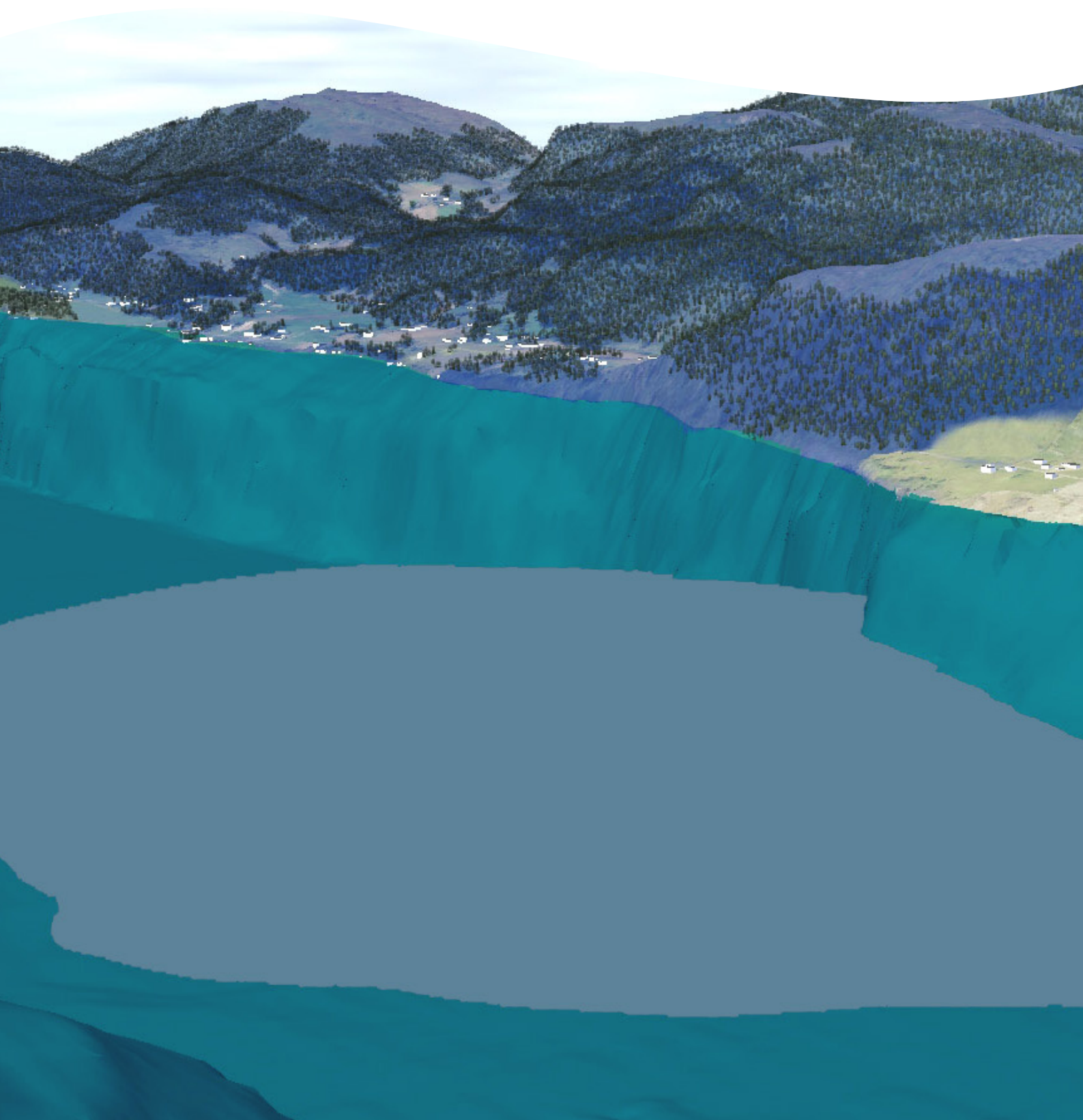


# Strømforhold i Førdefjorden utenfor Engebøfjellet

## Tredimensjonal modellering av strømforholdene i vannsøylen ved endring av bunntopografi



**Hovedkontor**

Gaustadalléen 21  
0349 Oslo  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 22 18 52 00  
Internett: www.niva.no

**Sørlandsavdelingen**

Televeien 3  
4879 Grimstad  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 37 04 45 13

**Østlandsavdelingen**

Sandvikaveien 41  
2312 Ottestad  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 62 57 66 53

**Vestlandsavdelingen**

Thormøhlensgate 53 D  
5006 Bergen  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 55 31 22 14

**NIVA Midt-Norge**

Pirsenteret, Havnegata 9  
Postboks 1266  
7462 Trondheim  
Telefon (47) 22 18 51 00  
Telefax (47) 73 54 63 87

Tittel Strømforhold i Førdefjorden utenfor Engebøfjellet Tredimensjonal modellering av strømforholdene i vannsøylen ved endring av bunntopografi	Løpenr. (for bestilling) 5841-2009	Dato 10.12.2009
	Prosjektnr. Undernr. 29308	Sider Pris 38
Forfatter(e) André Staalstrøm Kjersti Lundmark Daae	Fagområde Oseanografi	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Sunnfjord	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Nordic Mining ASA	Oppdragsreferanse Ivar Fossum
---------------------------------------	----------------------------------

<p>Sammendrag</p> <p>Målet i dette prosjektet har vært å gi en beskrivelse av hvordan strømforholdene påvirkes av endringer i bunntopografien ved deponi av avgangsmasse fra gruvedrift i fjorden utenfor Engebø. Dette har blitt gjort ved bruk av havmodellen ROMS som ble satt opp for Førdefjorden. Modellen har blitt validert mot både strømmålinger i overflatelaget og bunnlaget. Modellresultatene sannsynliggjør at terskelen i Ålasundet (55 m dyp) skaper aktivitet fra indre bølger ned til omtrent 200 m dyp.</p> <p>Under forhold utenom dypvannsfornyelser, vil en heving av bunnen utenfor Engebø øke strømstyrken langs bunnen, spesielt på vestsiden av deponiområdet. Dersom bunnen heves opp fra omtrent 300 m (dagens situasjon) til 215 meter på det høyeste er økningen liten. 90-persentilen av strømstyrken økes da fra omtrent 2.5 cm/s til 3.9 cm/s ved nippflo og fra omtrent 3.8 til 4.8 cm/s ved springflo midt i Førdefjorden utenfor Engebøkaia. Dersom bunnen heves opp til 150 meter på det høyeste er virkningen større: 90-persentilen av strømstyrken økes da opp til 8.4 cm/s ved nippflo og opp til 10.3 cm/s ved springflo på samme området. De økte strømstyrkene er ikke så store at erosjon av partikler fra bunnen vil øke, men små partikler som er allerede svevet i vannet langs bunn vil i større grad blir transportert vekk.</p> <p>Under stagnerte forhold blir det mer bevegelsesenergi i vannmassene når bunnen heves. Dette fører til at den vertikale blandingen vil øke noe i Engebøbassenget under 55 m når masse deponeres. Et resultat av dette vil være en økning i hyppigheten av dypvannsfornyelser, men modellberegninger alene er ikke tilstrekkelig for å si noe om størrelsen av økningen. Det vil da også være nødvendig å overvåke sjiktningen i dypvannet over tid.</p>
---

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Førdefjorden</li> <li>2. Strømforhold</li> <li>3. Bunntopografi</li> <li>4. Indre bølger</li> </ol>	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Førdefjorden</li> <li>2. Current conditions</li> <li>3. Bathymetry</li> <li>4. Internal waves</li> </ol>
--	---

*André Staalstrøm*

André Staalstrøm  
Prosjektleder

*Dominique Durand*

Dominique Durand  
Forskningsleder

*Bjørn Faafeng*

Bjørn Faafeng  
Seniorrådgiver

O-29308

## **Strømforhold i Førdefjorden utenfor Engebøfjellet**

Tredimensjonal modellering av strømforholdene i  
vannsøylen ved endring av bunntopografi

## **Forord**

Denne rapporten beskriver modellering av strømforholdene i Førdefjorden utført på oppdrag fra Nordic Mining i forbindelse med dypvannsdeponi av løsmasser i fjorden. Oppsett av modellen og analyse av resultatene er utført av André Staalstrøm og Kjersti Lundmark Daae.

Oslo, 18. november 2009

*André Staalstrøm*

---

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>Summary</b>	<b>6</b>
<b>1. Innledning</b>	<b>7</b>
<b>2. Metoder</b>	<b>8</b>
2.1 Generelt om modellen ROMS	8
2.2 Fremgangsmåte	9
<b>3. Topografi</b>	<b>10</b>
<b>4. Sjøtningen i Førdefjorden</b>	<b>14</b>
4.1 Datagrunnlag	14
4.2 Ferskvannstilførsel	14
4.3 Sjøtning gjennom året	15
4.4 Vannsøylens tyngdepunkt	17
<b>5. Tidevann</b>	<b>18</b>
<b>6. Kvalitetssikring av modellen</b>	<b>19</b>
6.1 Strømmålinger i overflata	19
6.2 Strømmålinger ved bunn	21
6.3 Oppsummering av kvalitetssikringen	24
<b>7. Resultater</b>	<b>25</b>
7.1 Blandingsprosesser	25
7.2 Vannutveksling i Engebøbassenget	26
7.3 Forekomsten av indre bølger	26
7.4 Vertikalsnitt i Engebøbassenget	28
7.5 Horisontalt plott	32
7.6 Snitt på langs av fjorden	35
<b>8. Diskusjon</b>	<b>36</b>
<b>Referanser</b>	<b>38</b>

---

## Sammendrag

Målet i dette prosjektet har vært å gi en beskrivelse av hvordan strømforholdene påvirkes av endringer i bunntopografien ved deponi av avgangsmasse fra gruvedrift i fjorden utenfor Engebø. Dette har blitt gjort ved bruk av havmodellen ROMS (Haidvogel m.fl., 2007) som ble satt opp for Førdefjorden og kjørt med to forskjellige tidevannsforskytninger (svakt og sterkt tidevann), og tre forskjellige bunntopografier: slik den er i dag, slik den vil kunne se ut etter endt dagbruddsfase og slik den vil kunne se ut etter endt gruvedrift.

Havmodellen beskriver strømbildet på en tilfredsstillende måte både i overflatelaget og i bunnlaget under forhold utenom dypvannsfornyelser når det legges inn riktig sjiktning og tidevann. Modellen har blitt validert mot både strømmålinger i overflatelaget og bunnlaget. Det konkluderes med at strømmodellen kan brukes til å beskrive strømforholdene i hele vannsøylen, men at den slik som den er satt opp i dette prosjektet, stemmer best under terskeldyp på 55 m under forhold utenom dypvannsfornyelser.

Modellresultatene sannsynliggjør at terskelen i Ålasundet (55 m dyp) skaper aktivitet fra indre bølger ned til omtrent 200 m dyp. Dette er karakteristisk for terskelfjorder med vertikal sjiktning. Hydrografiske målinger fra Førdefjorden fra 1974 til 1982 viser at det er en viss sjiktning gjennom hele året i hvertfall ned til 70 m, og at sjiktningen er sterk i overflatelaget om sommeren. Det er liten variasjon i sjiktningen fra år til år under terskeldypet.

Under forhold utenom dypvannsfornyelser, vil en heving av bunnen utenfor Engebø øke strømstyrken langs bunnen, spesielt på vestsiden av deponiområdet. Dersom bunnen heves opp fra omtrent 300 m (dagens situasjon) til 215 meter på det høyeste er økningen liten. 90-persentilen av strømstyrken økes da fra omtrent 2.5 cm/s til 3.9 cm/s ved nippflo og fra omtrent 3.8 til 4.8 cm/s ved springflo midt i Førdefjorden utenfor Engebøkaia. Dersom bunnen heves opp til 150 meter på det høyeste er virkningen større: 90-persentilen av strømstyrken økes da opp til 8.4 cm/s ved nippflo og opp til 10.3 cm/s ved springflo på samme området. De økte strømstyrkene er ikke så store at erosjon av partikler fra bunnen vil øke, men små partikler som er allerede svevet i vannet langs bunn vil i større grad bli transportert vekk.

Under stagnerte forhold blir det mer bevegelsesenergi i vannmassene når bunnen heves. Dette fører til at den vertikale blandingen vil øke noe i Engebøbassenget under 55 m når masse deponeres. Et resultat av dette vil være en økning i hyppigheten av dypvannsfornyelser, men modellberegninger alene er ikke tilstrekkelig for å si noe om størrelsen av økningen. Det vil da også være nødvendig å overvåke sjiktningen i dypvannet over tid.

## Summary

Title: Current conditions in the Førdefjord outside Engebø – Three-dimensional modelling of the current conditions in the water column when the bathymetry is changed

Year: 2009

Authors: André Staalstrøm and Kjersti Lundmark Daae

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 82-577-5576-8

In this project the ocean model ROMS (Haidvogel et. al. 2007) has been implemented for the Førdefjord. The purpose has been to describe how the current conditions might change when the bathymetry is changed due to deposit of mass from mining. The methodology has been to run the model with three variations of the bathymetry, as it is today, as it might look like after approximately 20 and 50 years. The model has been run with weak and strong tidal forcing.

The ocean model describes the current conditions in a satisfactory way both in the surface layer and the bottom layer during conditions without deep water renewals when proper stratification and tidal conditions are used. The model has been validated against current measurements both in the surface and bottom layer. The conclusion is that the model can be used to describe the current conditions in the whole water column, but that the current model setup works best below sill depth at 55 m during conditions without deep water renewals.

The model results make it probable that the sill at the Ålasund (55 m) generates internal wave activity down to approximately 200 m depth. This is typical of sill fjords with vertical stratification. Hydrographical measurements from the Førdefjord from several years show that there is a certain vertical stratification present throughout the year at least down to 70 m, and that the stratification in the surface layer is strong in the summer. There is little variation from year to year in the stratification below sill depth at 55 m.

During conditions without deep water renewals, an elevation of the bottom topography will increase the current strength along the bottom, especially at the western side of the tipping. If the bottom is elevated from about 300 m (the situation today) to about 215 m at the maximum, the effect is small. The 90-percentile of the current strength will increase from about 2.5 cm/s to 3.9 cm/s during neap tides and from about 3.8 cm/s to 4.8 cm/s during spring tides in the middle of the Førdefjord outside the Engebø quay. If the bottom is elevated to 150 m at the maximum the effect is greater. The 90-percentile of the current strength will increase from about 2.5 cm/s to 8.4 cm/s during neap tides and from about 2.5 cm/s to 10.3 cm/s during spring tides in the same area. The increased current conditions will not lead to increased erosion, but transport of small particles that is already suspended in the water column is likely to increase.

During periods of stagnation the kinetic energy in the water column will increase as the water depth decrease when masses are deposited. This leads to some increase in the vertical mixing in the Engebø basin below 55 m. As a result the frequency of deep water renewals will increase, but model calculations alone are not sufficient to quantify this. To do this, it will also be necessary to monitor the stratification in the deep water over a period of time.

# 1. Innledning

Nordic Mining ASA ønsker å starte opp gruvevirksomhet i Engebøfjellet i Naustdal kommune og utvinne rutil. Avgangsmassene er planlagt deponert på bunnen av Førdefjorden utenfor Engebø (**Figur 1**). I den forbindelse er det bl.a. gjort en undersøkelse av strømforholdene ved bunnen (Sundfjord og Bjerkeng, 2008) og en undersøkelse av spredning av partikler i overflata (Staalstrøm og Molvær, 2008).

Deponiet av masse vil endre bunntopografien utenfor Engebø, og dette prosjektet har ved hjelp av tredimensjonal modellering utredet hvordan strømforholdene utenfor Engebø endres når høyde og bredde på deponiet øker. Modellen beskriver strømforholdene i hele vannsøylen og utfyller de strømmålingene som allerede fins fra overflate- og bunnlaget. Vi har spesielt sett på hvordan strømstyrken nær bunn endrer seg.

Metodikken ved oppsett og bruk av modellen beskrives i kapittel 2. Kapittel 3 beskriver hvordan bunntopografien antas å endres når deponiet gradvis fylles opp med masse. Kapittel 4 beskriver sjiktningen i vannsøylen, og kapittel 5 diskuterer tidevannsvariasjonen i Førdefjorden. Kapittel 6 viser resultatene av sammenligning av modellens resultater mot strømmålinger ved bunn og i overflata. Kapittel 7 beskriver hvilke scenarioer som er blitt kjørt på bakgrunn av de forskjellige utgangspunktene som er beskrevet i kapittel 3 til 5, og resultatene av disse modellkjøringene er presentert. I kapittel 8 blir resultatene av modellkjøringene kort diskutert med tanke på hvilke konsekvenser utfyllingen kan ha.



## 2. Metoder

### 2.1 Generelt om modellen ROMS

I dette prosjektet er det valgt å bruke modellen ROMS (Regional Ocean Modeling System) som er en tredimensjonal havmodell med fri overflate og terrengfølgende vertikale koordinater. Den er beskrevet av blant annet Haidvogel m.fl. (2007) og på hjemmesiden [www.myroms.org/wiki/](http://www.myroms.org/wiki/). ROMS har tidligere blitt brukt i Sunnfjord i forbindelse med spredning av smitte mellom oppdrettsanlegg hvor den har blitt validert mot strømmålinger fra oppdrettsanlegg (Staalstrøm, 2009). Den samme modellen ble brukt ved simulering av spredning av partikler i overflaten utenfor Engebøfjellet (Staalstrøm og Molvær, 2009). Den versjonen av modellen som da ble brukt hadde 150 meters horisontal oppløsning, dvs. at modellområdet var delt inn i ruter på 150 mx150 m. Bare den ytre delen av Førdefjorden til rett innefor Ålasundet var da med i modellområdet. Den horisontale oppløsningen i den versjonen av modellen som blir brukt her er 100 meter, og Førdefjorden er med helt inn til Førde (**Figur 1**).

I hver rute eller celle beregnes strøm, vannstand, saltholdighet, temperatur og eventuelt konsentrasjon av et eller flere sporstoff. Variablene som beregnes er beskrevet i **Tabell 1**. Modellen utfører beregninger for 20 vannlag mellom overflate og bunn. Siden modellen har terrengfølgende vertikale koordinater, så har hver beregningscelle like mange lag uansett vanddyb. Tykkelsen på lagene varierer derfor med vanddypet i modellområdet og **Tabell 2** viser tykkelsen av det laget som er nærmest overflata, et lag midt i vannsøylen og det laget som er nærmest bunn. Strømmen beregnet av modellen er et gjennomsnitt av strømmen i hele tykkelsen av laget. Når det totale vanddypet er 200 m er for eksempel strømstyrken i modellens nederste lag gjennomsnittet for et 18.1 m tykt vannlag.

De viktigste inngangsdataene til modellen er:

1. Startbetingelser for strøm, vannstand, saltholdighet og temperatur.
2. Grenseflatebetingelser for strøm, vannstand, saltholdighet og temperatur.
3. Tidevann.
4. Ferskvannstilførsel.
5. Vind.

Disse omtales senere i rapporten

**Tabell 1.** Variabler som beregnes i modellen.

Variabel	Symbol	Enhet
Vannstand	$\zeta(x, y, t)$	m
Dybdeintegrert strøm i x-retning	$\bar{u}(x, y, t)$	m/s
Dybdeintegrert strøm i y-retning	$\bar{v}(x, y, t)$	m/s
Strøm i x-retning	$u(x, y, z, t)$	m/s
Strøm i y-retning	$v(x, y, z, t)$	m/s
Strøm i z-retning	$w(x, y, z, t)$	m/s
Saltholdighet	$S(x, y, z, t)$	-
Temperatur	$T(x, y, z, t)$	°C

**Tabell 2.** Tykkelsen av modellens øverste, midterste og nederste lag som funksjon av vanddybden. Modellen har 20 lag som følger bunntopografien.

Totalt vanddyb (m)	Tykkelsen av det øverste laget (m)	Tykkelsen av det midterste laget (m)	Tykkelsen av det nederste laget (m)
50	0.3	4.1	4.5
100	0.5	8.3	9.0
150	0.7	12.5	13.6
200	0.9	16.7	18.1
250	1.1	20.9	22.7
300	1.3	25.1	27.3
350	1.5	29.3	31.8
400	1.7	33.5	36.4

## 2.2 Fremgangsmåte

Målet med dette prosjektet har vært å vurdere hvordan strømforholdene i Førdefjorden utenfor Engebø vil endre seg som følge av utfyllingen. Dette gjelder da ikke bare nær bunn, men gjennom hele vannsøylen. Strømmålinger både fra overflaten og ved bunnen i området er tilgjengelig, og ved å sammenligne disse med resultatene som modellen gir har en vurdert hvor godt modellen klarer å representere de virkelige strømforholdene i fjorden.

Etter at det har blitt klarlagt hvor godt modellen gjengir de reelle strømforholdene og hvilke begrensninger den har, har modellen blitt brukt til å kjøre forskjellige scenarioer for å sammenligne dagens situasjon med fremtidige situasjoner. Den har blitt kjørt med dagens bunntopografi og bunntopografien slik den vil se ut etter henholdsvis 15 og 50 år med utfylling. Virkninger av forskjellig bunntopografi og styrke i tidevannsstrøm har blitt studert. I modellen er det lagt inn vindstille forhold og konstant ferskvannstilførsel fordi vinden ikke i merkbar grad kan påvirke strømforholdene i dypvannet.

Terskelen i Ålasundet (**Figur 2**) på 55 meters dyp som skiller det vi kaller indre og ytre Førdefjord, kan tenkes å danne indre bølger. Disse vil i så fall bre seg vekk fra terskelen og kunne påvirke strømforholdene utenfor Engebø. Dannelse av slike indre bølger er blant annet avhengig styrken på tidevannsstrømmen. Modellen har blitt kjørt med sterk (springflo) og svak (nippflo) tidevannstrøm. Til sammen vil dette utgjøre seks forskjellige scenarioer (**Tabell 3**).

**Tabell 3.** Beskrivelse av de scenarioene som har blitt kjørt.

Nr	Topografi	Sjiktning	Tidevannspådrag
1	Dagens topografi	Mars 2008	Nippflo
2	Dagens topografi	Mars 2008	Springflo
3	Etter endt dagbrudd	Mars 2008	Nippflo
4	Etter endt dagbrudd	Mars 2008	Springflo
5	Ved maksimal utfylling	Mars 2008	Nippflo
6	Ved maksimal utfylling	Mars 2008	Springflo

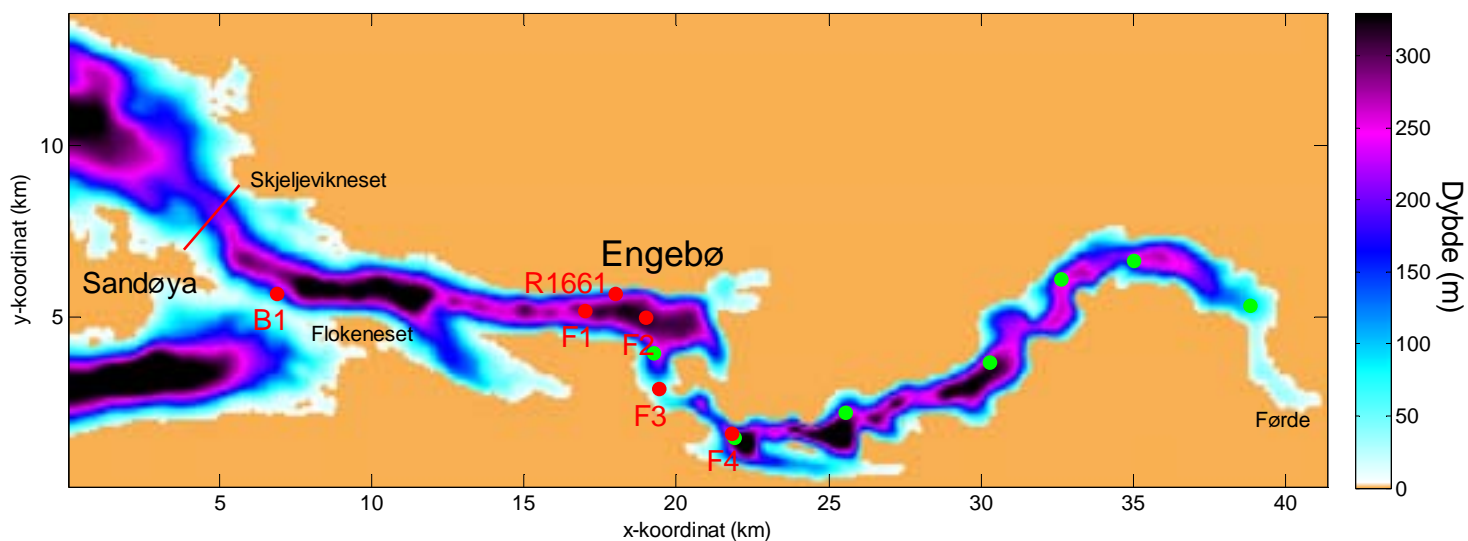
### 3. Topografi

**Figur 1** viser et kart over Førdefjorden som er omtrent 75 km lang fra ytterst ved Flokeneset til innerst ved Førde. Omtrent 19 til 20 km inn i fjorden er det et smalt sund, Ålasundet, som skiller den indre og ytre Førdefjorden. I dette sundet er det en terskel med dyp på 55 m, som i denne rapporten blir kalt Ålasundterskelen. Både på innersiden og yttersiden av terskelen er det dype bassenger. Rett utenfor terskelen i Ålasundet er det et basseng med relativt flat bunn som er atskilt fra vannet utenfor fjorden med en terskel på omtrent 305 m. Innløpet til Førdefjorden befinner seg ved Flokeneset og er forholdsvis dypt. Utenfor Flokeneset går Førdefjorden over i Brufjorden. Mellom Flokeneset og Svanøy er det en grunn terskel med største dyp på omtrent 20 meters dyp. Mellom Svanøy og Skjeljevikneset er det en terskel på omtrent 210 meters dyp. Disse to siste tersklene skiller dypvannet i Førdefjorden fra dypvannet ute i det åpne havet.

**Tabell 4** viser seks posisjoner som er aktuelle i rapporten. Posisjonene er vist med stasjonskode i **Figur 1**. I forbindelse med bruk av ROMS i Sunnfjord (Urke m.fl., 2009) ble det utplassert en profilerende strømmåler på 40 m dyp ved Brugalten (B1). Trykkmålinger fra dette instrumentet viser hvordan vannstanden endrer seg her. Vannstandsmålingene har blitt brukt til å skalere tidevannspådraget i modellen. Strømmålinger ved bunn ved stasjon Vevring midtfjords (F1, se Sundfjord og Bjerkeng, 2008) og fra overflatelaget ved stasjon Vevring (R1661, se Staalstrøm og Mølvær, 2008) har blitt brukt til å validere modellen. Resultater fra modellkjøringene blir presentert fra de øvrige stasjonene i tabellen for å belyse forskjellige sider av strømforholdene i fjorden.

I denne rapporten er det definert et basseng som kalles Engebøbassenget (**Figur 2**). Dette er atskilt av et snitt mellom Ålaneset på vestsiden av Ålasundet og Engelnset på østsiden av Ålasundet (snitt A), og et snitt tvers over fjorden ved Dyvikneset (snitt B). Snittene er beskrevet i **Tabell 5**. Det er dette bassenget som vil være resipient for avgangsmassene fra gruvedrift i Engebøfjellet. I **Figur 2** er det tre kart over deler av Førdefjorden. Kartene viser bunntopografien som brukes i modelleringen. Den horisontale oppløsningen er 100 meter. Det øverste kartet viser dagens bunntopografi. Det flate dypbassenget ligger rett sør for Engebø.

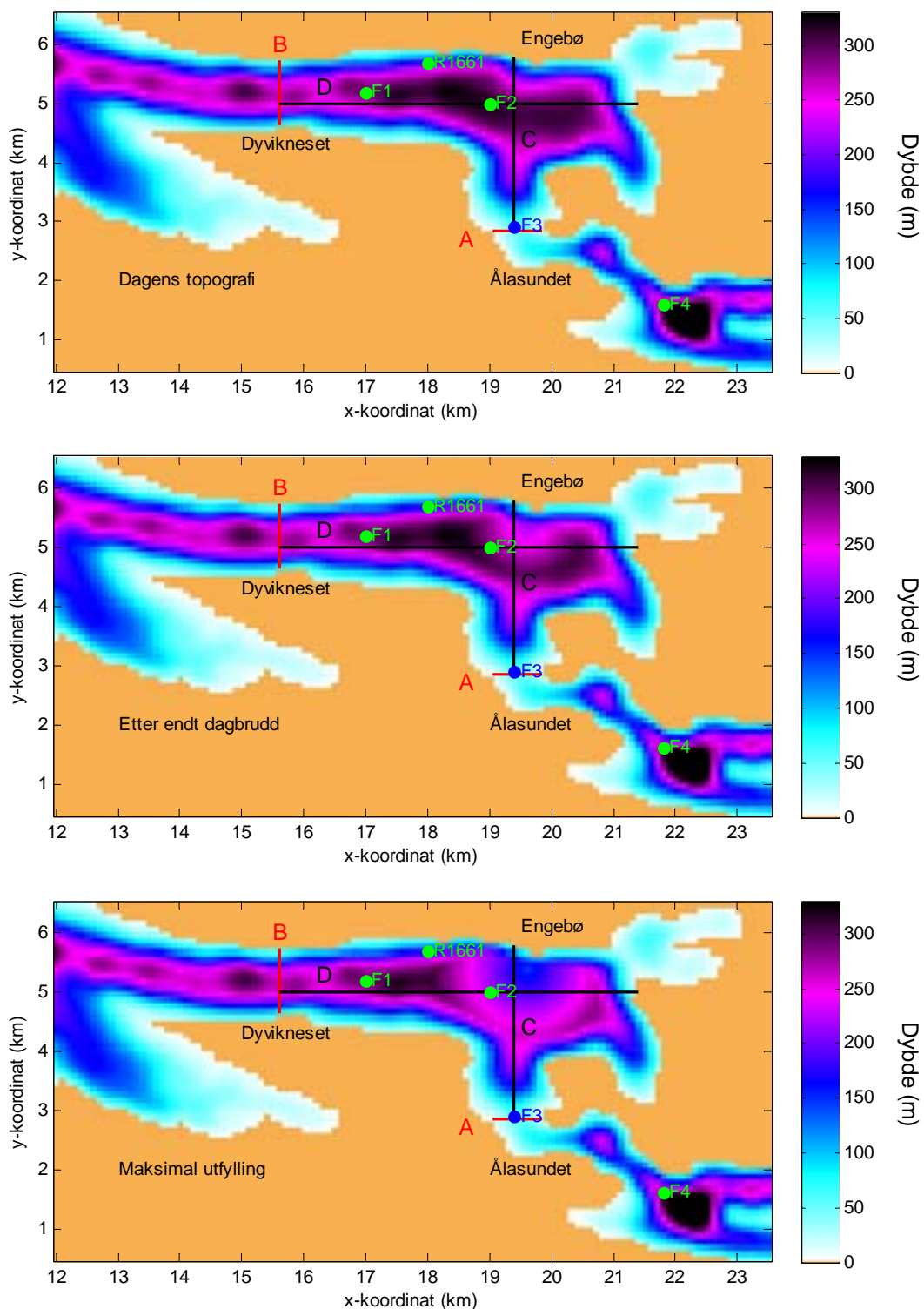
Det antas at avgangsmassene vil rase ut slik at det dannes en halv kjegle med en helningsvinkel på  $6^\circ$ . Det midterste kartet viser hvordan bunnen vil se ut ved endt dagbrudd etter omtrent 15 år. I modellen er det da lagt inn 23.1 millioner  $m^3$  masse som fordeler seg over 1.1  $km^2$ . Det nederste kartet viser hvordan bunntopografien vil se ut ved maksimal utfylling etter omtrent 50 år. I modellen er det lagt inn 147.5 millioner  $m^3$  avgangsmasser som fordeler seg over 2.6  $km^2$ . **Figur 3** viser hvordan det horisontale arealet til Engebøbassenget endrer seg som funksjon av dypet. **Tabell 6** viser volumet av Engebøbassenget fra overflata til bunn ved forskjellig grad av utfylling. Det vil ikke være noen endring av volumet over 150 m dyp, og den prosentvise endringen av volumet fra 150 m dyp til bunn vil være større enn det som er angitt i tabellen.



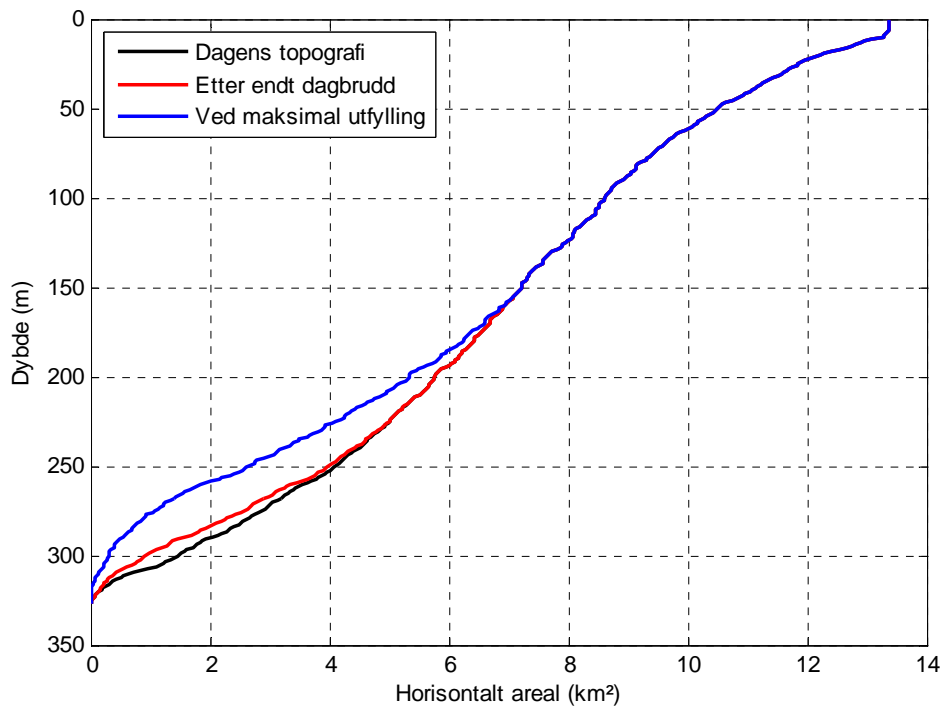
**Figur 1.** Kart over modellområdet basert på bunntopografien som brukes i modellen. Fargeskalaen angir dybder i meter. Det maksimale dypet i modellområdet er 395 m. Seks posisjoner er markert med røde prikker: B1 er Brugalten, R1661 er Vevring, F1 er Vevring midtfjords, F2 er Engebø, F3 er Ålasundet og F4 er Hellenes. Syv av NVE sine hydrografiske stasjoner er markert med grønne prikker. Fra venstre mot høyre: Leknes, Hellenes, Helle, Buanes, Liabøen, Slåteskornes og Rotenes.

**Tabell 4.** Posisjonene er tatt ut fra båtsportkart O-793.

Stasjon kode	Område	Geografisk posisjon	Modell-koordinater (m)
<b>B1</b>	Brugalten	N 61°29.1' Ø 05°11.9'	x 6900 y 5700
<b>F1</b>	Vevring	N 61°29.0' Ø 05°23.2'	X 17500 y 5200
<b>F2</b>	Engebø	N 61°29.0' Ø 05°25.8'	x 19000 y 5000
<b>F3</b>	Engelneset	N 61°27.8' Ø 05°26.4'	x 19400 y 2900
<b>F4</b>	Helleneset	N 61°27.1' Ø 05°29.0'	x 21800 y 1600
<b>R1661</b>	Vevring	N 61°29.4' Ø 05°23.9'	x 18000 y 5700



**Figur 2.** Kart over Engebøbassenget. Kartet er basert på bunntopografien som er brukt av modellen. Det øverste kartet viser dagens bunntopografi. Det midterste kartet viser bunntopografien slik den vil se ut etter endt dagbrudd. Det nederste kartet viser bunntopografien slik den vil se ut ved maksimal utfylling.



**Figur 3.** Hypsografisk kurve for Engebøbassenget. Bassengets areal i horisontale snitt i forskjellige dyp er tegnet ved henholdsvis dagens topografi (svart kurve), etter omtrent 15 års utfylling (rød kurve) og etter omtrent 50 års utfylling (blå kurve).

**Tabell 5.** Beskrivelse av snittene som begrenser Engebøbassenget i Figur 2.

	<b>Tverrsnittareal (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Bredde (m)</b>	<b>Maksimalt dyp (m)</b>
<b>Snitt A</b>	31354	800	54.4
<b>Snitt B</b>	208734	1100	270.5

**Tabell 6.** Engebøbassengets volum fra overflata til bunn basert på bunntopografien i modellen.

	<b>Volum (mill m<sup>2</sup>)</b>	<b>Prosentvis endring</b>
Dagens topografi	2200	0
Etter endt dagbrudd	2177	1
Ved maksimal utfylling	2052	7

## 4. Sjiktningen i Førdefjorden

### 4.1 Datagrunnlag

Når tidevannet presser vann ut og inn gjennom Ålasundet, vil det ved Ålasundterskelen på 55 m dyp sannsynligvis danne indre bølger som vil bre seg innover i Førdefjorden og ut i Engebøbassenget. Disse indre bølgene manifesterer seg som at tetthetsflatene i fjorden svinger opp og ned. Strømforholdene i Engebøbassenget vil være påvirket av disse indre bølgene, fra overflaten og til et godt stykke under terskeldypet på 55 m (ned til omtrent 200 m, se **Figur 14**).

I dette kapitlet ønsker vi å belyse variasjonen i sjiktningen i Førdefjorden. NVE utførte jevnlig målinger av hydrografi (saltholdighet og temperatur) i Førdefjorden fra 1974 til 1982. Målingene har i noen av årene blitt foretatt hver 14. dag. Disse dataene utgjør et fyldig datagrunnlag som dekker sesongvariasjonene ned til 70 meters dyp. Vi har benyttet data fra NVE sine hydrografiske stasjoner Leknes, Hellenes, Helle, Buanes, Liabøen, Slåteskornes og Rotenes (se **Tabell 7** og **Figur 1**). Det er god spredning på data fra hele de indre delene av fjorden. Datagrunnlaget fra under 70 m dyp er mindre, men målinger fra Sundfjord og Bjerkeng (2008) viser at sjiktningen er liten under 150 m dyp.

**Tabell 7.** Noen av NVE sine hydrografiske stasjoner i Førdefjorden.

Stasjon	Breddegrad	Lengdegrad
Leknes	N 61°28.4'	Ø 5°28.9'
Helleneset	N 61°27.1'	Ø 5°29.0'
Helle	N 61°27.5'	Ø 5°33.1'
Buanes	N 61°28.3'	Ø 5°38.4'
Liabøen	N 61°29.6'	Ø 5°41.0'
Slåteskornes	N 61°29.9'	Ø 5°43.7'
Rotenes	N 61°29.2'	Ø 5°48.0'

### 4.2 Ferskvannstilførsel

Ferskvannstilførselen er bestemmende for sjiktningen i de øverste meterne i fjorden. Tilførselen av ferskvann fra de 10 største elvene modellområdet er lagt inn i modellen. **Tabell 8** viser hvilke elver som er tatt med. Den totale midlere ferskvannstilførselen i modellen er 89 m<sup>3</sup>/s. Årlig middel vannføring er hentet fra nve.no.

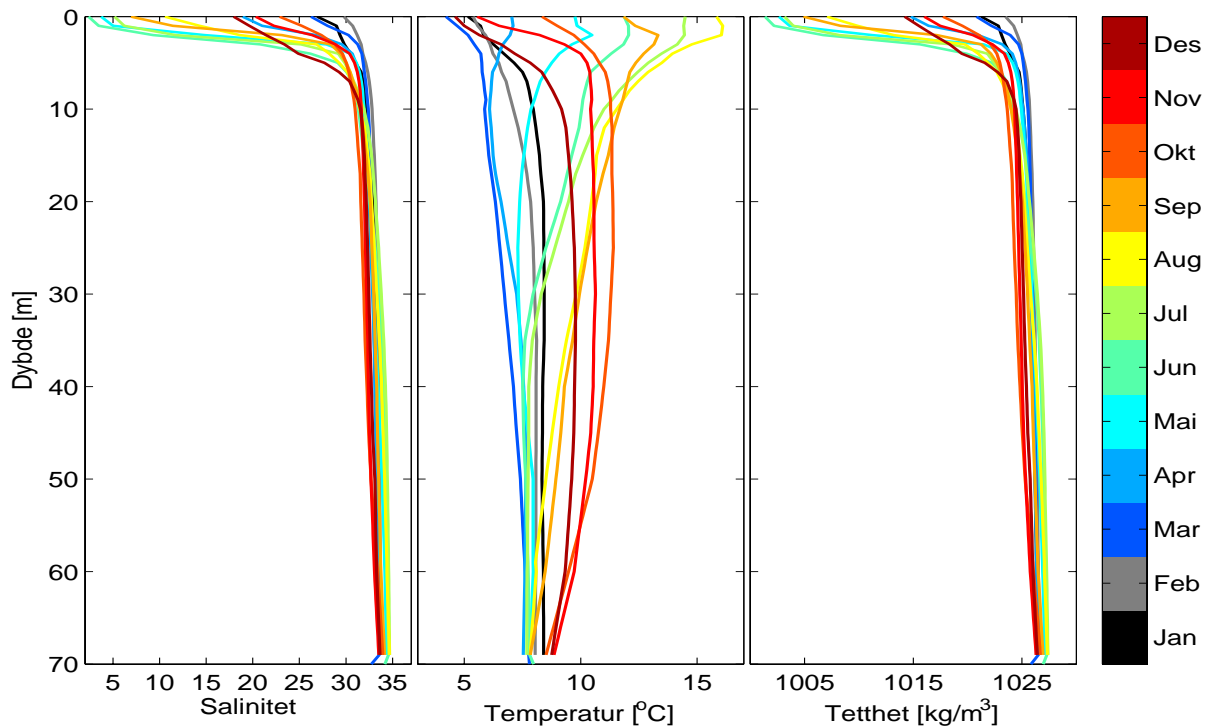
**Tabell 8.** Årlig middel vannføring i de ti største elvene i modellområdet.

Nr	Elv	Vannføring (m <sup>3</sup> /s)
1	Skarvenvassdraget	3.89
2	Heilevangselva	1.16
3	Soleimselva	1.96
4	Kråkeneselva	0.62
5	Gravdalselva	0.51
6	Jølstra	52.84
7	Erdøla	1.28
8	Nausta	24.60
9	Stølselva	1.06
10	Daleelva	1.09

### 4.3 Sjøtning gjennom året

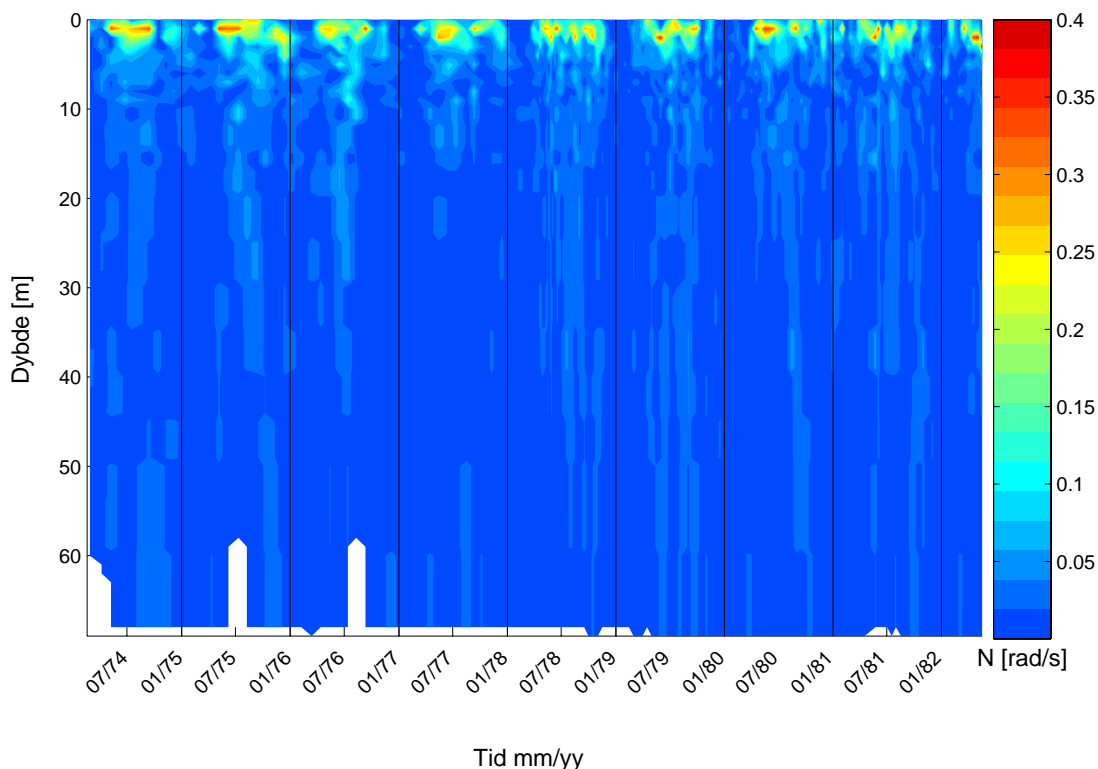
**Figur 4** viser hvordan den gjennomsnittlige saltholdigheten, temperaturen og vannmassenes tetthet i fjorden varierer i løpet av året. Det er saltholdigheten som dominerer variasjonen i tettheten. Fra 70 m og opp til 10 m er det liten sesongvariasjon i saltholdigheten. Over 10 m derimot, ser vi at det er markert ferskere vann mellom mai og september. Dette gir en skarpere gradient for saltholdighet og tetthet og fører til en meget stabil sjiktning. I vintermånedene januar til mars er sjiktningen en del svakere enn i sommerhalvåret.

**Figur 5** viser variasjoner i Brunt-Väisala-frekvensen (oppdriftsfrekvensen)  $N$  (rad/s) på målestasjonen Leknes nær Engebø. Oppdriftsfrekvensen forteller hvor sterk sjiktningen er. Er oppdriftsfrekvensen stor så vil et gitt volum med vann som blir forflyttet vertikalt, raskt svinge tilbake til sin likevektsposisjon. Er oppdriftsfrekvensen lavere, vil dette gå saktere. Når oppdriftsfrekvensen er lav vil utslaget på de indre bølgene bli større fordi det da er lettere å flytte vannet ut av sin likevektsposisjon. Mesteparten av variasjonen skjer i overflatelaget som skyldes ferskvannstilførsel. Det er liten variasjon i sjiktningen under terskeldyp på 55 m dyp. Figuren viser også at  $N$  varierer lite fra år til år.



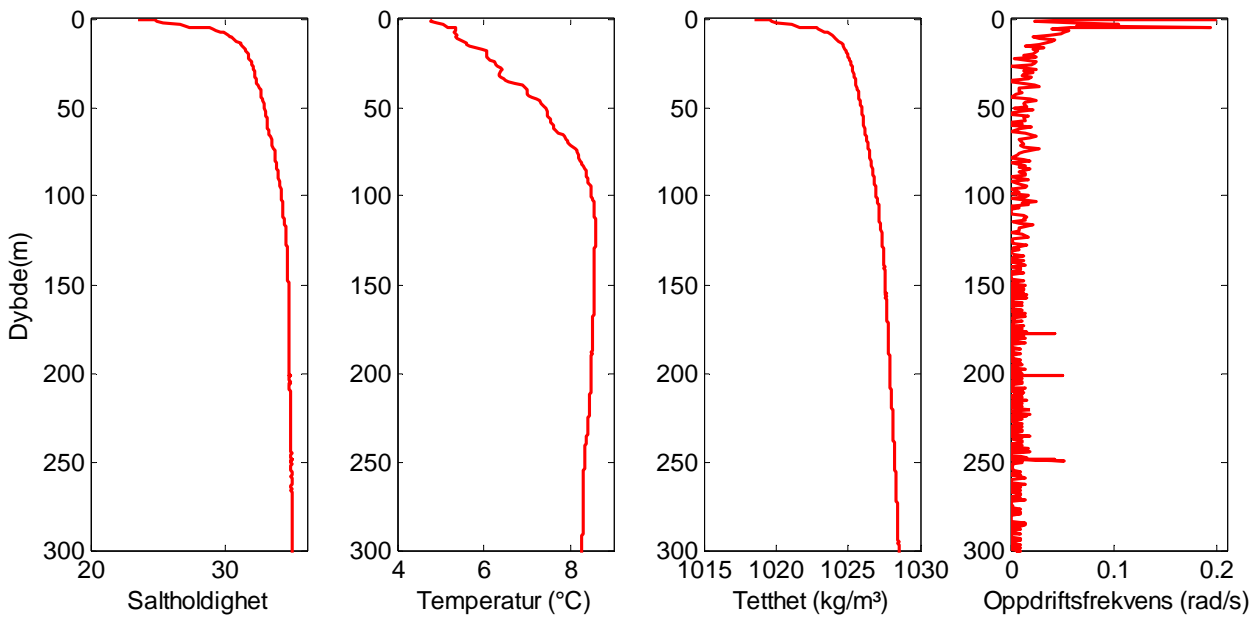
**Figur 4.** Månedsmiddel av saltholdighet, temperatur og tetthet for alle stasjonene i Førdefjorden (beregnet for tidsrommet 1972-82).





**Figur 5.** Brunt-Väisala frekvensen (oppdriftsfrekvensen)  $N$  gitt i radianer per sekund for stasjonen Leknes som er den ytre stasjonen nærmest Engebø. Tidsrommet er 1972-82 og de lodrette svarte linjene markerer januar hvert år.

**Figur 6** viser den sjiktningen som ble brukt i modellkjøringene. Det ble i modellkjøringene brukt den samme sjiktningen i hvert av modellens beregningspunkter som startbetingelse. Det ble antatt at den horisontale variasjonen i sjiktningen innover i fjorden først og framst vil påvirke strømforholdene i overflatelaget. Data fra fra mars 2008 ble brukt fordi det ble målt strøm ved bunn på stasjon F1 i denne perioden. Gjennomsnittlig oppdriftsfrekvens fra 70 m og til bunn var 0.006 rad/s i målingene fra mars 2008.



**Figur 6.** Sjiktning målt ved stasjon F1 mars 2008 som ble brukt i modellkjøringene.

#### 4.4 Vannsøylens tyngdepunkt

Senere i rapporten skal vannsøylens tyngdepunkt utenfor Engebø beregnes. Når vannmassene blandes heves tyngdepunktet. Derfor er dette et mål på blandingsforholdene i bassenget. La  $\rho(z)$  være vannets tetthet som funksjon av dypet  $z$ . Den vertikale akse er positiv oppover og går fra bunnen ( $z = -H$ ) til overflata ( $z = 0$ ). Vannsøylens tyngdepunkt  $z_g$  fra bunn til et dyp  $z = -h$  er da

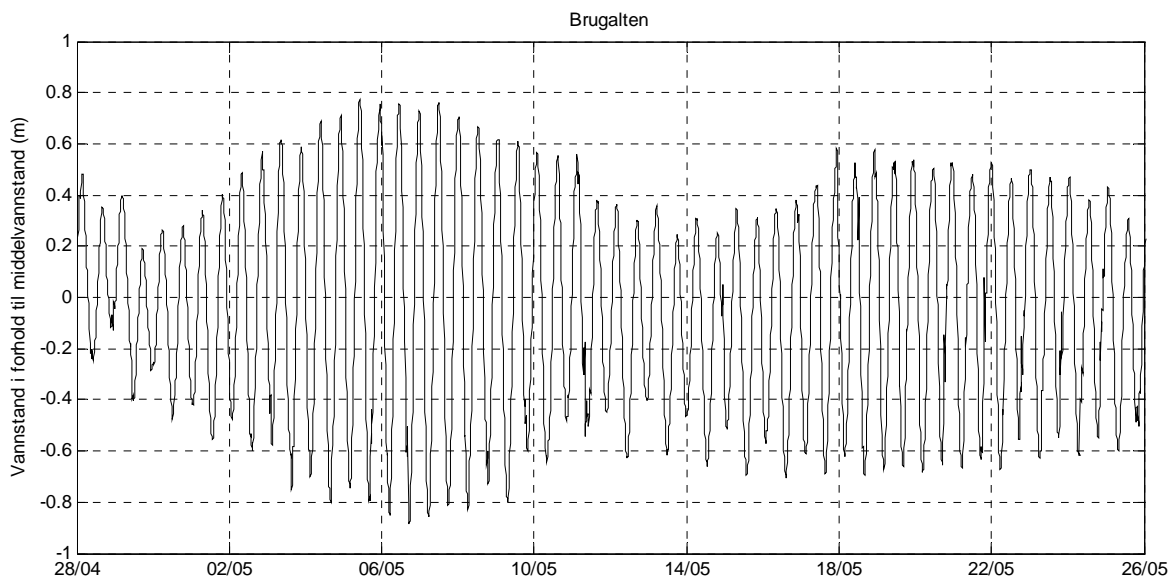
$$z_g = \frac{\int_{z=-h}^{z=0} \rho(z) \cdot z \cdot dz}{\int_{z=-H}^{z=-h} \rho(z) \cdot dz} \quad (1)$$

Ferskvannstilførselen øker sjiktningen i det øverste laget samtidig som tyngdepunktet til hele vannsøylen senkes fordi tyngre vann byttes ut med ferskere og lettere vann i overflatelaget. I denne rapporten fokuseres det på hva som skjer under overflatelaget, og ved å se på vannsøylen fra bunn til 50 meters dyp forventes det at vertikal blanding vil heve tyngdepunktet siden det antas at elvene ikke påvirker sjiktningen dypere enn 50 meter. Resultater fra disse beregningene blir presentert i **Figur 12**.

## 5. Tidevann

Mesteparten av bevegelsesenergien i modellen kommer fra tidevannet som tilfører energi til modellområdet gjennom den åpne randen i vest. Den viktigste halvdaglige komponenter (M2) og den viktigste daglige komponenten (K1), er beregnet fra en modell med 150 meters horisontal oppløsning som dekker hele Sunnfjord (Staalstrøm m. fl., 2009). Tidevannskomponentene for denne modellen har blitt beregnet ved å kjøre harmonisk analyse av data fra met.no sin modell MI-POM som er satt opp for norske farvann for et rutenett med 4 km oppløsning. Tidevannsdataene har så blitt interpolert fra 150 m grid til 100 m grid.

Spring- og nippflo, altså sterkt og svakt tidevann oppstår på grunn av samspillet mellom tidevannskomponentene M2 og S2, månen og solens halvdaglige komponenter, som har litt forskjellig periode. Når fasene til M2 og S2 sammenfaller er det springflo og når de er i motfase er det nippflo. Siden bare M2 er med i modellen, vil vi ikke få spring- eller nippflo selv om vi kjører modellen i lengre perioder. For å simulere effekten av varierende tidevannsamplitude, kjøres modellen med henholdsvis moderat og stor tidevannsvariasjon. **Figur 7** viser målt vannstand ved Brugalten fra 27. april til 26. mai 2008 (se **Figur 1**). Den største forskjellen mellom høyvann og lavvann i målingene er 1.6 meter. Den minste differansen er 0.7 meter. Modellen har blitt kjørt med scenarier der forskjellen mellom høy- og lavvann ved B1 er henholdsvis 0.9 og 1.4 meter. Til sammenligning så er forskjellen mellom middels høyvann og lavvann ved Statens kartverk sin målestasjon ved Måløy 1.2 m.



**Figur 7.** Målt vannstand ved stasjon Brugalten (B1).

## 6. Kvalitetssikring av modellen

### 6.1 Strømmålinger i overflata

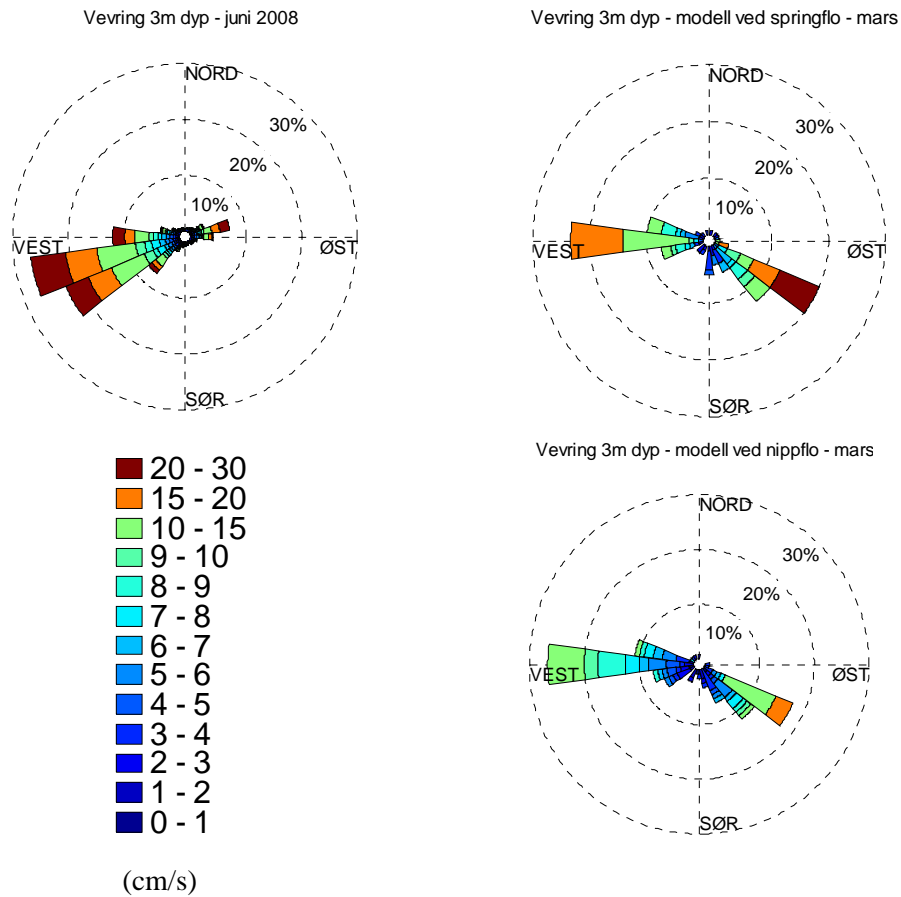
Fra 30. mai til 27. juni 2008 ble det målt strøm i 3 meters dyp utenfor Vevring (Staalstrøm og Molvær, 2008).

**Figur 8** viser målt strømretning sammenlignet med strømretningen til modellkjøringene. Strømretningen er presentert som polare histogram som viser antall målinger eller beregninger i hver sektor på 15°. Fargene på søylene angir hvilke strømshastigheter som har vært i hver sektor.

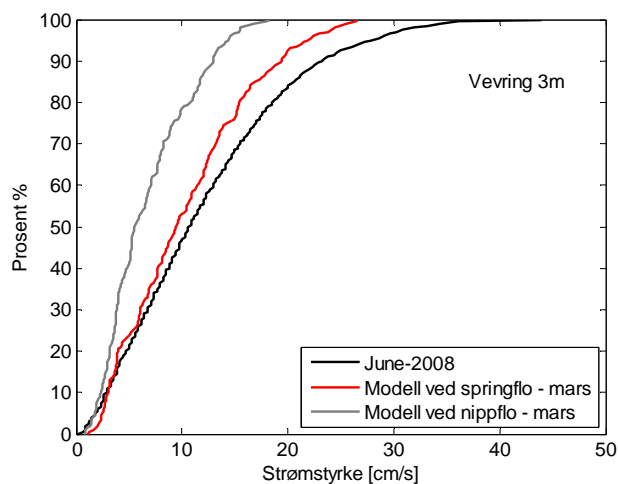
Oppe til venstre sees strømmålingene fra juni 2008. Strømmålingene er foretatt nær land (omtrent 50 m) og er dermed påvirket av topografien. Siden modellen har en horisontal oppløsning på 100 meter er den virkelige topografien mindre godt gjengitt der hvor den varierer mye. Er målingene styrt av topografiske detaljer som er mindre enn det som er oppløst i modellen, så vil ikke modellen gjenspeile dette. Strømmen beregnet i modellen er også topografisk styrt, men av modelltopografien og ikke den virkelige topografien.

Modelldataene viser at strømmen går langs land slik som i målingene. I målingene dominerer den strømmen som går ut av fjorden, noe som sannsynligvis skyldes ferskvannstilførsel fra indre deler av fjorden. Data fra [www.nve.no](http://www.nve.no) viser at vannføringen i Jølstra kan være 1.5 ganger så stor som middelvannføringen i 10 % av tiden. I modellkjøringene med sjiktning fra mars er det mindre utgående strøm. I modellen er det benyttet konstante verdier for vind og ferskvannstilførsel. Dette er gjort fordi det i denne rapporten fokuseres på strømforholdene nær bunn, og varierende vindforhold og ferskvannstilførsel påvirker strømforholdene i de øverste 10-20 meterne. Modellen har tidligere blitt satt opp for området med lavere horisontal oppløsning, men med sterkere ferskvannstilførsel (Staalstrøm og Molvær, 2008). Modellen ga da mer utstrømmende vann i overflatelaget.

**Figur 9** viser den kumulative fordelingen av strømstyrken. Grafen viser hvor stor andel av målingene/beregningene som er lavere enn den strømstyrken som man kan lese av på den horisontale aksene. Den svarte heltrukne kurven viser målt strømstyrke. De to andre kurvene viser at modellen beregner middels strømstyrker som varierer mellom 50 og 85 % av den målte verdien, alt etter hvilken styrke på tidevannet man velger å bruke.



**Figur 8.** Strømroser for Vevring i juni 2008. Søylen angir prosentvis andel av data innenfor gitt retning. Fargene angir fordeling av strømstyrke i cm/s i gitt retning. Oppe til venstre ser vi resultat fra strømmålingene. De to strømrosene til høyre viser modellresultatene med springflo (øverst) og nippflo (nederst).



**Figur 9.** Kumulativ fordeling av strømstyrken (cm/s). Figuren viser hvor stor prosentandel av målepunktene som er lavere enn angitt strømstyrke. Den svarte linja viser resultat fra strømmålingene. Den røde linjen viser modellkjøringene for springflo, mens den grå linjen viser tilsvarende for nippflo.

## 6.2 Strømmålinger ved bunn

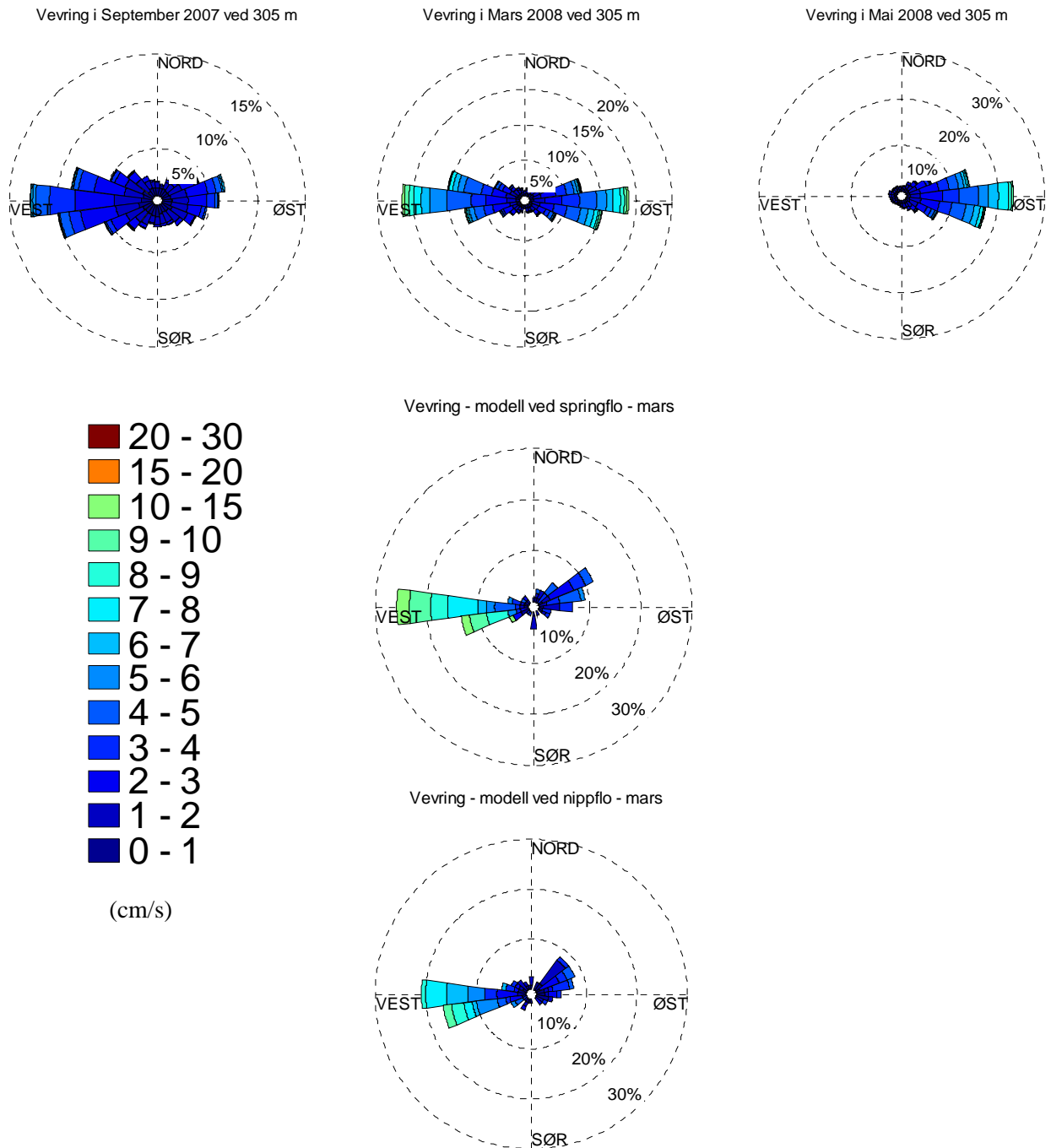
På stasjon F1 midt ute i Førdefjorden utenfor Vevring ble det gjort strømmålinger i dypvannet (303 m og 335 m) i tre perioder i løpet av høsten 2007 og våren 2008 (Sundfjord og Bjerkeng, 2008). Det ble benyttet strømmålere av typen RCM9, og målerne sto ute i ca én måned av gangen.

Fordi modellen krever utglatting av bunndypet, er modelltopografien noen steder noe dypere enn den virkelige topografien. I det punktet i modellen som blir sammenlignet med målingene er modellens bunndyp 319 m, mens det reelle bunndypet er 335 m. Strømmen i det nederste laget i dette punktet er gjennomsnittsstrøm fra 319 m til 290 m dyp. Vi har sammenlignet dette med måledataene fra 303 m dyp som er omtrent 30 m over bunn.

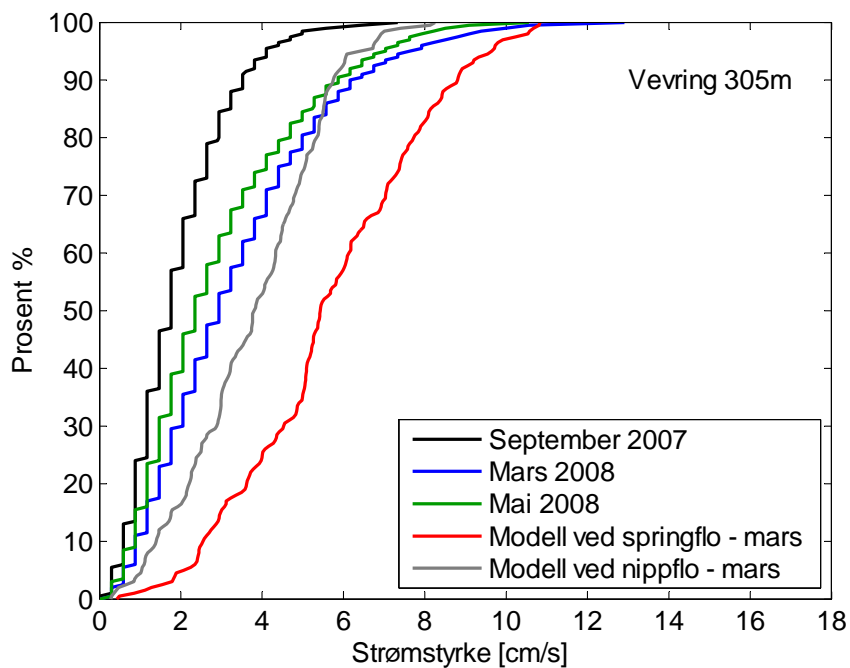
**Figur 10** viser strømroser for de tre måleperiodene samt modellkjøringene med mars-sjiktning ved springflo og nippflo. Vi ser at både strømstyrken og strømretningen varierer mye i de tre måleperiodene. I den første perioden er det mer utgående strøm i 305 m dyp enn inngående. Det er i den samme perioden innstrømning i 335 m dyp (Sunnfjord, 2008). I den andre perioden ser det ut til at 30 m over bunn i Engebøbassenget strømmer det like mye frem og tilbake. Strømstyrkene er nå noe høyere. Målt strøm nede ved bunn viser at det er noe mer utgående enn inngående strøm (Sunnfjord, 2008). I den siste perioden dominerer den inngående strømmen 30 m over bunnen, og strømstyrkene er da noe lavere igjen. Målt strømstyrke nede ved bunn viser at den inngående strømmen dominerer også her, men i mindre grad (Sunnfjord, 2008).

Modellkjøringene med mars-sjiktning klarer rimelig bra å gjenskape strømretning i forhold til måledata fra mars 2008. Modellberegningene viser noe mer utstrømmende vann enn målingene fra 305 m dyp, men dette stemmer bedre med målingene nede ved bunn.

Ser vi på den kumulative strømstyrkefordelingen (**Figur 11**), ser vi at målt strømstyrke i mars stemmer godt med beregnet strømstyrke når det er nippflo. Beregnet median strømstyrke er da 130 % av målt strømstyrke, mens beregnet 90 persentil strømstyrke er 90 % av målt strømstyrke. Modellen er følsom for styrken på tidevannet som legges inn. Ved springflo er beregnet median strømstyrke 180 % av målt medianverdi (5.3 cm/s mot 2.9 cm/s).



**Figur 10.** Strømroser nær bunn i Førdefjorden utenfor Vevring. Søylene angir prosentvis andel av data innenfor gitt retning. Fargene angir fordeling av strømstyrke i cm/s i gitt retning. De tre øverste strømrosene viser resultat fra strømmålingene i 3 perioder. I de to nederste strømrosene ser vi modellresultat for springflo (nest nederst) og nippflo (nederst).



**Figur 11.** Kumulativ fordeling av strømstyrken (cm/s). Figuren viser hvor stor prosentandel av målepunktene som er lavere enn angitt strømstyrke. Den svarte, blå og grønne linja viser resultat fra strømmålingene fra henholdsvis september 2007, mars 2008 og mai 2008. Den røde linjen viser modellkjøringene for springflo, mens den grå linjen viser tilsvarende for nippflo.



### 6.3 Oppsummering av kvalitetssikringen

Strømretningen i modelldataene er topografisk styrt av modelltopografien, mens målingene er topografisk styrt av den virkelige bunntopografien. Dette gjør at modellen kan gi en litt annen strømretning enn målingene. Sammenligning av målingene og beregningene i 3 meters dyp viser at modellen gjensker strømmens utgående og inngående retningen utenfor Vevring. Modellen benytter konstante verdier for vind og ferskvannstilførsel (vindstille forhold og årlig middel vannføring). I målingene fra juni 2008 er det betydelig mer ferskvannstilførsel enn det som er lagt inn i modellen. Modellresultatene gir derfor mindre dominerende og svakere utgående strøm utenfor Vevring. Modellen har tidligere blitt satt opp for området med lavere horisontal oppløsning, men med sterkere ferskvannstilførsel (Staalstrøm og Molvær, 2008). Modellen ga da mer utstrømmende vann i overflatelaget.

Sammenligning av strøm i 305 meters dyp må i denne rapporten ansees som viktigere enn sammenligning i overflatelaget.

Beregnet strømstyrke og strømretning når det legges inn sjiktning fra mars og nippflo stemmer rimelig godt med målingene fra mars 2008. Når det benyttes sterkere tidevann i modellen blir beregnet middels strømstyrke omtrent 180 % større enn målt verdi.

Modellen klarer ikke å gjenskape de innstrømmende vannbevegelsene som vises i målingene fra mai 2008, men det konkluderes med at strømforholdene i mars 2008 gjensker godt i modelldataene. Det var i denne perioden det ble målt høyest strømstyrker nær bunn.

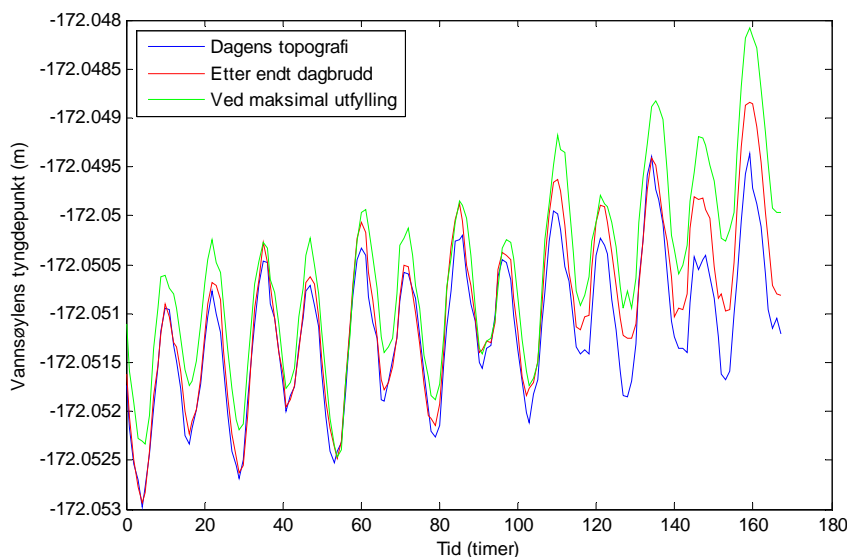
## 7. Resultater

Tolv forskjellige modellscenarier har blitt kjørt. Den tredimensjonale hydrofysiske modellen har blitt kjørt med tre forskjellige bunntopografier, to forskjellige vertikale sjiktninger og to forskjellige styrker på tidevannspådraget. **Tabell 3** viser de scenarioene som har blitt beregnet.

Først i dette kapitlet skal det gjøres en energibetraktning, for å se på om endret bunntopografi påvirker energinivået og den vertikale blandingen i bassenget. Deretter blir vannutvekslingen i Engebøbassenget beregnet. Vannutvekslingen er hovedsakelig styrt av vannstandsendingene og forventes ikke å bli merkbart påvirket av endret bunntopografi. For å forstå mer av hvordan strømstyrken varierer med dypet, er det nyttig å se på de indre bølgene i fjorden. Målinger har vist hvilke strømstyrker som forekommer i to punkter i overflata i en periode og ved bunn og i et punkt 30 meter over bunn i to perioder. Modellresultatene vil vise hvordan strømstyrken kan variere horisontalt og vertikalt i bassenget.

### 7.1 Blandingsprosesser

I **Figur 12** er massesenteret til vannsøylen under 50 meters dyp beregnet ut fra formelen i kapittel 4.3. Vannsøylen tyngdepunkt heves et par millimeter når vannet blandes i sju dager. Tyngdepunktet er et uttrykk for den potensielle energien i vannmassen. Når deponiet fylles økes den kinetiske energien i modellområdet noe, og dette fører til mer vertikal blanding. Vertikal blanding er en viktig forutsetning for dypvannsfornyelser i terskelfjorder, og økte blandingsforhold vil generelt øke hyppigheten av dypvannsfornyelser. Siden terskelen som skiller Engebøbassenget fra vannet utenfor er såpass dyp (210-215 m) vil dette sannsynligvis ikke ha stor effekt. Men for å vurdere effekten av blandingsforholdene på dypvannsfornyelser trenger man å betrakte utviklingen til sjiktningen i dypvannet over 1-2 år.



**Figur 12.** Beregnet massesenter for vannsøylen ved posisjon F1.

## 7.2 Vannutveksling i Engebøbassenget

Beregnet vannstand ved lokalitetene F1-F4 er sammenlignet for alle mars-sjiktningene. For springflo-scenarioet ble det beregnet identisk vannstand (korrelasjonskoeffisient  $r=1$ ) for hver lokalitet med både dagens bunntopografi og bunntopografi om henholdsvis 20 og 50 år. Det samme gjaldt nippflo-scenarioet.

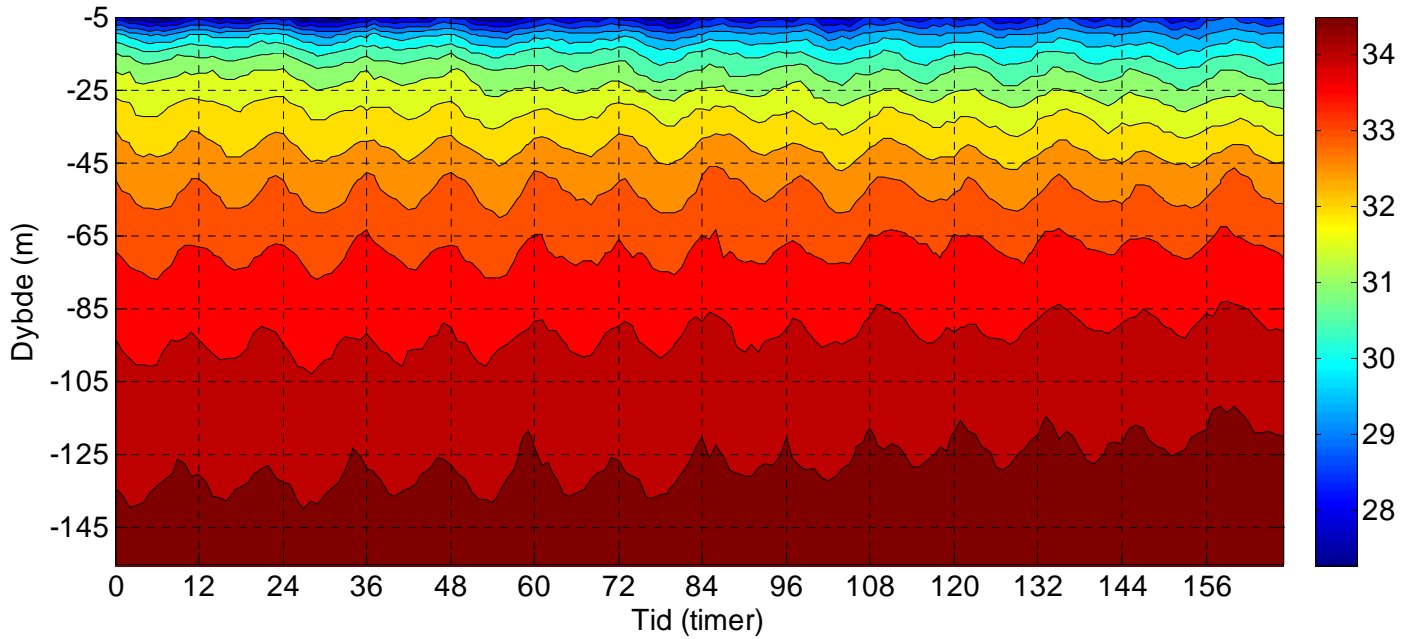
Beregnet vannstand på lokalitetene påvirkes i hovedsak av det halvdaglige tidevannet, med springflo-variasjon på +/- 0.7m og nippflo-variasjon på +/- 0.5m. Som en følge av dette er også volumtransportene inn og ut av Engebøbassenget gjennom snitt A og B også uendret ved forskjellige bunntopografier.

## 7.3 Forekomsten av indre bølger

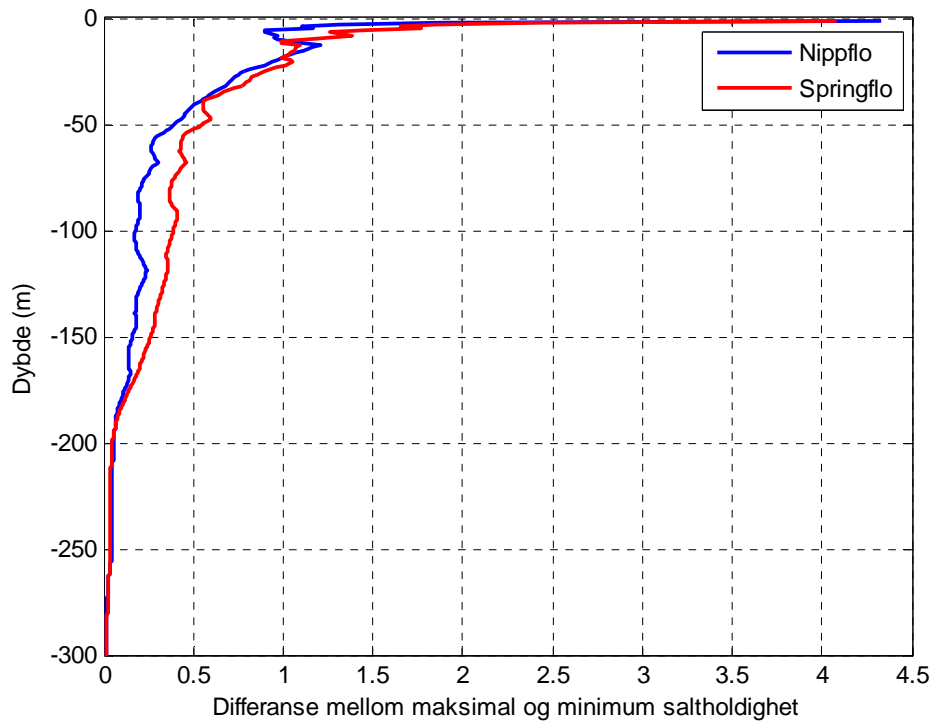
Tidevannsbølgen er en svært lang bølge som setter opp strøm fra overflata til bunn. Strømmen under terskeldyp blir stoppet av tersklene, mens strøm i overflatelaget fortsetter uhindret. Dette gjør at det dannes indre bølger som brer seg vekk fra terskelen innover og utover i fjorden. Disse indre bølgene manifesterer seg blant annet som at flater med konstant tetthet svinger opp og ned nede i vannmassen. Slike svingninger er observert i mange terskelfjorder, blant annet i Oslofjorden (Gade, 1967). Disse bølgene setter opp strømmer i vannmassene betydelig dypere enn terskeldyp.

Modellresultatene viser at det sannsynligvis eksisterer indre bølger i Engebøbassenget og at disse dannes av Ålasundterskelen. **Figur 13** viser beregnet saltholdighet i de øverste 150 meterne av vannsøylen som funksjon av tiden ved stasjon F2 utenfor Ålasundterskelen. Saltholdighetsflatene svinger opp og ned med samme periode som tidevannstrømmen over terskelen. Amplituden på de indre svingningene er av størrelsesorden 5 m. I **Figur 14** er den største variasjonen i saltholdighet tegnet opp som funksjon av dypet. Dette gir en indikasjon på maksimal amplitude for de indre svingningene. Modellen viser at saltholdigheten varierer mest over terskeldyp, men det er tydelige indre svingninger helt ned til 200 meters dyp. Sterkere tidevann gir større indre svingninger.

For og kvantifiserer hvor sterk den delen av strømmen er som er generert av de indre bølgene, kan man bruke en 2-lagsmodell som er beskrevet av Stigebrandt (1976). Utifra fjordens overflateareal innefor Ålasundterskelen (omtrent 37 km<sup>2</sup>), tverrsnittarealet over Ålasundterskelen (omtrent 31500 m<sup>2</sup>), terskeldypet (omtrent 50 m), høyden på terskelen over bunn (omtrent 200 m), gjennomsnittlig tetthet av de øverste 50 m av vannsøylen (omtrent 1024.3 kg/m<sup>3</sup> i mars 2008) og gjennomsnittlig tetthet av de vannsøylen under 50 m (omtrent 1027.8 kg/m<sup>3</sup> i mars 2008) kan amplituden på de indre svingningene samt størrelsesordenen på strømmen generert av de indre svingningene. Utifra disse forholdene kan amplituden på de indre svingningene anslås til 3.6 m, som er noe lavere enn det modellresultatene viser (se **Figur 13**). Strømmen generert av de indre bølgene anslås til 8 cm/s i gjennomsnitt over det nederste laget.



**Figur 13.** Modellens beregning av flater med konstant saltholdighet ved stasjon F2 ved springflo. Fargeskalen angir saltholdighet.



**Figur 14.** Forskjellen mellom høyeste og laveste beregnede saltholdighet i hvert dyp.

## 7.4 Vertikalsnitt i Engebøbassenget

I **Figur 2** er tegnet inn fire snitt på langs og på tvers av fjorden. I dette delkapitelet blir modellresultatene fra et vertikalt snitt fra Ålasundterskelen til Engebø og et snitt på langs av Engebøbassenget presentert. I **Figur 2** betegnes disse snittene henholdsvis med bokstaven C og D.

Beregninger av maksimal strømhastighet i snitt C er vist i **Figur 15** og **Figur 16**. Forskjellene i maksimal strømhastighet er ubetydelige etter endt dagbruddsfase, mens den har økt noe langs bunn ved maksimal utfylling. Ålasundterskelen skaper sannsynligvis indre bølgeaktivitet som påvirker strømfeltet noe ned til omtrent 200 meters dyp (**Figur 14**). Etter endt dagbrudd er bunnen på det høyeste hevet til 215 meters dyp. Det er da små forskjeller i strømmen langs bunn i forhold til førtilstanden.

**Figur 17** og **Figur 18** viser beregnet maksimal strømhastighet i snitt D. Økte strømhastigheter opptrer på fyllingens vestsida ved maksimal utfylling og ved sjiktning fra mars 2008. Strømf forholdene langs bunn blir påvirket også utover i Førdefjorden ved maksimal utfylling.

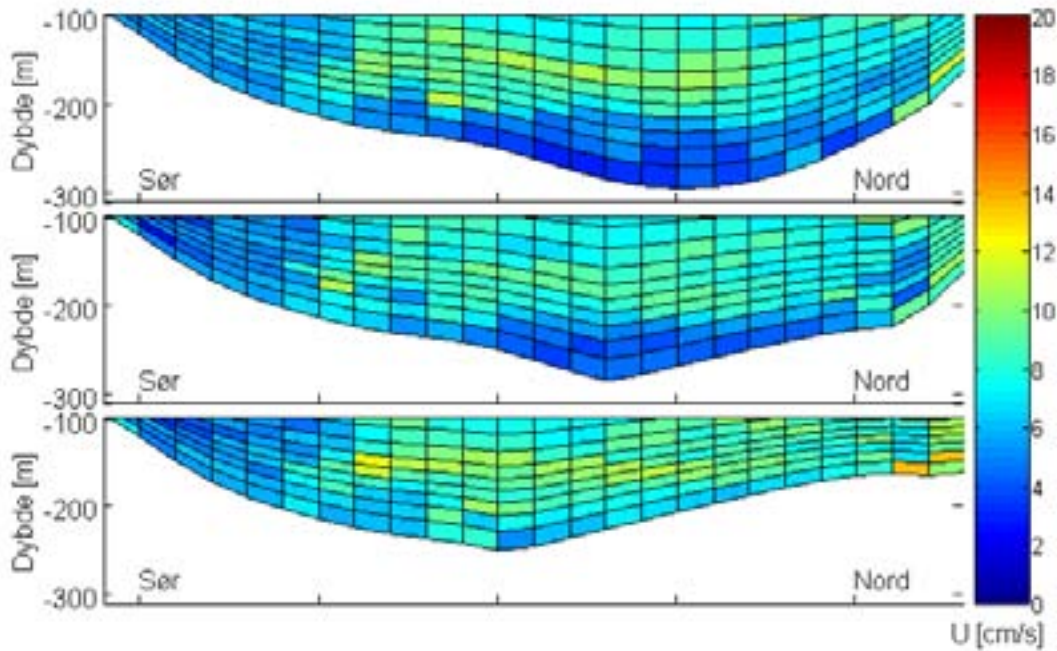
Ved maksimal utfylling er bunnen på det høyeste hevet til 150 meters dyp og skjærer inn i vannmassene som påvirkes av indre bølger. **Figur 19** viser beregnet strømhastighet ved posisjon F2. Sammenlignet med dagens situasjon er median strømhastighet ved maksimal utfylling tredoblet, fra omtrent 1.3 cm/s til 4.0 cm/s ved nippflo og fra omtrent 2.0 cm/s til 3.9 cm/s ved springflo. I figuren er også 10- og 90- persentilene tegnet inn som stiplede linjer. Persentilene angir den strømhastigheten hvor henholdsvis 10 % og 90 % av verdiene er under denne verdien. De høyeste strømhastighetene (90-persentilen) er også omtrent tredoblet hvis man sammenligner resultatene for dagens topografi med topografien ved maksimal utfylling, fra omtrent 2.5 cm/s til 8.4 cm/s ved nippflo og fra omtrent 3.8 cm/s til 10.4 cm/s ved springflo (se **Tabell 9** og **Tabell 10**). I denne sammenheng er det viktig å ta i betraktning at den beregnede strømhastigheten ved springflo var 2-3 ganger større enn den målte strømhastigheten (se **Figur 11**).

**Tabell 9.** Middels strømhastigheten i cm/s ved bunn ved stasjon F2.

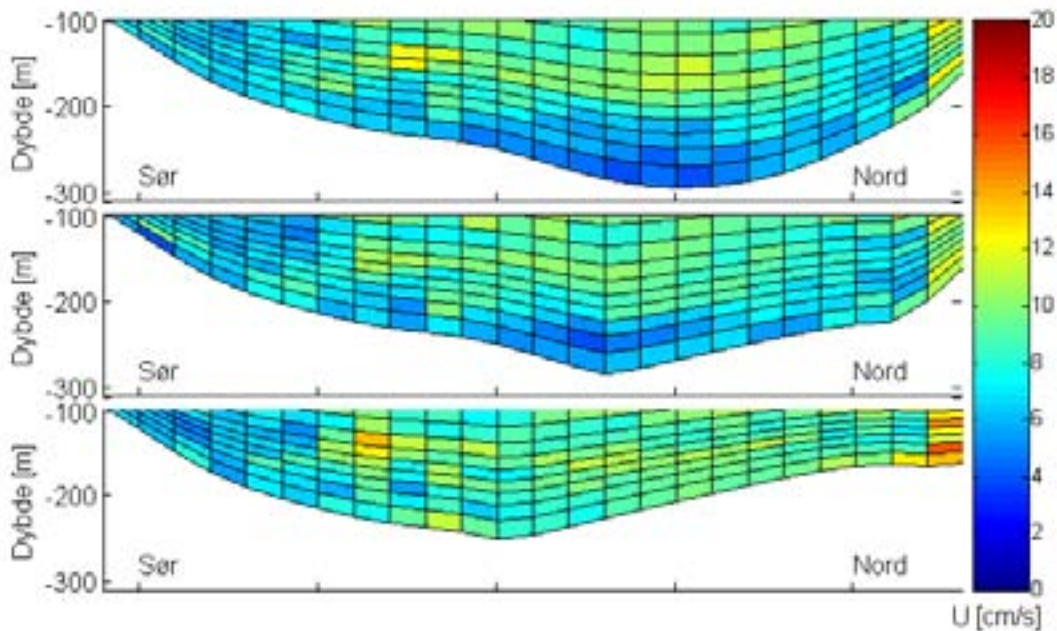
	Nippflo	Springflo
Dagens topografi	1.3	2.0
Etter endt dagbrudd	2.1	2.3
Ved maksimal utfylling	4.0	3.9

**Tabell 10.** 90-persentilen av strømhastigheten i cm/s ved bunn ved stasjon F2.

	Nippflo	Springflo
Dagens topografi	2.5	3.8
Etter endt dagbrudd	3.9	4.8
Ved maksimal utfylling	8.4	10.3

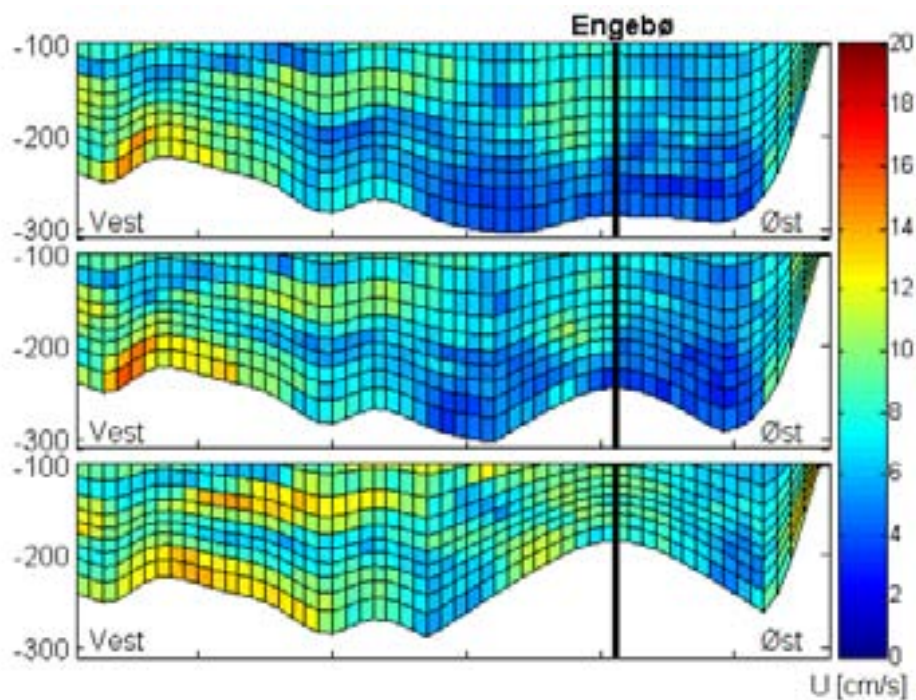


**Figur 15.** Beregnet maksimal strøm i snitt C (se **Figur 2**) ved sjiktning fra mars 2008 og nippflo. Den øverste figuren viser dagens situasjon, den midterste figuren viser situasjonen ved endt dagbrudd, og den nederste ved maksimal utfylling. Avstanden mellom hver markør på den horisontale aksene er 1000 m.

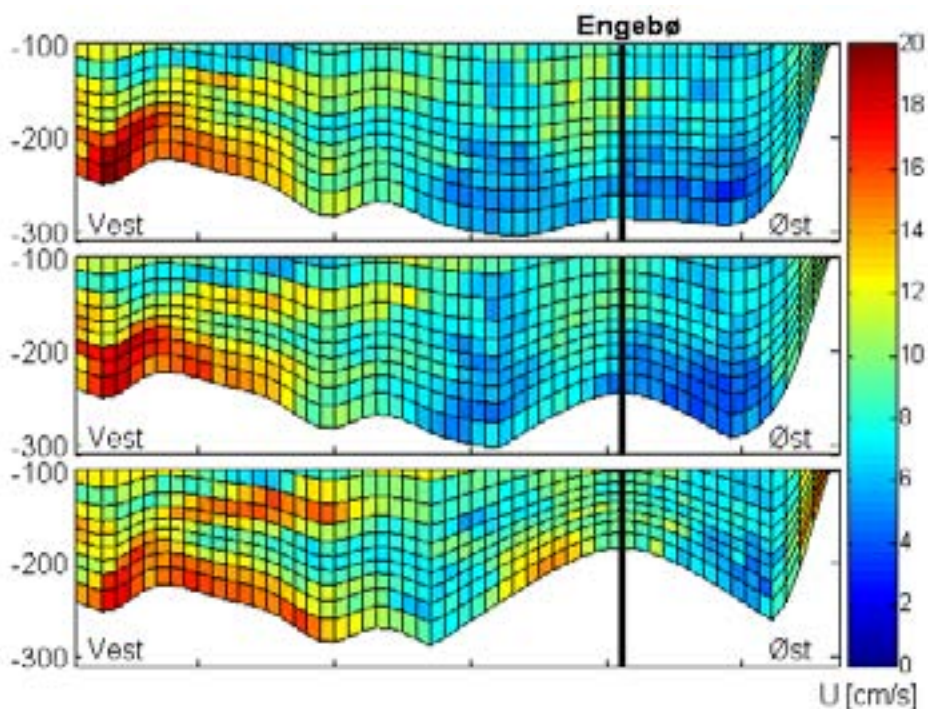


**Figur 16:** Beregnet maksimal strøm i snitt C (se **Figur 2**) ved sjiktning fra mars 2008 og springflo. Den øverste figuren viser dagens situasjon, den midterste figuren viser situasjonen ved endt dagbrudd, og den nederste ved maksimal utfylling. Avstanden mellom hver markør på den horisontale aksene er 1000 m.

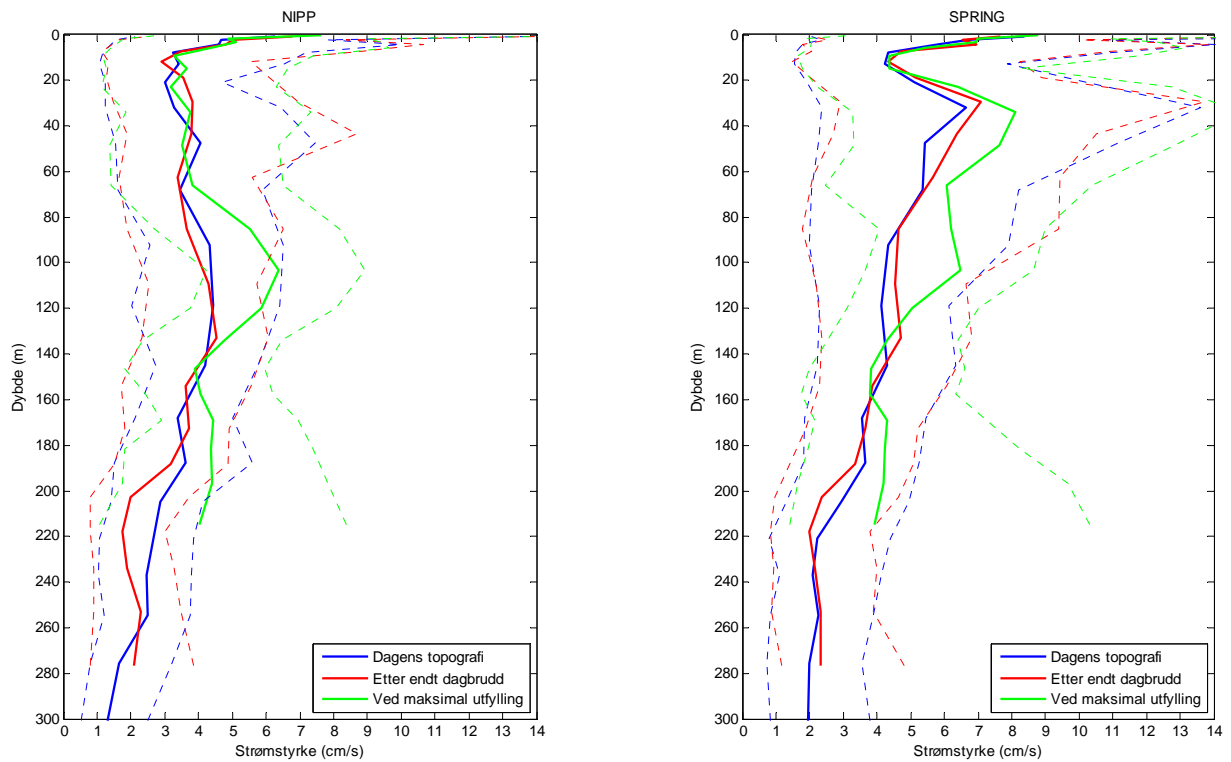




**Figur 17:** Beregnet Maksimal strøm i snitt D (se **Figur 2**) ved sjiktning fra mars og nippflo. Den øverste figuren viser dagens situasjon, den midterste figuren viser situasjonen ved endt dagbrudd, og den nederste ved maksimal utfylling. Avstanden mellom hver markør på den horisontale akse er 1000 m.



**Figur 18:** Beregnet maksimal strøm i snitt D (se **Figur 2**) ved sjiktning fra mars og springflo. Den øverste figuren viser dagens situasjon, den midterste figuren viser situasjonen ved endt dagbrudd, og den nederste ved maksimal utfylling. Avstanden mellom hver markør på den horisontale akse er 1000 m.



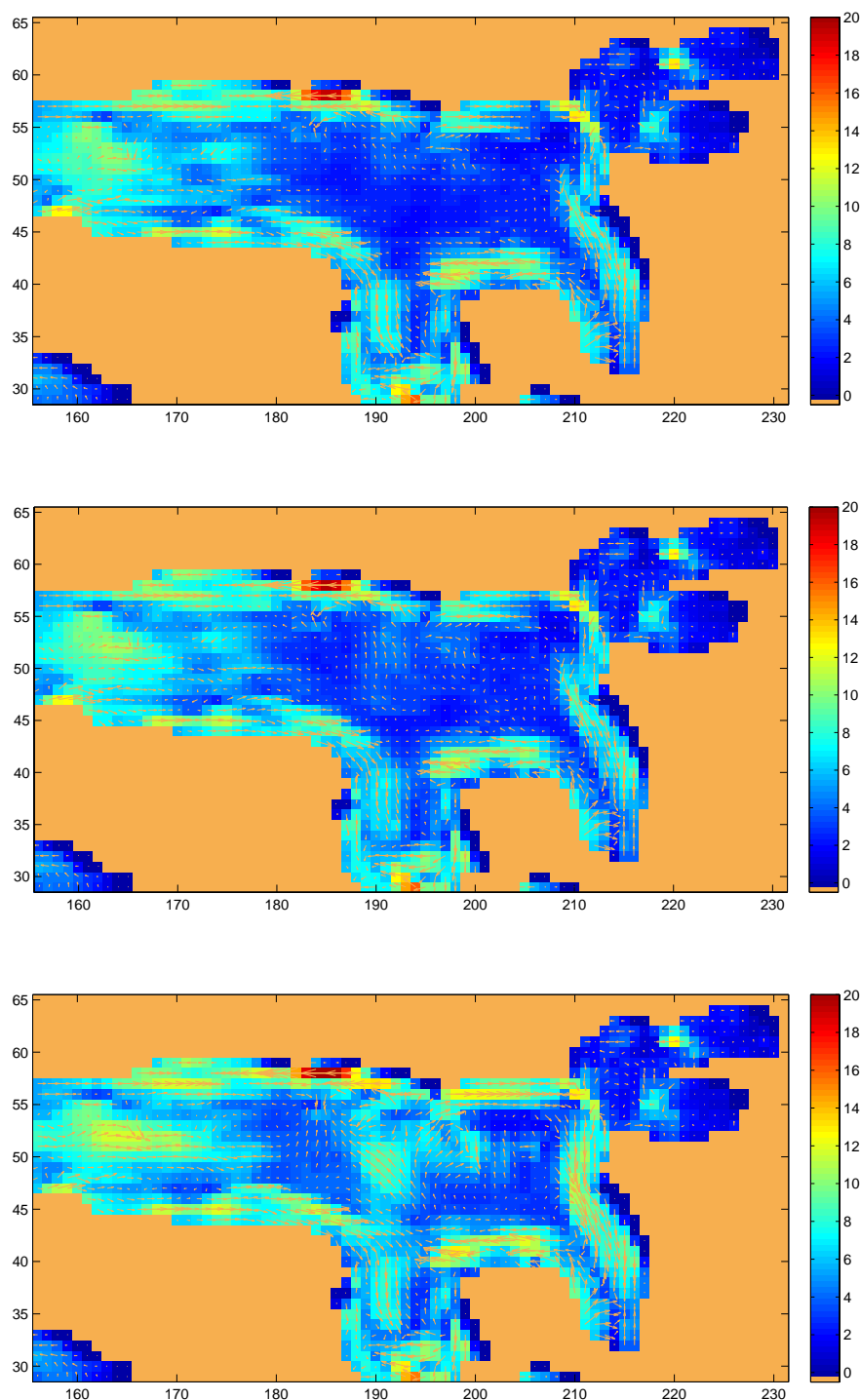
**Figur 19.** Beregnet strømstyrke på stasjon F2 (sør for Engebø) ved sjiktning fra mars 2008. Figuren til venstre viser situasjonen med nippflo, og figuren til høyre situasjonen ved springflo. De heltrukne linjene viser median strømstyrke som funksjon av dypet. De stiplede linjene viser henholdsvis 10 og 90 persentilen til strømstyrken i disse to situasjonene. De røde og grønne kurvene viser situasjonen ved henholdsvis endt dagbrudd og ved maksimal utfylling. Disse kurvene går på grunn av utfyllingen ikke like dypt som de blå kurvene som viser strømstyrken slik den er i dag.



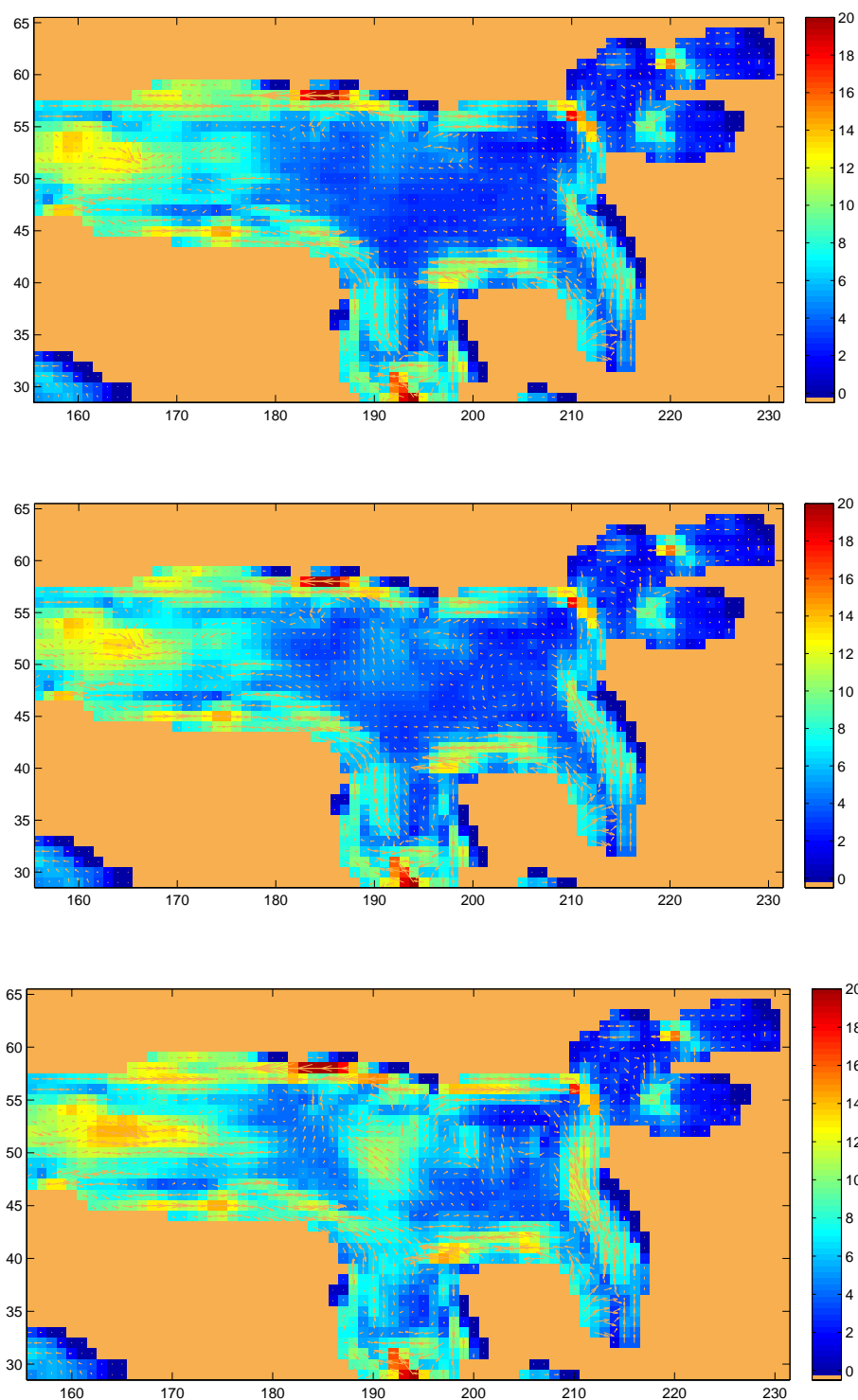
## 7.5 Horisontalt plott

**Figur 20** og **Figur 21** viser strømstyrken langs bunn i de 6 modellkjøringene hvor det er brukt sjiktning fra mars 2008. Fargeskalaen angir styrken til 90-persentilen til strømstyrken ved nippflo og springflo. 90 % av strømberegningene da er lavere enn den angitte verdien somr altså er et mål på de høyeste strømstyrkene som opptrer. Vi ser at de høye strømstyrkene øker på vestsiden av deponiområdet etter hvert som bunnen fylles ut. Igjen ser vi at effekten er liten etter endt dagbrudd, men at de høye strømstyrkene enkelte steder tredobles ved maksimal utfylling.

**Figur 20** og **Figur 21** viser også median strømstyrke ved svakt og sterkt tidevann. Den er presentert som piler, og viser det samme bildet som for 90 persentil strømstyrke. Lengden på pilene indikerer strømstyrken, og vi ser at også middelstrømmen øker på vestsiden av deponiområdet. Retningen på den økte middelstrømmen langs bunn ved maksimal utfylling er nordvest.



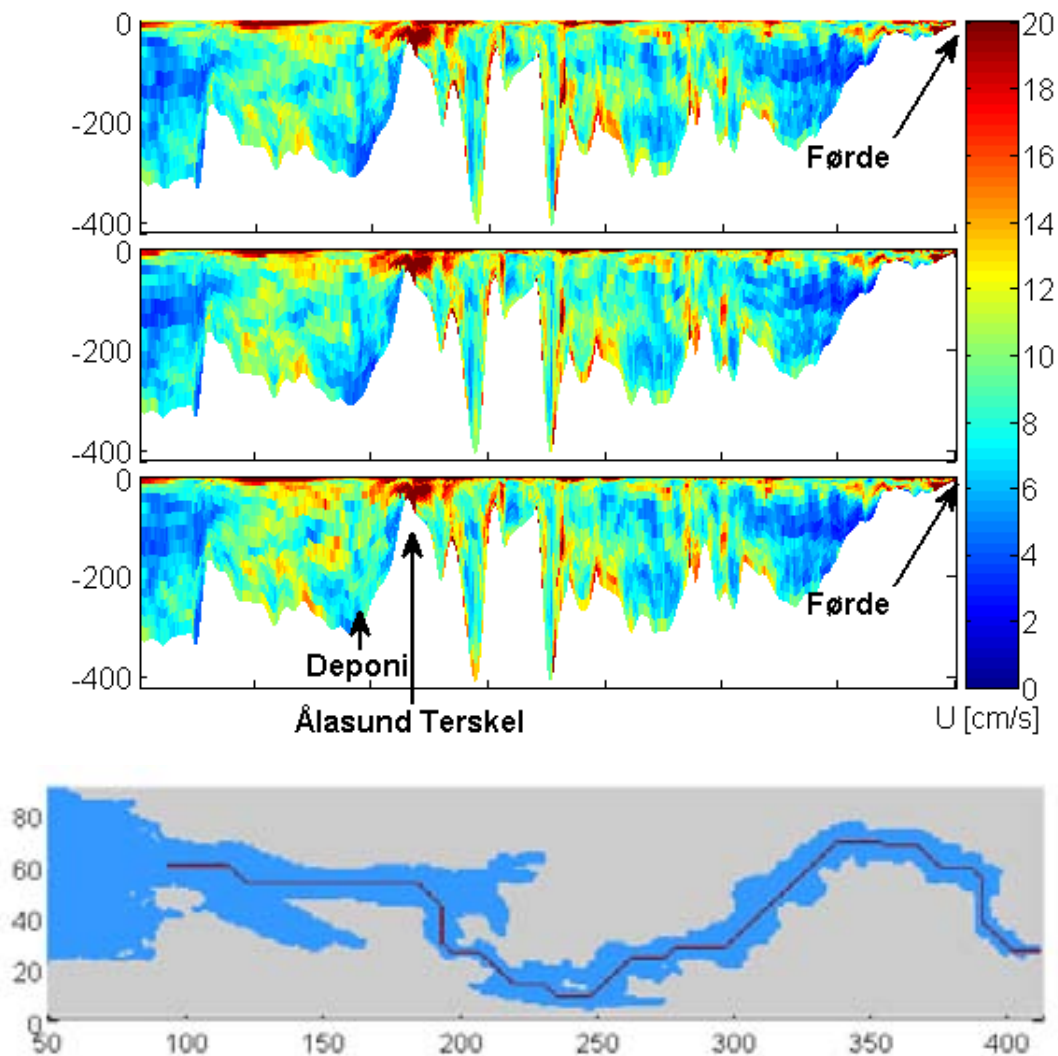
**Figur 20.** Beregnet Strøm ved bunn med sjiktning fra mars og nippflo. Den øverste figuren viser resultatene med dagens bunntopografi. Den midterste og nederste figuren viser resultatene henholdsvis med topografi etter endt dagbrudd og ved maksimal utfylling. Fargeskallen viser 90-persentilen av strømstyrken i cm/s. Pilene angir retningen til middelstrømmen.



**Figur 21.** Beregnet Strøm ved bunn med sjiktning fra mars og springflo. Den øverste figuren viser resultatene med dagens bunntopografi. Den midterste og nederste figuren viser resultatene henholdsvis med topografi etter endt dagbrudd og ved maksimal utfylling. Fargeskalen viser 90 persentilen av strømstyrken i cm/s. Pilene angir retningen til middelstrømmen.

## 7.6 Snitt på langs av fjorden

I **Figur 22** har den maksimale strømstyrken blitt tegnet inn langs et snitt på langs av hele Førdefjorden med sjiktning som i mars 2008 og nippflo. Som tidligere nevnt vil de maksimale strømstyrkene øke langs bunn i Engebøbassenget, men at strømforholdene som ventet ikke påvirkes merkbart utenfor bassenget når bunntopografien endres.



**Figur 22:** Snitt på langs av fjorden (midfjords) med sjiktning fra mars og nippflo. De hvite feltene i de tre øverste figurene angir bunntopografien med dagens topografi (øverst), etter endt dagbrudd (midten) og med maksimal utfylling. Den nederste figuren viser en skisse av Førdefjorden hvor det langsgående snittet er tegnet inn (markert med en rød linje). Fargeskalaen på de tre øverste figurene angir maksimal strømstyrke på langs av fjorden i cm/s.

## 8. Diskusjon

De resultatene som er presentert i denne rapporten er basert på modellberegninger. Alle modeller har usikkerhet knyttet til seg, som vil stå i forhold til hvor mange målinger av strøm og sjiktning man har å sammenligne med og hvor mange forskjellige situasjoner man tar hensyn til. Det er her blitt forsøkt å gi en beskrivelse av en normalsituasjon, og ikke forsøkt på gjøre en risikovurdering hvor ekstreme verdier har blitt brukt.

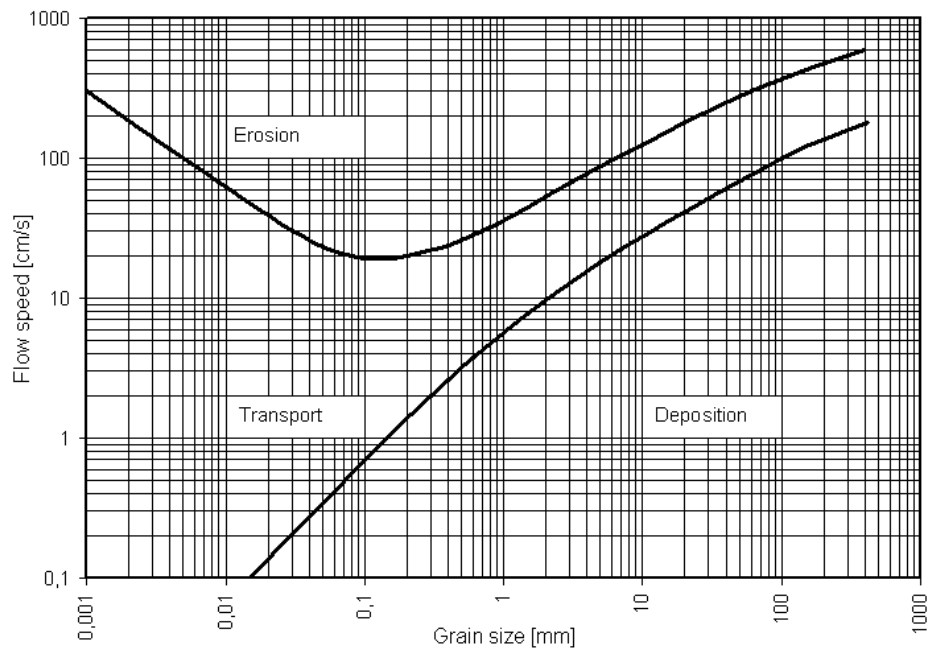
Modellresultatene sannsynliggjør at det fins indre bølgeaktivitet ned til omtrent 200 meters dyp. Dette er karakteristisk for terskelfjorder (se for eksempel Gade, 1967). Dette betyr at det er vertikale bevegelser i vannmassene som skaper strømmer som kommer i tillegg til tidevannstrømmene. Utifra anslag basert på betraktninger av fjorden som et 2-lag system (Stigebrandt, 1976) kan denne strømstyrken anslås til maksimalt å være omtrent 8 cm/s i gjennomsnitt over hele vannsøylen i det nedre laget (fra bunn og opp til 50 m).

**Tabell 9** viser middelverdi av beregnet strømstyrke i en periode på 7 dager når det henholdsvis er lagt inn liten og stor tidevannsvariasjon og sjiktning fra mars 2008. **Tabell 10** viser det samme, men her er 90 persentilen av beregnet strømstyrke vist.

Når bunnen heves inn i den delen av vannmassen hvor det sannsynligvis er indre bølgeaktivitet ved maksimal utfylling så kan strømstyrken langs bunn bli opp til tre ganger så stor. Det må påpekes at når modellens beregnede strømstyrker nær bunn på stasjon F2 sammenlignes med målingene fra mars 2008, så er de 120-180 % større enn målt verdi. Når bunnen er hevet til omtrent 215 m ved endt dagbrudd er virkningen liten. De økte strømstyrkene er i følge Hjulstrøms diagram (**Figur 23**) ikke så store at erosjon av partikler fra bunn vil øke, men små partikler som er allerede svever i vannet langs bunn vil i større grad blir transportert vekk.

Under stagnerte forhold blir det mer bevegelsesenergi i vannmassene når bunnen heves. Dette fører til at den vertikale blandingen vil øke noe i Engebøbassenget under 50 m når masse deponeres. For å undersøke hvilken betydning dette vil ha for dypvannsfornyelsen vil ikke modellberegninger alene være tilstrekkelig. Det vil da også være nødvendig å overvåke sjiktningen i dypvannet over tid (1-2 år).

I denne studien er det antatt at deponiet vil ha form som en halv kjegle. I løpet av gruvedriften vil strømforholdene forme deponiet. Formen vil sannsynligvis avvike mest fra en ren kjegleform der det er beregnet høyest strømstyrker langs bunn.



**Figur 23.** Hjulstrøms diagram over sammenhengen mellom strømstyrke og erosjon.

## Referanser

Gade H G (1967) *Hydrografi, Delrapport 2, Oslofjorden og dens forurensningsproblemer, Undersøkelser 1962-1965*, Niva rapport OR-0191c

Haidvogel, Arango, Budgell, Cornuelle, Curchister, Lorenzo, Fennel, Geyer, Hermann, Lanerolle, Levin, McWilliams, Miller, Moore, Powell, Shchepetkin, Sherwood, Signell & Warner (2007) *Ocean forecasting in Terrain-following Coordinates: Formulation and Skill Assessment of the Regional Ocean Modelling System*, Journal of Computational Physics (2007).

Staalstrøm A og Molvær J (2008) *Spredning av partikler i overflatelaget utenfor Engebøfjellet - Modellering av vannkvalitet som følge av utslipp fra gruveaktivitet*, NIVA rapport, løpenr. 5690-2008.

Sundfjord A og Bjerkeng B (2008) *Strøm, turbiditet og hydrografi i fjordbassenget utenfor Enggebø, Førdefjoren. Målinger utført for konsekvensutredning for deponi av gruvegang*, NIVA rapport, løpenr. 5662-2008.

Staalstrøm A (2009) *Validering av havmodellen i AquaStrøm prosjektet*, NIVA rapport, løpenr. 5842-2009

Stigebrandt A (1976) *Vertical Diffusion Driven by Internal Waves in a Sill Fjord*, Journal of physical oceanography, vol. 6, pp. 486-495

Urke H A, Staalstrøm A, Molvær J, Viljugren H og Jansen P (2009) *Aquastrøm Sunnfjord - Kartlegging og detaljert beskrivelse av strømforhold og risiko for smittespredning i Sunnfjord*, NIVA rapport, løpenr. 5853-2009.

NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

NIVA gir offentlig vannforvaltning, næringsliv og allmennheten grunnlag for god vannforvaltning gjennom oppdragsbasert forsknings-, utrednings- og utviklingsarbeid. NIVA kjennetegnes ved stor faglig bredde og godt kontaktnett til fagmiljøer i inn- og utland. Faglig tyngde, tverrfaglig arbeidsform og en helhetlig tilnæringsmåte er vårt grunnlag for å være en god rådgiver for forvaltning og samfunnsliv.



Norsk institutt for vannforskning

Gaustadalléen 21 • 0349 Oslo  
Telefon: 02348 • Faks: 22 18 52 00  
[www.niva.no](http://www.niva.no) • [post@niva.no](mailto:post@niva.no)