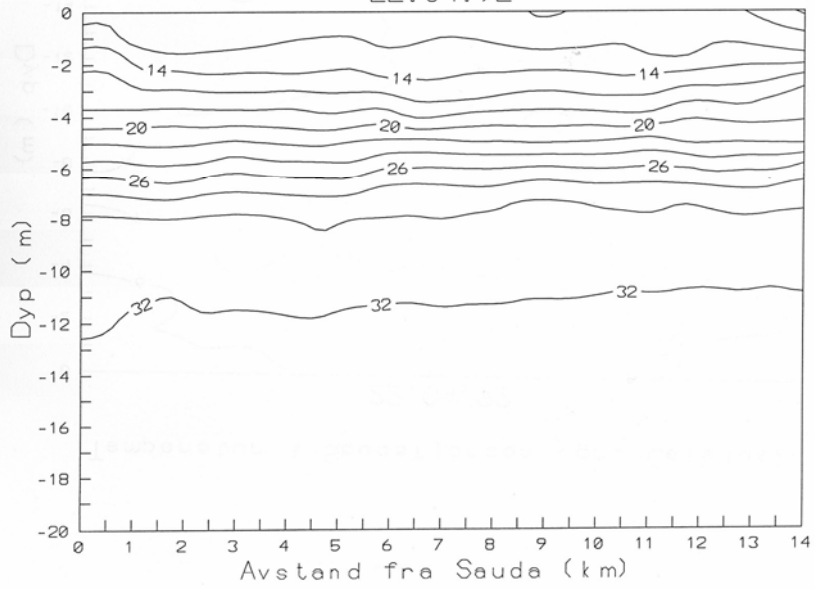
Temperatur i Saudafjorden (gr. Celsius)

23.03.92



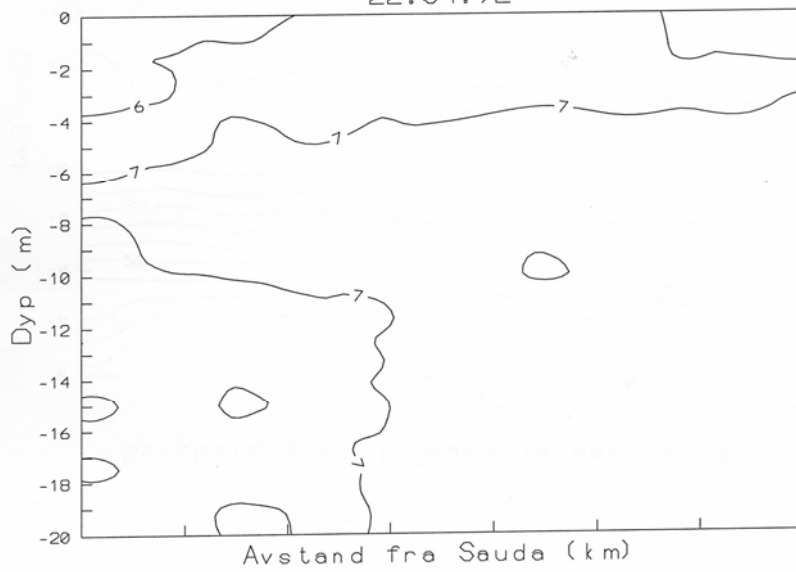
Saltholdighet i Saudafjorden (g/kg)

22.04.92



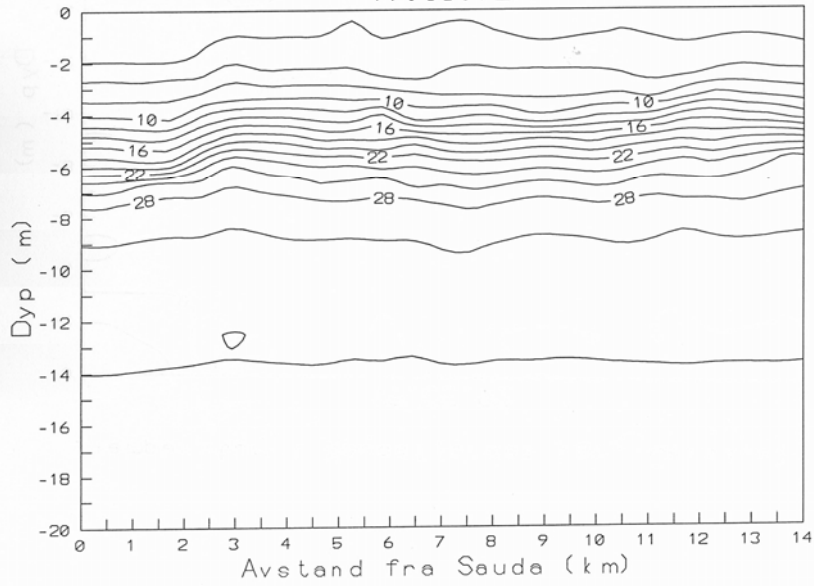
Temperatur i Saudafjorden (gr. Celcius)

22.04.92



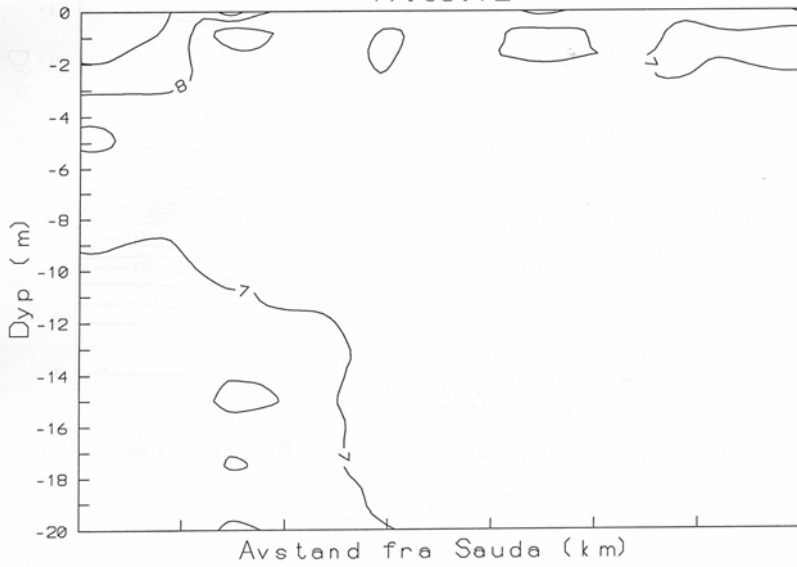
Saltholdighet i Saudafjorden (g/kg)

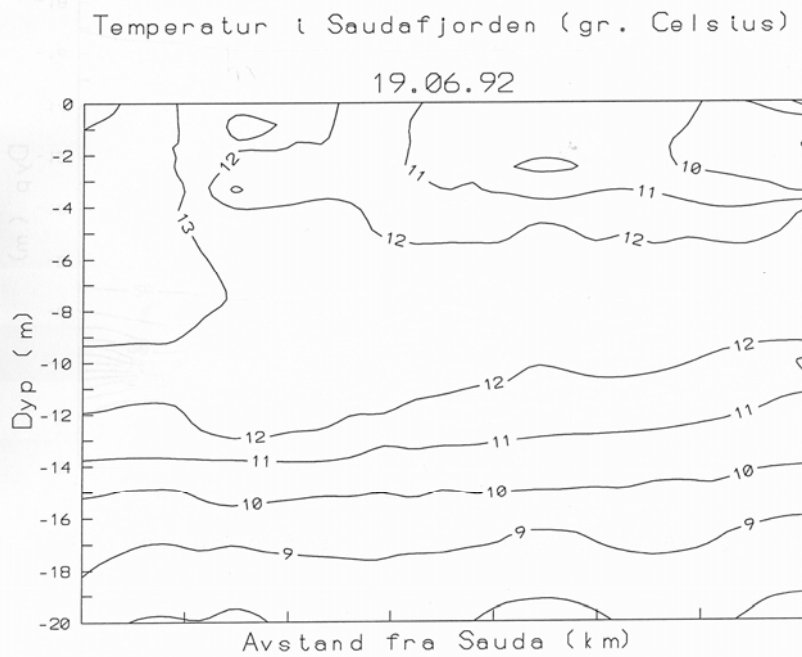
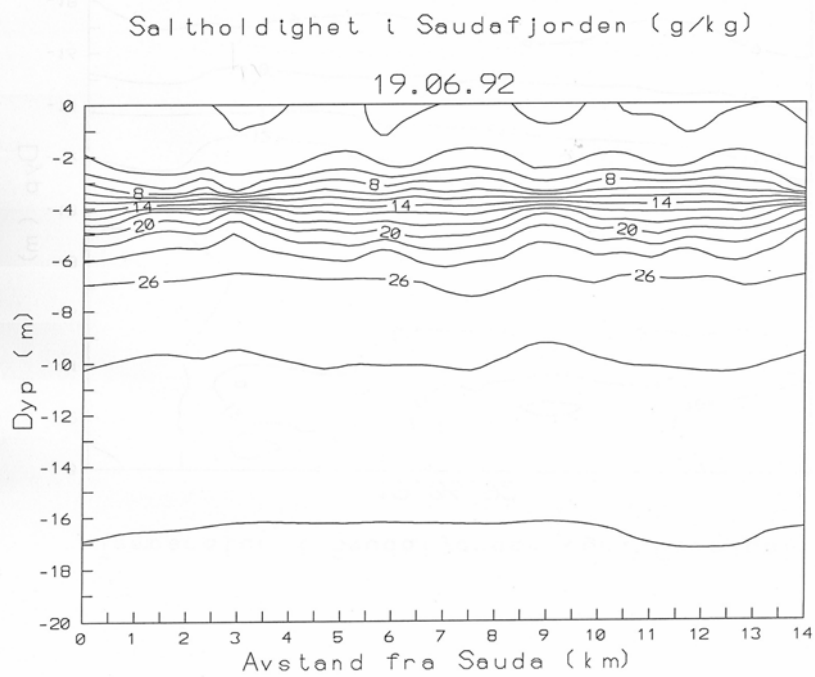
19.05.92



Temperatur i Saudafjorden (gr. Celstus)

19.05.92

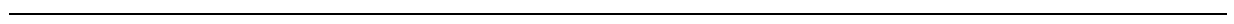






## **Vedlegg 3. Iskart fra lokale observatører fra 1990, 91 og 92**

Bildene i dette vedlegg er skannete fra papirkopier fra NVE.







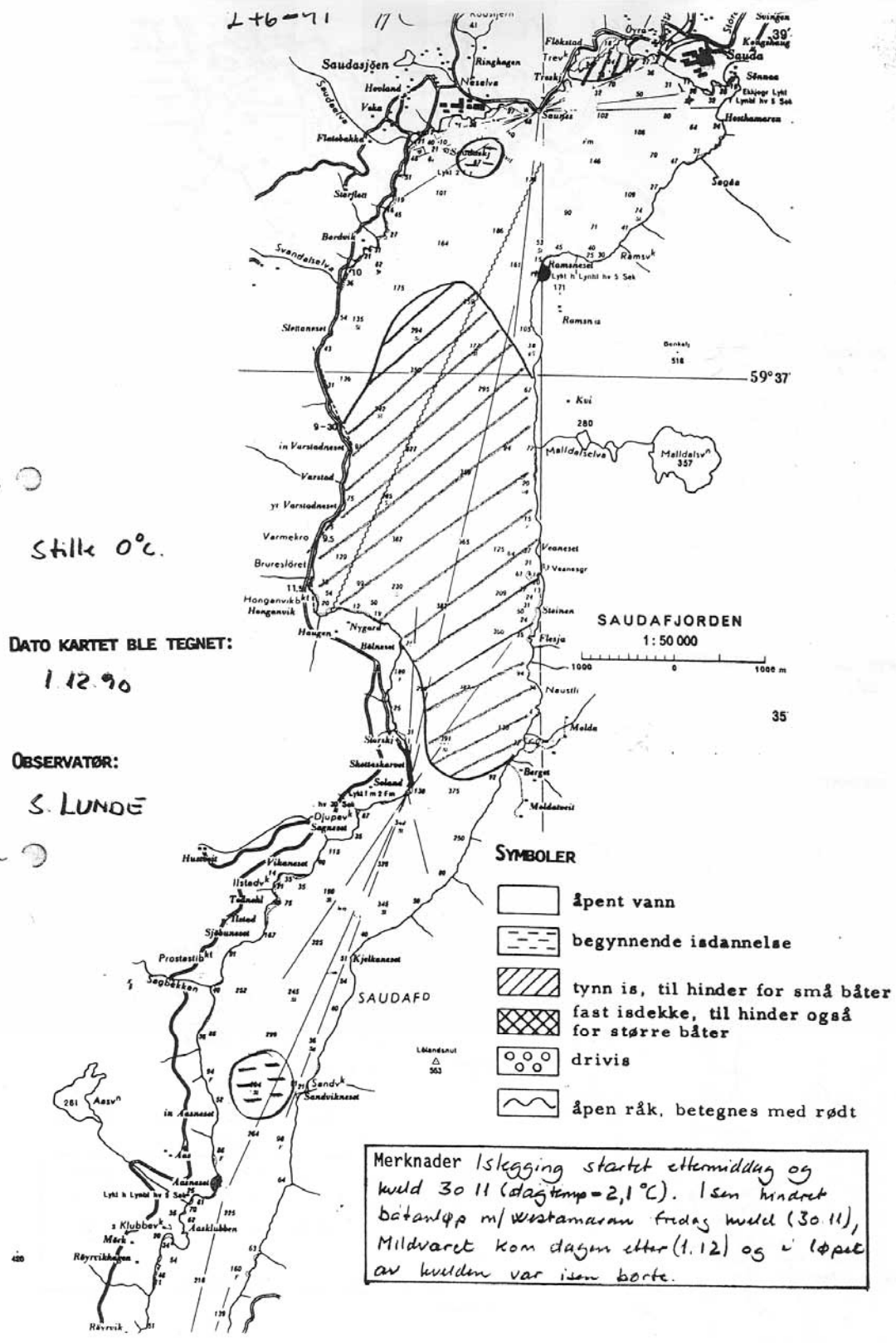


L 16-71

Stille 0°C.

DATO KARTET BLE TEGNET:  
1.12.90

OBSERVATÖR:  
S. LUNDÉ



SAUDAFJORDEN  
1:50 000

59°37'

1000 0 1000 m

35

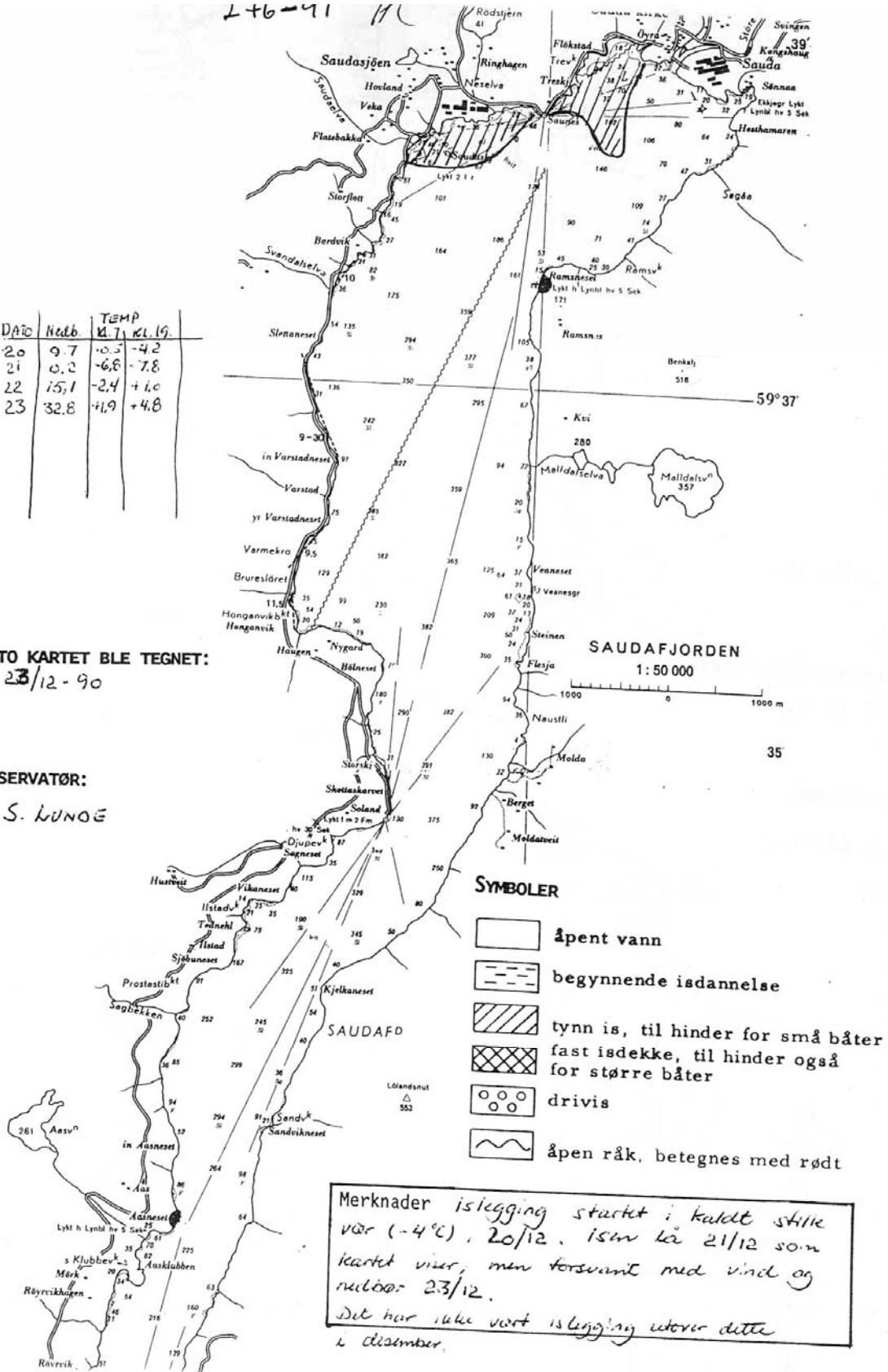
Merknader Islegging startet ettermiddag og kveld 30.11 (dagtemp = 2,1°C). Isen hindret båtutløp m/ Vestamannan fredag kveld (30.11), Mildværet kom dagen etter (1.12) og i løpet av kvelden var isen borte.

L + 6 - 91

DATO	Nedb	TEMP	
		KL 7	KL 19
20	9.7	-0.5	-4.2
21	0.2	-6.8	-7.8
22	15.1	-2.4	+1.0
23	32.8	+1.9	+4.8

DATO KARTET BLE TEGNET:  
23/12 - 90

OBSERVATØR:  
S. LUNOE



276-91 HC

DATO	Temp.	
	07.00	19.00
10.1	0,3	1,4
11.2	0,4	1,2
12.1	1,2	0,4
13.1	0,9	-5,0
14.1	-8,5	-4,3

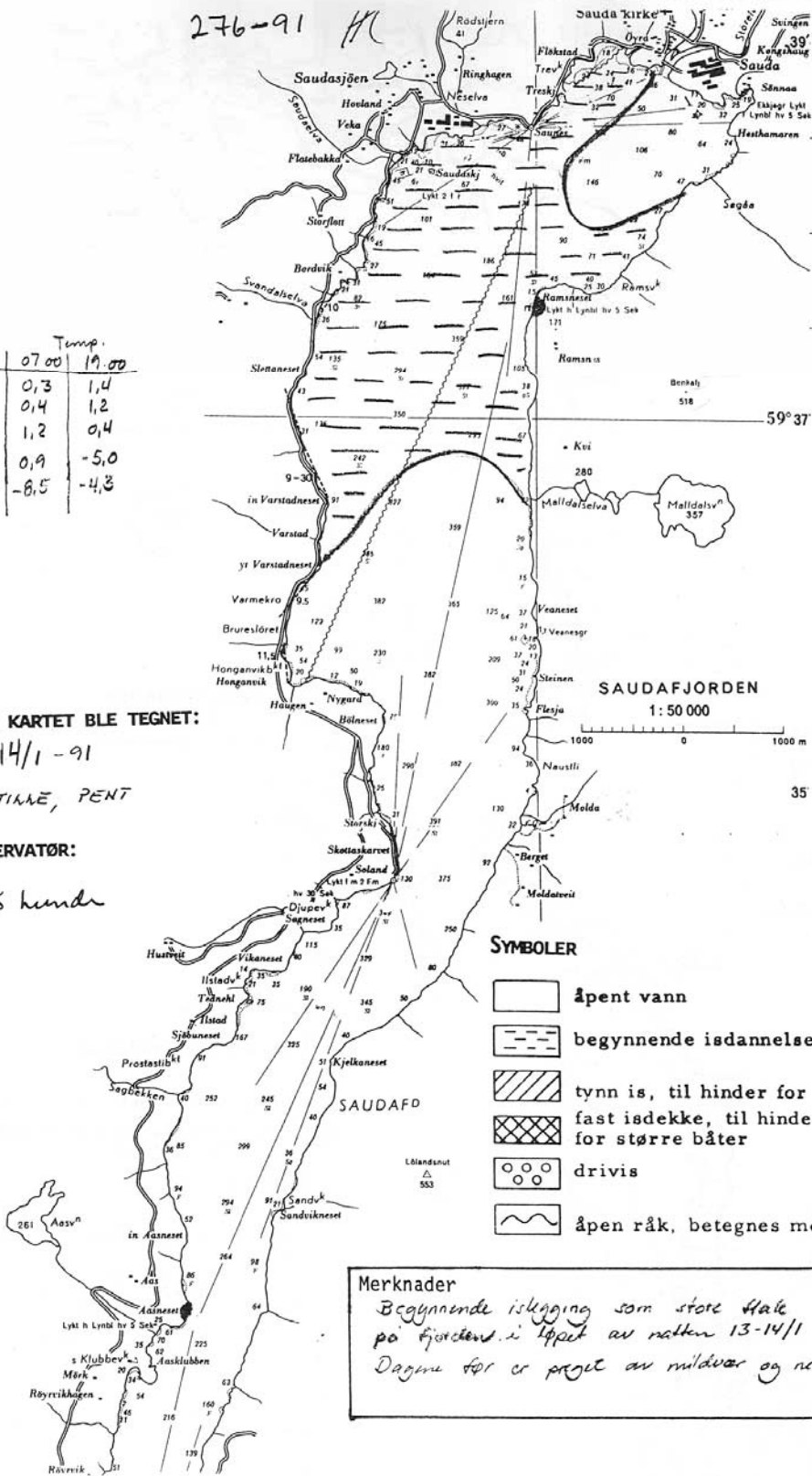
DATO KARTET BLE TEGNET:

14/1 - 91

STIANE, PENT

OBSERVATØR:

S hunde

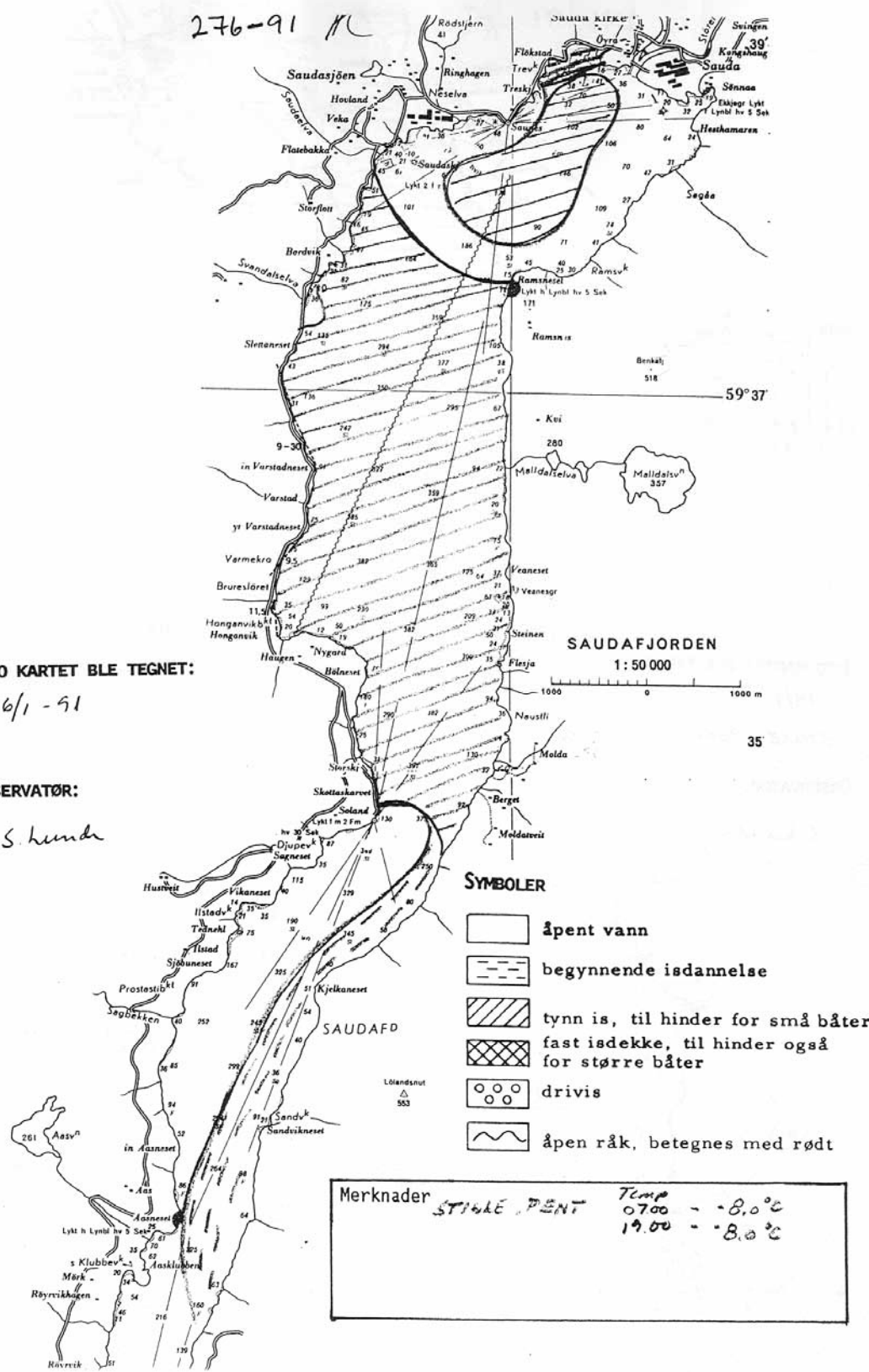


SYMBOLER

- åpent vann
- begynnende isdannelse
- tynn is, til hinder for små båter
- fast isdekke, til hinder også for større båter
- drivis
- åpen råk, betegnes med rødt

**Merknader**  
 Begynnende islegging som store flak på fjordens i løpet av natten 13-14/1  
 Dagene før er preget av mildvær og nedbør

276-91



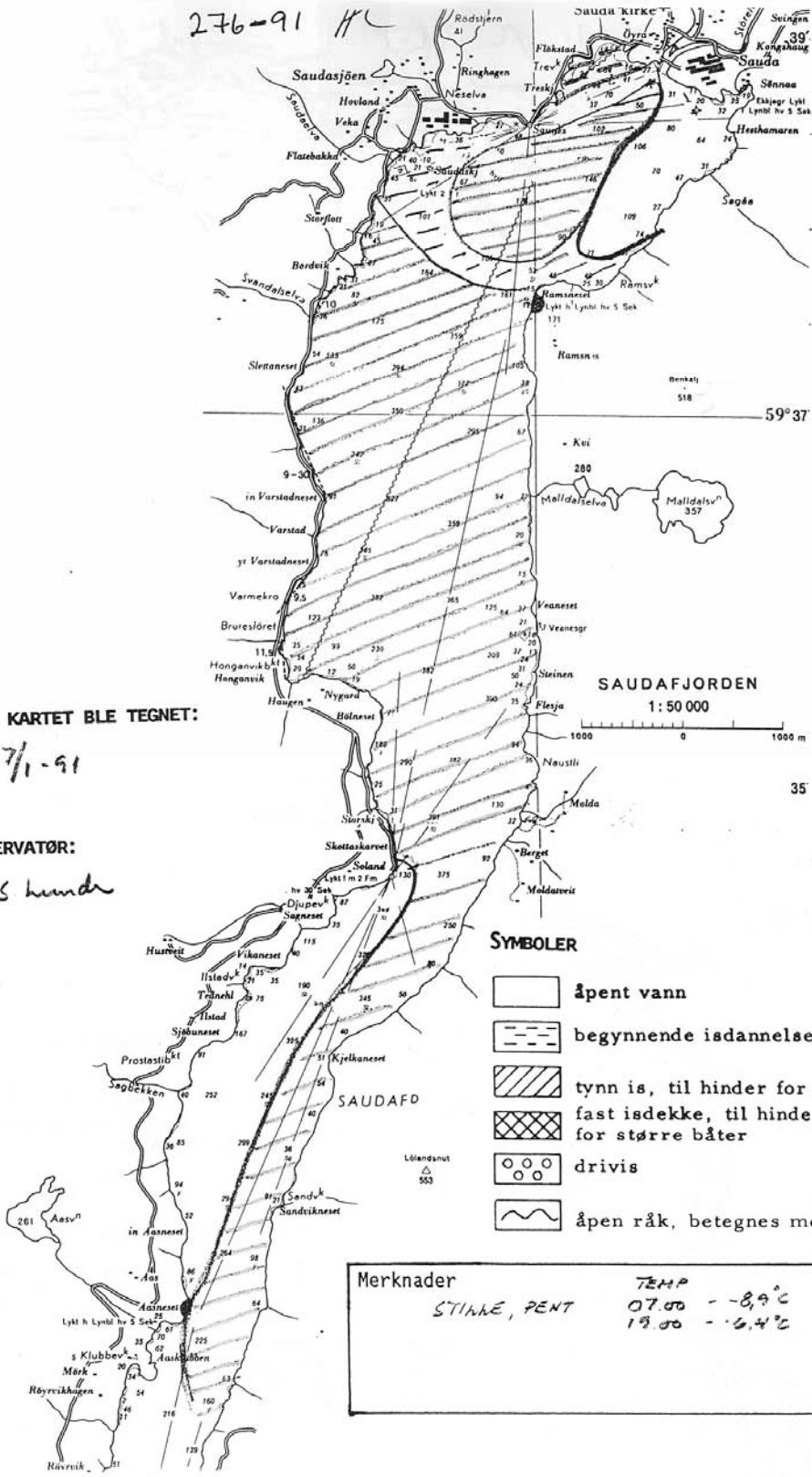
DATO KARTET BLE TEGNET:

16/1 - 91

OBSERVATØR:

S. Lund

276-91 H









DATO KARTET BLE TEGNET:

17/1-91

OBSERVATØR:

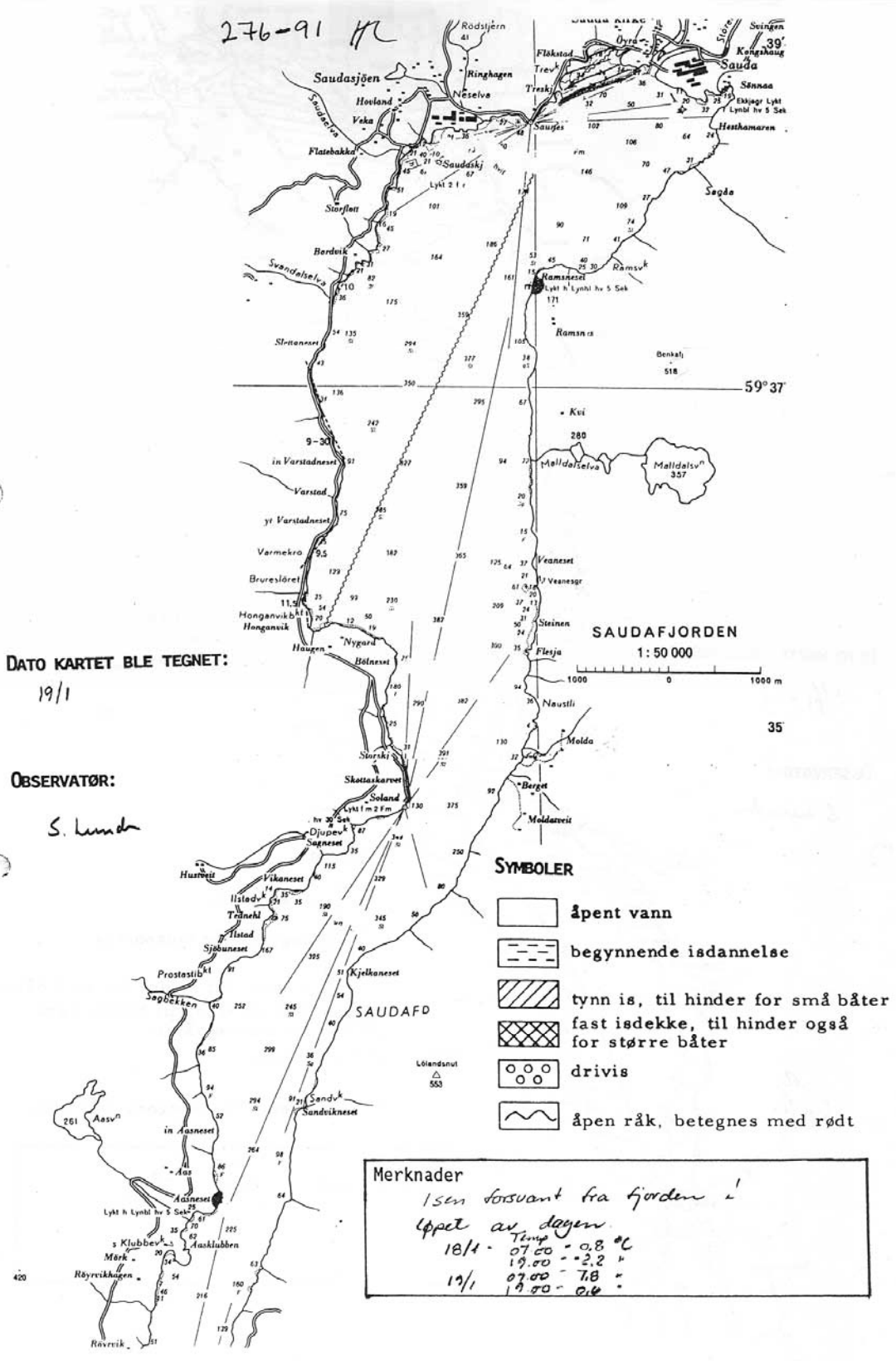
S. hunder

**SYMBOLER**

-  åpent vann
-  begynnende isdannelse
-  tynn is, til hinder for små båter
-  fast isdekke, til hinder også for større båter
-  dravis
-  åpen råk, betegnes med rødt

Merknader	TEMP
STILLE, PENT	07.00 - -8,9°C
	19.00 - -6,4°C

276-91 H









DATO KARTET BLE TEGNET:

19/1

OBSERVATØR:

S. Lund

**SYMBOLER**

-  åpent vann
-  begynnende isdannelse
-  tynn is, til hinder for små båter
-  fast isdekke, til hinder også for større båter
-  dravis
-  åpen råk, betegnes med rødt

**Merknader**  
 Isen forsvant fra fjorden!  
 løpet av dagen  
 18/1 - 07.00 - 0.8 °C  
 19.00 - 2.2 °C  
 19/1 07.00 - 7.8 °C  
 19.00 - 0.6 °C



276-91 H

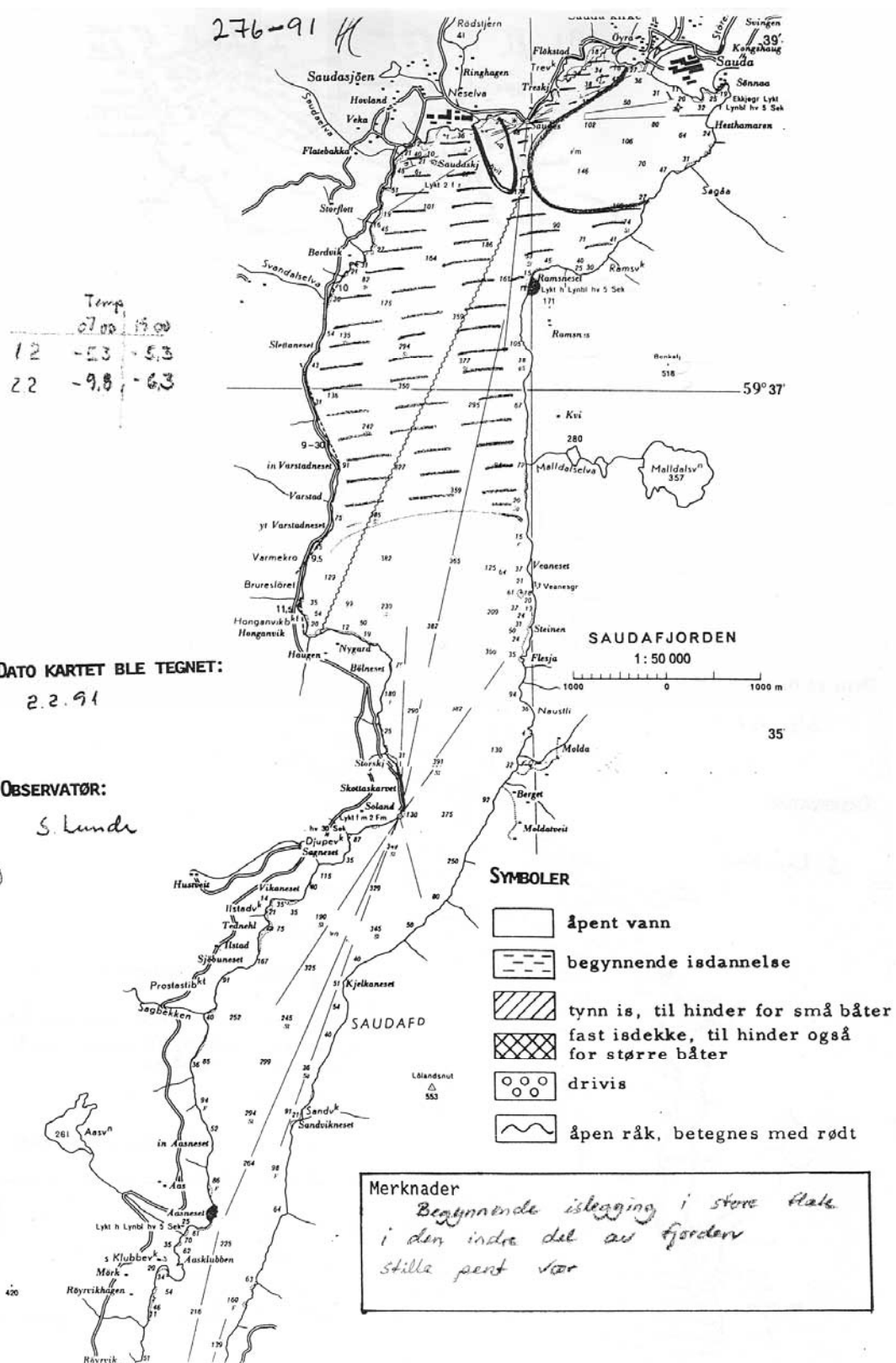
Temp	07.00	19.00
12	-5.3	-5.3
22	-9.8	-6.3

DATO KARTET BLE TEGNET:

2.2.91

OBSERVATÖR:

S. Lund



SYMBOLER

- åpent vann
- begynnende isdannelse
- tynn is, til hinder for små båter
- fast isdekke, til hinder også for større båter
- dravis
- åpen råk, betegnes med rødt

**Merknader**  
*Begynnende islegging i store flate  
 i den indre del av fjorden  
 stille perst vær*

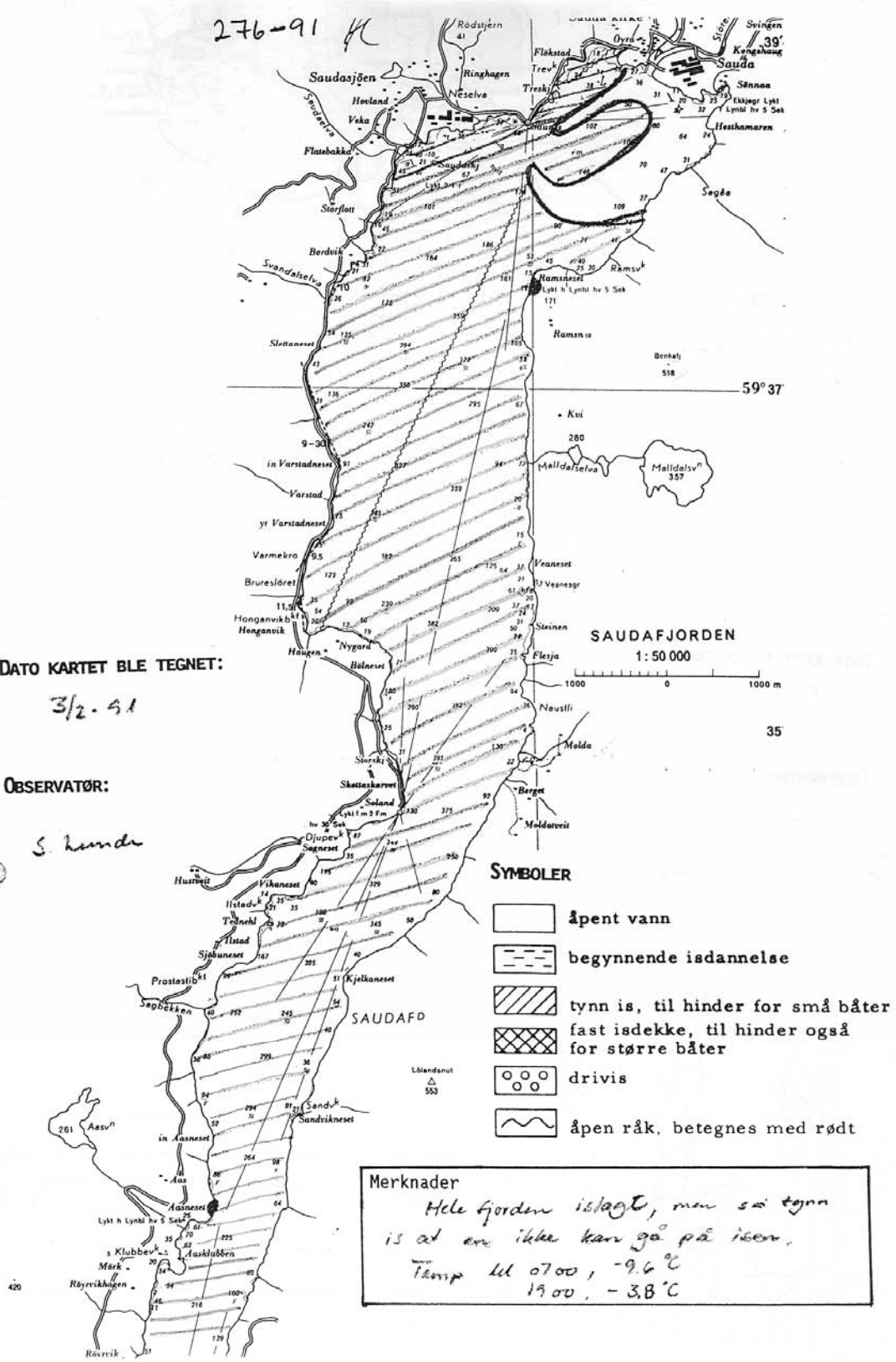
276-91 H

DATO KARTET BLE TEGNET:

3/2-91

OBSERVATÖR:

S. Kunder



276-91 H

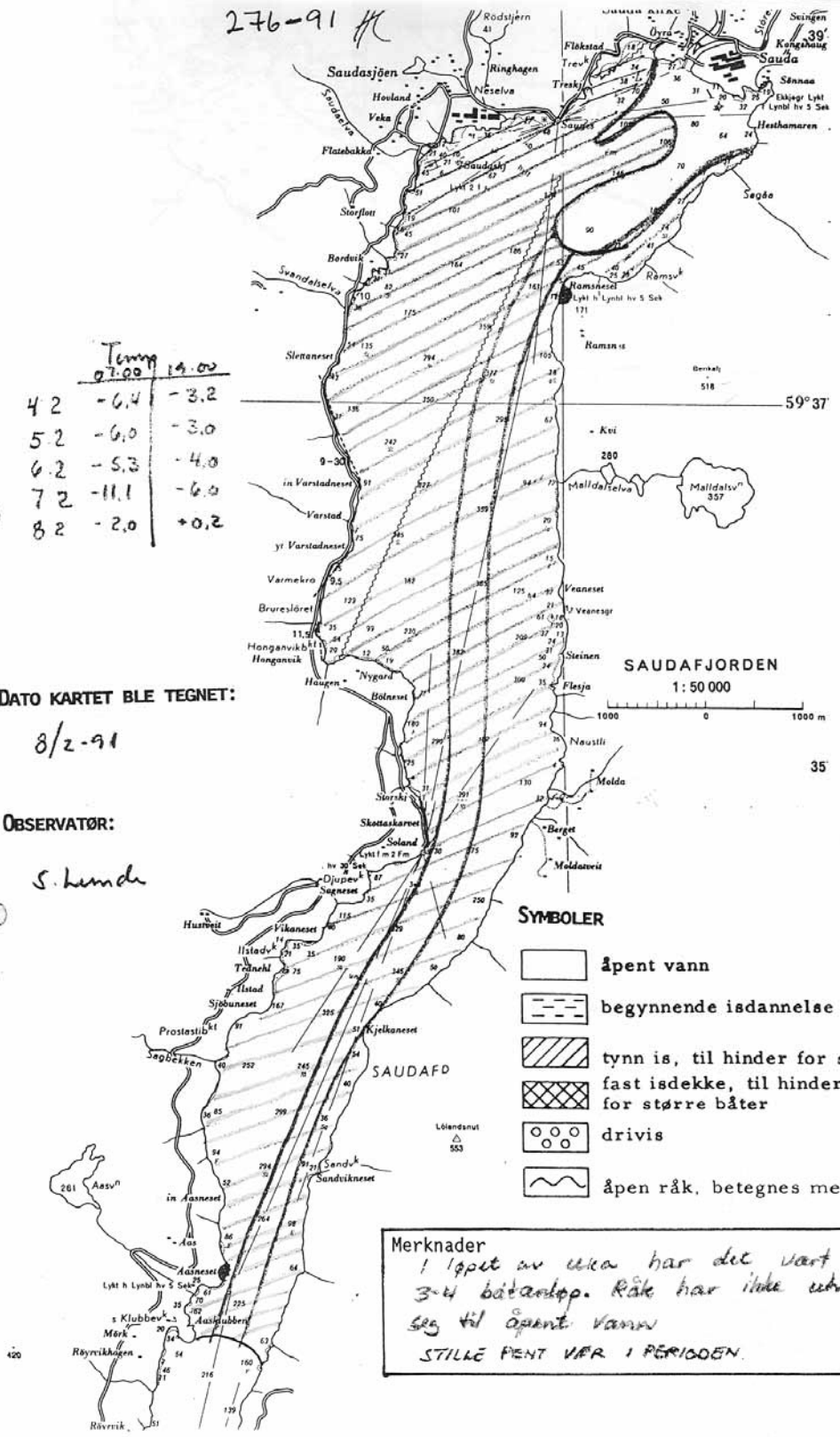
	Temp	
	07.00	14.00
42	-6.4	-3.2
52	-6.0	-3.0
62	-5.3	-4.0
72	-11.1	-6.0
82	-2.0	+0.2

DATO KARTET BLE TEGNET:

8/2-91

OBSERVATØR:

S. Lunde



**Merknader**  
 I løpet av uka har det vært  
 3-4 båtanløp. Råk har ikke utviklet  
 seg til åpent vann  
 STILLE PENT VÆR I PERIODEN.

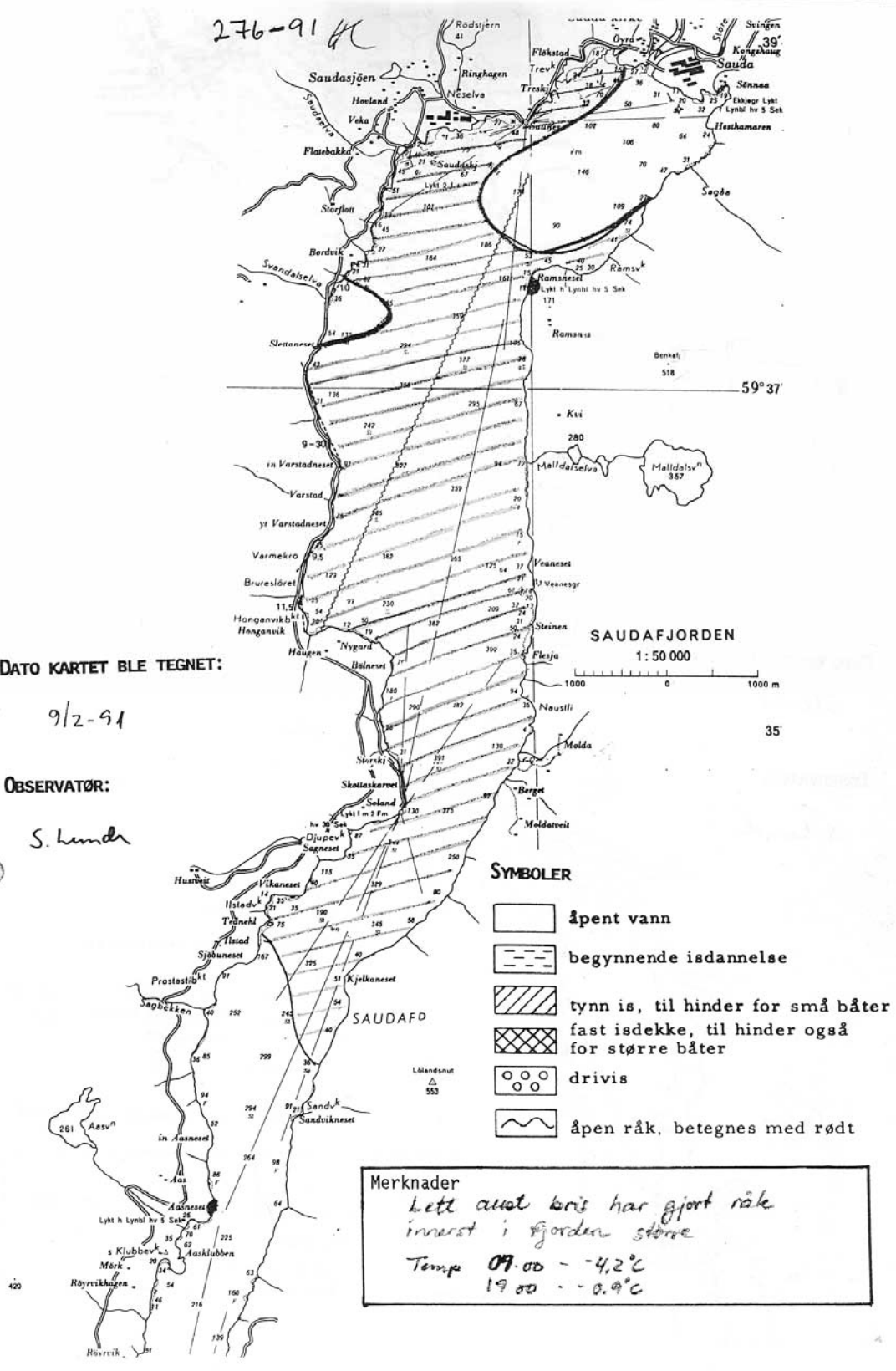
276-91 H

DATO KARTET BLE TEGNET:

9/2-91

OBSERVATÖR:

S. Lund



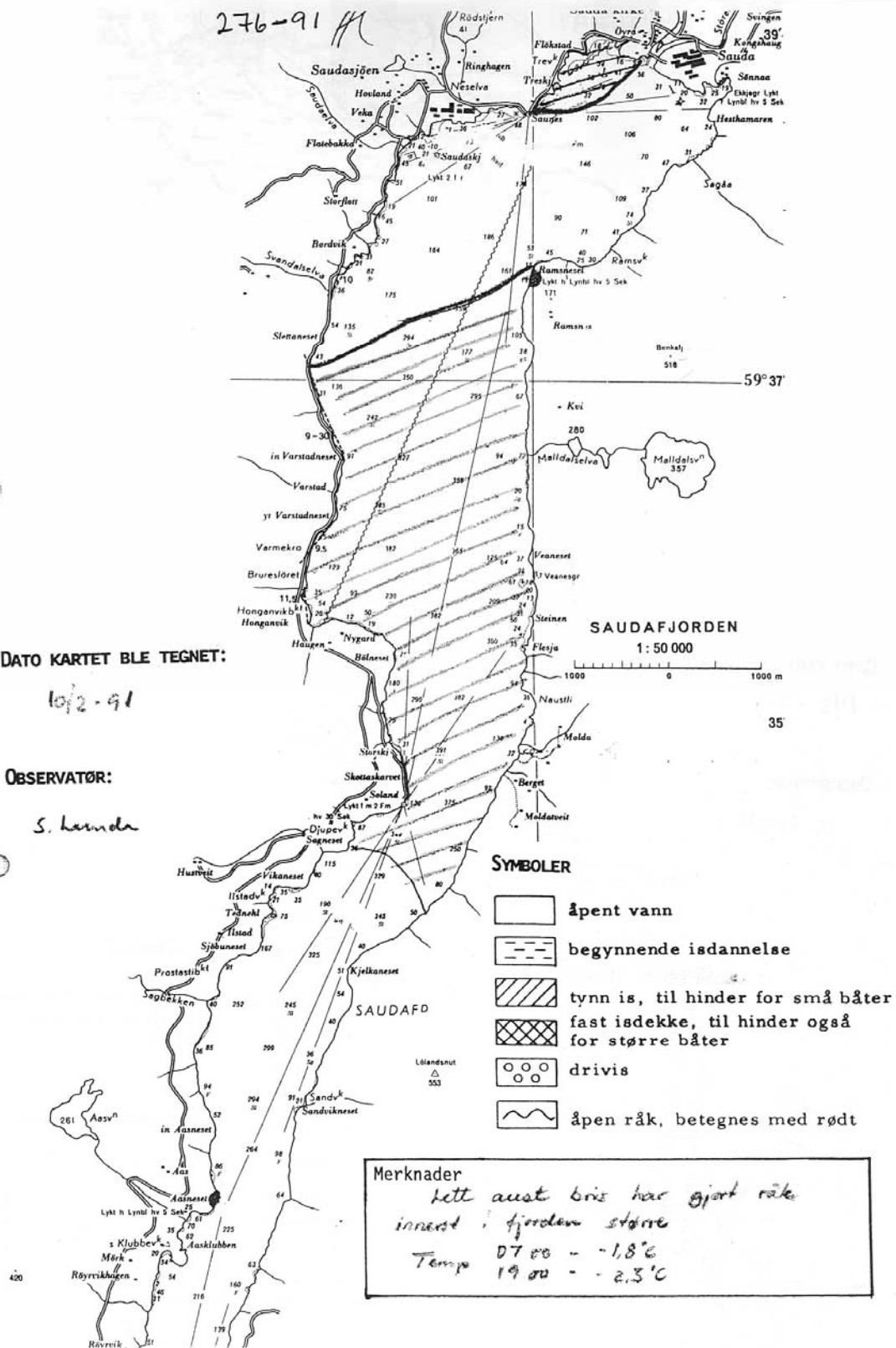
276-91 H

DATO KARTET BLE TEGNET:

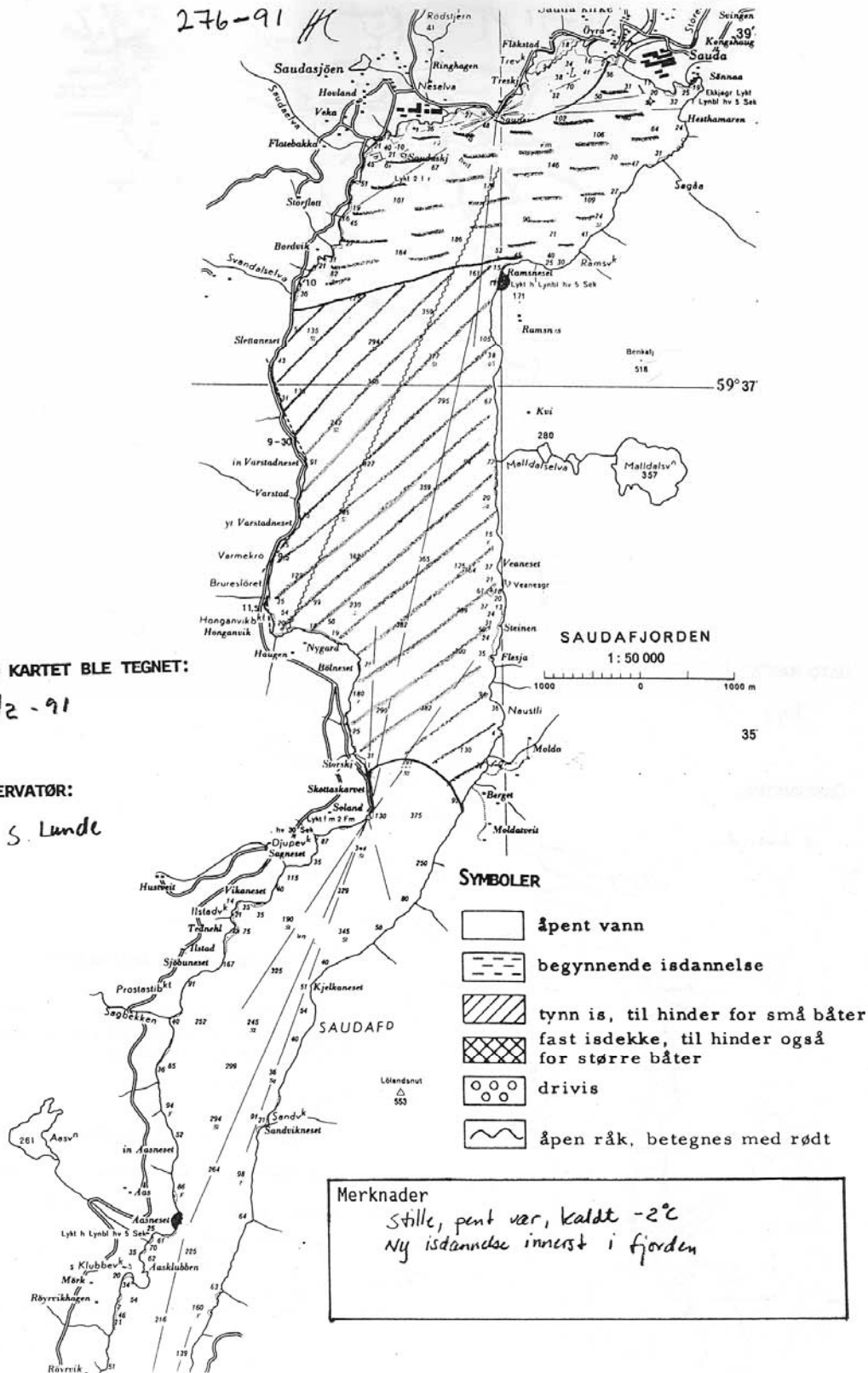
10/2-91

OBSERVATÖR:

S. Lammela



276-91 H









DATO KARTET BLE TEGNET:

11/2 - 91

OBSERVATØR:

S. Lunde

SYMBOLER

-  åpent vann
-  begynnende isdannelse
-  tynn is, til hinder for små båter
-  fast isdekke, til hinder også for større båter
-  dravis
-  åpen råk, betegnes med rødt

Merknader

Stille, pent vær, kaldt -2°C  
Ny isdannelse innerst i fjorden

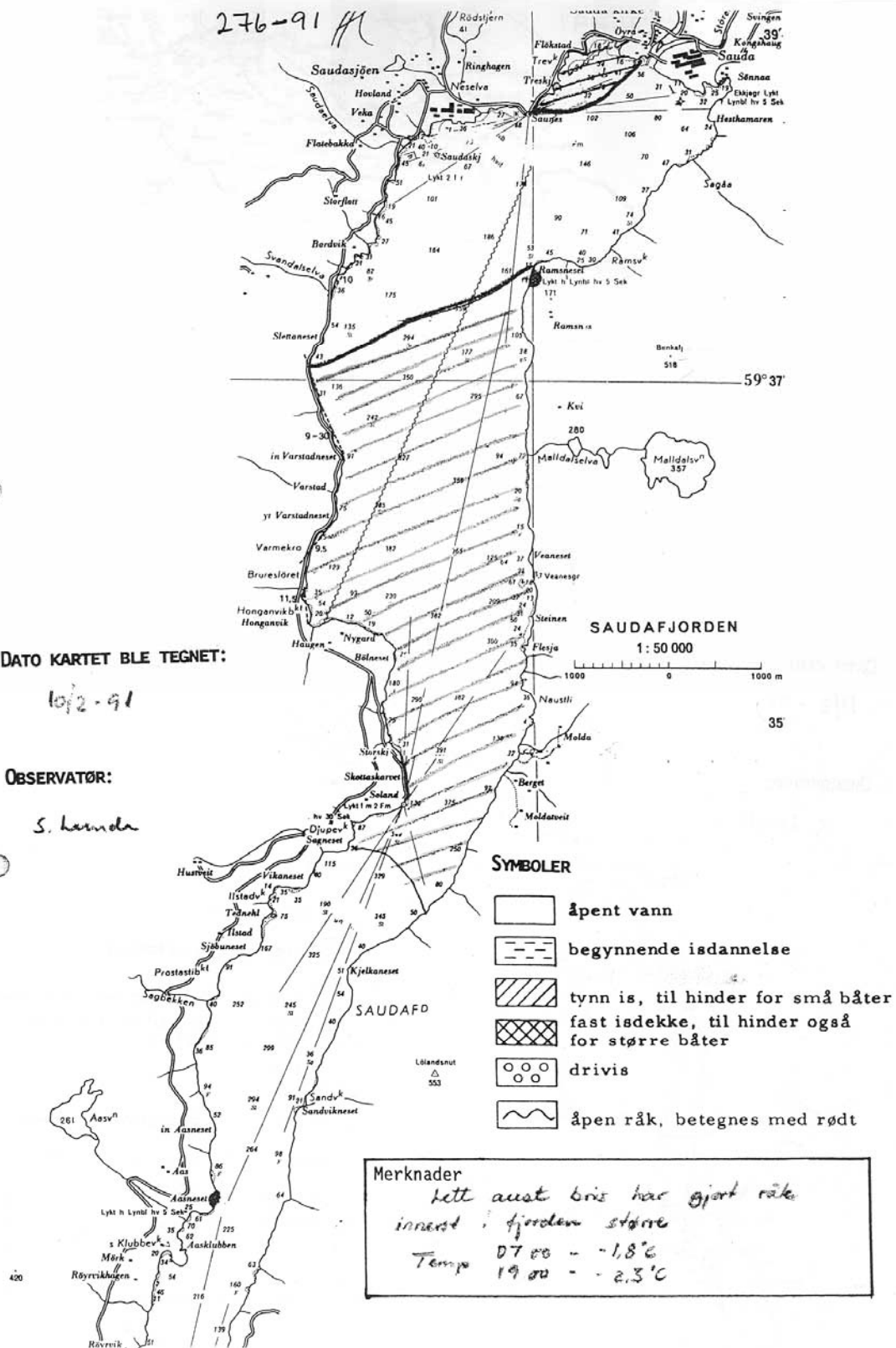
276-91 H

DATO KARTET BLE TEGNET:

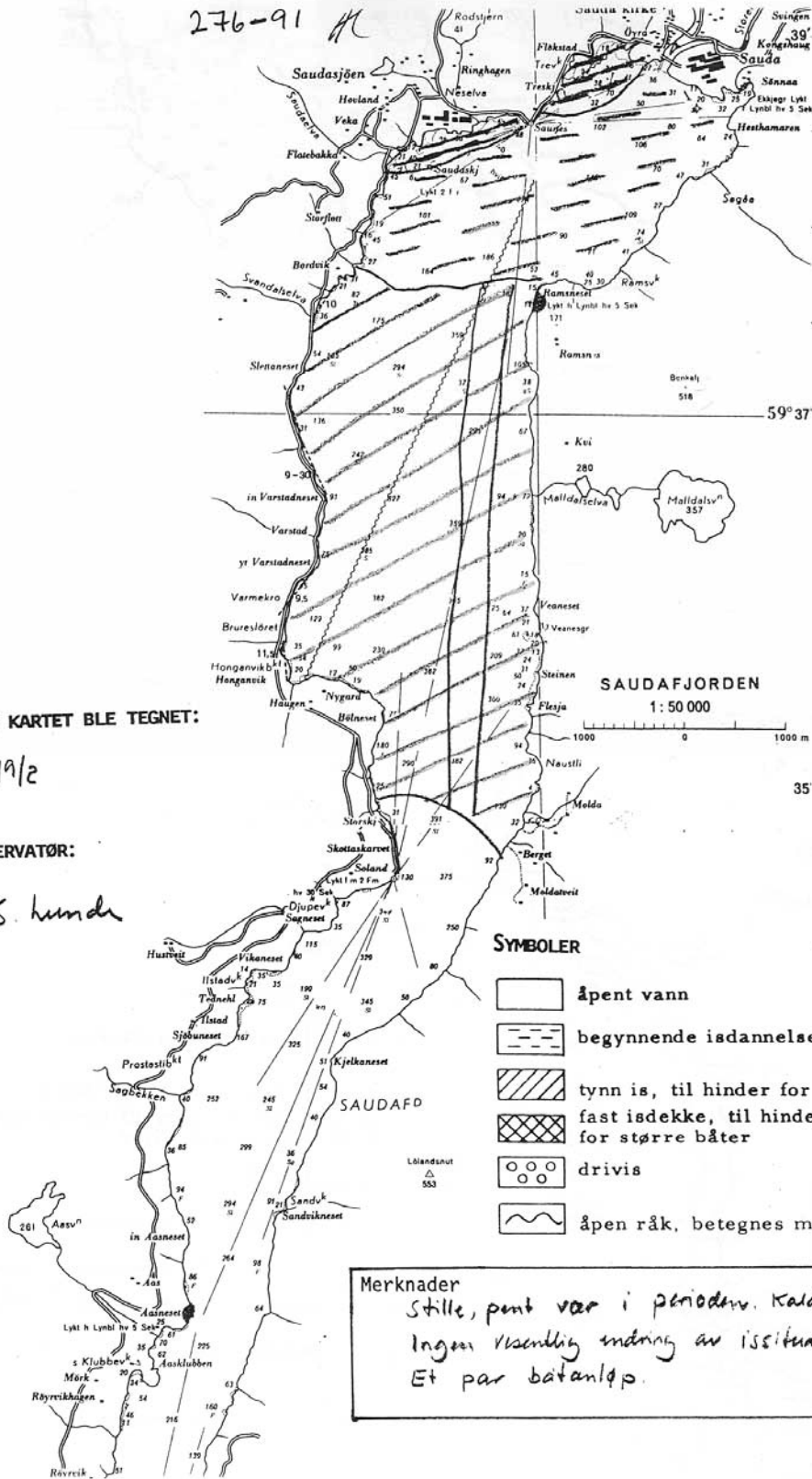
10/2-91

OBSERVATÖR:

S. Lammela



276-91 H



DATO KARTET BLE TEGNET:

19/2

OBSERVATØR:

S. Kunder

SYMBOLER

- åpent vann
- begynnende isdannelse
- tynn is, til hinder for små båter
- fast isdekke, til hinder også for større båter
- dravis
- åpen råk, betegnes med rødt

**Merknader**  
 Stille, pent vær i perioder. Kaldt  
 Ingen vesentlig endring av issituasjonen.  
 Et par båtanløp.



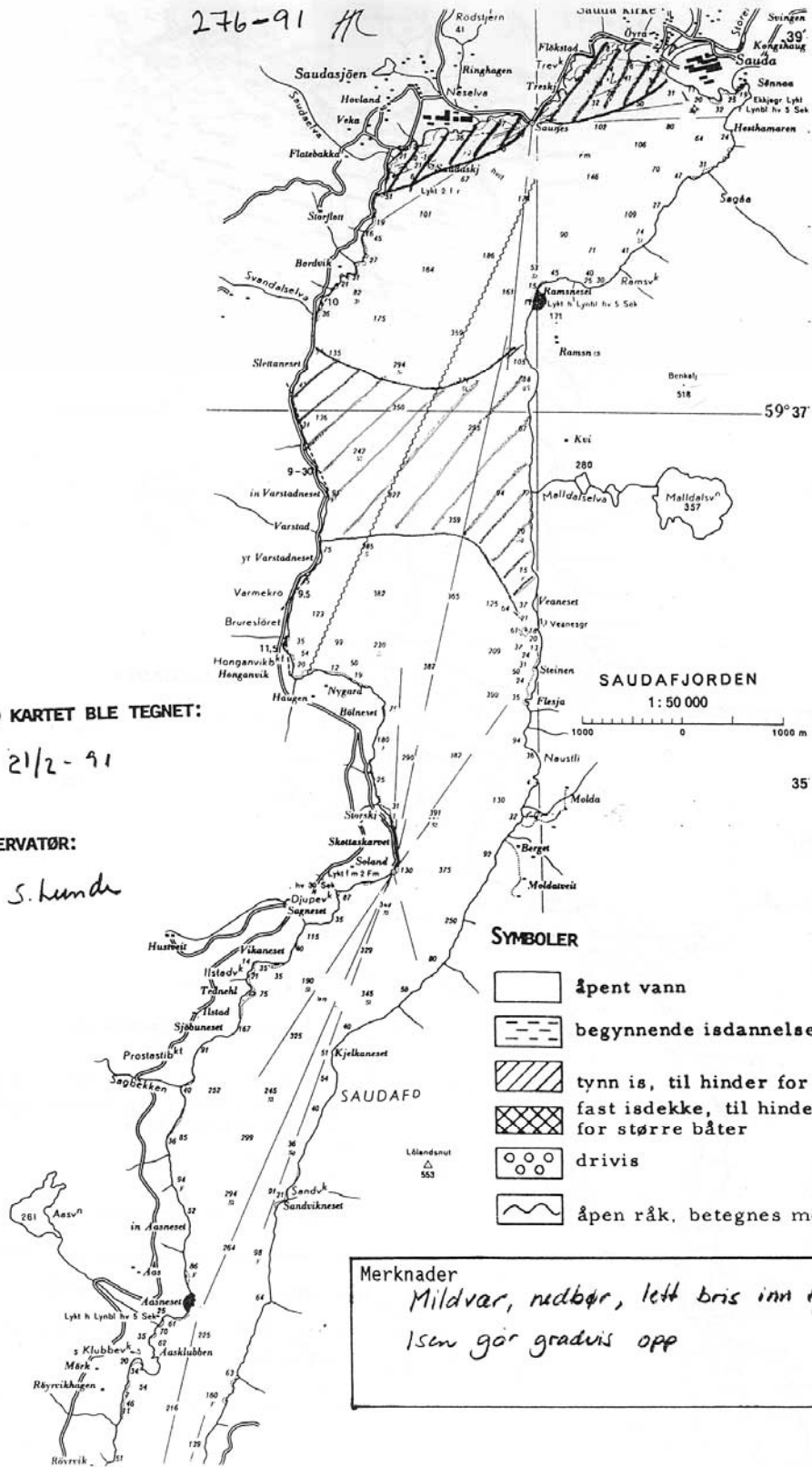
276-91 HC

DATO KARTET BLE TEGNET:

21/2-91

OBSERVATÖR:

S. Lund



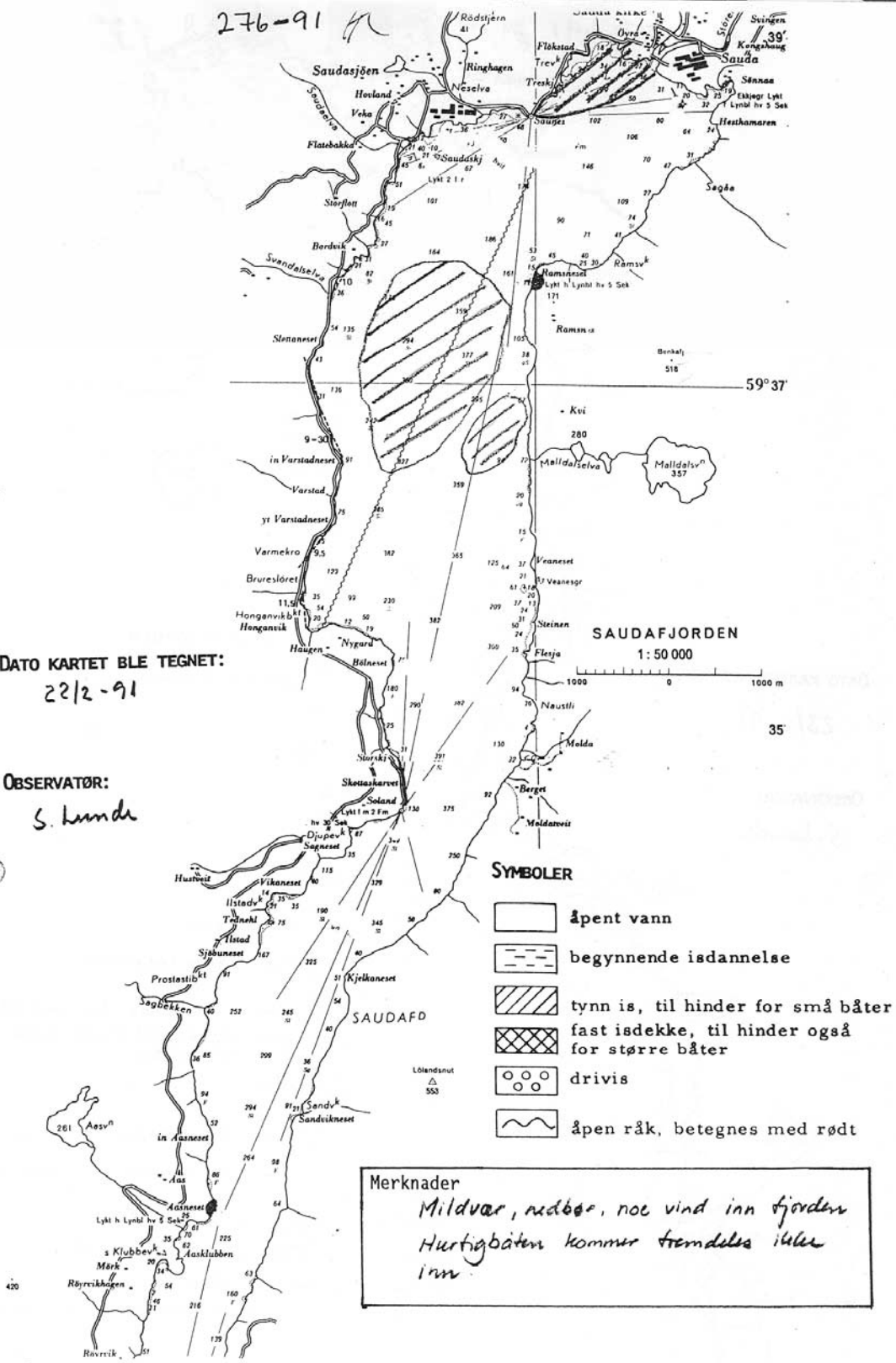
276-91

DATO KARTET BLE TEGNET:

22/2-91

OBSERVATØR:

S. Lund

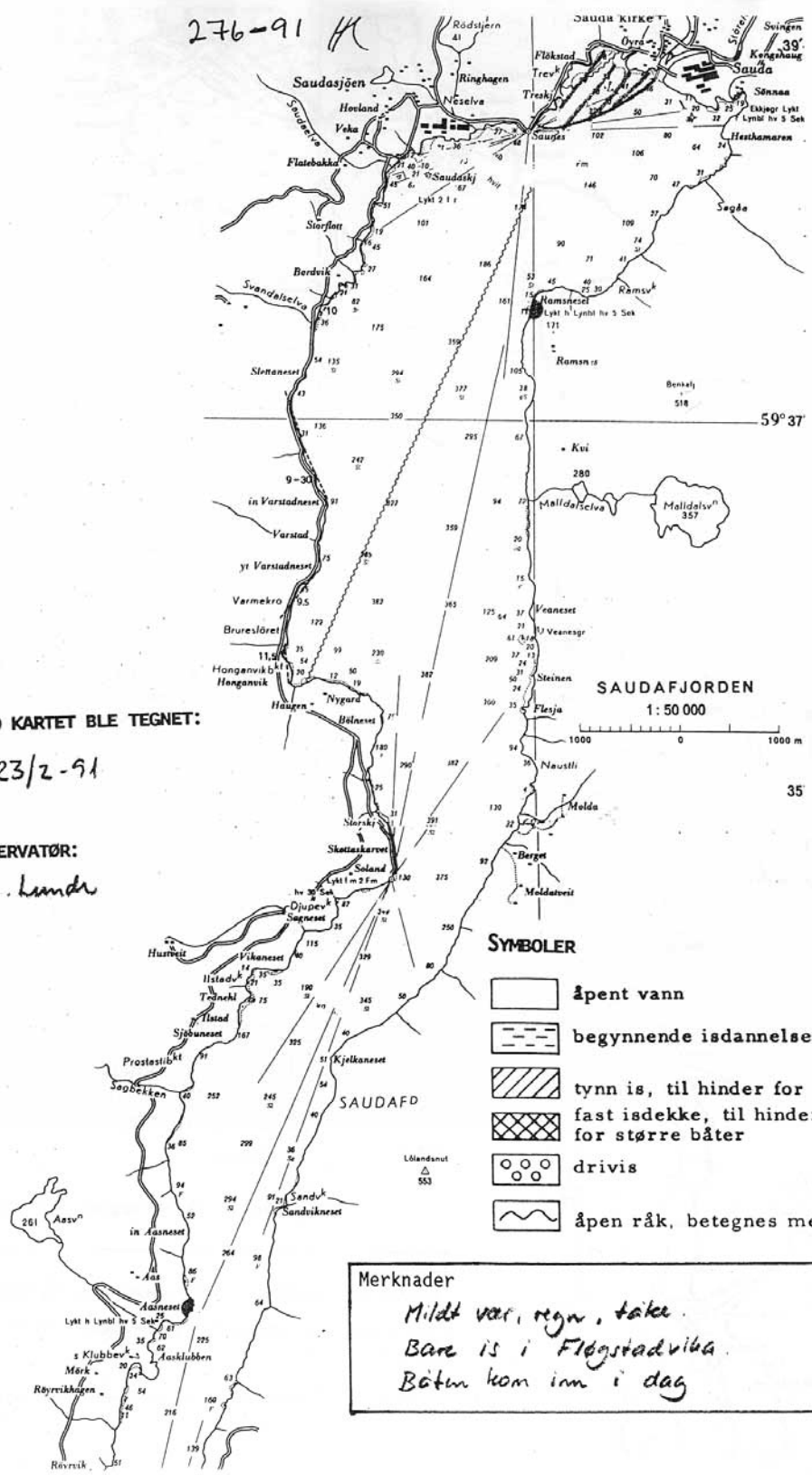


SYMBOLER

- åpent vann
- begynnende isdannelse
- tynn is, til hinder for små båter
- fast isdekke, til hinder også for større båter
- dravis
- åpen råk, betegnes med rødt

Merknader  
 Mildvar, redder, noe vind inn fjorden  
 Hurtigbåten kommer fremdeles ikke inn

276-91 H



DATO KARTET BLE TEGNET:

23/2-91

OBSERVATØR:

S. Lund

**SYMBOLER**

- åpent vann
- begynnende isdannelse
- tynn is, til hinder for små båter
- fast isdekke, til hinder også for større båter
- dravis
- åpen råk, betegnes med rødt

**Merknader**

Mildt vær, regn, tåke.  
 Bare is i Fløgstadvika.  
 Båten kom inn i dag

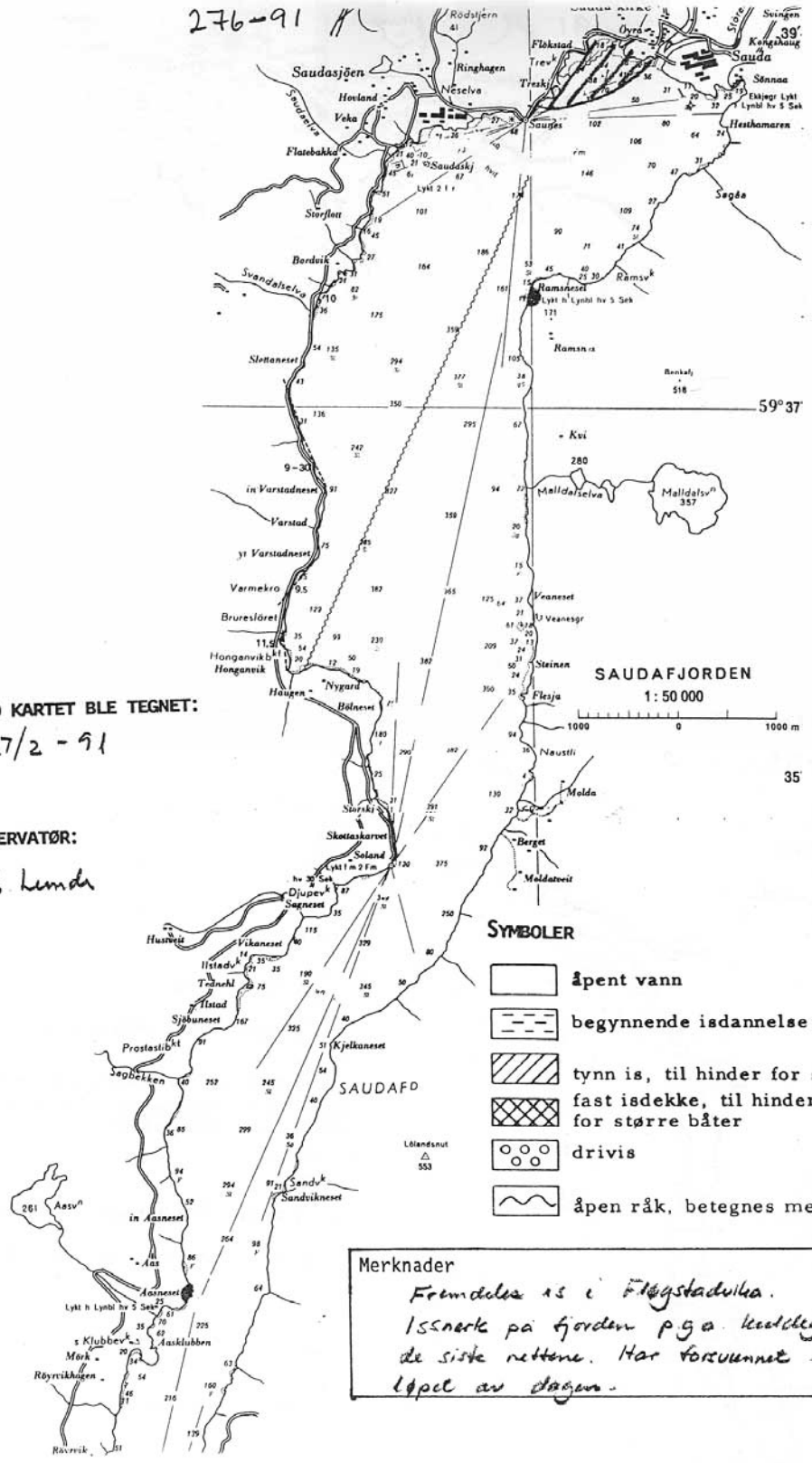
276-91

DATO KARTET BLE TEGNET:

27/2 - 91

OBSERVATØR:

S. Lemda



**SYMBOLER**

- åpent vann
- begynnende isdannelse
- tynn is, til hinder for små båter
- fast isdekke, til hinder også for større båter
- dravis
- åpen råk, betegnes med rødt

**Merknader**  
 Fremdeles is i Fjellstadvika.  
 Issnerte på fjorden p.g.a. kystfjellrøder  
 de siste nettene. Har forsvunnet i  
 løpet av dagen.

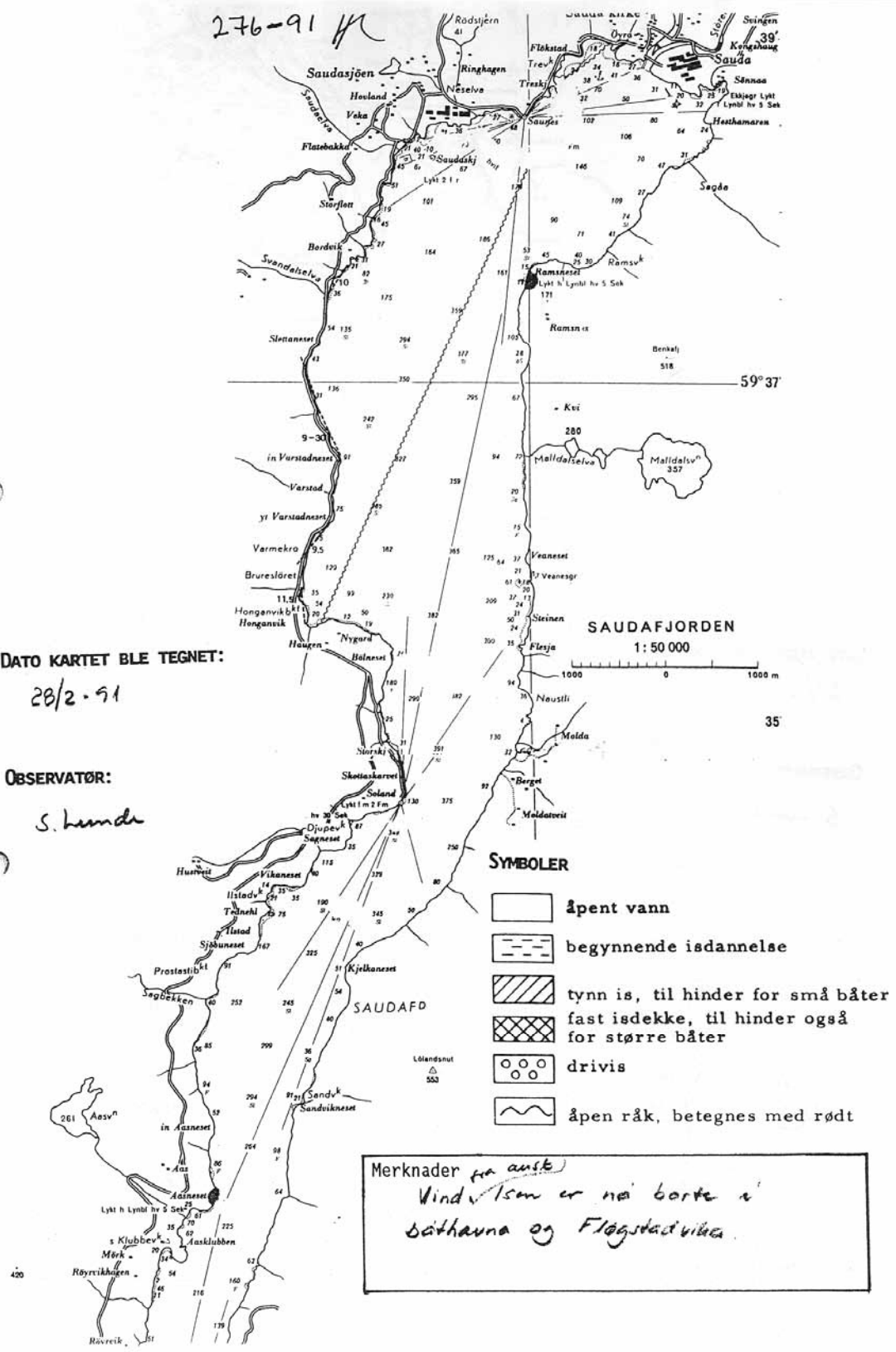
276-91 H

DATO KARTET BLE TEGNET:

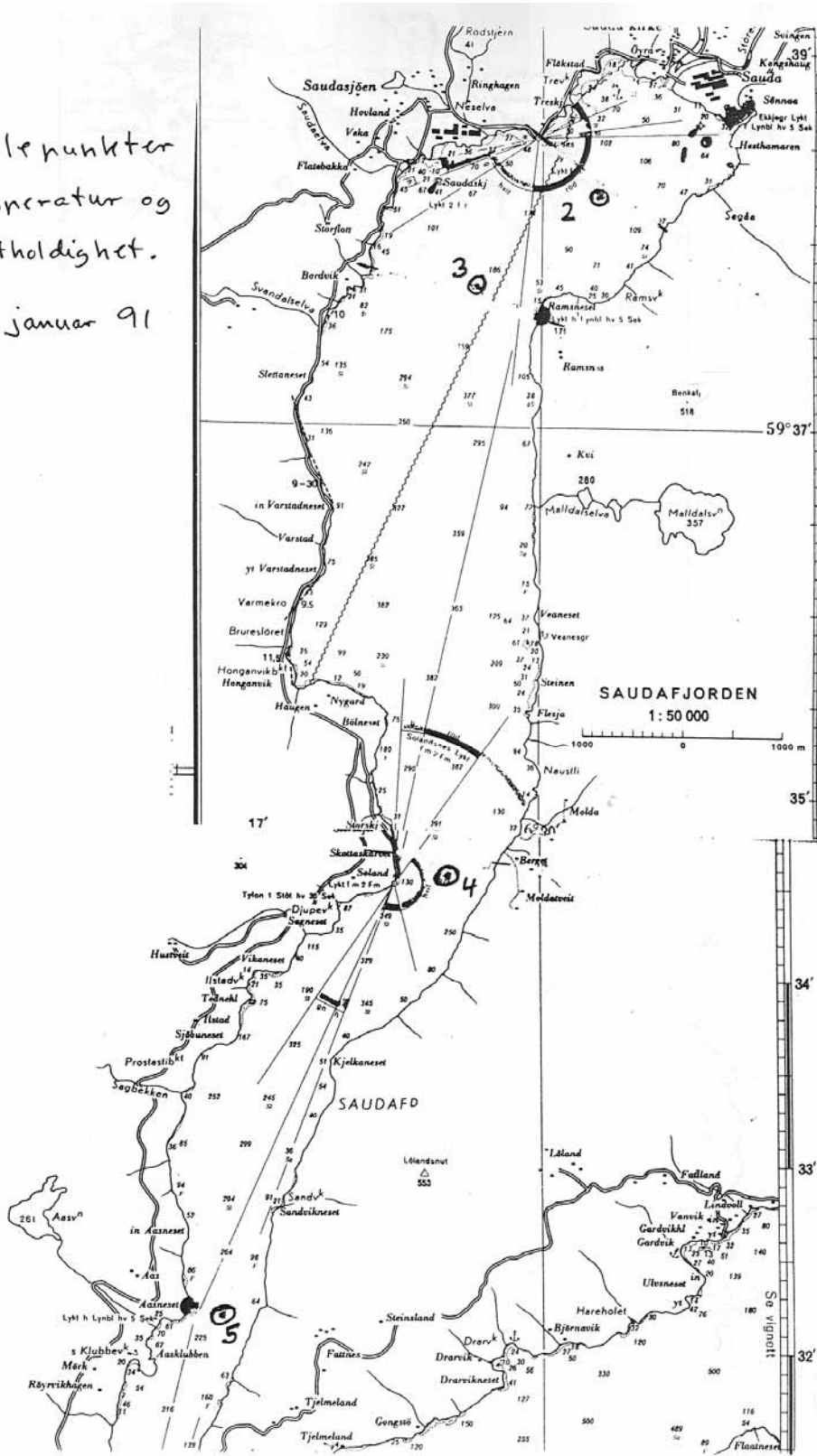
28/2-91

OBSERVATÖR:

S. Hamre



Målepunkter  
Temperatur og  
Saltholdighet.  
Fra januar 91



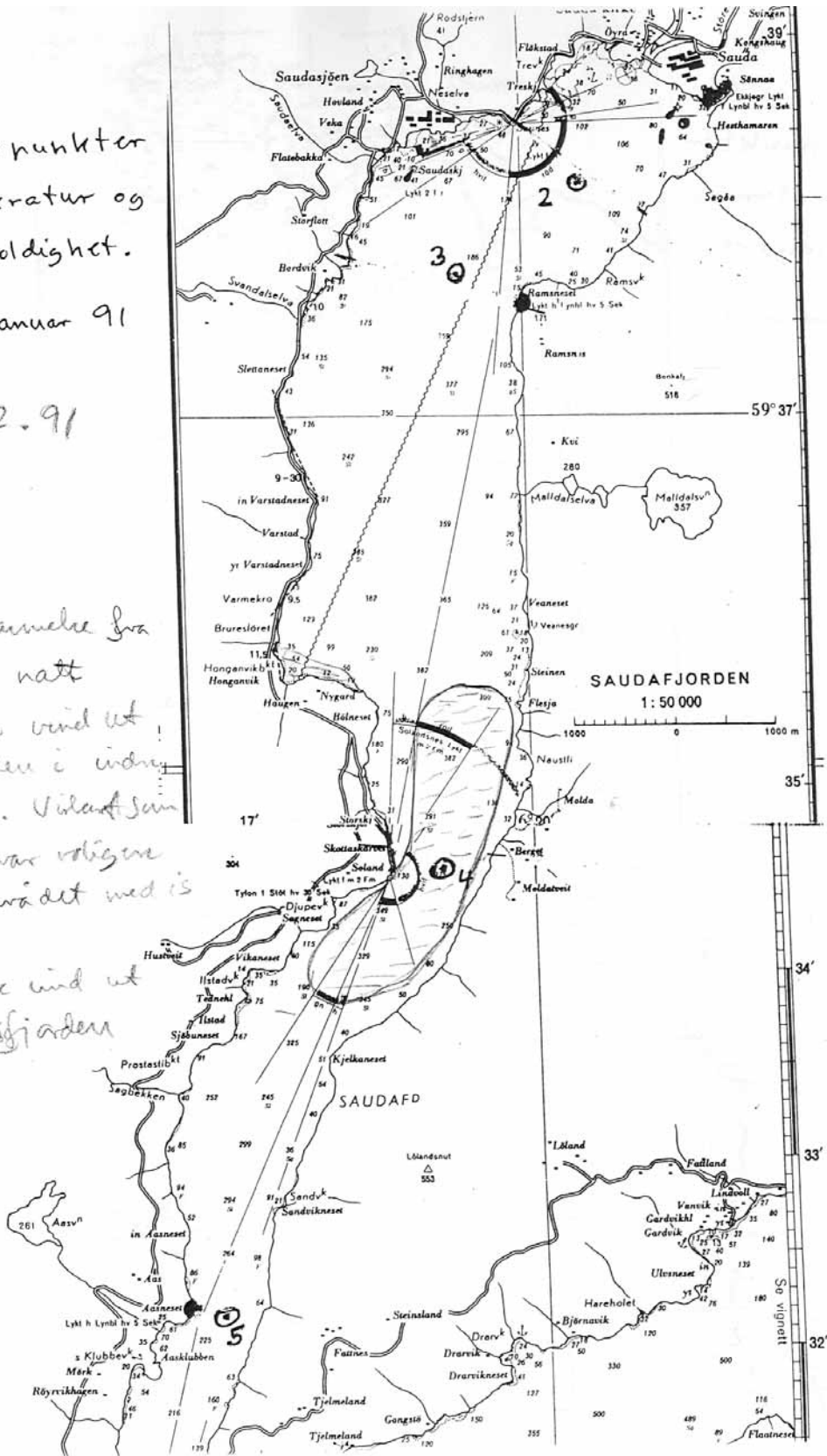
Målepunkter  
temperatur og  
saltholdighet.

Fra januar 91

28.2.91

Beskrivelse fra  
sist natt  
Størke vind ut,  
fjorden i vidre  
del. Vind som  
det var tidligere  
i området med is

Størke vind ut  
Hylsfjorden



276-91

Temp.

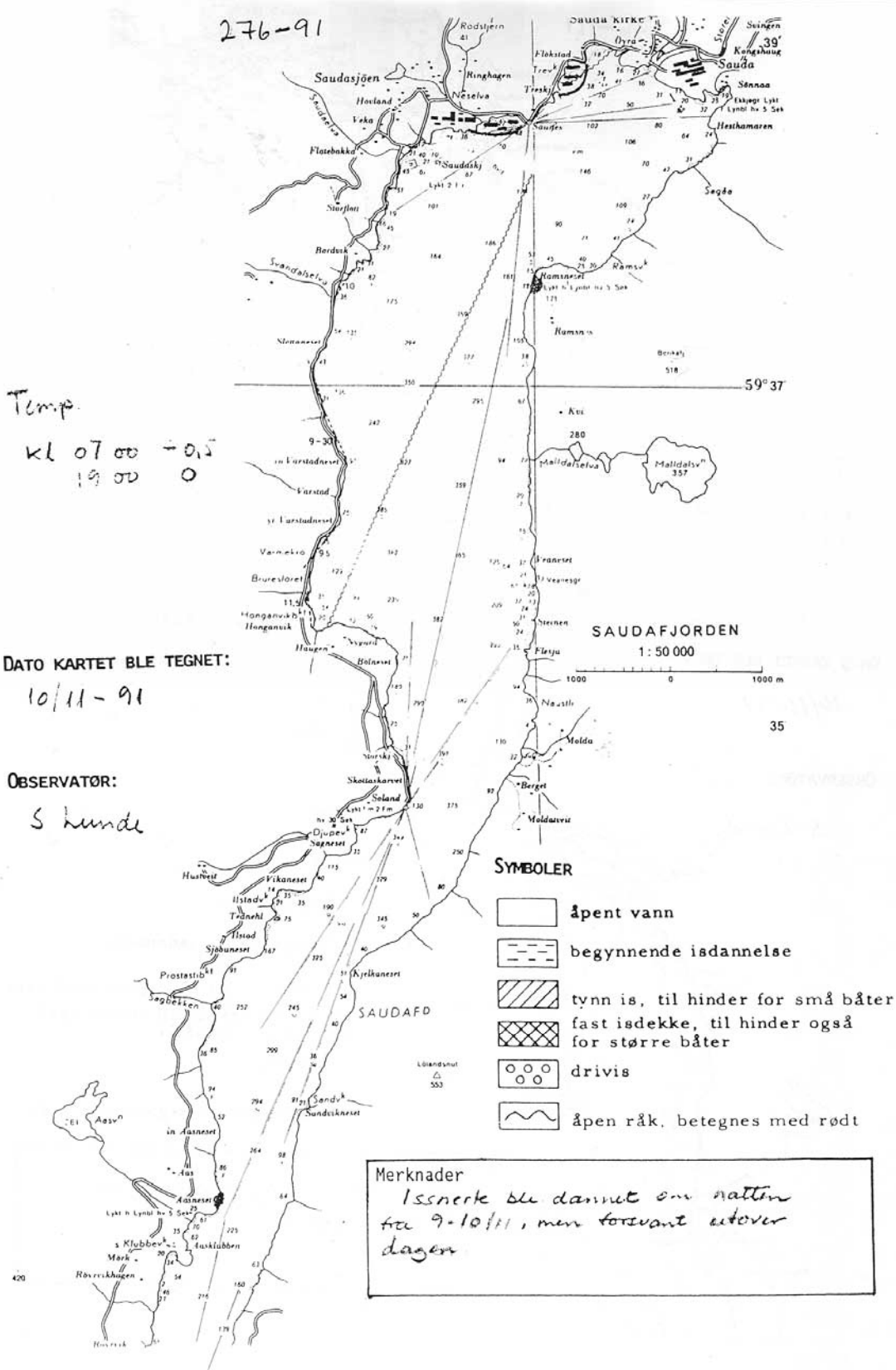
kl 07 00 - 0,5  
19 00 0

DATO KARTET BLE TEGNET:

10/11-91

OBSERVATÖR:

S hunde





276-91

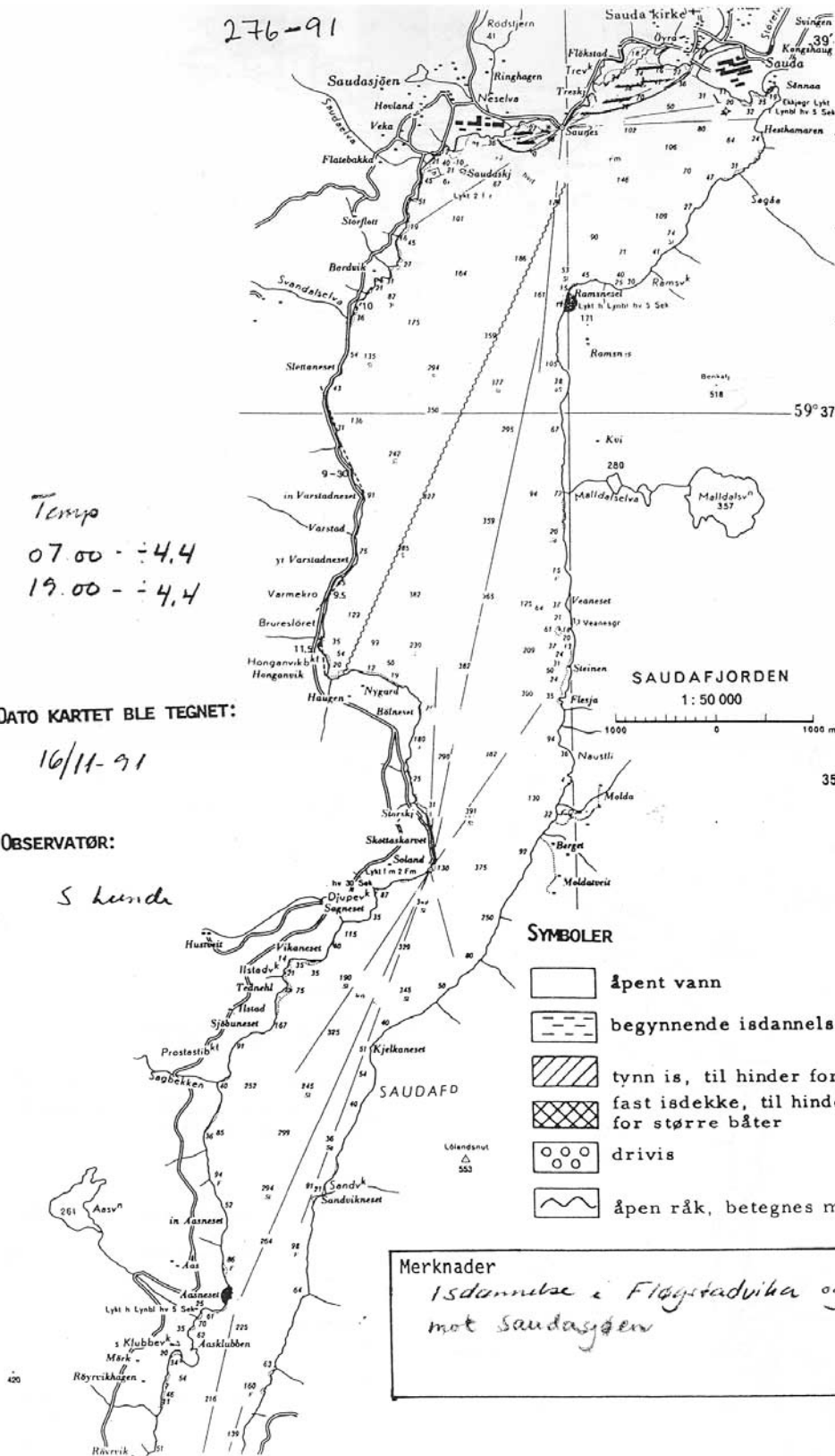
Temp  
07.00 - -4.4  
19.00 - -4.4

DATO KARTET BLE TEGNET:

16/11-91

OBSERVATØR:

S kunde



276-91

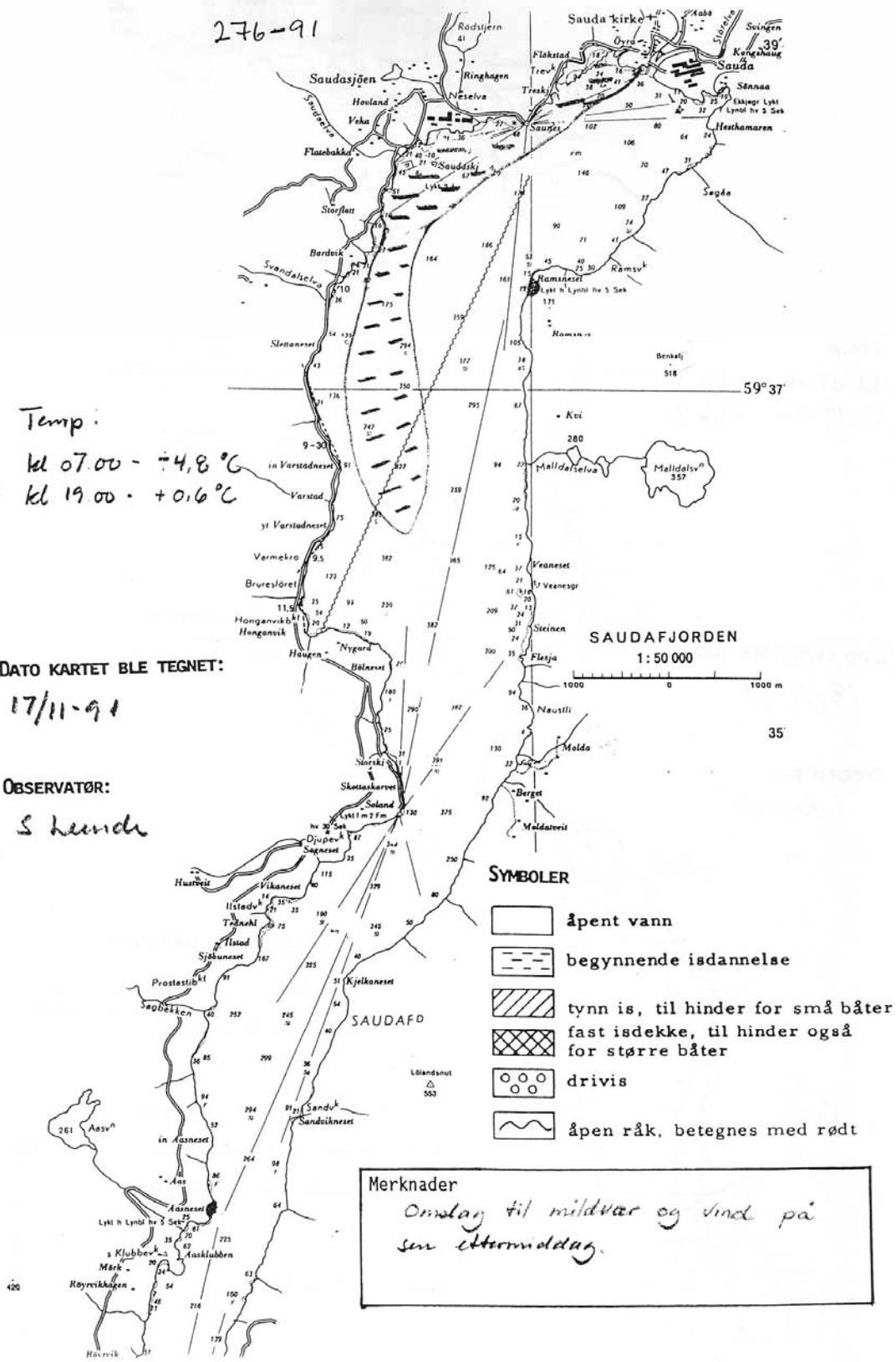
Temp:  
kl 07.00 - +4,8 °C  
kl 19.00 - +0,6 °C

DATO KARTET BLE TEGNET:

17/11-91

OBSERVATØR:

S Lunde



276-91

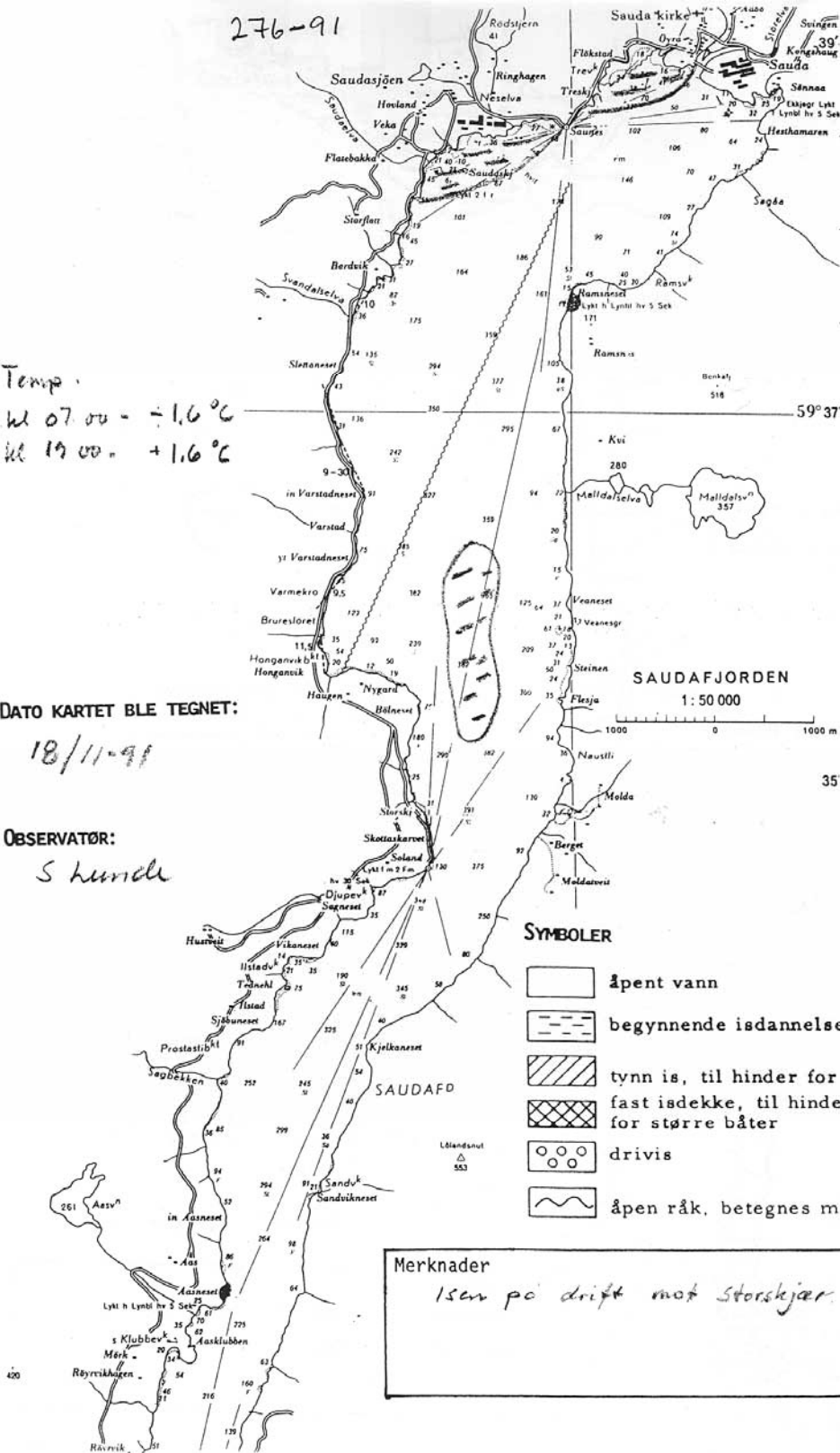
Temp.  
kl 07.00 = -1.6 °C  
kl 19.00 = +1.6 °C

DATO KARTET BLE TEGNET:

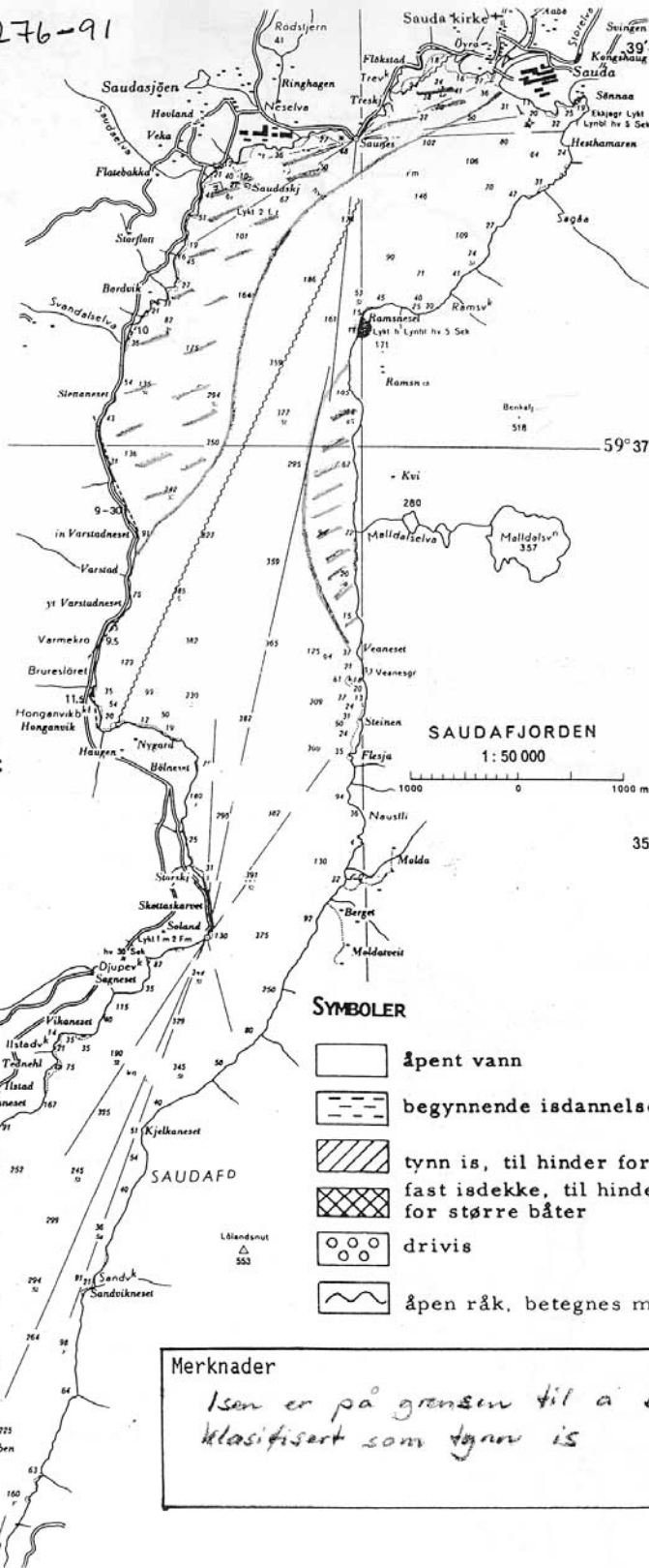
18/11-91

OBSERVATÖR:

S. Lund



276-91



Temp  
 07 00 - -5,3°C  
 19 00 + 2,0°C







DATO KARTET BLE TEGNET:

19/11-91

OBSERVATØR:

S. Kinneth

SYMBOLER

-  åpent vann
-  begynnende isdannelse
-  tynn is, til hinder for små båter
-  fast isdekke, til hinder også for større båter
-  dravis
-  åpen råk, betegnes med rødt

Merknader

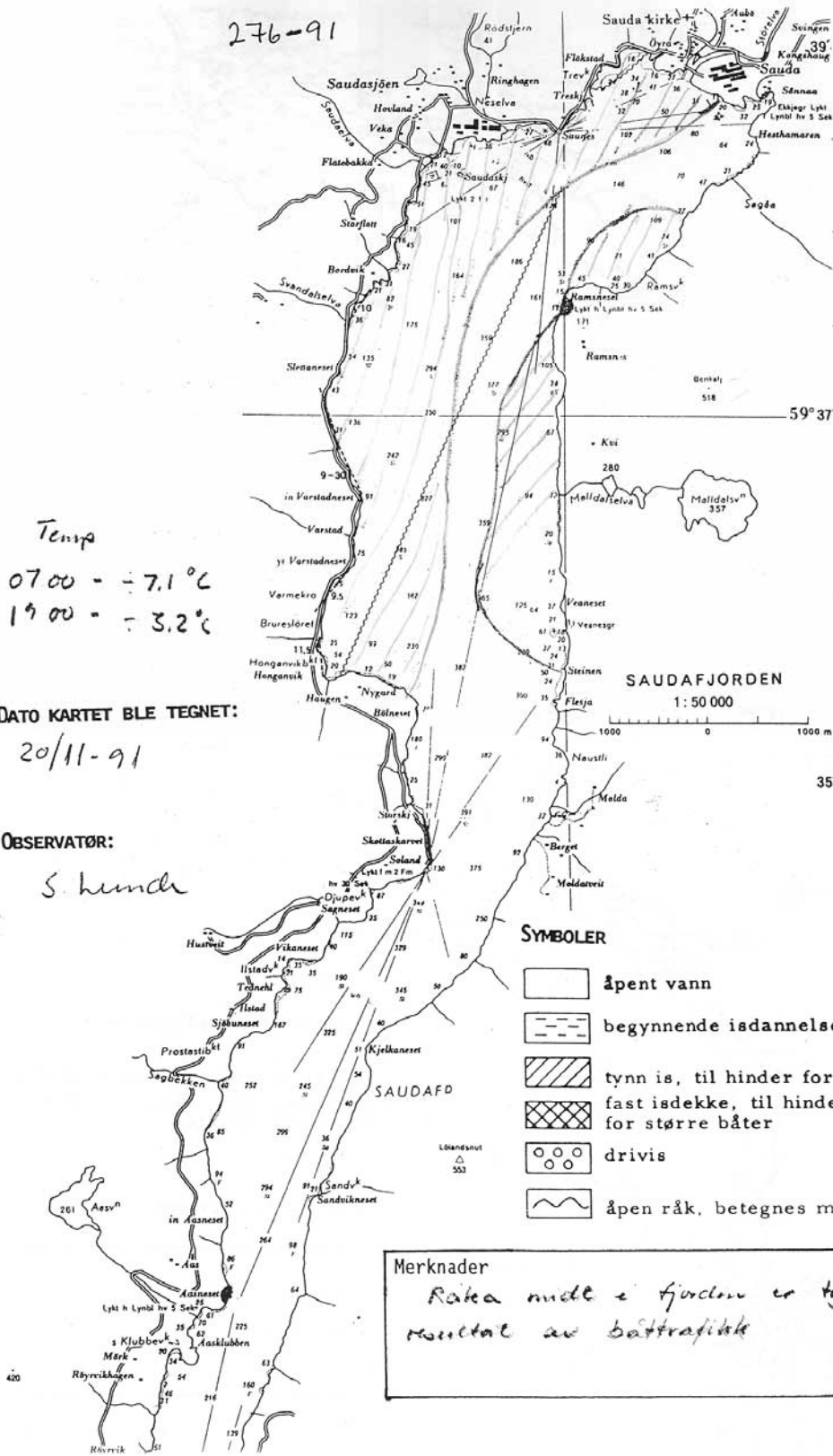
Isen er på grensen til å bli klassifisert som tynn is

276-91

Temp  
0700 = -7.1 °C  
1900 = -3.2 °C

DATO KARTET BLE TEGNET:  
20/11-91

OBSERVATØR:  
S. hunch



276-91

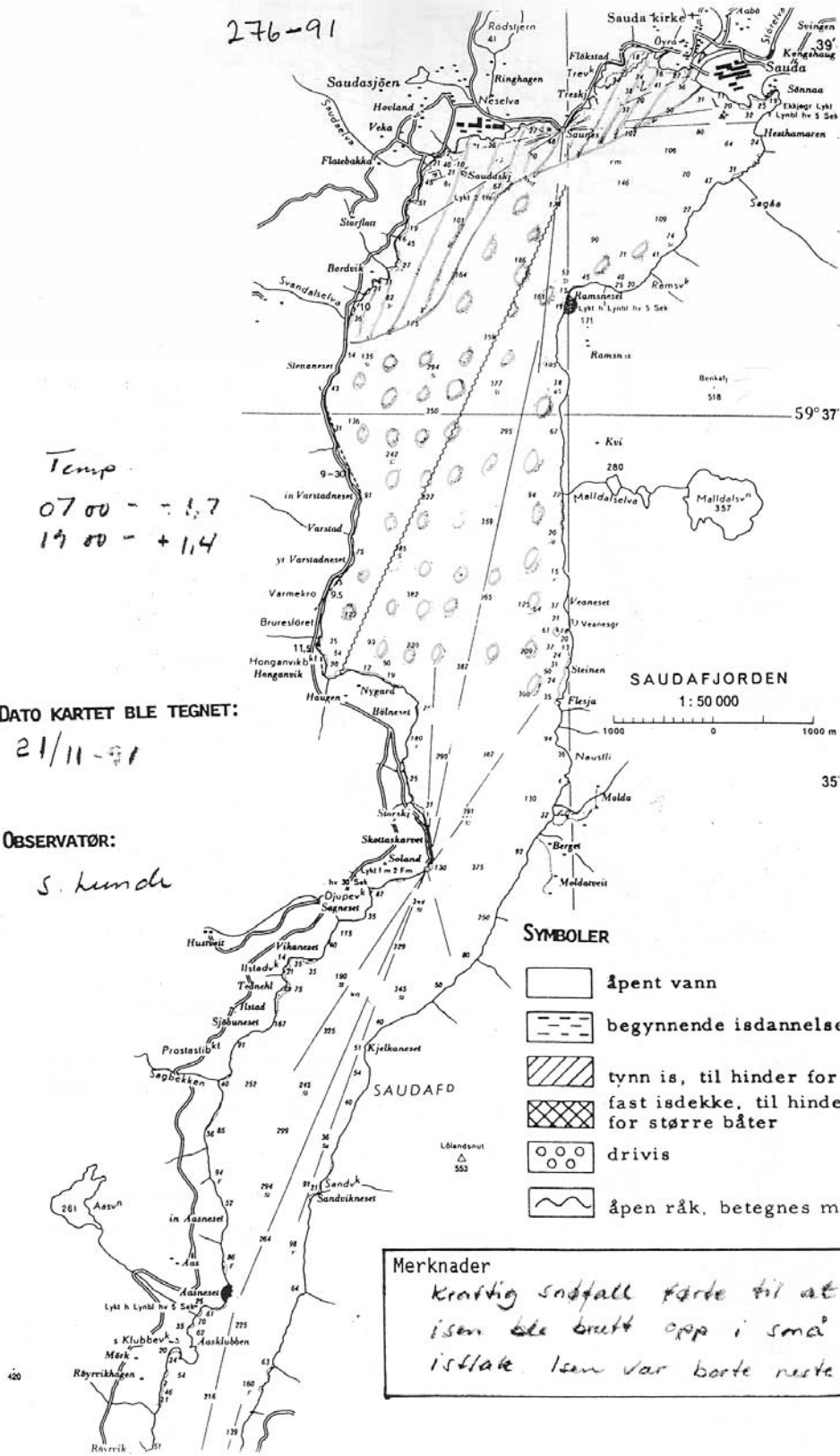
Temp  
07 00 - - 1,7  
19 00 - + 1,4

DATO KARTET BLE TEGNET:

21/11-91

OBSERVATØR:

S. Kunder



276-91

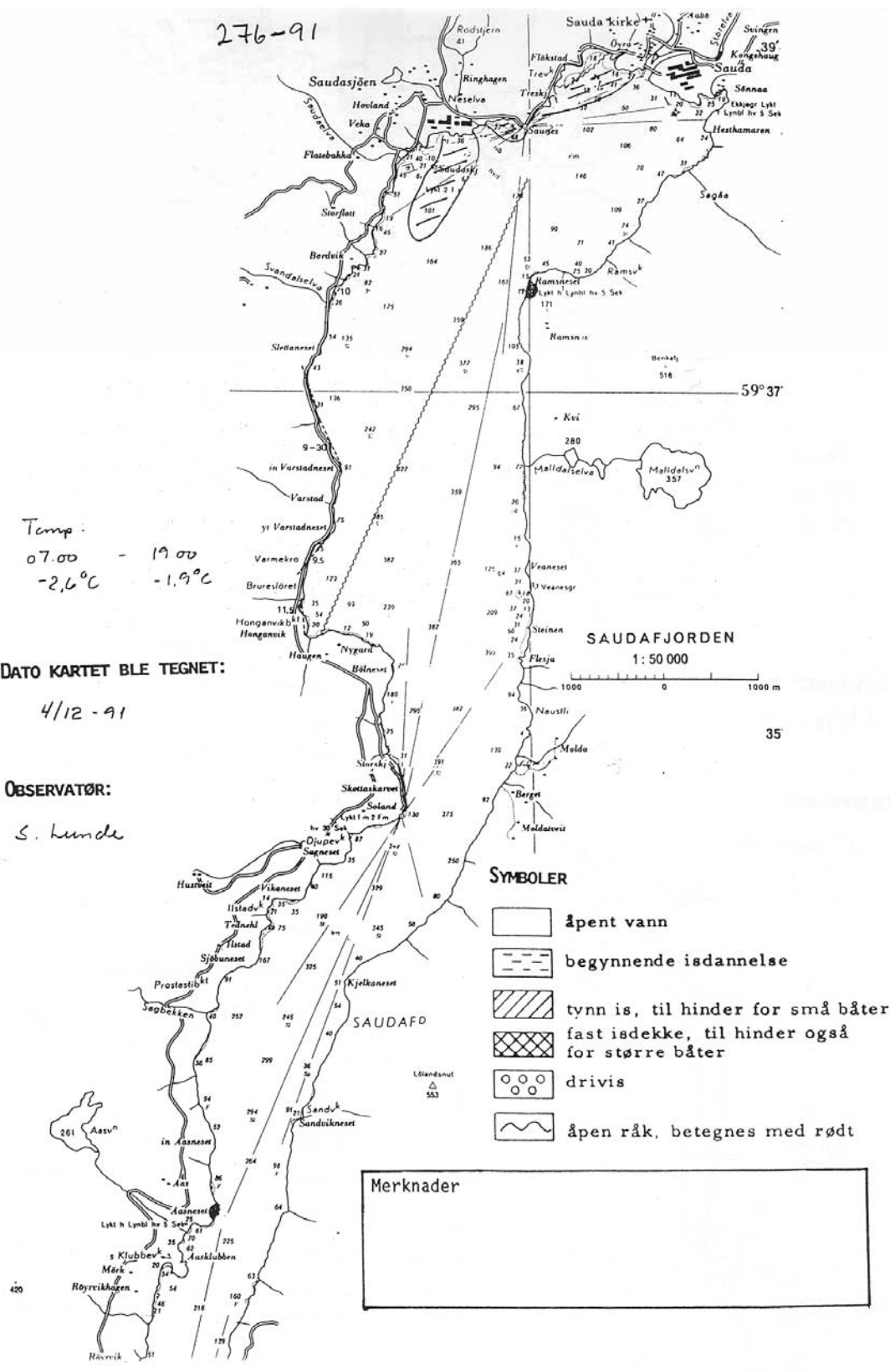
Temp:  
07.00 - 19.00  
-2,6°C - -1,9°C

DATO KARTET BLE TEGNET:

4/12 - 91

OBSERVATØR:

S. Kunde



276-91

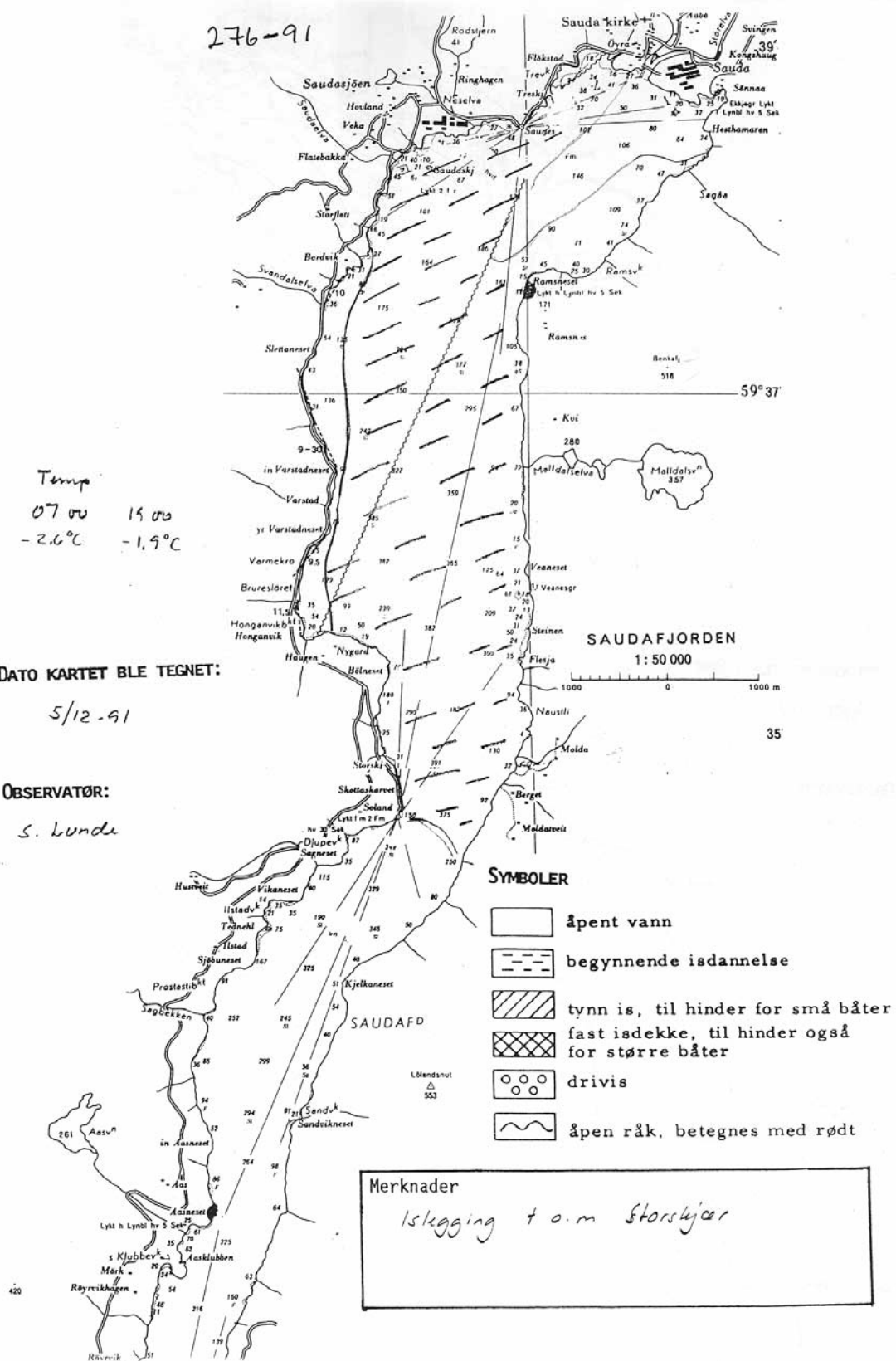
Temp  
07.00 15.00  
-2.6°C -1.9°C

DATO KARTET BLE TEGNET:

5/12-91

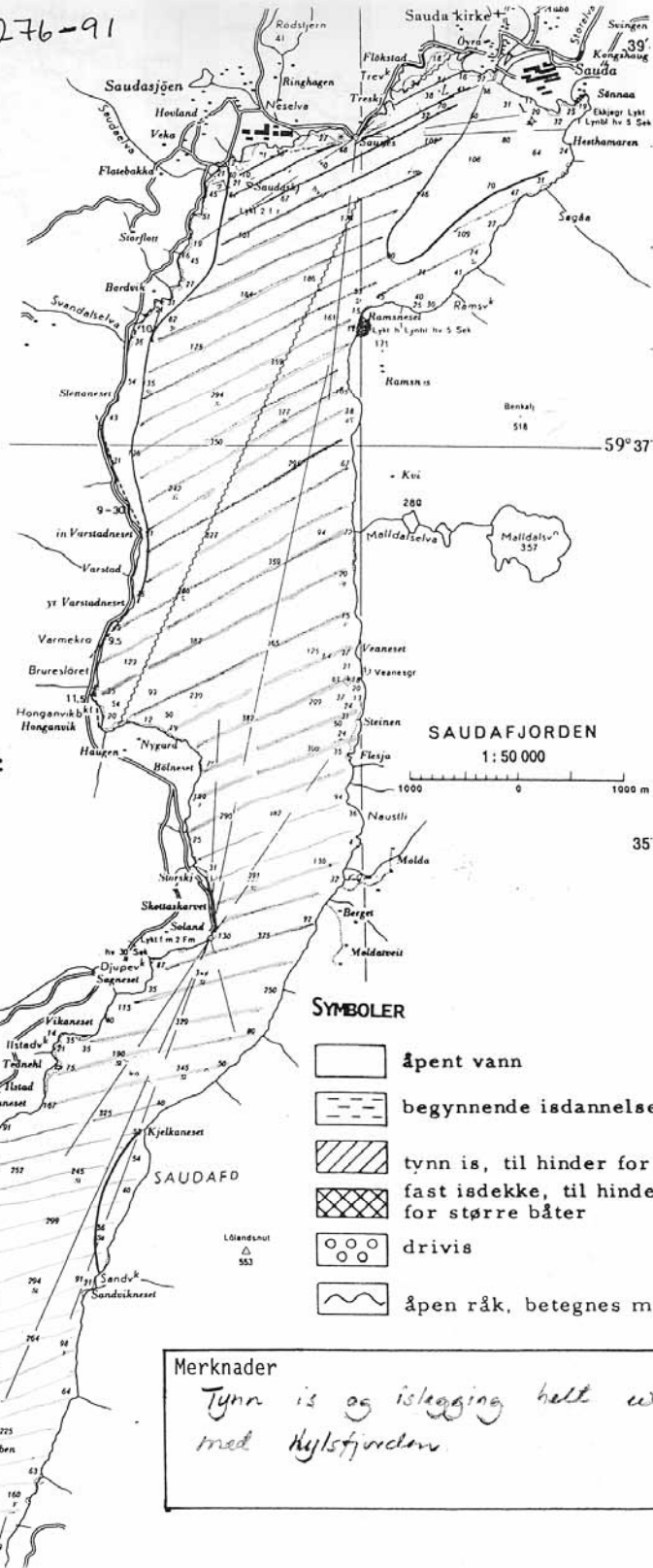
OBSERVATØR:

S. Lunde





276-91



Temp:  
 07.00 19.00  
 -4.5°C -4.8°C

DATO KARTET BLE TEGNET:

6/12 -91

OBSERVATØR:

S. Kunde

SYMBOLER

- åpent vann
- begynnende isdannelse
- tynn is, til hinder for små båter
- fast isdekke, til hinder også for større båter
- drivis
- åpen råk, betegnes med rødt

Merknader

Tynn is og islegging helt ut med Hylsfjorden.

276-91

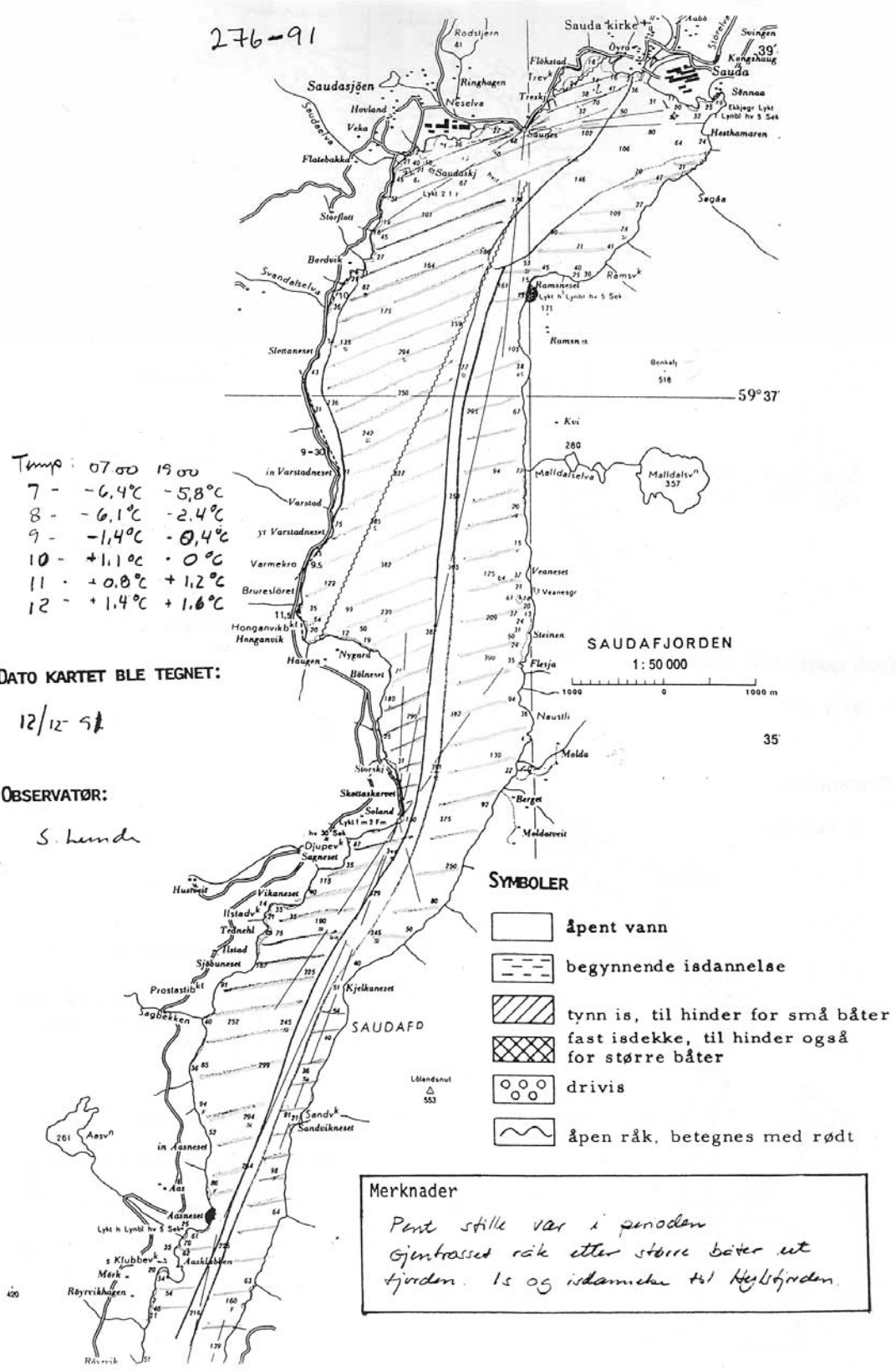
Temp: 07.00 19.00  
 7 - -6.4°C -5.8°C  
 8 - -6.1°C -2.4°C  
 9 - -1.4°C -0.4°C  
 10 - +1.1°C 0°C  
 11 - +0.0°C +1.2°C  
 12 - +1.4°C +1.6°C

DATO KARTET BLE TEGNET:

12/12-51

OBSERVATØR:

S. Lund



276-91

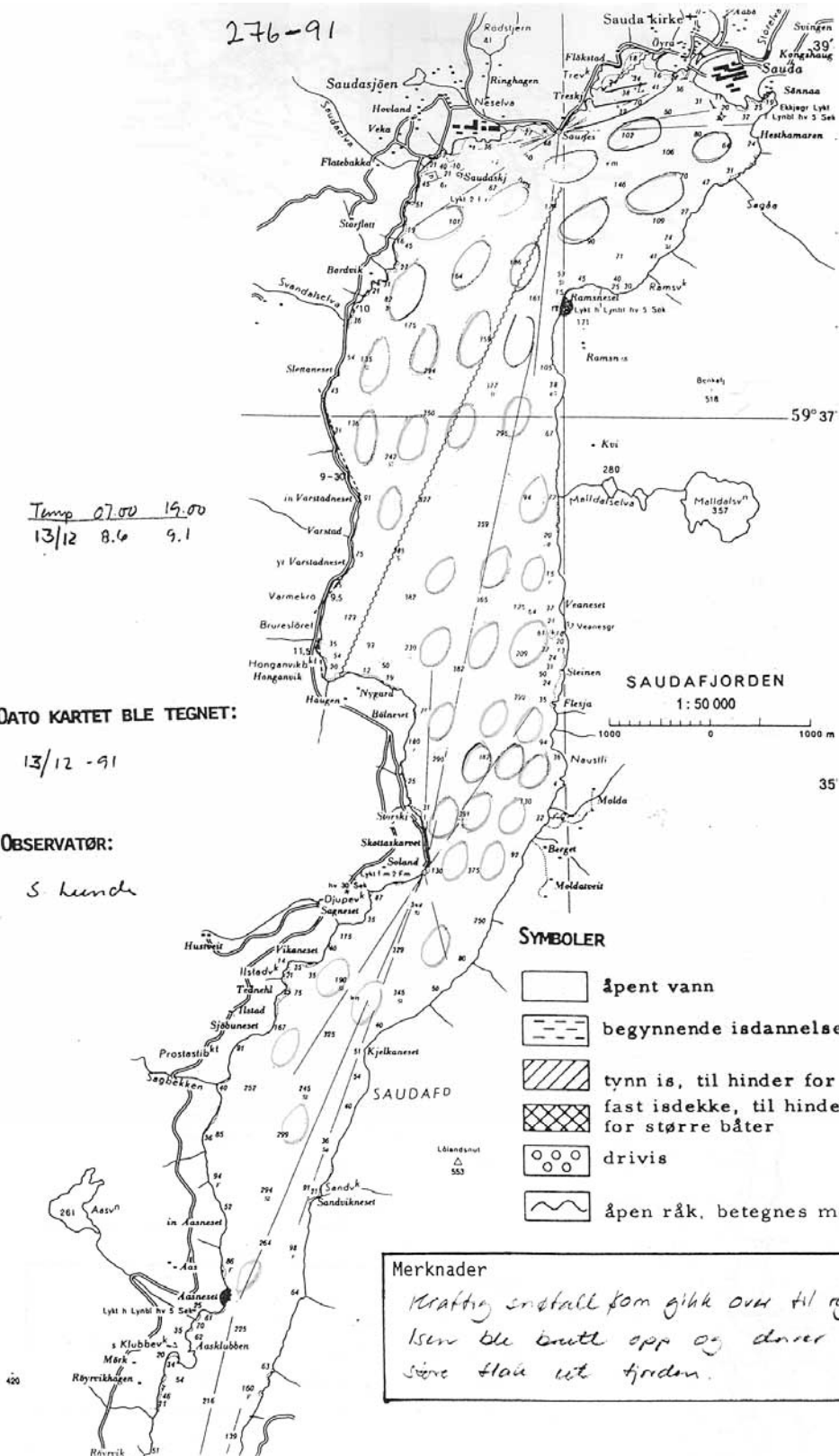
Temp 07.00 19.00  
13/12 8.6 9.1

DATO KARTET BLE TEGNET:

13/12 - 91

OBSERVATØR:

S. Kunch



276-91

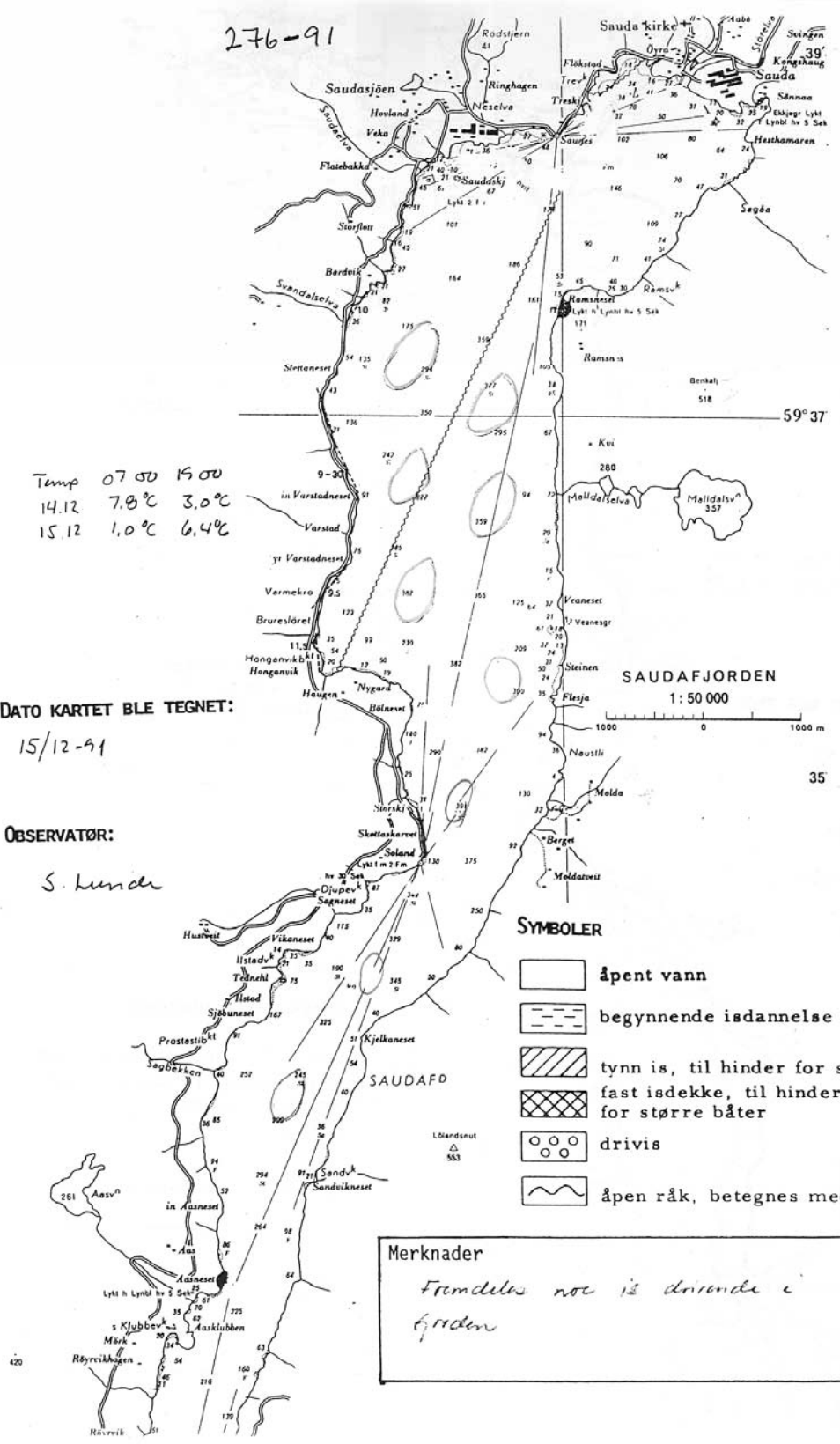
Temp 07.00 15.00  
 14.12 7.8°C 3.0°C  
 15.12 1.0°C 6.4°C

DATO KARTET BLE TEGNET:

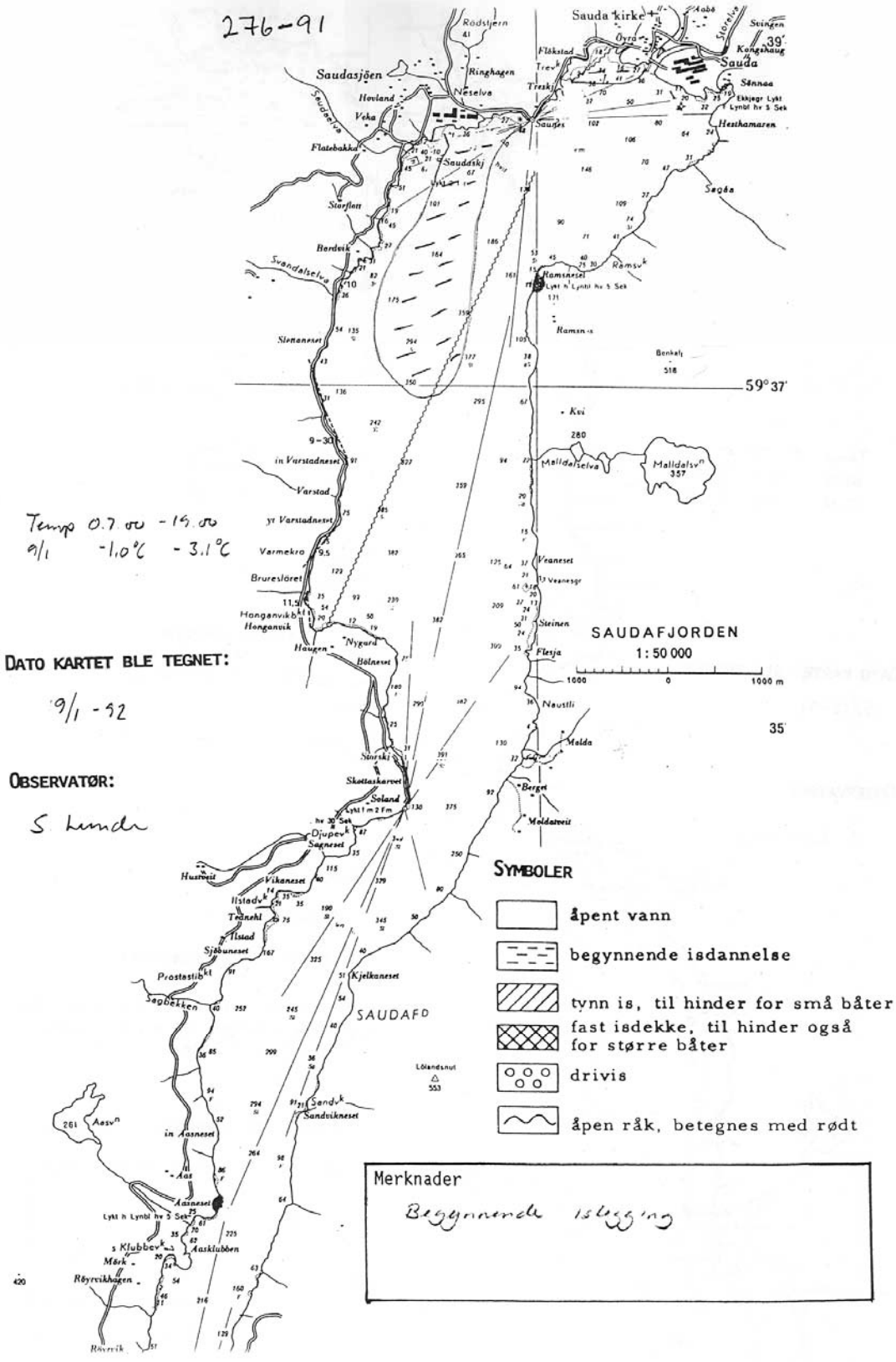
15/12-91

OBSERVATØR:

S. Lunde



276-91



276-91

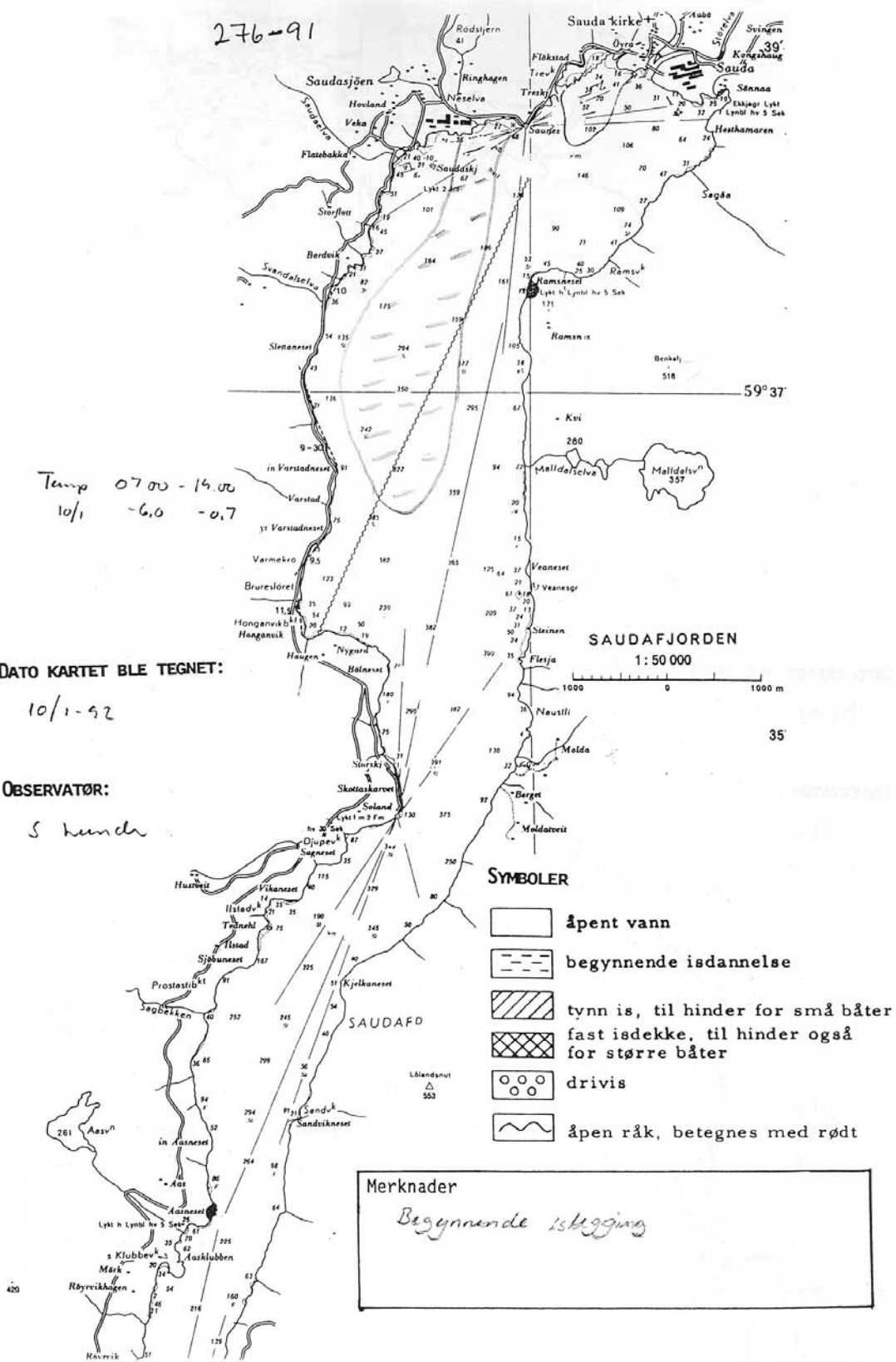
Temp 07.00 - 14.00  
10/1 -6.0 -0.7

DATO KARTET BLE TEGNET:

10/1-92

OBSERVATØR:

S. Kunder



276-91

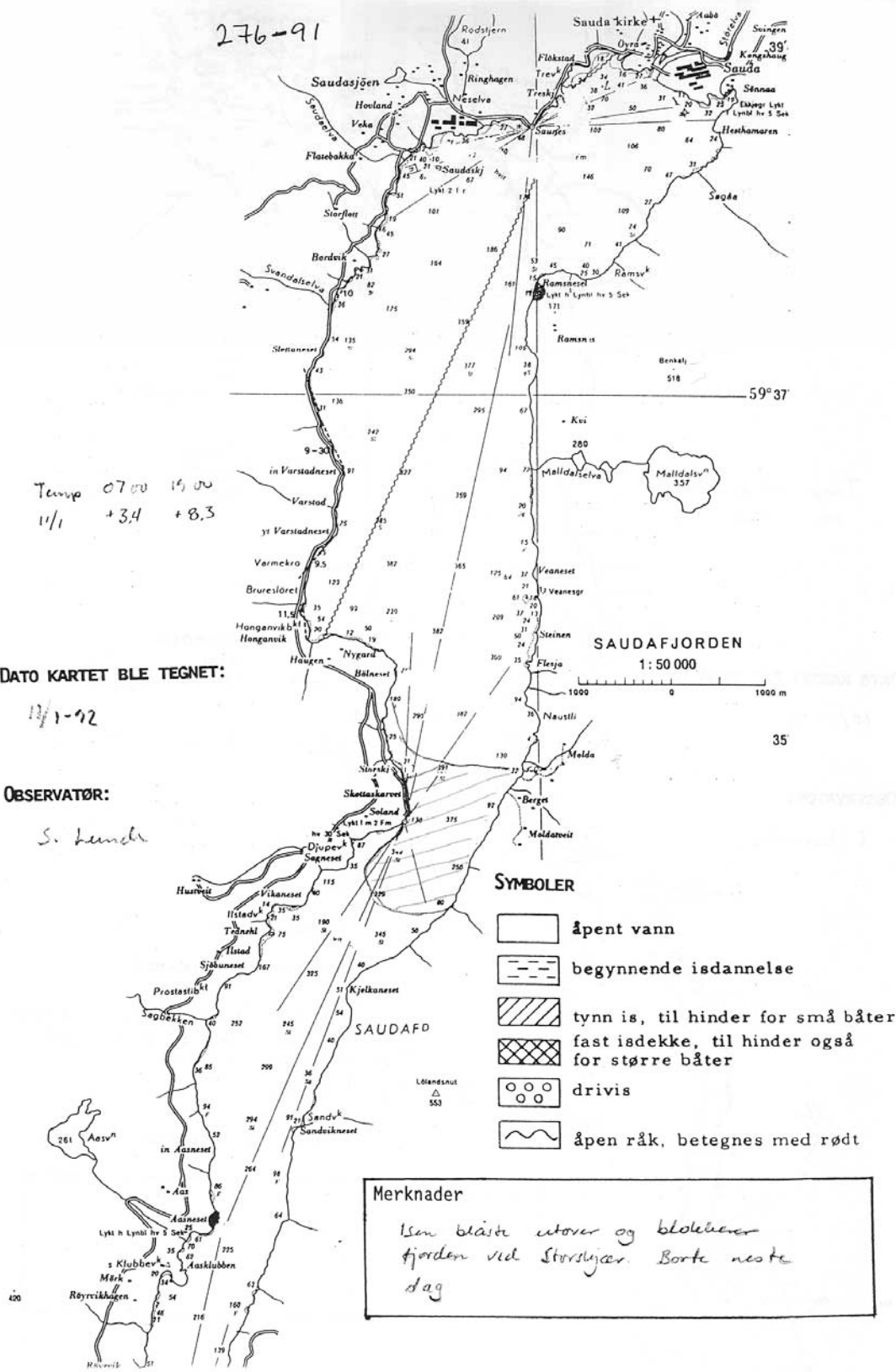
Temp 07.00 14.00  
11/1 +3.4 +8.3

DATO KARTET BLE TEGNET:

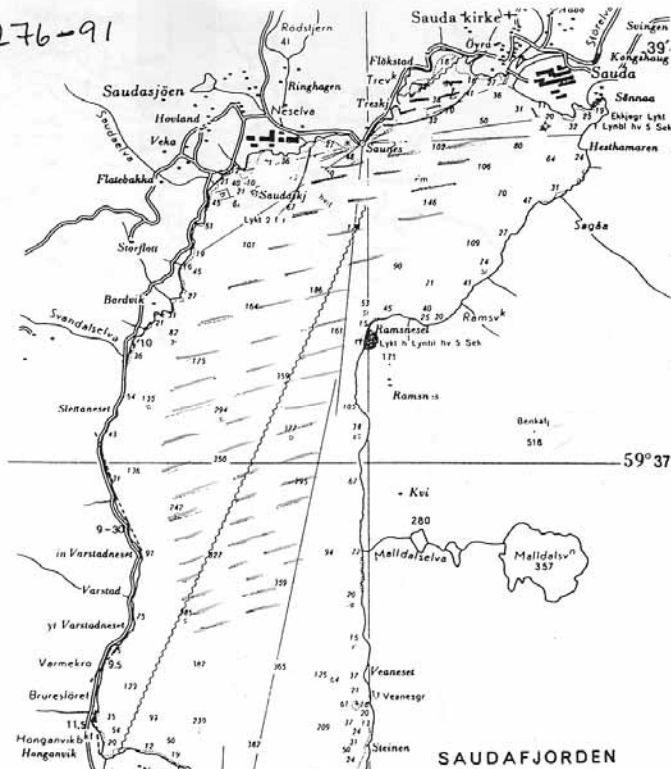
12/1-92

OBSERVATØR:

S. Lunde



276-91

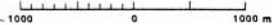


DATO KARTET BLE TEGNET:

23/1-92

OBSERVATØR:

SAUDAFJORDEN  
1:50 000

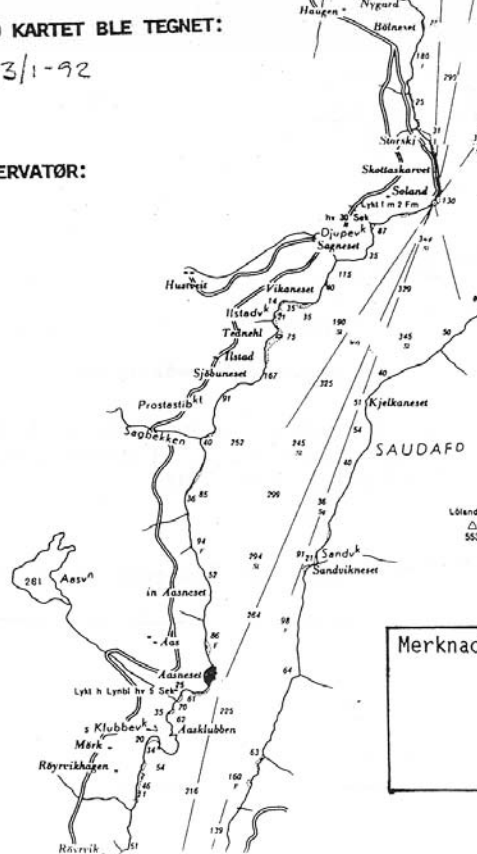


35

SYMBOLER

- åpent vann
- begynnende isdannelse
- tynn is, til hinder for små båter
- fast isdekke, til hinder også for større båter
- drivis
- åpen råk, betegnes med rødt

Merknader



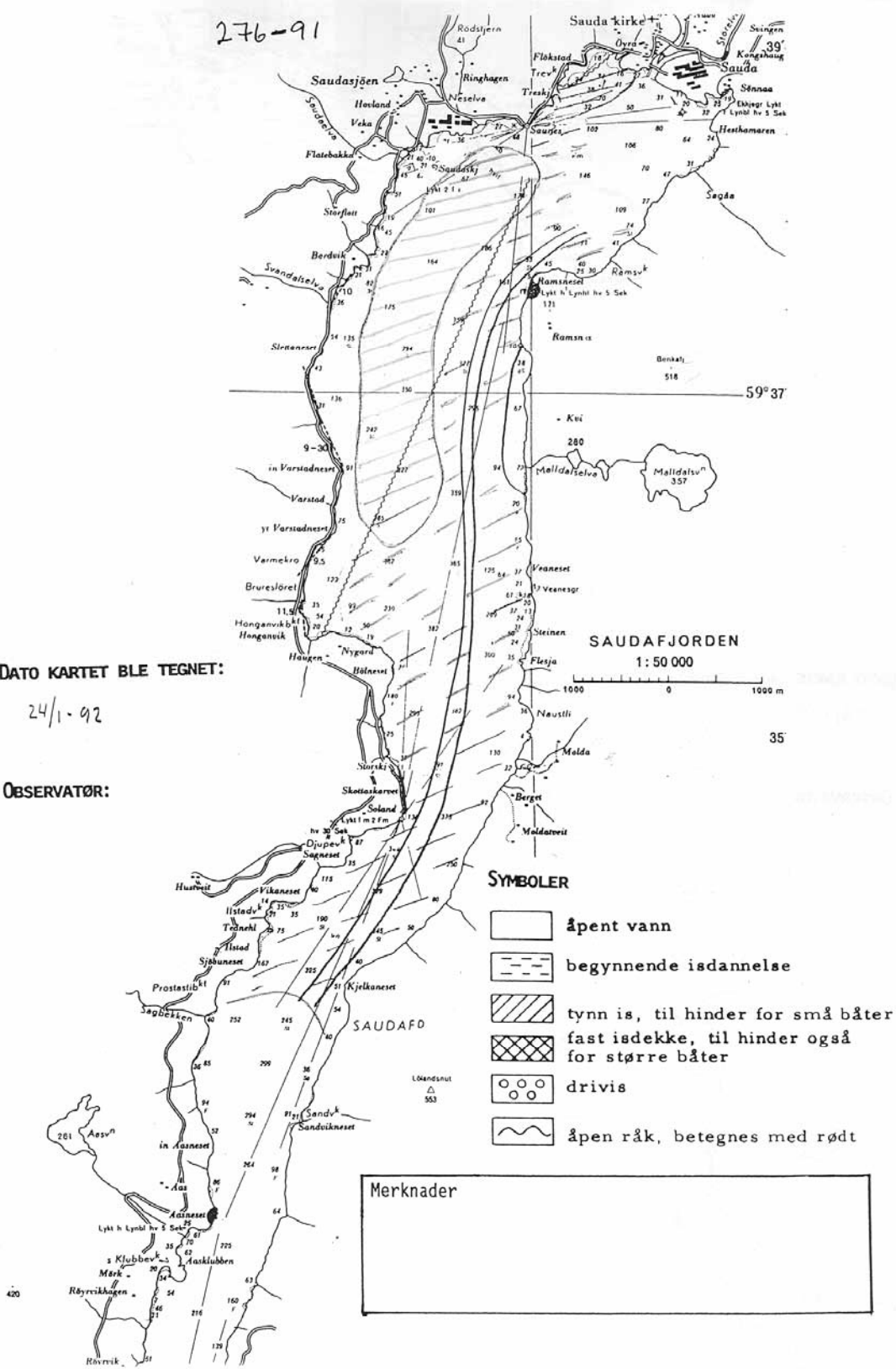


276-91

DATO KARTET BLE TEGNET:

24/1-92

OBSERVATØR:

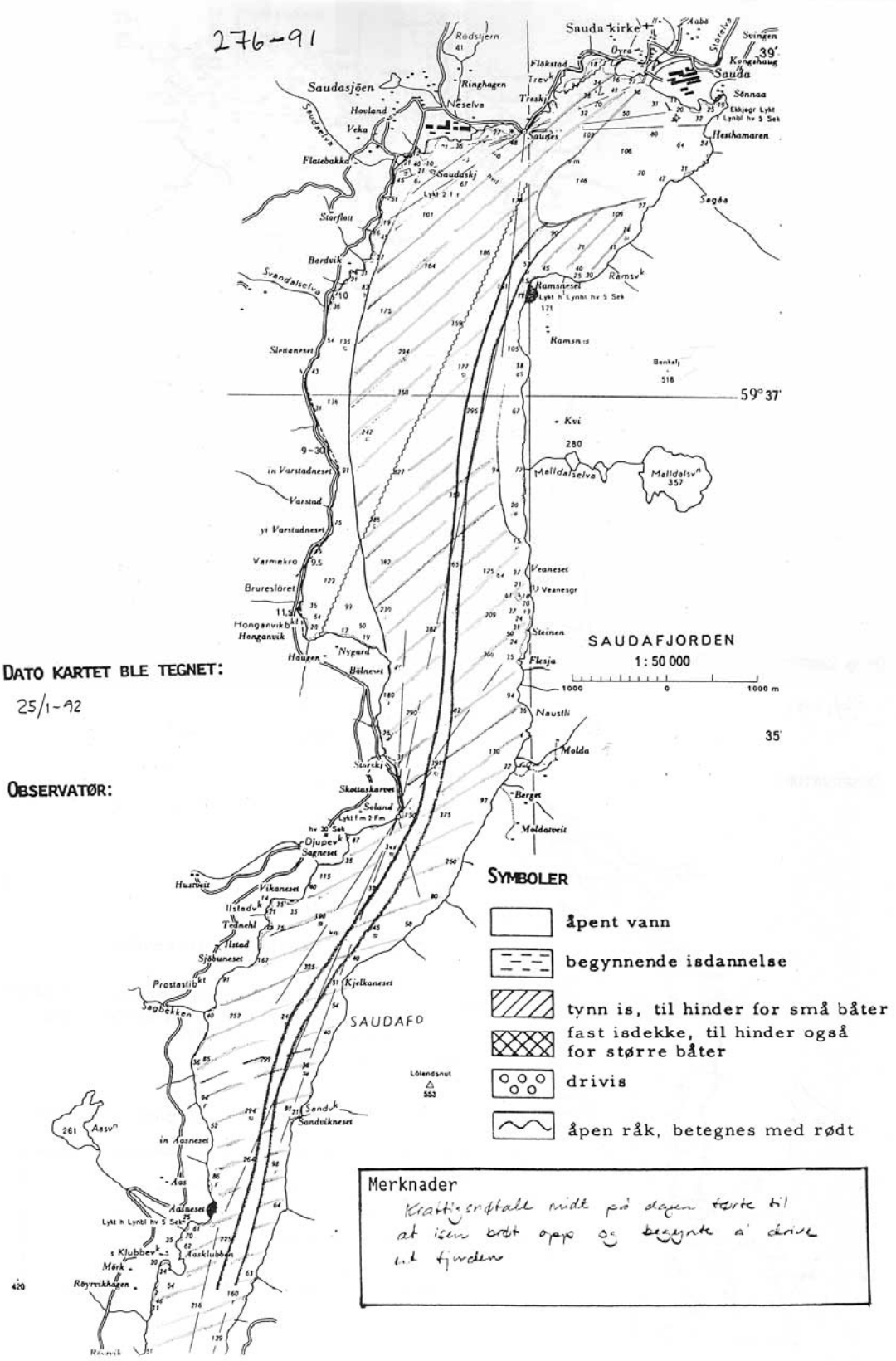


276-91

DATO KARTET BLE TEGNET:

25/1-92

OBSERVATØR:



SYMBOLER

- åpent vann
- begynnende isdannelse
- tynn is, til hinder for små båter
- fast isdekke, til hinder også for større båter
- dravis
- åpen råk, betegnes med rødt

Merknader

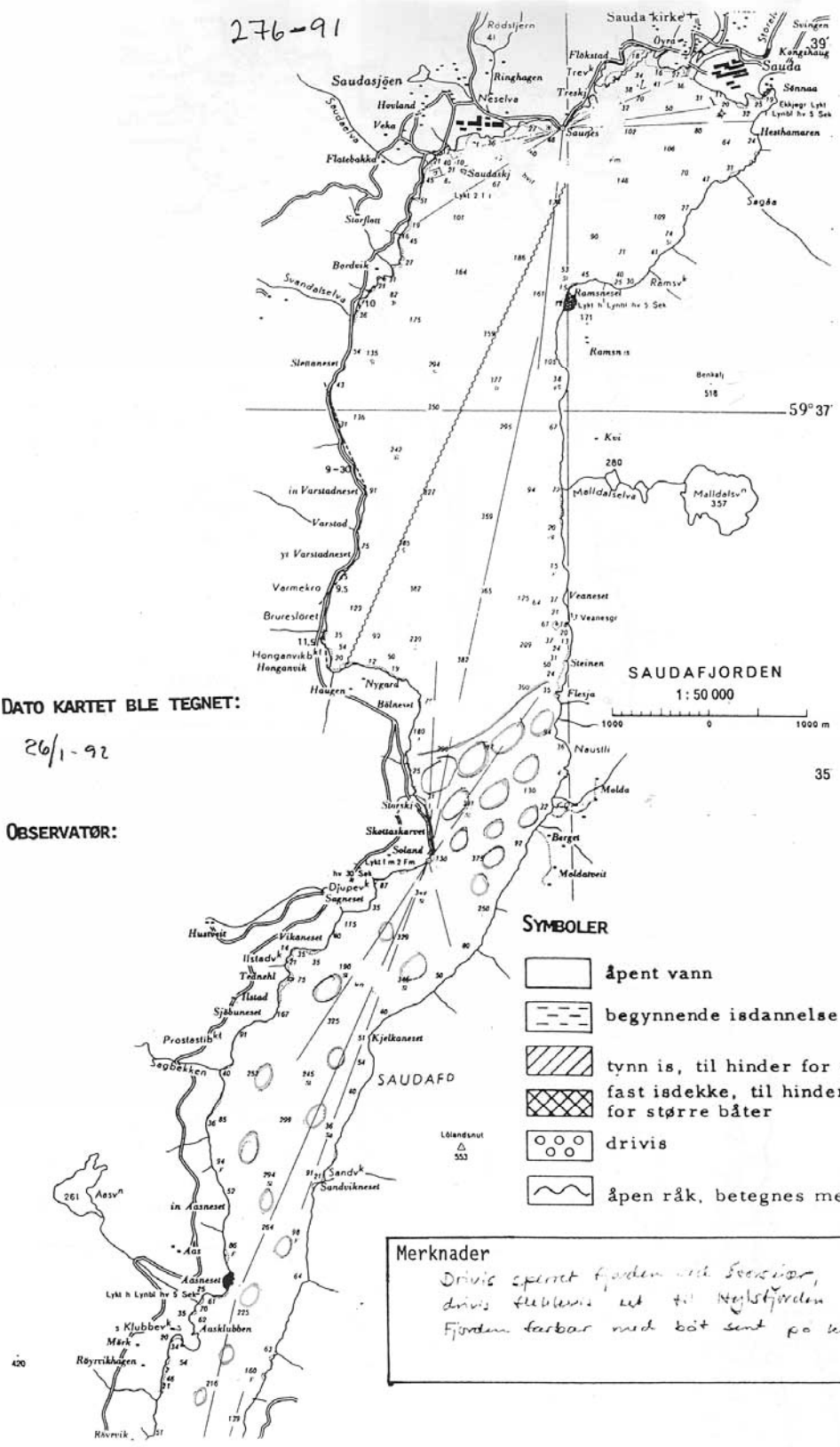
*Kraftig nedfrysning midt på dagen førte til at isen er et opp og begynte å drive ut fjorden*

276-91







DATO KARTET BLE TEGNET:

26/1-92

OBSERVATØR:



SYMBOLER

-  åpent vann
-  begynnende isdannelse
-  tynn is, til hinder for små båter
-  fast isdekke, til hinder også for større båter
-  drivis
-  åpen råk, betegnes med rødt

Merknader

Drivis sperrt fjorden ved Seevik, drivis flekkvis ut til Høgløstjorden. Fjorden farbar med båt sent på vintern.

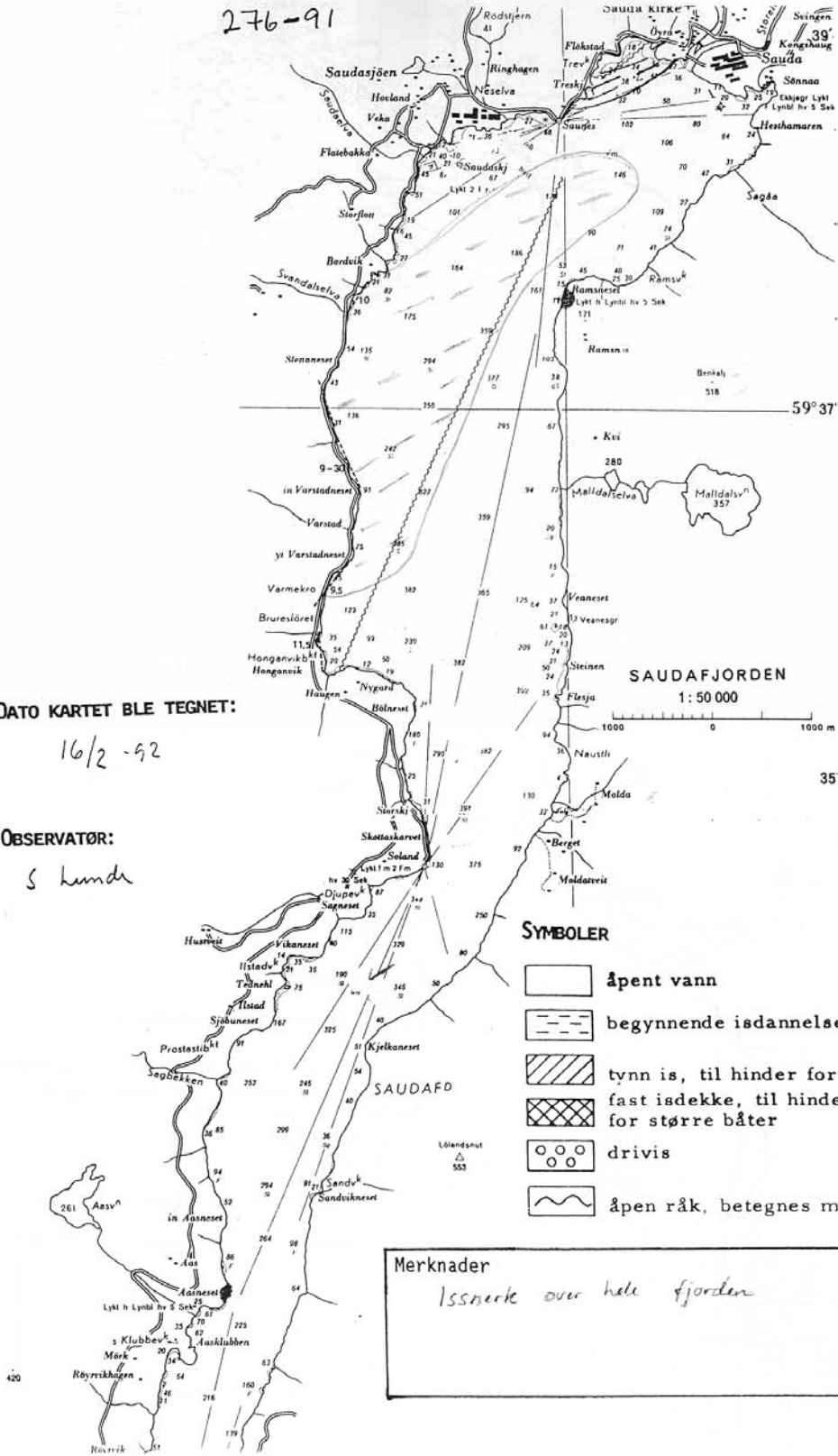
276-91

DATO KARTET BLE TEGNET:

16/2 -92

OBSERVATØR:

S Lund



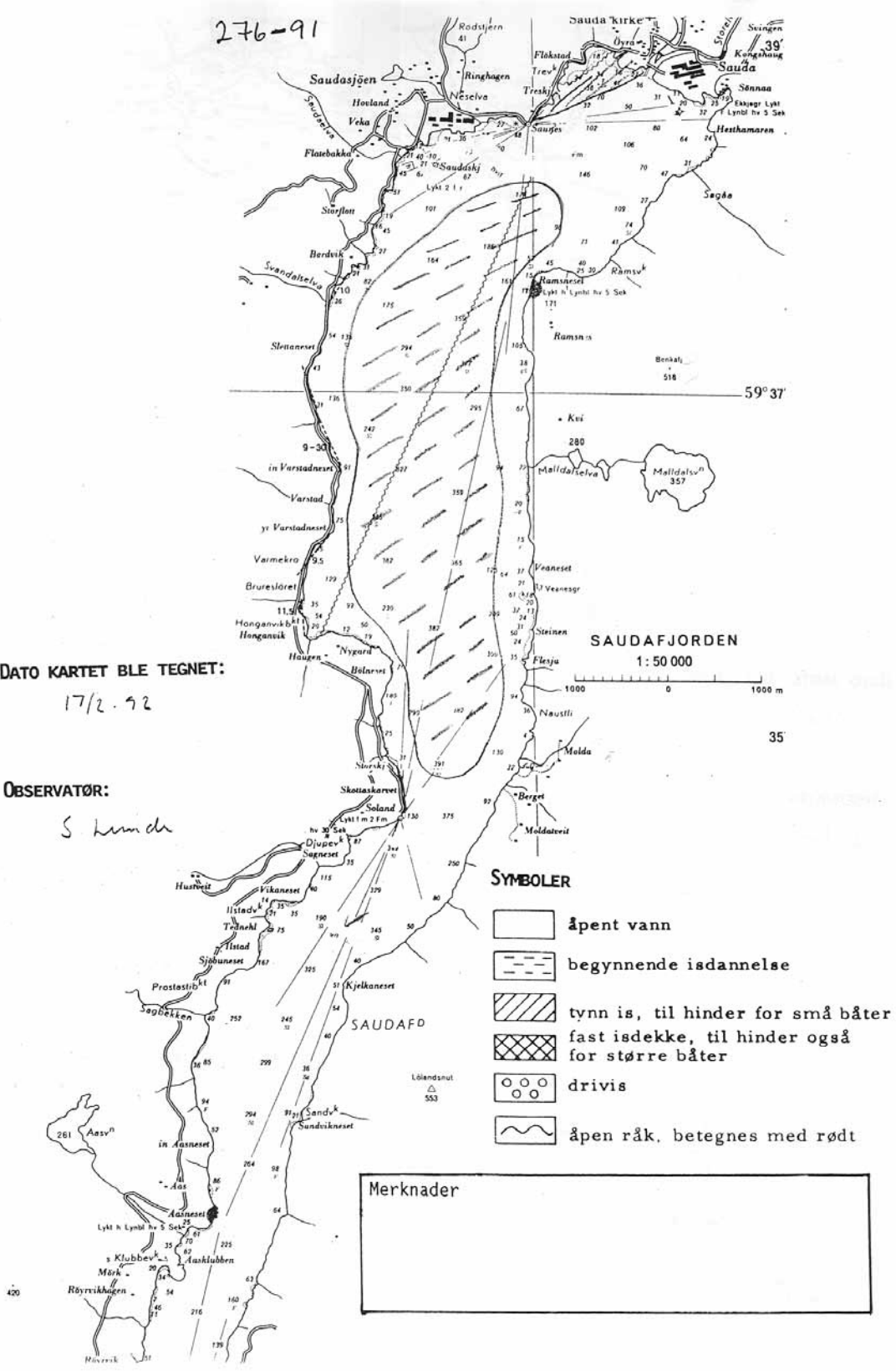
276-91

DATO KARTET BLE TEGNET:







17/2. 92

OBSERVATÖR:

S. Lunde



**SYMBOLER**

-  åpent vann
-  begynnende isdannelse
-  tynn is, til hinder for små båter
-  fast isdekke, til hinder også for større båter
-  dravis
-  åpen råk, betegnes med rødt

Merknader

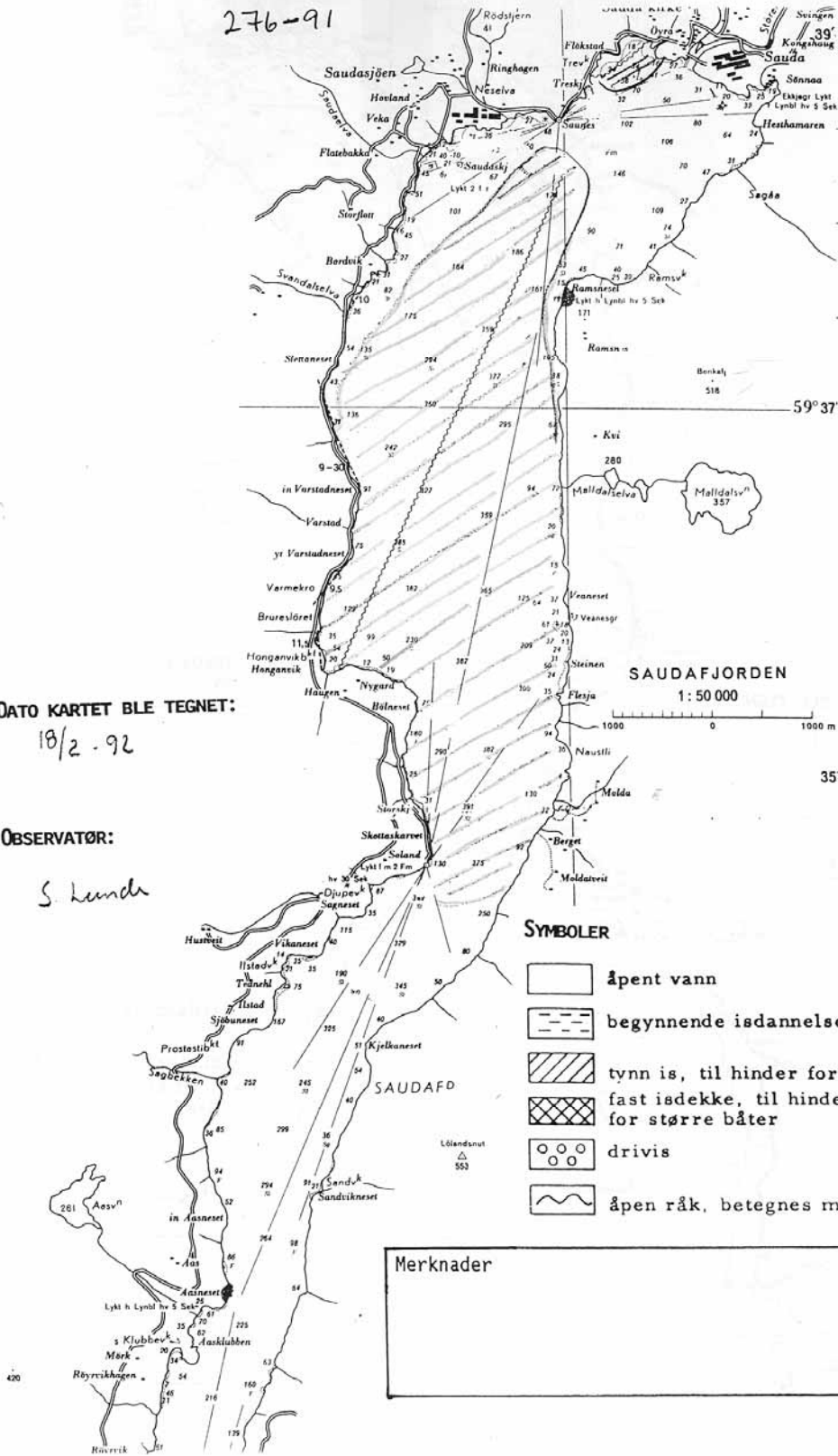
276-91

DATO KARTET BLE TEGNET:

18/2 - 92

OBSERVATØR:

S. Lunde



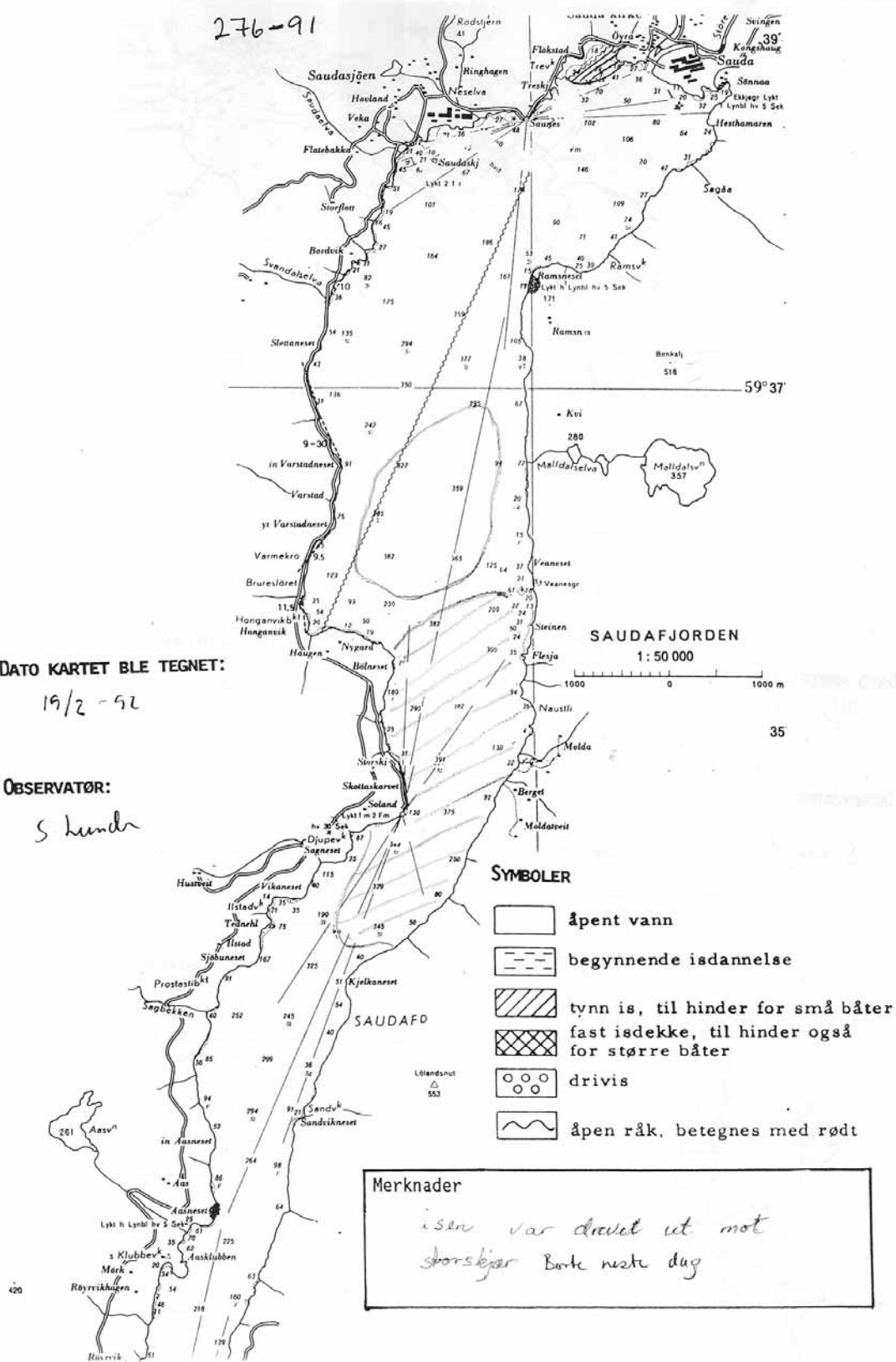
276-91

DATO KARTET BLE TEGNET:

19/2 - 92

OBSERVATØR:

S. Lunde



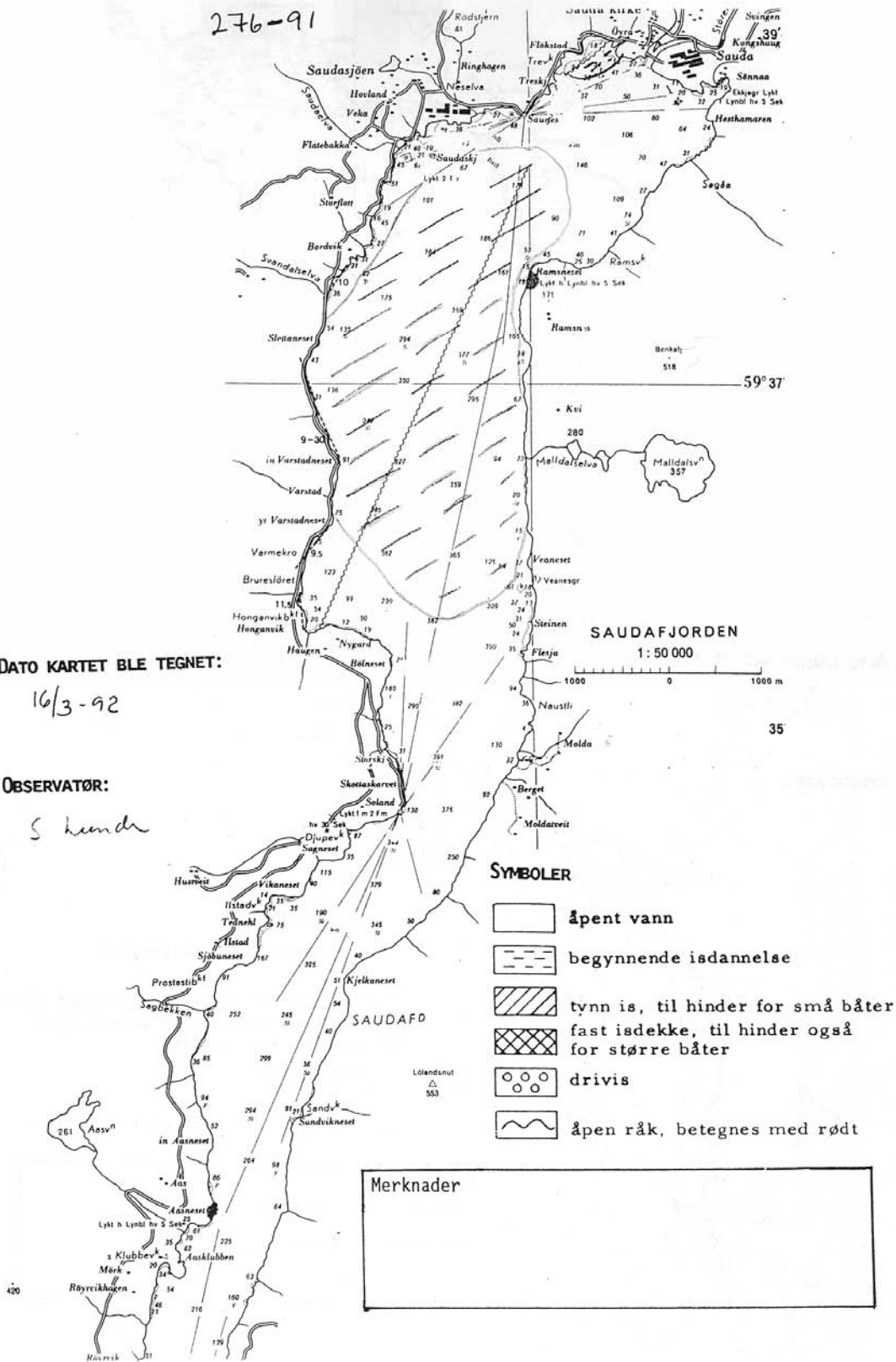
276-91

DATO KARTET BLE TEGNET:

16/3-92

OBSERVATØR:

S. hunde





276-91

