

Fastlandsforbindelsen mellom Nøtterøy og Tønsberg

Endringer i strømforholdene i Byfjorden og Tønsberg havn

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 533



Tittel

Fastlandsforbindelsen mellom Nøtterøy og Tønsberg

Undertittel

Endringer i strømforholdene i Byfjorden og Tønsberg havn

Forfatter

Bjørn Gjevik, Elisabeth Gundersen og Hilde C. Sandbo

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

Seksjon

Geoteknikk og skred

Prosjektnummer

206998

Rapportnummer

Nr. 533

Prosjektleder

Steinar Aspen

Godkjent av

Kari Therese Svinø

Emneord

Fastlandsforbindelse, strømforhold, sediment transport, tidevann, Aulielva, Kanalen, Byfjorden, Vestfjorden

Sammendrag

I forbindelse med kommunedelplan for fastlandsforbindelsen fra Nøtterøy og Tjøme har vi sett på konsekvenser av to ulike fjordkryssinger. I hver trase er alternativer med senketunnel og åpne påkjøringer med spuntvegger, og bruer vurdert. Sjøbunnen er modellert før og etter tiltak. Vannføring i Aulielva er basert på årsavrenningsdata og antatt flomvannføring. Strømningsberegningene drives av antatte vannstandsforskjeller mellom Kanalen og Vestfjorden. Stormflo, flom i Aulielva og en større utfylling ved Smørberg er vurdert. Modellsimuleringene viser kun mindre endringer i strømningsfeltet på grunn av inngrepene. Det kan oppstå separasjon av strømmen med dannelse av bakevjer i kjølvannet. Grove overslag indikerer at bruløsningene med frittstående pelegrupper ikke vil ha stor innvirkning på gjennomstrømningen i fjorden. Resultatene i rapporten er i hovedsak basert på modellsimuleringer. Disse bør kalibreres mot målinger i neste planfase. Et forslag til måleprogram er gitt.

Title

Mainland connection between Nøtterøy and Tønsberg

Subtitle

Changes to current conditions in the City fjord and Tønsberg harbour

Author

Bjørn Gjevik, Elisabeth Gundersen and Hilde C. Sandbo

Department

Traffic Safety, Environment and Technology Department

Section

Geoteknikk og skred

Project number

206998

Report number

No. 533

Project manager

Steinar Aspen

Approved by

Kari Therese Svinø

Key words

Mainland Connection, Current conditions, City fjord, Tønsberg harbour

Summary

In connection with the municipal sub-plan for a mainland connection from the islands of Nøtterøy and Tjøme we have examined the consequences of two different fjord crossings. For both road alignments, we have considered alternatives with bridges or submerged tunnels with open entrances with sheet pile walls. The seabed is modelled before and after the interventions. Water flow in the Aulielva river is estimated on the basis of annual runoff data and estimated flood water flow. Flow calculations are based on anticipated water level differences between the Canal and Vestfjorden. Storm surges, floods in the Aulielva river and the effect of a large rock landfill at Smørberg have been taken into consideration. Model simulations show that the tunnels and sheet pile walls cause only minor changes in the flow field. There may be flow separations with formation of eddies in the wake. Rough estimates indicate that the bridges with freestanding pile groups will not significantly affect the flow in the fjord. The results in this report are mainly based on model simulations. These should be calibrated against measurements in the next planning stage. A proposal for a measuring programme is provided in the report.

Endringer i strømforholdene i Byfjorden og Tønsberg havn ved den planlagte fastlandsforbindelsen til Nøtterøy

av

Bjørn Gjevik¹, Elisabeth Gundersen², Hilde C. Sandbo³

Dato 17. februar 2017

¹Professor emeritus, Matematisk institutt, Universitetet i Oslo. epost: bjorn@math.uio.no

²Sjefsingeniør, Vegdirektoratet, epost: elisabeth.gundersen@vegvesen.no

³Overingeniør, Statens vegvesen Region øst, epost: hilde.sandbo@vegvesen.no

Innhold

1	Innledning	3
2	Kort beskrivelse av traséne	4
3	Kort oversikt over de fysiske forhold i Byfjorden og Tønsberg havn.	5
4	Ekstrem vannstand og tidevannshøyder	6
5	Aulielva - vannføringsdata - sedimenttransport	6
6	Data for bunntopografien i fjorden og gridding av bunnmatrise	8
6.1	Beregning av dybdegrid	8
6.2	Nøyaktighet	11
6.3	Dybdemodeller for alternativ 12200 og 16700	11
7	Strømmodellen	11
8	Simulering av strømforholdene i Kanalen-Byfjorden-Vestfjorden.	15
8.1	Simulering av strømforholdene i dagens situasjon (uten undersjøisk vegtunnel).	15
8.2	Simulering av strømforholdene med spuntvegger og undersjøisk vegtunnel.	15
9	Stormflo	24
10	Hvordan vil en bruforbindelse påvirke strømforholdene ?	24
11	Oppsummering og anbefalinger.	25
11.1	Endringer i strømforholdene ved eventuelle utbygginger.	25
11.2	Behov for strømmålinger.	26
11.3	Konklusjoner.	27
12	Referanser	28
13	Takk	29
14	Appendiks	30
14.1	Tabeller	30
14.2	Bunntopografi - sammenligning mot høydegrunnet fra 1960	30

1 Innledning

Denne rapporten er utarbeidet på oppdrag for prosjektet: Konsekvensutredning Tønsbergpakken, Statens vegvesen. Oppgaven er å vurdere hvordan en senketunnel til Nøtterøy, med åpne nedkjøringer og spuntvegger, vil påvirke strømforholdene i Byfjorden og Tønsberg havn.

Den fysiske tilstanden i mange norske fjorder har blitt undersøkt i forbindelse med konsekvensutredninger ved bygging av kraftverk, resipientstudier for utslipp av kloakk og avløpsvann, vannkvalitet, spredning av parasitter og sykdommer fra oppdrettsanlegg etc. Det finnes også omfattende internasjonale undersøkelser av forholdene i fjorder.

Resultatene fra disse undersøkelsene, relevant for norske forhold, finnes for det meste i oppdragsrapporter som er vanskelig tilgjengelige, men noe er publisert i åpne vitenskapelige tidsskrifter (McClimans 1973, 1978a, Gade 1980, Farmer og Smith 1980, Jacobsen 1983, Tverberg et al. 1991, Sigebrandt og Molvær 1996, Berntsen et al. 2008, Lothe og Brørs 2010, Lynge et al. 2013).

Struping av tidevannet i trange innløp til fjorder er behandlet av Glenne og Simensen (1963), McClimans (1978b), Stigebrandt (1980) og Gjevik (2009). Gjevik et al. (2014) og Gjevik (2016) vurderte muligheten for struping av tidevannet ved brufyllinger med relativ trang åpning i Sifjorden på Senja.

To nye rapporter, Røed et al. (2016) og Hjelmervik et al. (2014), er spesielt relevante for den aktuelle undersøkelsen for Statens vegvesen. Disse rapportene inneholder resultater både fra modellsimuleringer og målinger av strømsirkulasjonen og tidevannsstrømmen i Oslofjorden.

Den sist nevnte rapporten behandler strømforholdene i området ved Moss havn. Det brukes en dybdeintegreert modell dvs. det tas ikke hensyn til eventuell tetthetssjiktning. Den horisontale gitteropløsning varierer fra 800 m til ned mot 15 m for det indre havneområdet i Moss. Røed et al. (2016) beskriver simuleringer med en 3-dimensjonal modell med vertikal sjiktning. Modellen dekker hele Oslofjorden nord for en snittlinje tvers over fjorden ved ca. 59 °N nord for Hvalerøyene. Den horisontale gitteropløsningen varierer fra ca. 300 m langs randen i sør til ca 50 m i Drøbaksundet. I vertikalen har modellen 42 lag som følger bunntopografien. Modellen er drevet både med meteorologiske pådrag (lufttrykk og vind), tidevann og vannføring fra elver.

Vi er ikke kjent med at det tidligere har blitt gjennomført *systematiske* målinger eller simuleringer av strømforholdene i Byfjorden og Tønsberg havn.

En underlagsrapport til konsekvensutredningen av Tønsbergpakken, fase 2 (Statens vegvesen, mai 2004) viser noen korte tidserier med strømmålinger nær land i området sør for Smørberg lykt på vestsiden av Vestfjorden. Disse strømmålingene er også omtalt i en rapport fra Statens vegvesen fra august 2004 (Kvaal Grepstad et al. 2004). Målt strømhastighet oppgives til å gå opp mot 20 cm/s. Dataserien er kort (29/5-9/6 2014) og plasseringen av måleren gir et lite representativt bilde av strømforholdene i fjorden.

Vi har nylig fått tilgang til en rapport fra Norconsult (2014) med vurdering av strømforholdene ved Kaldnes på Nøtterøy i forbindelse med planer for endret arealbruk fra industri til bysenter Kaldnes Vest. Det ble i tidsrommet 20. september til 25. oktober 2013 foretatt strømmålinger i *ett* målepunkt utenfor Kaldnes ca. 160 m fra land på ca. 2 m vanddyb. Ved utsetting og opptak av strømmåleren ble det gjort CTD-målinger i Tønsbergrenna nord for Kaldnes for å registrere hvordan saltholdighet, temperatur og tetthet varierte fra overflaten ned mot bunnen. Det ble samtidig gjort målinger av oksygeninnhold og turbidi-

tet (FTU) dvs. mengde av sedimenter i vannmassene. Vi vil kommentere disse målingene i avsnitt 3, 5 og 10.2 og vurdere hvilke betydning resultatene har for planleggingen av fjordkryssing med senketunnel eller bru fra Kaldnes.

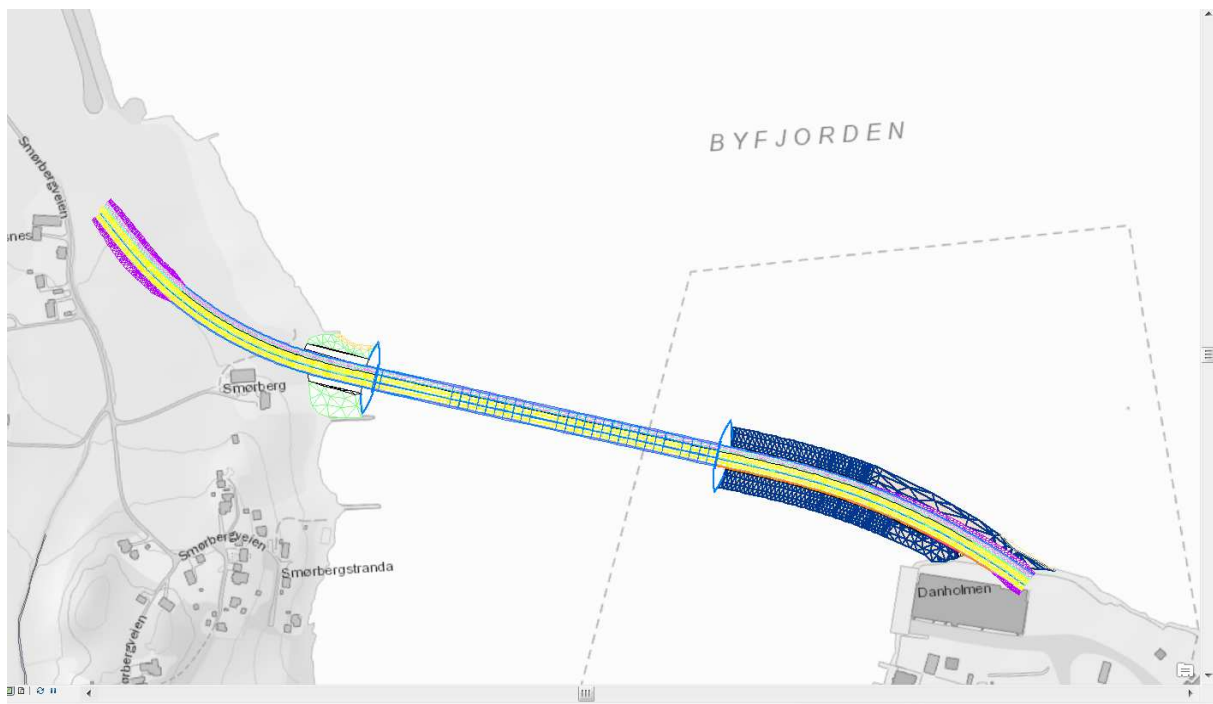
2 Kort beskrivelse av traséne

Vi er bedt om å vurdere konsekvensene for to alternativer med senketunnel og åpne påkjøringer med spuntvegger som går ut i sjøen. De to alternativene er beskrevet i rapporten: Ny fastlandsforbindelse fra Nøtterøy og Tjøme - Siling av alternativer. (Statens vegvesen 2016).

Alternativ I (12200): Fjordkryssing fra Kaldnes på Nøtterøy til Hogsnes på vestsiden av Vestfjorden (fig. 1).

Alternativ II (16700): Fjordkryssing i Byfjorden mellom Kaldnes på Nøtterøy og Korten nord for Slottsfjellet. (fig. 2).

I tillegg har vi blitt forelagt en skisse med forskjellige forslag til bruforbindelse mellom Kaldnes på Nøtterøy og fastlandet (Statens vegvesen 2017).



Figur 1: Alternativ I (12200): Fjordkryssing mellom Kaldnes og Hogsnes med senketunnel. Åpen påkjøring med utfylling og spuntvegger ved Kaldnes.



Figur 2: Alternativ II (16700): Fjordkryssing av Byfjorden mellom Kaldnes og Korten med senketunnel. Åpen påkjøring med utfylling og spuntvegger ved Kaldnes.

3 Kort oversikt over de fysiske forhold i Byfjorden og Tønsberg havn.

Byfjorden og Tønsberg havn er grunne med største dyp 12-15 *m* i et område midtfjords nordøst for Kaldnes på Nøtterøy. I Vestfjorden som leder inn til Byfjorden på vestsiden av Nøtterøy er største dyp 10-12 *m* midtfjords sørøst for Smørberg lykt. Nord for Kaldnes går den en renne, Tønsbergrenna, i retning vest-øst mellom Vestfjorden og Byfjorden. Dypet er ca. 8 *m* og større skip kan passere gjennom denne renna. Innseilingen til Byfjorden og Tønsberg havn fra øst er gjennom den ca. 700 *m* lange Kanalen med bredde 100-200 *m* og dyp 6-7 *m* i midten av løpet.

Nordvest i Byfjorden, i det grunne området utenfor Jarlsberg og Ilene naturreservat, har Aulielva utløp. Ferskvannstilførselen fra elva fører tidvis til tetthetssjiktning i fjorden.

Den 20. september og 24. oktober i 2013 ble det gjort CTD-målinger i Tønsbergrenna for å kartlegge hvordan temperatur, saltholdighet, konsentrasjonen av oksygen og svevende sedimenter varierer nedover i vannmassene (Norconsult 2014). Målingene viste ferskvann/brakkvann i de øverste 1-2 *m* ved overflaten i september. I oktober var ferskvann/brakkvannslaget noe tykkere 2-3 *m*. Under dette, ned mot bunnen, lå et forholdsvis

Tabell 1: Vannstandsni v er oppgitt i *cm* i forhold til chart datum (sjøkartnull) for tre faste vannstandsstasjoner i området. NN2000 er normalnull 2000, nullnivå i det norske nasjonale høydesystemet

Stasjon	Middelvann 1996-2014	NN2000	HAT	LAT	Høyest obs.	Dato	Lavest obs.	Dato
Helgeroa	50	56	80	20	185	27/2-1990	-33	26/1-2014
Viker	51	55	82	20	190		-34	
Oscarsborg	66	68	100	30	241		-51	

homogent lag saltvann. En strømmåler var satt ut ca. 160 *m* fra land på ca. 2 *m* i det grunne området utenfor Kaldnes. I perioden september-oktober 2013 viste måleren variabel strømstyrke og retning. Høyest registrerte strømstyrke var opp i 1 *m/s* n r bunnen og 0,5 *m/s* ved overflaten. Middelstr mmen var vesentlig mindre. Forskjellen i strømhastighet mellom bunn og overflate er en indikasjon på tetthetssjiktning.

Havnefogden i Tønsberg, Per Svennar, opplyser i telefonsamtale (september 2016) at det kan bli forholdsvis sterk strøm i Kanalen spesielt i forbindelse med kraftig s rlig vind. Han mener at ved Kanalbrua kan strømmen gå opp i 3-4 knop (1,5-2 *m/s*). Vestgående strøm er som regel sterkest.

Enkelte år kan Vestfjorden være delvis islagt om vinteren.

4 Ekstrem vannstand og tidevannsh yder

Forskjellen på høyest og lavest astronomisk tidevann (HAT-LAT) er omkring 0,6 *m* i Tønsberg havn og Byfjorden. Under stormflo med sterk s rlig vind og lavt lufttrykk kan vannstanden stige til ca. 1,4 *m over* middelvann. Med høytrykk og nordlig vind kan vannstanden synke til ca. 0,8 *m under* middelvann. Forskjellen på høyest og lavest vannstand kan derfor bli opptil 2,2 *m*. Det kan bli langt sterkere strøm, f. eks. i Kanalen og Byfjorden, i forbindelse med slike meteorologiske hendelser enn på grunn av det regulære astronomiske tidevannet. Under ekstreme hendelser med høy vannstand i fjorden er det også større sannsynlighet for stor vannføring og flom i Aulielva.

Vannstandsni v er for tre av de faste stasjonene med vannstandm linger i området er gjenngett i tabell 1. Helgeroa ligger på vestsiden av Oslofjorden sør for Tønsberg, Viker ligger på Hvaler på østsiden og Oscarsborg lengere inn i fjorden mot Oslo. Forholdene i Tønsberg havn forventes å ligge n r verdiene for disse stasjonene. Fra mai til november 2014 hadde Sjøkartverket en vannstandsmåler i Melsomvik i Vestfjorden. Målingen er nært korrelert med samtidige målinger fra Viker og avvikene er bare ± 5 *cm* i visse tidsperioder.

5 Aulielva - vannføringsdata - sedimenttransport

Nedbørsfeltet for Aulivassdraget har et areal på 364 *km*² med en årsavrenning på 186 mill. *m*³ (Kvaal Grepstad et al. 2004). Det gir en midlere volumstrøm på 5,9 *m*³/*s* fordelt jevnt over hele året. I flomsituasjoner kan volumstrømmen anslagsvis bli opptil 60 *m*³/*s*.



Figur 3: Flyfoto av utløpet av Aulielva og Byfjorden over mot Nøtterøy og Tønsberg. Bildet som er fra 2007 viser sedimenttransport fra elva langs vestsiden av fjorden sørover forbi Smørberg (lys brun farge). Foto hentet fra: <http://kart.finn.no>

Det tilsvarer ca. 40 mm nedbør over hele feltet som renner ut gjennom elva i løpet av 3 døgn.

Mesteparten av sedimenttilførselen i Vestfjorden kommer fra Aulivassdraget. Sedimentmålinger i elva viser en gjennomsnittelig konsentrasjon av suspendert materiale på 60 mg/l. Det er anslått at Aulielva produserer i størrelsesorden 5000-6000 m³ sedimenter pr år. De groveste sedimentene legger seg ved utløpet av elva, men med de lave strømhastighetene i Vestfjorden og Byfjorden er det sedimentering av finstoffer i store deler av fjorden (Kvaal Grepstad et al. 2004). Bilde i fig.3 viser hvordan sedimentene fra elva transporteres sørover med strømmen på vestsiden av Vestfjorden.

Ved målingene som ble gjort i 2014 finner en klare indikasjoner på at vannføringen i Aulielva påvirker strømforholdene i Byfjorden og at elva bringer med seg betydelige mengder sedimenter ved høy vannføring. Vannet i Byfjorden framstår tildels som grumsete i slike situasjoner (Norconsult 2014).

6 Data for bunntopografien i fjorden og gridding av bunnmatrise

Det er beregnet en dybdemodell for Tønsberg basert på tilgjengelige grunnlagsdata med varierende alder og nøyaktighet (tabell 2). Dybdemodellen vises sammen med dekningsområde for inngangsdataene i (fig.4). Sluttproduktet ble en rasterbasert modell med oppløsning (gitterstørrelse) på 10 meter (fig.6).

Tabell 2: Oversikt over datagrunnlagene til høydemodellen med unøyaktigheter angitt i vertikal- og horisontalplanet.

Datakilder	Alder	Datatype	Δz (meter)	Δxy (meter)
Laserdata,Sjøtroll	2010-004	punkt	0,21 - 0,27	0,22 - 0,94
Sjødata dybder ¹	2010/1960	punkt	0,21 - 100,2	0,22-50
Sjødata brygger,kai	2008-2013	kurver	varierer	varierer
Sjødata dybdekurver		kurver	0,25	0,35
Tørrfallsgrense ²		kurver	ukjent	ukjent
FKB ³ vannkontur	2008/2013	kurver	0,25	0,35
FKB høydekurver	2012	kurver	0,35	0,55
Ekkoloddmålinger	1960	punkt	100,2	30,1-50

¹ Kartverkets marine primærdata (S-57). Stammer fra Sjøkartverkets dybdemålinger etter 1950, og er her generert ut fra 1) Sjøtroll 2010-004 laserdata fra 2010 med svært høy nøyaktighet for dyp større enn 2 m, og 2) enkeltstråle ekkolodd I-099-målinger med svært dårlig nøyaktighet langs land. Kurvene er basert på dybdepunktene.

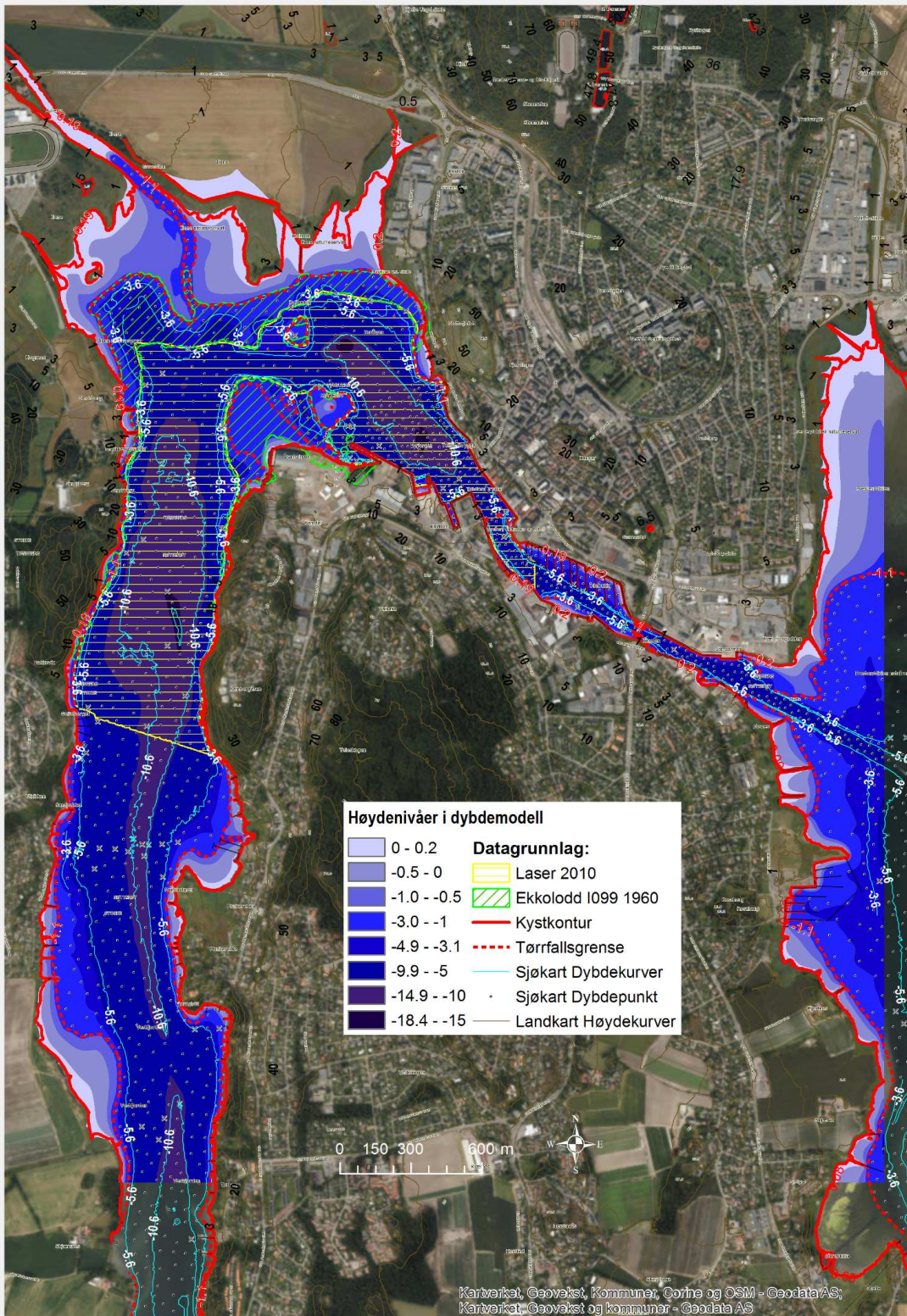
²Tørrfallsgrensa er definert 0,5 m under referansepunktet kalt sjøkartnull, og avgrenser et område opp til middelhøyvann. Kystkonturen følger her middelhøyvann.

³Felles kartbase for landkart. Se www.kartverket.no for mer informasjon.

Laserdata fra 2010 for Tønsberg var bestilt av prosjektet og kunne brukes for størstedelen av området. De dekket imidlertid ikke kystnære grunne områder. Man måtte derfor komplettere med andre data kystnært. Det nyeste som fantes av data i disse grunne områdene var enstråles ekkolodd-dybder fra 1960. Disse dataene var lagret med høyder i forhold til sjøkartnull, og ble korrigert med +30 cm p.g.a endringer i dette datumet siden 1960. Dette ble anslått skjønnsmessig i samarbeid med Kartverkets Sjødivisjon. Unøyaktigheten i disse dataene er svært stor (tabell 2), så korreksjonen antas å være av liten betydning.

6.1 Beregning av dybdegrid

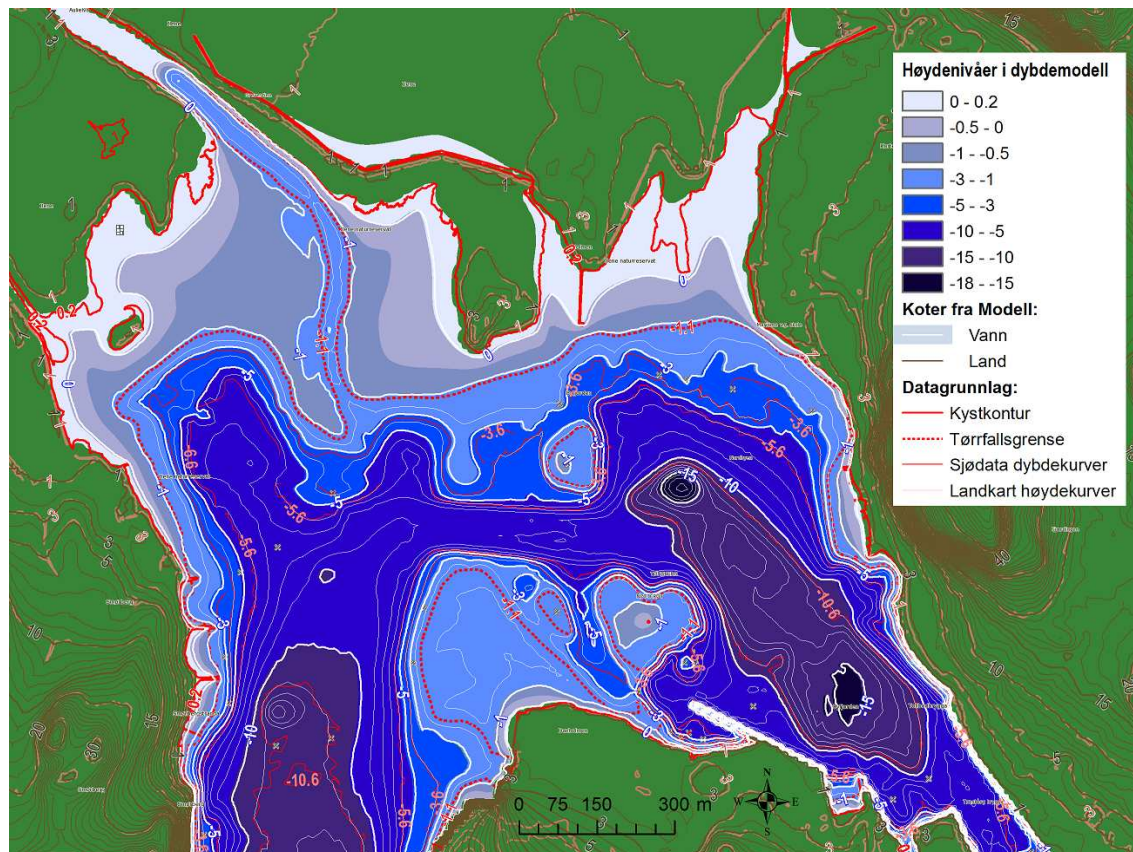
Statens vegvesen hadde tilgang til en interpolasjonsmetode kalt ANUDEM (Hutchinson 2011), implementert som kommandoen Topogrid i programvaren ArcGIS fra ESRI (www.esri.com). Det ble besluttet å benytte denne, da den var lett tilgjengelig og laget for å kunne interpolere ut fra topografiske kartdata med blanding av både punkt og kurver som inngangsdata. Metoden produserer også raster som utdata. «Anudem» inneholder en algoritme som benytter kurvaturen i høydekurver til å sørge for en jevn stigning vinkelrett



Figur 4: Nivåene i dybdemodellen vist sammen med dekningsområde for de ulike datagrunnlage. Laserdata er målt med Sjøtroll i 2010 og dekker alle dype områder. Her avgrenset i sør og i vest. Gamle ekkoloddmålinger ble benyttet kun der det ikke fantes nyere data, dvs. helt kystnært på grunnere enn 2 m og inn til tørrfallssonen. Tørrfallsgrensa med høyde -1,1 m, kystkontur med høyde 0,2 m og de laveste landkartkurvene ble også en viktig datakilde. Alle høyder og dybder ble referert til vertikaldatum NN2000.

på høydekurvene. Metoden søker også automatisk etter strukturer eller terrenglinjer⁴, og forsøker å beholde strukturen. Dette antas å stemme med terrengets naturlige topografi, som i stor grad er formet av geomorfologiske prosesser der is og vann jobber v.h.a tyngdekraften. Metoden estimerer ellers både lokale og mer utstrakte variasjoner i terrenget. Etter en kjøring av Topogrid med alle inngangsdata ble det foretatt en sjekk av plasseringen til kystkonturen i modellen. Den ble litt unøyaktig, og det kunne være vanskelig å kjenne seg igjen flere steder langs kysten. I flate områder blir det glissent mellom høydekurvene. Interpolasjonsmetoden har da ekstra lett for å «overinterpolere», slik at det blir for dypt i fordypningene (kunstige søkk, eller «sinks»). Det meste av dette fjernes automatisk, men noe av effekten ble igjen.

For å begrense problemet kan minimums- og maksimumsverdier for resultathøyden angis. Det ble generert to modeller slik: A) En dybdemodell med maksimumsverdi på 0,21 m som var høyeste høyde på kystkonturen. Denne dekket sjøområdet som skulle modelleres, men hadde inngangsdata med fra 100 meter innover land. B) En landmodell ble tilsvarende generert med minimumshøyde 0,19 m fra laveste kystkontur. Modellen vises i fig. 4 og 5, bunnmatrisen brukt i strømmodellen i fig. 6.



Figur 5: Modellene ble slått sammen til en modell og vises inndelt i høydenivåer. I tillegg er kurver utledet fra modellen sammenstilt med røde kurver fra datagrunnlagene. Modellens definisjon av kystkontur ved høyde 0,2 m (NN2000) vises som avgrensingen mot det grønne, og sammenfaller nokså godt med den virkelige kystkonturen.

⁴Terrenglinjer er her i hovedsak linjer langs små og store dalsøkk og rygger/kammer. Dette er det vanlig å innhente som input ved produksjon av digitale terrengmodeller

6.2 Nøyaktighet

På større dyp enn 2,59 *m* (i forhold til NN2000) skal det i all hovedsak være kartlagt med laser i 2010. Dette området er markert med gul rett skravering i fig. 4, og her kan modellen antas å ha svært god nøyaktighet. Områdene midtfjords i sør og i øst som er utenfor det skraverete feltet er også dekket av nyere målinger, og modellen kan antas å være god selv om bare sjødata ble benyttet. Her er sjøkartdybdene midtfjords også kartlagt med laser.

Overalt hvor det er grunt og relativt flatt, kan man regne med at modellen har en dårlig nøyaktighet, pga. 1) unøyaktigheten i ekkoloddmålingene og 2) fordi det er glissent med datagrunnlag. For modellen sin del er den gode nøyaktigheten i laserdataene i overkant av hva som er nødvendig, ettersom vi skulle lage en grov modell med bare 10x10 meters oppløsning. Unøyaktigheten i de enstråles ekkoloddmålingene er imidlertid så stor at det kan gi store utslag selv i en grov modell. Det kan være et problem at modellen ved interpolasjon kan produsere kunstige topper eller groper langs bunnen.

6.3 Dybdemodeller for alternativ 12200 og 16700

Det ble levert to plandatasett fra SVV Region Sør, Plan og Prosjektering i Vestfold, for de to planalternativene som behandles videre. De inneholdt mulig plassering for spuntvegger, samt antatt plassering av overflaten til tunneltak og fyllinger (fig. 1 og 2). Disse ble konvertert direkte til et overflateraster for hvert planalternativ, som så ble sammenstilt med dybdemodellene til de bunnmatrisene som ble brukt i strømsimuleringene (fig. 7).

7 Strømmodellen

Simulering av strømforholdene i Byfjorden og Vestfjorden hvor en tar hensyn til varierende tetthetssjiktning under vekslende værforhold er en meget vanskelig og omfattende oppgave. Tetthetssjiktningen oppstår når lag med lettere ferskvann legger seg over tyngere saltholdig vann. Temperaturforskjeller med varmt vann i overflate og kaldere vann i dyptet kan også bidra til tetthetssjiktningen (Norconsult 2014). I tillegg vil et eventuell isdekke i fjorden i kalde vintere være en kompliserende faktor.

I denne innledende studien har vi derfor valgt en enklere fremgangsmåte ved å se på forholdene hvor vannmassene i fjorden er mer eller mindre vel gjennomblandet. I en grunn fjord som dette med middeldyp ca. 6 *m* vil vannmassene bli gjennomblandet relativt ofte spesielt i høst- og vinterhalvåret.

I slike tilfeller kan en dybdeintegrert strømmodell brukes. Den gir en midlere strømhastighet for vannsøylen i hvert gitterpunkt av modellen (Lyng et al., 2013, Hjelmervik et al., 2014).

Modellen som er brukt her er en såkalt “finite difference model” med et regulært kvadratisk gitternett i horisontalplanet med gitterstørrelse $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ m}$. Den er en variant av modellen beskrevet av Lyng et al., 2013 tilpasset forholdene i fjorden ved Tønsberg (fig. 6). Modellen er hovedsakelig kjørt i en kvasi-linær mode dvs. uten ikke-linære konvektive ledd, men med ikke-linær kvadratisk bunnfriksjon. Friksjonsspenningen mellom vannmassene og bunnen er satt proporsjonal med den midlere strømhastigheten i vannsøylen i andre potens. Proporsjonalitetsfaktoren kalles bunnfriksjonskoeffisient. Den vil avhenge av ruheten på bunnen og turbulensen i grensesjiktet ved bunnen. Dette er et relevant modelloppsett fordi strømhastigheten er relativt liten og fordi bunnfriksjonen

Tabell 3: Topografiske data for modellområdet

Ved vannstand NN2000 + 0,20 m
(fig. 6, øverst):

Flateareal av fjorden	2,274	km^2
Tverrsnittsareal Vestfjorden	4822	m^2
Tverrsnittsareal øst i Kanalen	746	m^2
Vannvolum	$13,942 \cdot 10^6$	m^3
Middeldyp	6,13	m

Ved vannstand NN2000 + 1,20 m
(fig. 6, nederst):

Flateareal av fjorden	2,848	km^2
Tverrsnittsareal Vestfjorden	5372	m^2
Tverrsnittsareal øst i Kanalen	1055	m^2
Vannvolum	$16,542 \cdot 10^6$	m^3
Middeldyp	5,81	m

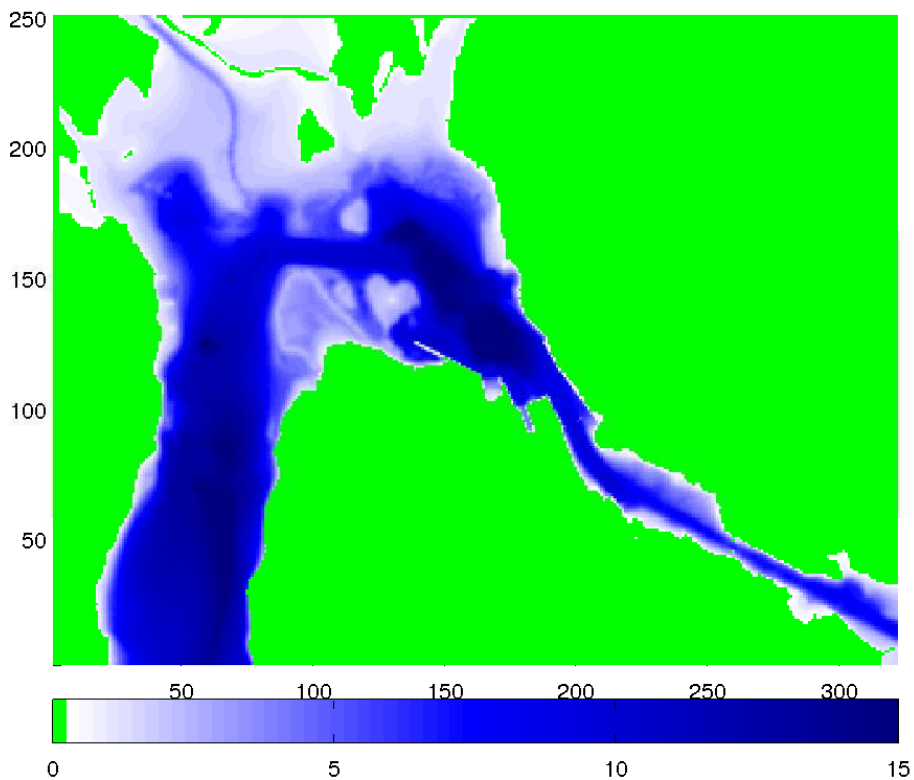
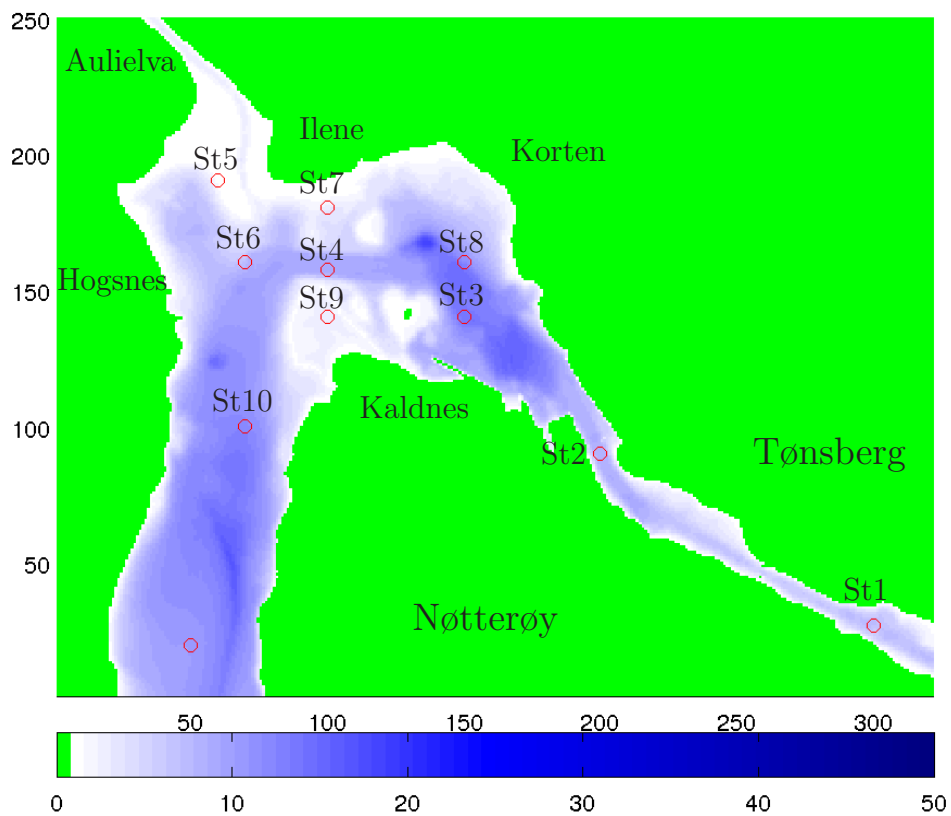
vil ha stor betydning i den grunne fjorden. I de fleste simuleringene er det brukt en bunnfriksjonskoeffisient $r_b = 0,003$. Det er en typisk verdi i tråd med det som har blitt brukt i liknende simuleringer (Lyngre et al., 2013). Når en eventuelt får bedre måledata fra fjorden (se avsnitt 11.2) vil det vise seg om det er behov for å justere verdien av r_b .

Med en fullt ikke-lineær modell må det brukes en kunstig stor numerisk virvlingsviskositet (eddy-viscosity) for å holde modellen stabil. Hvordan dette eventuelt påvirker strømsimuleringene, bortsett fra at det vil glatte ut skarpe strømgradienter og undertrykke virveldannelse, er en mer omfattende oppgave å vurdere. I denne innledende studien ønsker en i første rekke å få en forståelse av hvordan senketunnelen og utfyllinger med åpne påkjøringer og spuntvegger utover i sjøen påvirker strømforholdene på større skala.

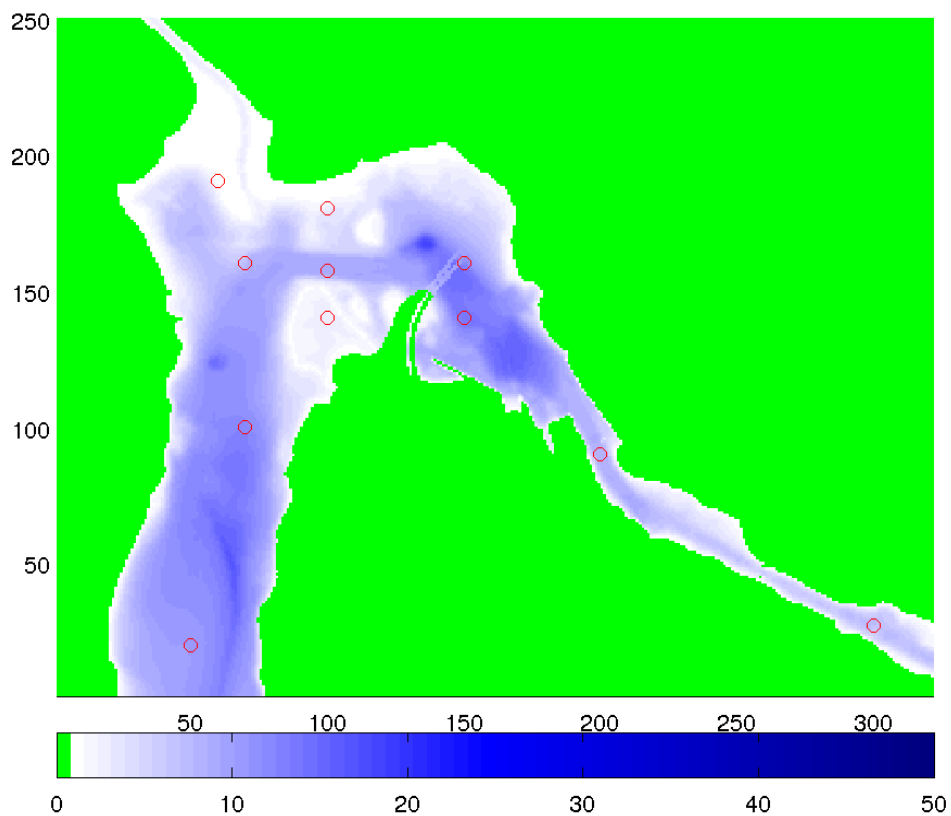
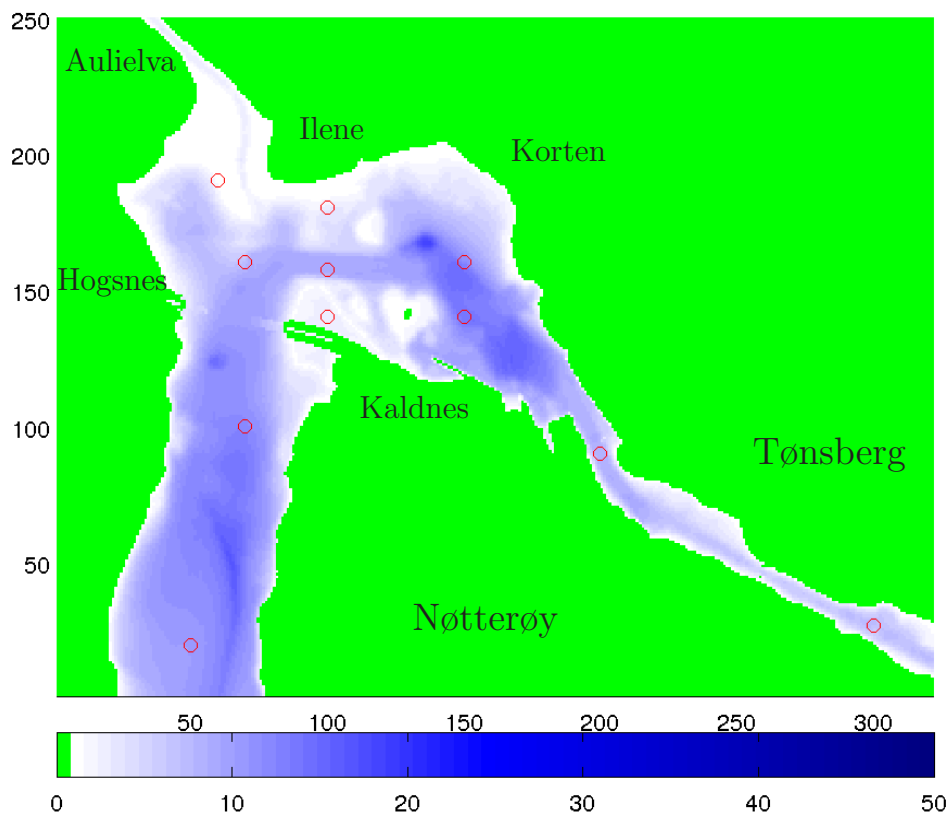
Kort forklart kan det sies at den kvasi-lineære modellen tar med effekten av den vertikale variasjonen av turbulensnivået i vannet. En full ikke-lineær modell vil i tillegg ta med horisontale virvler som f. eks. kan oppstå i områder med sterke strømgradienter.

Modellområdet er vist i fig. (6-7). Flateareal for fjorden, vannvolum, middeldyp og tverrsnittsareal for grenseflaten (modellåpning) i Vestfjorden og østre munning av Kanalen finnes i tabell 3.

Ti steder (St1-St10) i Byfjorden og Kanalen er valgt ut for å vise tidserier av simulert strømhastighet og vannstand. Plasseringen av disse stedene (stasjonene) er vist på fig. (6) og vanddyb i stasjonene finnes i tabell 7 i Appendiks.



Figur 6: Bunnmatrise for simuleringsområdet (dagens forhold), øverst med kystlinje 0,20 m over NN2000, nederst med kystlinje 1,20 m over NN2000 (stormflo) Data fra filen 'topo6_ny_10m', utsnitt (322,250). Gitteropløsning $\Delta x = \Delta y = 10$ m. Koordinatsystem med x -akse fra vest mot øst (horisontalt), y -akse fra sør mot nord (vertikalt). Enheter på aksene er gitterpunkter (10 m). Dybdeskala i meter nederst i bildet. Stasjonene (St1 – St10) med simulerte tidserier for strømhastighet er avmerket med røde ringer.



Figur 7: Bunnmatrise for simuleringsområdet med senketunnel og spuntvegger. Øverst vegforbindelse Kaldnes - Hogsnes, alternativ I (12200). Nederst Kaldnes-Korten, alternativ II (16700). Kystlinje er lagt 0,20 m over NN2000. Gitteropløsning $\Delta x = \Delta y = 10$ m. Koordinatsystem med x -akse fra vest mot øst (horisontalt), y -akse fra sør mot nord (vertikalt). Enheter på aksene er gitterpunkter (10 m). Dybdeskala i meter nederst i bildet. Påkjøringen som ligger under nullnivået synes som en lyseblå stripe med utfyllinger og spuntvegger på siden (grønt).

8 Simulering av strømforholdene i Kanalen-Byfjorden-Vestfjorden.

I stedet for å simulere tidevann og vinddrevet strøm direkte har vi valgt å simulere to typiske senarier.

- 1) Høyere vannstand ved østre munningen av Kanalen enn i Vestfjorden.
- 2) Høyere vannstand i Vestfjorden enn ved østre munningen av Kanalen.

I det første tilfellet vil vannstandsforskjellen drive strømmen vestover gjennom Kanalen og sørover ut Vestfjorden. I det andre tilfellet vil strømmen gå nordover i Vestfjorden og østover gjennom Kanalen. Slike forhold antas å oppstå både under stormsituasjoner og i deler av tidevannsyklusen når tidevannet er den dominerende faktor.

I simuleringene kommer vannføringen gjennom utløpet av Aulielva inn som en modifierende faktor på gjennomstrømningen i fjorden. Virkningen avhenger av styrken på vannføringen i forhold til vannstandsforskjellen mellom Vestfjorden og østre munning av kanalen. Simuleringene er startet fra ro (ingen strøm, konstant vannstand) og vannstandsforskjellen mellom Vestfjorden og munningen av kanalen bygger seg gradvis opp over et tidsrom på 2-4 timer. Vannføringen i Aulielva bygger seg opp fra null til maksimum på tilsvarende måte.

Ved en gradvis oppstart vil en unngå kunstige svingninger med en for brå oppstart av modellen. Etter ca. 4 timer er det etablert en tilnærmet stasjonær strøm gjennom fjorden (fig 14).

En oversikt over simuleringene som har blitt utført finnes i tabell 6 i Appendiks.

8.1 Simulering av strømforholdene i dagens situasjon (uten undersjøisk vegtunnel).

Resultater fra simuleringene er vist nederst i fig. 9-10 og 12-13 med strømfelt fra Byfjorden. I fig. 14 (nederst) vises tidserier av vannstand og strømhastighet for 5 punkter (stasjoner) i Kanalen og Byfjorden (run51).

Både i tilfeller med vest- og østgående strøm i Byfjorden, henholdsvis fig. 9 og 10 er det sterkeste strøm i Kanalen. Strømmen går opp i ca. 1 m/s (2 knop). I Byfjorden nord for Kaldnes er det et område med relativt sterk strøm. Det strekker seg nordover forbi den forholdsvis dype Tønsbergrenna midt i fjorden. Strømstyrken går her opp i 0,5 m/s (1 knop). Ellers er det relativt svak strøm mindre enn 0,1 m/s. Ferskvannsstrømmen ut fra Aulielva er ca. 0,2 m/s ved utløpet og den dreier mot vestre side av Vestfjorden, spesielt i tilfeller hvor det er vestgående strøm i kanalen (fig. 9 og 12).

8.2 Simulering av strømforholdene med spuntvegger og undersjøisk vegtunnel.

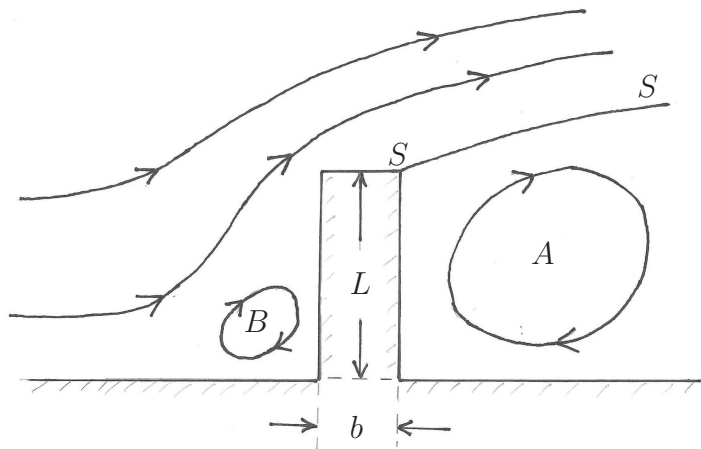
Resultater fra simuleringene er vist øverst i fig. 9-13. med strømfelt fra Byfjorden. I fig. 14 (øverst) vises tidserier av vannstand og strømhastighet for 5 punkter (stasjoner) i

Kanalen og Byfjorden (run84). Simuleringene viser at strømfeltene påvirkes hovedsakelig i nærheten av spuntvegger og tunnel. Strømforholdene er nesten uendret ellers i Byfjorden og Kanalen. Utstrømningen fra Aulielva er også tilnærmet upåvirket.

Med tunnel mellom Kaldnes og Hogsnes (alternativ I, 12200) blir det sterkere strøm på nordsiden av spuntveggene ved Kaldnes. Dette er spesielt framtrepende med vestgående strøm i Byfjorden (fig. 9). På sørsiden (lesiden) av spuntveggene er strømmen svak og det er mulighet for at strømmen separerer fra ytre ende av spuntveggene og at det dannes en bakevje i kjølvannet. Modellen som er brukt her vil ikke fange opp dette og en full ikke-linær modell må eventuelt brukes for å simulere separasjon og bakevjer. Med østgående strøm i Byfjorden (fig. 10) blir det noe sterkere strøm utenfor enden av spuntveggene og utfyllingene fra Kaldnes. I området på sørsiden (losiden) vil det bli svak strøm. På nordsiden (lesiden) vil det dannes bakevjer.

Med tunnel mellom Kaldnes og Korten (alternativ II, 16700) blir det noe sterkere strøm på nordsiden utenfor enden av spuntveggene og utfyllingene fra Kaldnes. Det gjelder i tilfeller både ved vest- og østgående strøm i Byfjorden (fig. 12 og 13). Vestgående strøm kan separere fra enden av utfyllingene og det kan dannes bakevjer i kjølvannet på vestsiden. Tilsvarende kan det bli bakevjer på østsiden av utfyllingen i tilfeller med østgående strøm i Byfjorden.

En direkte sammenlikning av strømshastigheten på 10 steder i Byfjorden (St1-St10, fig. 6) finnes i tabell 4 og 5. Vanddyp i de samme stasjonene finnes i tabell 7 i Appendiks.



Figur 8: Skisse av strømfeltet (i horisontalplanet) ved en utfylling; sparasjonslinje ($S - S$), bakevjer A og B . Lengden av utfyllingen L og bredden b .

Et kriterium, utledet av Signell og Geyer (1991) og Garrett (1995), kan brukes for å vurdere om det vil bli separasjon ved enden av utfyllingene (fig.8). Dersom vanddypet utenfor utfyllingen betegnes H kan kriteriet uttrykkes slik

$$\frac{L}{b} > r_b \frac{b}{H}$$

hvor r_b er bunnfriksjonskoeffisienten. Settes som typiske verdier $L = 300 \text{ m}$, $b = 30 \text{ m}$, $H = 5 \text{ m}$ og $r_b = 0,003$. viser kriteriet at det vil bli separasjon og bakevjer i situasjoner hvor strømmen kommer på tvers av utfyllingen.

Tabell 4: Strømhastighet i stasjon 1-5 (se fig. 6 og 14) etter 8 timer.

Stasjoner	Run	St1	St2	St3	St4	St5
		<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>
Vestgående strøm:						
Dagens forhold	51	1,049	1,167	0,162	0,410	0,062
Tunnel (alternativ I)	72	1,048	1,165	0,164	0,449	0,131
Tunnel (alternativ II)	82	1,049	1,166	0,196	0,409	0,124

Tabell 5: Strømhastighet i stasjon 6-10 (se fig. 6 og 14) etter 8 timer.

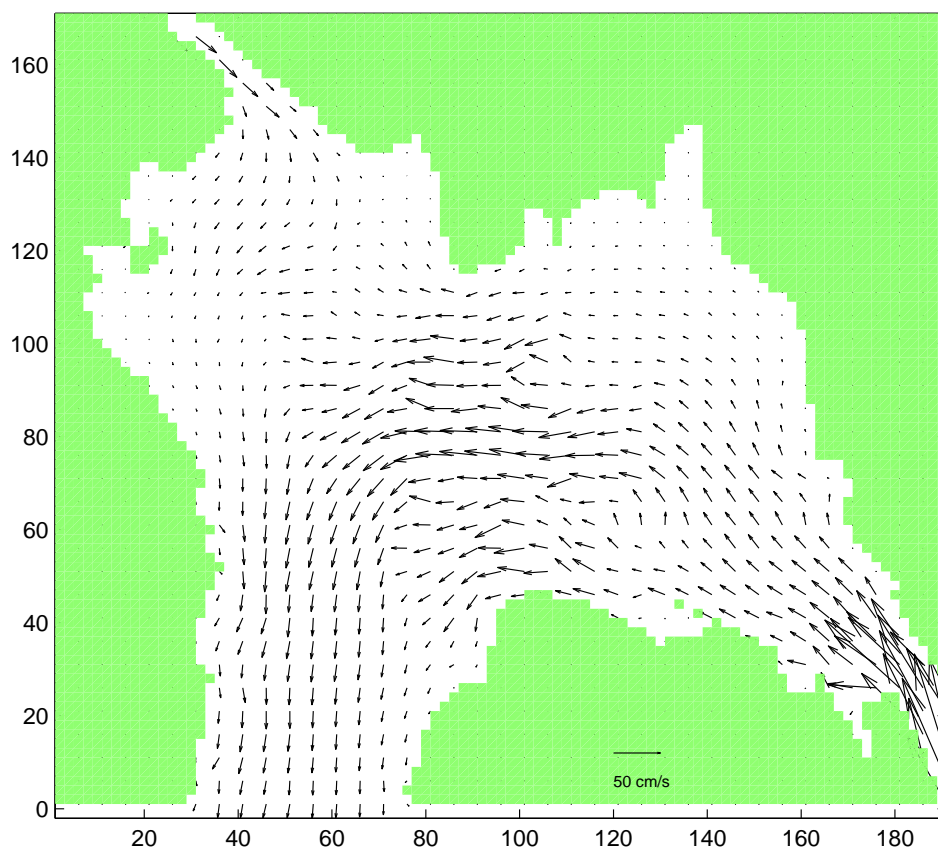
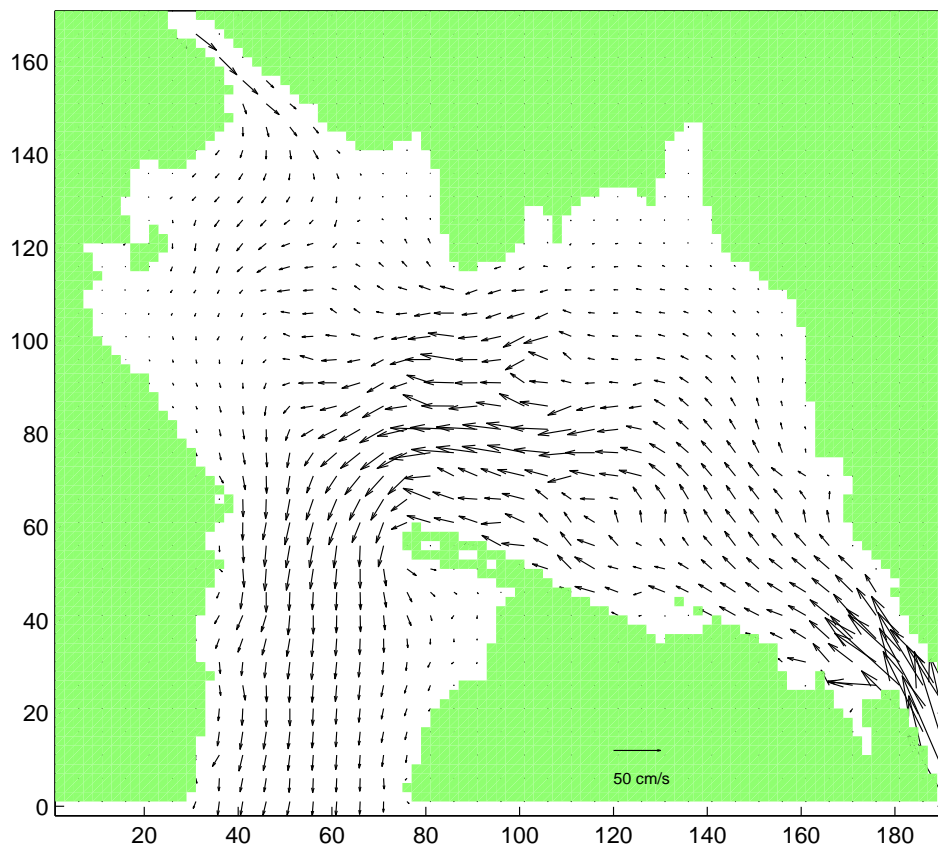
Stasjoner	Run	St6	St7	St8	St9	St10
		<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>
Vestgående strøm:						
Dagens forhold	51	0,199	0,189	0,139	0,195	0,159
Tunnel (alternativ I)	72	0,220	0,204	0,141	0,210	0,169
Tunnel (alternativ II)	82	0,197	0,195	0,191	0,191	0,170

I feltene vist på fig. 9-13 er strømvektorer bare plottet i annenhvert gitterpunkt for å gi et mer oversiktlig bilde. Kystlinjen i plottene har samme oppløsning. Det gjør at kystlinjen ser noe hakkete ut i forhold til plottene av dybdeforholdene som er med full oppløsning (fig. 6 og 7). Dette synes spesielt godt ved utfyllingene og spuntveggene som går ut fra Kaldnes. Selve simuleringene er gjort med full oppløsning og det er derfor mulig å gå tilbake å lage mer detaljerte plott av strømfeltet for mindre utvalgte områder.

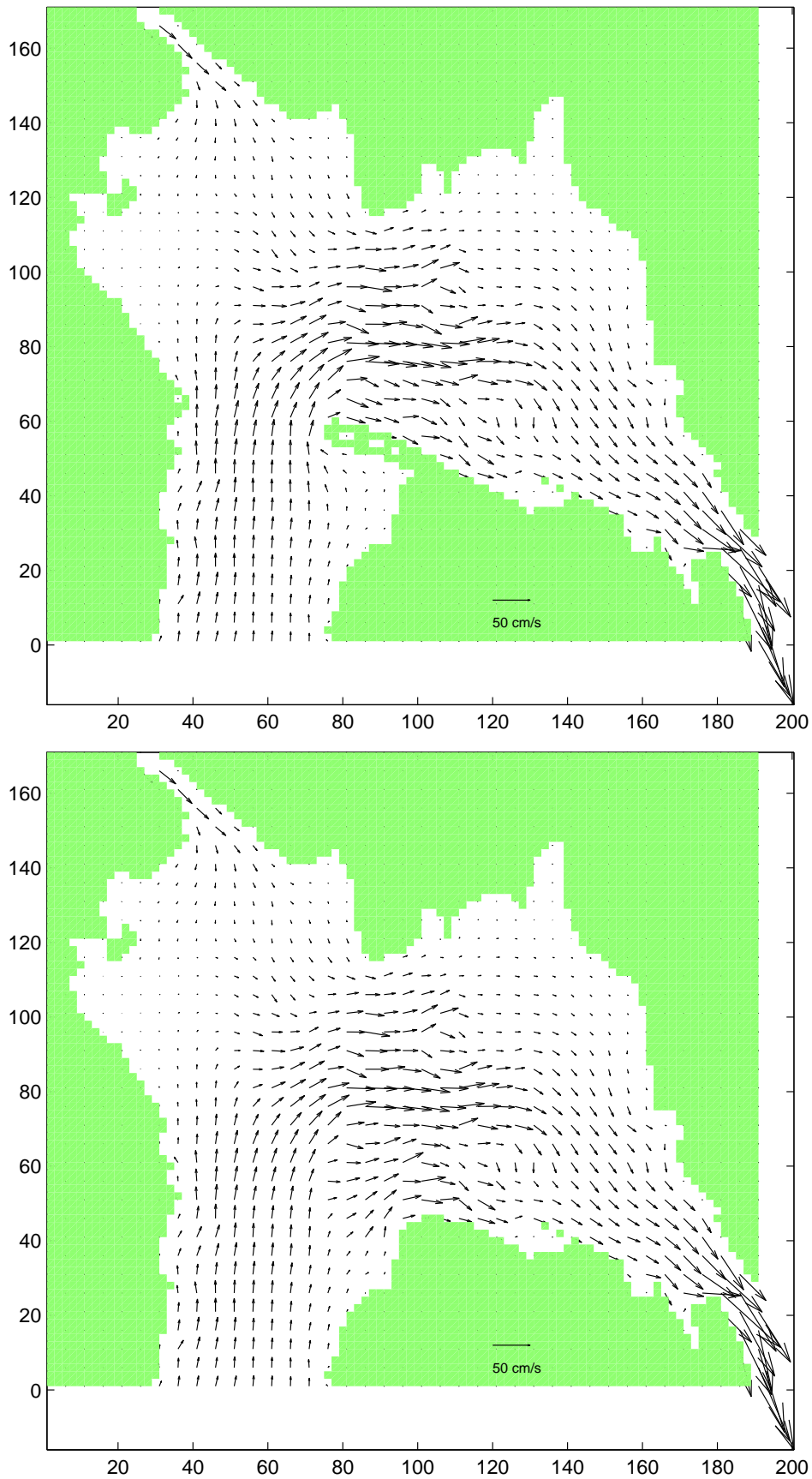
I tillegg til simuleringene med den opprinnelige planen for utfyllinger og spuntvegger for alternativ I (12200) har vi også gjort simuleringer med forlenget utfylling (60 m) ved Smørberg (fig. 11). I disse simuleringene er også vannføringen gjennom Aulielva økt til antatt flomnivå (ca. 60 m³/s).

Som forventet blir det nå sterkere strøm i åpningen mellom fyllingene mellom Smørberg og Nøtterøy. Det kan føre til erosjon i løpet og sedimentering i bakevjene som dannes ved utfyllingene.

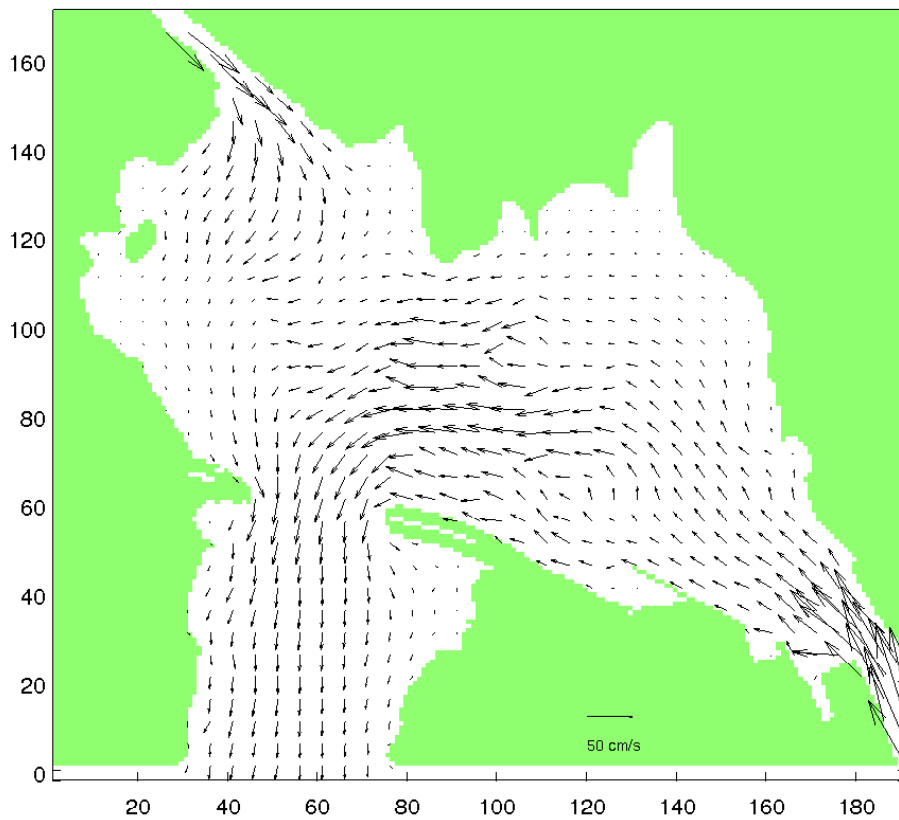
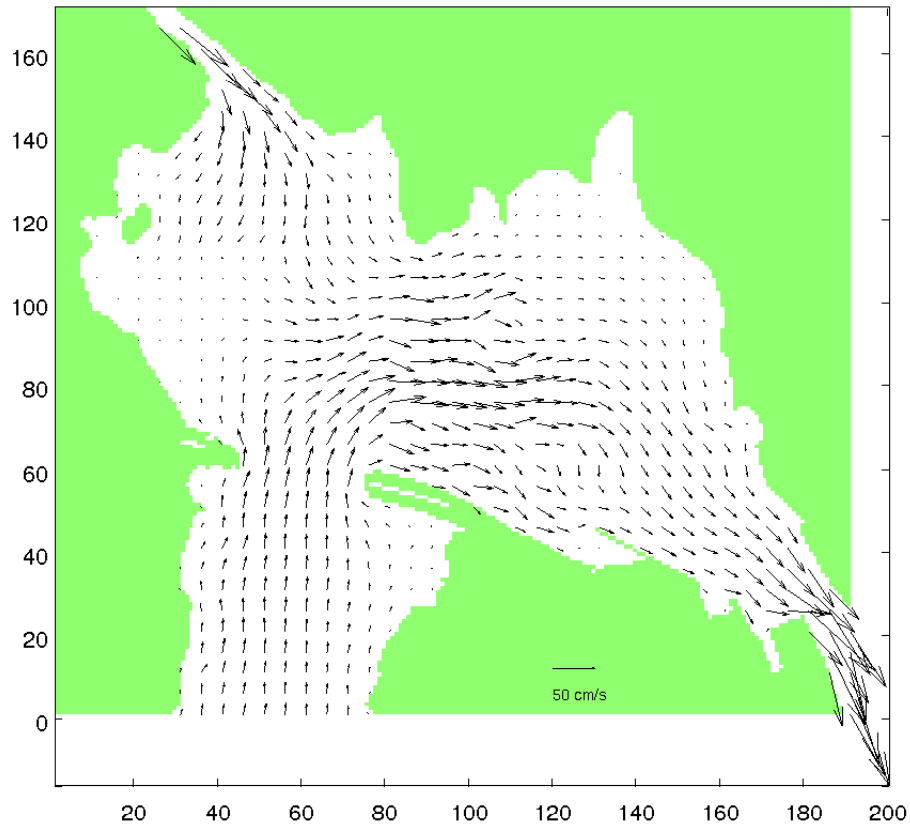
Endringen i strømfeltet er begrenset til området nær utfyllingene.



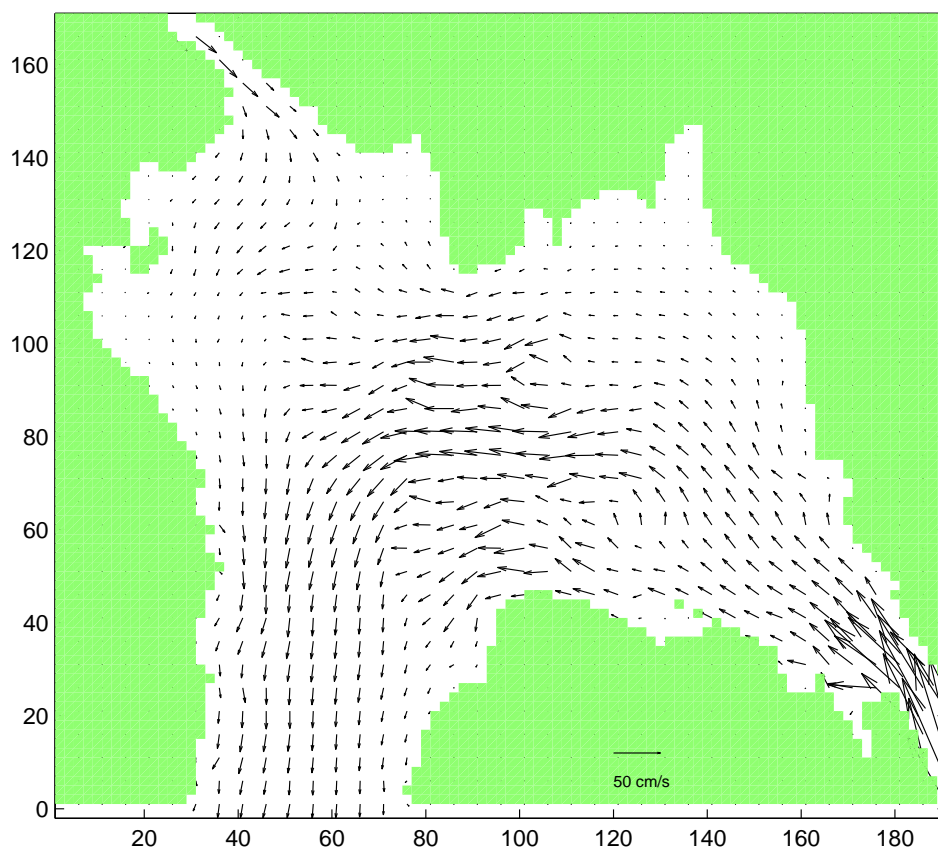
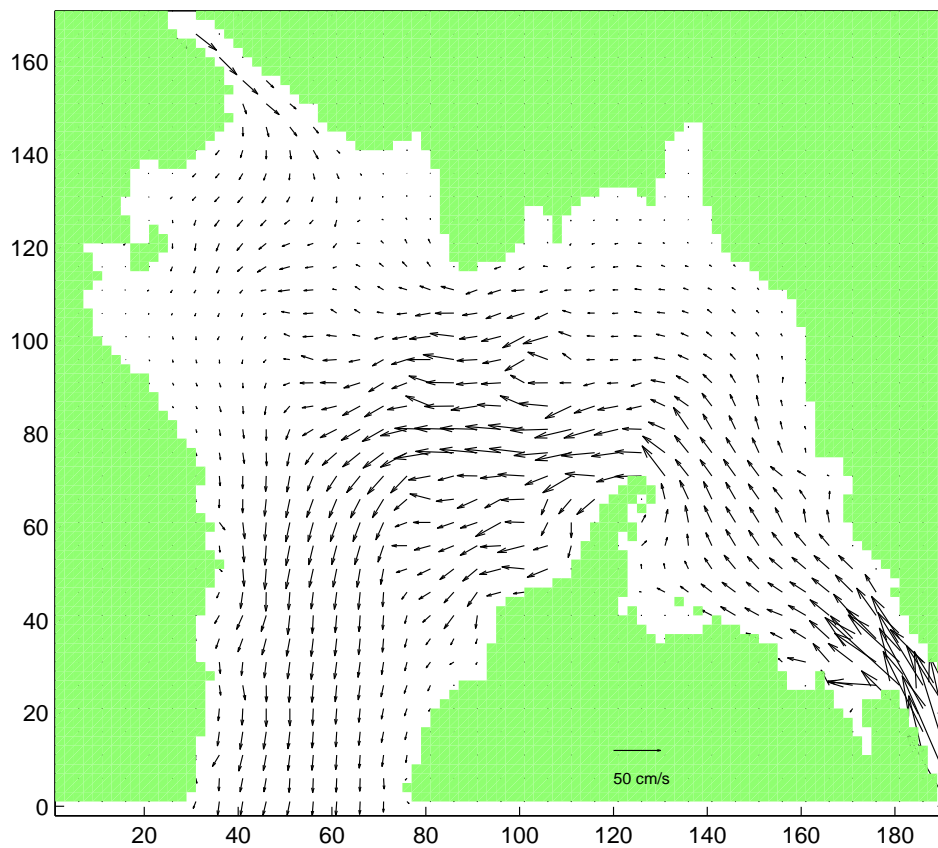
Figur 9: Simulert strøm med 0,25 m høyere vannstand ved munningen av Kanalen i øst enn ved sørlig rand i Vestfjorden. Tidspunkt $t = 8$ timer etter start. Volumstrømmen ut fra Aulielva $22,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Øverst: Med med utfyllinger og senketunnel for alternativ I, 12200 (run72). Nederst: Med dagens bunnforhold, bunnmatrise `hdata_topo6_standard` (run55). Utsnitt av simuleringsområdet. Enhetene på aksene er i gitterpunkter med avstand $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ m}$.



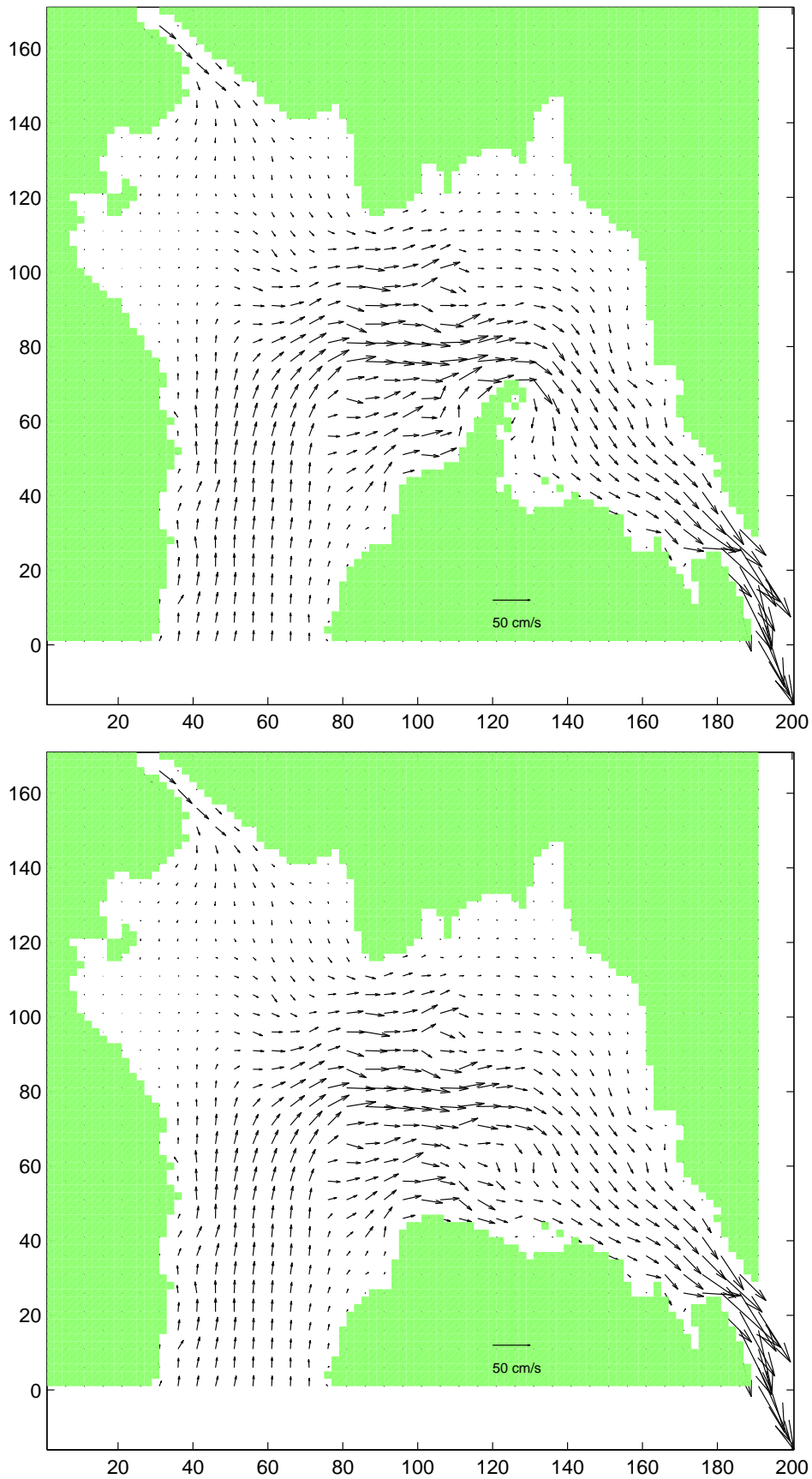
Figur 10: Simulert strøm med 0,25 m høyere vannstand ved sørlig rand i Vestfjorden enn ved munningen av kanalen i øst. Tidspunkt $t = 8$ timer etter start. Volumstrømmen ut fra Aulielva $22,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Øverst: Med med utfyllinger og senketunnel for alternativ I, 12200 (run74). Nederst: Med dagens bunnforhold, bunnmatrise `hdata_topo6_standard` (run51). Utsnitt av simuleringsområdet. Enhetene på aksene er i gitterpunkter med avstand $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ m}$.



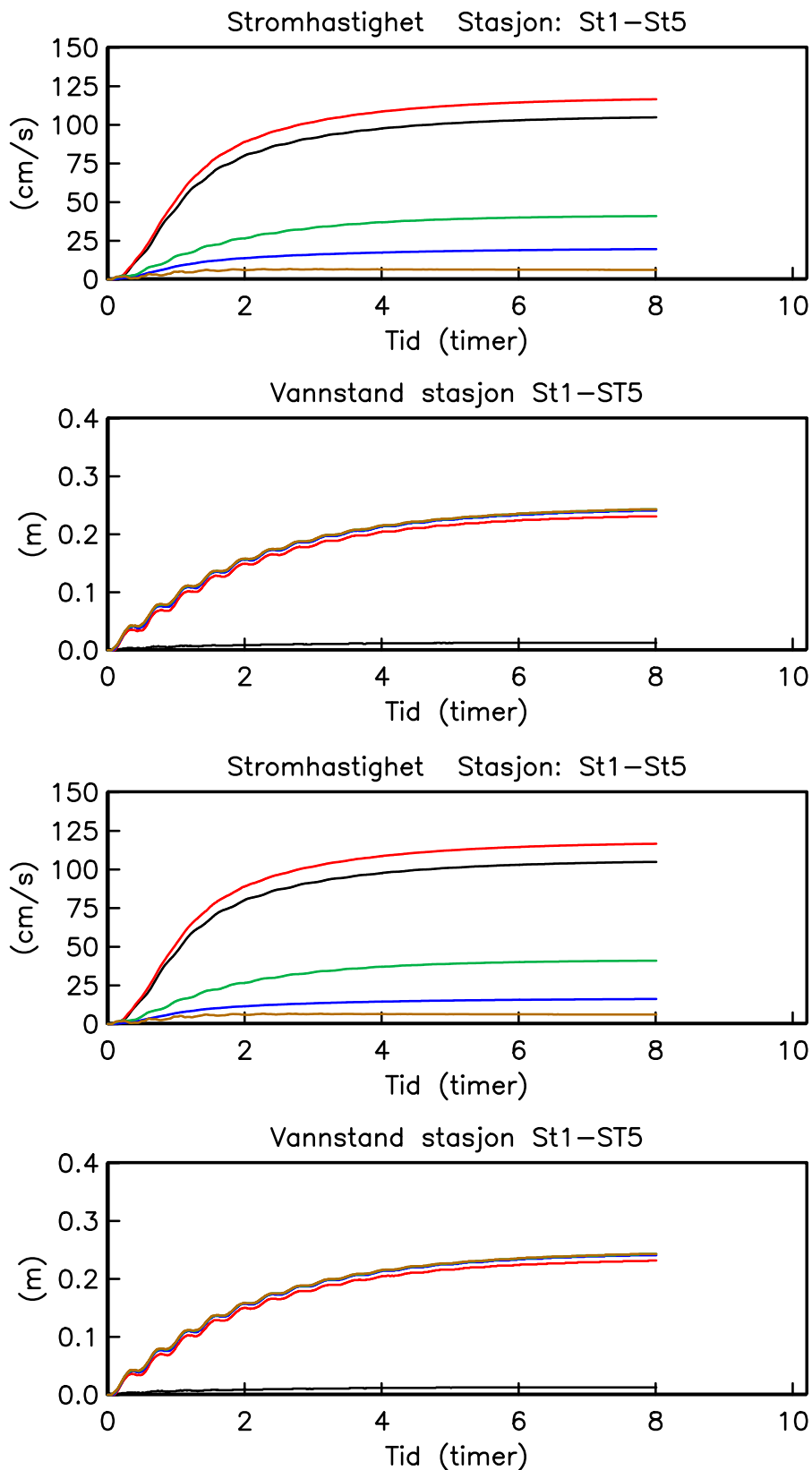
Figur 11: Simulert strøm for alternativ I, 122000 med forlenget utfylling (60 m) ved Smørberg. Volumstrømmen ut fra Aulielva $58,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (flom). Tidspunkt $t = 8 \text{ timer}$ etter start. Øverst: Østgående strøm med 0,25 m høyere vannstand ved sørlig rand i Vestfjorden enn ved munningen av Kanalen i øst (run77). Nederst: Vestgående strøm (run76). Utsnitt av simuleringsområdet. Enhetene på aksene er i gitterpunkter med avstand $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ m}$.



Figur 12: Simulert strøm med 0,25 m høyere vannstand ved munningen av kanalen i øst enn ved sørlig rand i Vestfjorden. Tidspunkt $t = 8$ timer etter start. Volumstrømmen ut fra Aulielva $22,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Øverst: Med med utfyllinger og senketunnel for alternativ II, 16700 (run82). Nederst: Med dagens bunnforhold, bunnmatrise hdata_topo6_standard (run55). Utsnitt av simuleringsområdet. Enhetene på aksene er i gitterpunkter med avstand $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ m}$.



Figur 13: Simulert strøm med 0,25 m høyere vannstand ved sørlig rand i Vestfjorden enn ved munningen av kanalen i øst. Tidspunkt $t = 8$ timer etter start. Volumstrømmen ut fra Aulielva $22,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Øverst: Med med utfyllinger og senketunnel for alternativ II, 16700 (run84). Nederst: Med dagens bunnforhold, bunnmatrise hdata_topo6_standard (run51). Utsnitt av simuleringsområdet. Enhetene på aksene er i gitterpunkter med avstand $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ m}$.



Figur 14: Simulert tidserier for strømhastighet og vannstand for 5 stasjoner med 0,25 cm høyere vannstand ved sørlig rand i Vestfjorden enn ved munningen av Kanalen. Øverst med senketunnel (alternativ I, 12200), run84. Nederst dagens situasjon, run51. Stasjon 1: Ved østre kanalmunning, koordinat (300,27), svart kurve. Stasjon 2: I Kanalen, koordinat (200,90), rød kurve. Stasjon 3: Vest i Kanalen, koordinat (150,140), blåkurve. Stasjon 4: Nord for Kaldnes, koordinat (100,157), grønn linje. Stasjon 5: Munningen av Aulielva, koordinat (60,190), brun linje. Stasjonene er avmerket på fig. 6.

9 Stormflo

Den høyeste observerte stormflo ved vannstandsmåleren i Helgeroa nådde 129 *cm* over NN2000-nivået. Det skjedde 27. februar 1990 (se tabell 1). En kan regne med at vannstanden i Tønsberg var omtrent på samme nivå. Måleren i Helgeroa ble satt opp i 1965. Før det var det en måler i Nevlunghavn (1926-1965). Høyest observerte vannstand i Nevlunghavn gikk opp til 108 *cm* over middelvann i desember 1936. Det er nesten på samme høyde som i 1990. Sjøkartverket har beregnet at hendelsen i 1990 har et gjentaksintervall på 100-år (www.sehavniva.no). Påliteligheten av slike beregninger er diskutert.

Plottet i fig. 6 (nederst) viser situasjonen når vannstanden i Byfjorden er 1,2 *m* over NN2000. Det tilsvarer nesten nivå fra 1990. Legg merke til at det er valgt en litt annen fargeskala for dyp (1-15 *m*) i dette plottet. Det er gjort for å få fram topografien og kystlinjen i de oversvømte områdene bedre. Vi ser at de relativt store flate og lavtliggende områdene ved utløpet av Aulielva og Ilene naturreservat er oversvømt. I områdene med utfyllinger og spuntvegger i forbindelse med senketunnelen er det bare mindre oversvømte områder. Det gjelder både på Nøtterøy og fastlandssiden. Totalt er arealet av de oversvømte områdene 0,573 *km*² og vannmengden i disse områdene utgjør 0,326·10⁶ *m*³. Det gir et middeldypet i de oversvømte områdene på bare 0,568 *m*.

Vannmengden som kom inn med stormfloa i 1990 til de deler av Byfjorden, Kanalen og Vestfjorden, omfattet av modellsimuleringene i denne rapporten (fig. 6), er 2,60·10⁶ *m*³. Bare en forholdsvis lite del (ca. 13 prosent) av dette gikk altså til å fylle opp de grunne oversvømte områdene.

Forutsetter vi at vannet strømmer inn samtidig (i fase) gjennom modellranden i Vestfjorden og kanalmunningen i øst og at stormfloa bygger seg jevnt opp til 1 *m* over et tidsrom av 6 *timer* tilsvarer det en gjennomsnittlig strømstyrke ca. 2 *cm/s*. Dette er ubetydelig i forhold til de strømhastigheter som framkom ved simuleringene ovenfor hvor det ble spesifisert en vannstandsforskjell av 0,25 *m* mellom Vestfjorden og Kanalen (se avsnitt 8.1 og 8.2).

Dersom det under stormfloa er en faseforskjell mellom vannstanden i Vestfjorden og ved kanalmunningen i øst vil det bli vesentlig sterkere strøm i Byfjorden. En slik faseforskjell vil oppstå når stormfloa kommer inn til litt forskjellig tid i Vestfjorden og østfra gjennom Kanalen.

Hvorvidt slike faseforskjeller oppstår kan bare bekreftes ved målinger av vannstand og strøm.

10 Hvordan vil en bruforbindelse påvirke strømforholdene ?

Under siste fase i arbeidet med denne rapporten fikk vi spørsmål om hvordan en eventuelt bru med fundamenter (brukar og peleggrupper) nede i sjøen vil påvirke strømforholdene. Vi ble forelagt et dokument, datert 19.01.2017 - Evaluering bruer, med skisse av 13 forskjellige alternativer (Statens vegvesen 2017). Dokumentet inneholdt ingen detaljer angående utforming og størrelse av brufundamentene eller plassering av brua. Den 8. februar fikk vi ettersendt et oppriss av bru.

Ut fra dette er det bare mulig å komme med noen generelle betraktninger. Det er

vel kjent at brufundamenter i elver vil føre til en høyere vannstand oppstrøms for brua, Henderson (1969). Det skyldes at kraften på brukaret fra vannstrømmen er knyttet til et trykkfall (trykkta) i strømrretningen ved brukarene. Stigebrandt (1992) brukte dette til å beregne hvordan fundamentene til Öresundsbrua ville påvirke gjennomstrømningen til og fra Östersjøen. Han fant at i dette tilfellet ville en bru ha liten innvirkning på gjennomstrømningen i Öresund og brua ble bygd på dette grunnlaget.

Et liknende overslag er mulig å gjennomføre for en eventuelt bru mellom Nøtterøy og fastlandet. For å gjøre dette må en først bestemme den totale friksjonsmotstanden i det aktuelle område i Vestfjorden, Byfjorden og Kanalen på grunn av bunnfriksjoen. Det kan f. eks. gjøres med data fra modellsimuleringene beskrevet i avsnitt 8. Deretter må friksjonsmotstanden på brukarene bestemmes. Det krever detaljert kjennskap til form, størrelse, plassering av brukar og styrke og retning av strømmen på stedet. Bruas innvirkning på gjennomstrømningen vil avhenge av størrelsen av friksjonsmotstanden på brukarene i forhold til størrelsen av den totale bunnfriksjoen. Viktige faktorer når en skal vurdere dette er vannstandsforhøvelen mellom innløpene i Vestfjorden og ved østre munning av Kanalen (fig. 6) og i hvilken grad dette bestemmer strømforholdene i Byfjorden. Dette kan en bare få kunnskap om ved å gjennomføre systematiske målinger av vannstand og strøm i fjorden.

Overslagsberegninger, på liknende grunnlag som for Öresundsbrua, viser at en bru over Byfjorden vil ha forholdsvis liten innvirkning på gjennomstrømningen, men en fullstendig analyse av dette kan bare gjennomføres når en har data fra strømmålinger.

11 Oppsummering og anbefalinger.

11.1 Endringer i strømforholdene ved eventuelle utbygginger.

For begge alternativene med senketunnel (12200 og 16700) viser modellsimuleringer at endringene i strømfeltet er begrenset til områdene nær utfyllingene og spuntveggene ut fra Kaldnes på Nøtterøy-siden. Det ser ikke ut til at strømmen ellers i Byfjorden og Kanalen blir nevneverdig påvirket. Strømforholdene ved utløpet av Aulielva og i området ved Ilene er lite påvirket av utbyggingen (fig. 9-13).

Ved endene av spuntveggene og utfyllingene ut fra Kaldnes kan det oppstå separasjon av strømmen med dannelse av bakevjer i kjølvannet. Den enkle, men robuste kvasi-lineære modellvarianten som er brukt her vil ikke vise detaljer i dette. I bakevjene vil det kunne bli økt sedimentering av finpartikler som kommer med strømmen.

I en sen fase av arbeidet ble vi spurt om å vurdere hvordan en forlengelse av utfyllingene fra Smørberg (alternativ I, 12200) vil virke inn på strømforholdene. Dette fører til en sterkere strøm i det åpne løpet mellom utfyllingene, men endringen i strømfeltet pga. av utfyllingene er begrenset til nærområdet (fig. 11). Vi har dessuten i disse simuleringene lagt inn en større vannføring (ca. $60 \text{ m}^3/\text{s}$) i Aulielva tilsvarende en flomsituasjon. Det vil også bidra til noe sterkere strøm ved utfyllingene, spesielt for alternativ 12200. Sterkere strøm utenfor endene av utfyllingene kan føre til erosjon. Bakevjer som dannes i kjølvannet kan gi sedimentering.

Vi ble også spurt om å vurdere forholdene ved en stormflo (avsnitt 9). Høyeste observerte vannstand under stormflohendelsen i 1990 var ca. 1,3 m over NN2000-nivået. Det

ga oversvømmelse av et areal på ca. $0,6 \text{ km}^2$, hovedsakelig i områdene ved utløpet av Aulielva og ved Ilene naturreservat (fig. 6). I området hvor utbyggingene planlegges blir det bare mindre oversvømte områder. På grunn av manglende observasjonsdata er det ikke mulig å si noe om strømforholdene i fjorden under slike ekstreme hendelser.

Foreløpige beregninger tyder på at en bru med brukar i sjøen (fundamenter og pele-gruppe) vil ha liten innvirkning på gjennomstrømningen i fjorden, men før endelig konklusjon kan trekkes må en kjenne strømforholdene i fjorden bedre (avsnitt 10).

11.2 Behov for strømmålinger.

De to strømmålingene fra Byfjorden og Vestfjorden som vi har hatt tilgang til (Kvaal Grepstad et al. 2004 og Norconsult 2014) er begge gjort på steder som ligger nær land hvor det er grunt, hhv. ca. 8 og 2 m. Målepunktene plassering gir derfor et lite representativt bilde av strømforholdene i de dypere deler av fjorden (se avsnitt 1). Måleserien fra 2004 er kort og streker seg bare over 10-12 døgn. Målinger av temperatur og saltholdighet som bestemmer tetthetsjiktningen (CTD-målinger) ble gjort bare på to dager i forbindelse med strømmålingene i 2013 (Norconsult 2014).

Siden vurderingene av strømforholdene i Byfjorden som er beskrevet i denne rapporten i hovedsak baserer seg på modellsimuleringer ville det være påkrevet å få modellsimuleringene validert og kalibrert mot målinger.

Data fra målinger er absolutt nødvendige for å få dokumentert hvordan strømforholdene avhenger av de meteorologiske forhold (vind, lufttrykk og nedbør). Det siste vil ha innvirkning på tetthetsjiktningen i fjorden som vil virke inn på strømforholdene.

Måledata er også nødvendig for å bestemme styrken av tidevannsstrømmen og hvor framtredd den er. Spesielt vil det være viktig å få fastslått hvordan inn- og utstrømmingen til Byfjorden fordeler seg mellom tverrsnittsflatene ved østre munning av Kanalen og i Vestfjorden. Disse snittflatene danner begrensningene for modellen (fig. 6) og strømmen i Byfjorden vil avhenge av faseforskjeller i vannstand og forskjeller i tetthetsjiktning mellom disse stedene.

Måleprogrammet bør gjennomføres før arbeidet med utfyllinger og spuntvegger i forbindelse med en tunnel påbegynnes. Også når det gjelder å vurdere hvordan en eventuell bru vil påvirke strømforholdene i Byfjorden trengs det måledata (se avsnitt 10). Likeledes for å få bedre forståelse for hvordan strømforholdene blir under en stormflo, men det er selvsagt vanskelig å “fange” slike sjeldne ekstreme hendelser i løpet en relativt kort måleperiode på noen få måneder. Nye målingene bør minimum omfatte:

1. Vannstandsmåler (trykkmåler) ved østre kanalmunning og i Vestfjorden ved Rakkevik.
2. Strømmålinger i Byfjorden i dyprenna nord for Kaldnes, i de aktuelle områdene for fjordkryssing og eventuelt i Kanalen.
3. CTD-målinger for å skaffe bedre informasjon om ferskvannsstrømmen og tetthetsjiktningen i fjorden.

Strømmåling utføres med ADCP-sensor forankret på bunnen med tilstrekkelig oppløsning til å bestemme strømprofilen vertikalt gjennom vannsøylen opp til overflaten. Måleprogrammet bør strekke seg over en tidsperiode fra 1 til 3 måneder. Samtidig bør det helst gjøres

målinger av vannføringen i Aulielva.

11.3 Konklusjoner.

De viktigste konklusjonene kan oppsummeres slik:

- Simuleringene med en enkel kvasi-lineær strømmodell viser at endringene i strømfeltet er begrenset til området nær utfyllingene og spuntvegger fra Kaldnes på Nøtterøy-siden.
- Ved enden av utfyllingene kan det bli separasjon av strømmen og dannelse av bakevjer. Dette kan i noen tilfeller føre til erosjon, spesielt ved enden av utfyllingene. I bakevjene som dannes ved utfyllingene kan det bli oppbygging av sedimenter.
- Forlenget utfylling ved Smørberg vil føre til sterkere strøm ved enden av utfyllingene og i åpningen mellom dem. Det kan gi erosjon ved endene av utfyllingene og sedimentering i bakevjer på sidene.
- Foreløpige vurderinger tyder på at en eventuell bru (med brukar) vil ha liten innvirkning på gjennomstrømningen i fjorden. Endelig vurdering av dette kan først gjøres når en har måledata for strømforholdene i fjorden og kjenner plassering og fundamenteringen for brua.
- Strømforholdene ved utløpet av Aulielva og ved Ilene naturreservat er tilnærmet upåvirket ved de utbygningsalternativer og strømforhold som er vurdert her.
- Det er nødvendig å få validert modellsimuleringene med målinger (se avsnitt 11.2).
- Først etter at data fra eventuelle målinger er analysert kan en ta stilling til om det er behov for simuleringer med mer avansert modellverktøy.

12 Referanser

- Berntsen, J., JX. Xing and A.M. Davies (2008) Numerical studies of internal waves at a sill: sensitivity to horizontal grid size and subgrid scale closure. *Continental Shelf Res.* 28 (10-11), 1376-1393.
- Farmer, D.,M. and J. D. Smith (1980) Tidal interaction of stratified flow with a sill in Knight Inlet. *Deep Sea Res.* Vol. 27, 3-4, p 239-246.
- Gade, H., G. (1986) Features of fjord and ocean interaction. *Nordic Seas*, Editor Burton G. Hurdle. Springer New York. p. 183-189.
- Glenne, B. and T. Simensen (1963) Tidal current choking in the landlocked fjord of Nordåsvatnet. *Sarsia*, Vol. 11, side 43-73.
- Chris Garrett (1995) Flow separation in the Ocean. Note, Dep. Phys. and Astr. University of Victoria, British Columbia, Canada.
- Gjevik, B. (2009) Flo og fjære langs kysten av Norge og Svalbard. Farleia Forlag. ISBN 978-82-9980331-0-6, 351 sider.
- Gjevik, Bjørn, Elisabeth Gundersen og Hilde C. Sandbo (2014). Hvordan kan brufyllinger endre strømforholdene i fjorder. Vurderinger av endringer i strømforholdene i forbindelse med brufyllinger i Sifjordbotn på Senja. Statens vegvesens rapporter nr. 290, 2014, 21 sider.
- Gjevik, Bjørn (2016) Notat om strømforholdene med redusert bruåpning på Veg 6000 i Sifjorden på Senja. Utarbeidet for Statens vegvesen, datert 26. oktober 2016.
- Henderson, F. M. (1969) *Open Channel Flows*. Third Printing. Macmillan, London.
- Hjelmervik, Karina, André Staalstrøm og Svend Norby (2014) Simulert tidevann i Oslofjorden. Tre forskjellige utforminger av havneområdet i Moss. Rapport lnr. 6717-2014. Norsk institutt for vannforskning (NIVA), Oslo.
- Hutchinson, Michael (2011)
http://fennerschool.anu.edu.au/files/usedem53_pdf_16552.pdf
- Jacobsen, Per (1983) *Physical Oceanography of the Trondheimsfjord*. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, Vol. 26, pp. 3-26.
- Kvaal Grepstad, Gisle et al. (2004) Konsekvensutredning Tønsbergpakken. Utredning: Strømningsforhold. Rapport Statens vegvesen/NVK Multiconsult, august 2004.
- Lothe, Arne E. og Bård Brørs (2010) Mulighetsstudie for kryssing av Sognefjorden Opedal-Lavik. Estimert på Bølger og strøm. SINTEF rapport nr. SBF IN F10208.
- Lynge, Birgit Kjøss, Karina Hjelmervik, and Bjørn Gjevik, (2013) Storm surge and tidal interaction in the Tjeldsund channel, northern Norway. *Ocean Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-013-0625-1.

- McClimans, T. A. (1973) Physical oceanography of Borgenfjorden. Kongelige Norske Videnskabers Selskap, Skrifter no. 2, pp. 1-42.
- McClimans, T. A. (1978a) Fronts in fjords. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, Vol. 11, pp. 23-34.
- McClimans, T. A. (1978b) On the energetics of tidal inlets to landlocked fjords. *Marine Science Communications*, 4(2), pp. 121-137.
- Norconsult (2014) Vurdering av strømforhold. Kaldnes Tønsberg og Nøtterøy kommuner. Oppdrag: 5134958, Dokument nr.: 5134958-01. Norconsult 2014.02.14.
- Røed, Lars Petter, Nils Melsom Kristensen, Karina B. Hjelmervik og André Staalstrøm (2016) A high-resolution, curvilinear ROMS model for the Oslofjord. METreport No. 4/2016, ISSN 2387-4201. Norwegian Meteorological Institute, Oslo.
- Sigebrandt, Anders (1980) Some aspects of tidal interaction with fjord constrictions. *Estuarine and Coastal Marine Science*, Vol. 11, pp. 151-166.
- Sigebrandt, Anders og Jarle Molvær (1996) Evidence for hydraulically controlled outflow of brackish water from Holandsfjorden, Norway. *J. Phys. Oceanography*, Vol 26, no 2, pp. 257-266.
- Sigebrandt, Anders (1992) Bridge-Induced Flow Reduction in Sea Straits with Reference to Effect of a Planned Bridge across Öresund. *Ambio*, Vol 21, No 2, pp. 130-134.
- Signell, R. P., and W. R. Geyer (1991) Transient eddy formation around headlands. *J. Geophys. Res.*, 96, 2561-2575.
- Statens vegvesen (2016) Ny fastlandsforbindelse fra Nøtterøy og Tjøme: Siling av alternativer, sammendrag. Rapport Statens vegvesen 18.04.2016.
- Statens vegvesen (2017) Evaluering bruere, med skisse av 13 forskjellige alternativer. Dokument fra Statens vegvesen datert 19.01.2017.
- Tverberg, V., B. Cushman-Roisin and H. Svendsen (1991) Modeling of internal tides in fjords. *J. Marine Res.*, 49, 635-658.

13 Takk

Takk til Håvard Glosli v/ SVV Region Sør, Plan og Prosjektering Vestfold for plandata og til Lars Ole Engebakken v/ SVV Region Sør, Geodataseksjonen for jobb med sammenlikning av dybdeverdier. Arnstein Osvik og Tor Tørresen ved Kartverkets Sjødivisjon ga oss nyttig informasjon om dybdedata, tidevann og referansenivåer. Sistnevnte ga oss også tilgang til vannstandsregistreringer fra Melsomvik etter først å ha gått gjennom og kontrollert datasettet.

14 Appendiks

14.1 Tabeller

Tabell 6: Oversikt over simuleringene (runs) som er gjennomført

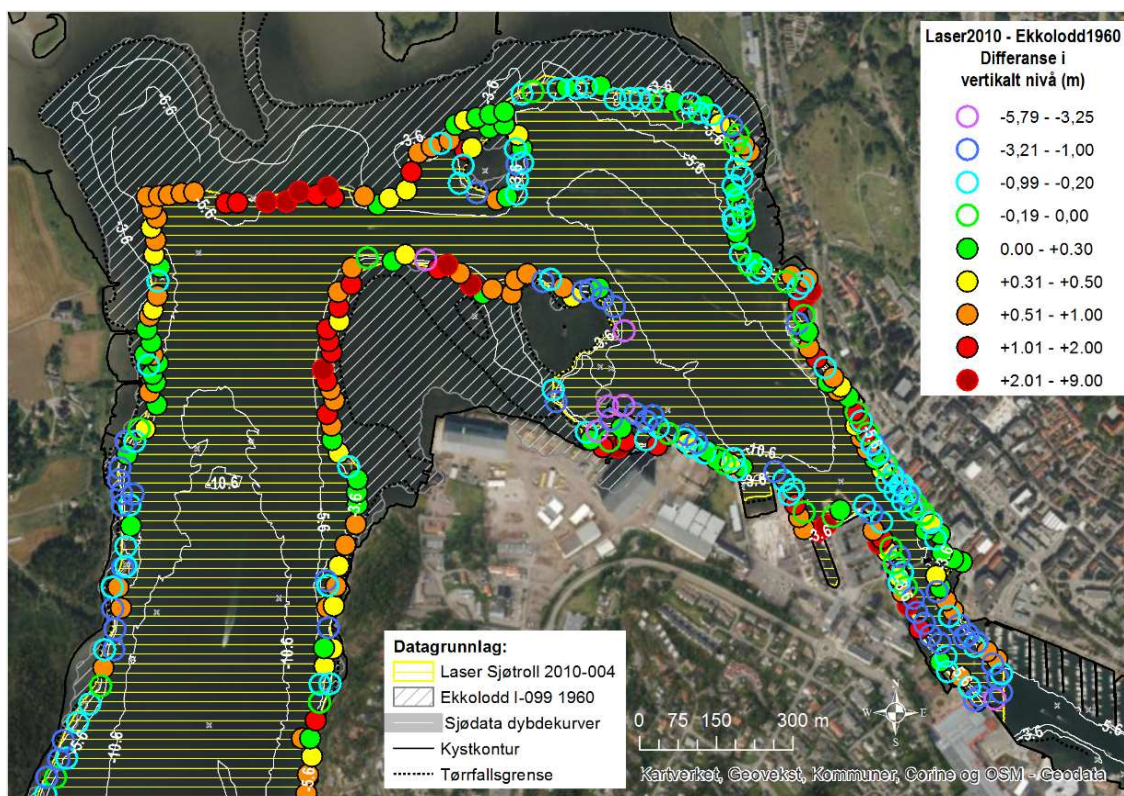
Run nr.	Situasjon	Bunnmatrise	Strømretning i Byfjorden	Vannføring i Aulielva (m^3/s)
51	dagens forhold	hdata_topo6_standard	østgående	22,5
55	dagens forhold	hdata_topo6_standard	vestgående	22,5
72	tunnel I, 12200	hdata_dwg12200_standard	vestgående	22,5
74	tunnel I, 12200	hdata_dwg12200_standard	østgående	22,5
76	tunnel I, 12200	hdata_dwg12200_standard forlenget utfylling	vestgående	58,8
77	tunnel I, 12200	hdata_dwg12200_standard forlenget utfylling	østgående	58,8
82	tunnel II, 16700	hdata_dwg16700_standard	vestgående	22,5
84	tunnel II, 16700	hdata_dwg16700_standard	østgående	22,5

Tabell 7: Vanndyp i stasjoner med tidsserier for vannstand og strøm (fig. 6). Dyp er angitt i forhold til høydenivået NN2000+0,2 m.

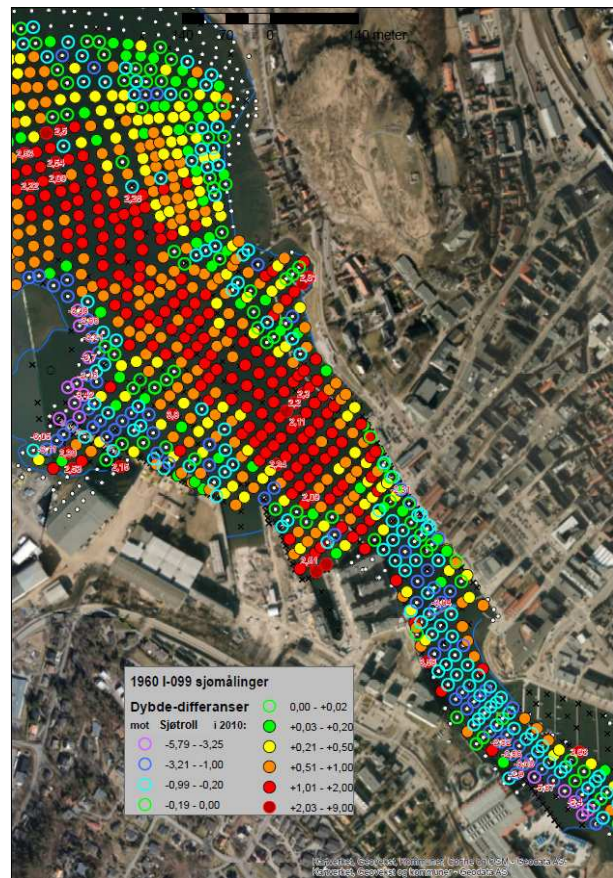
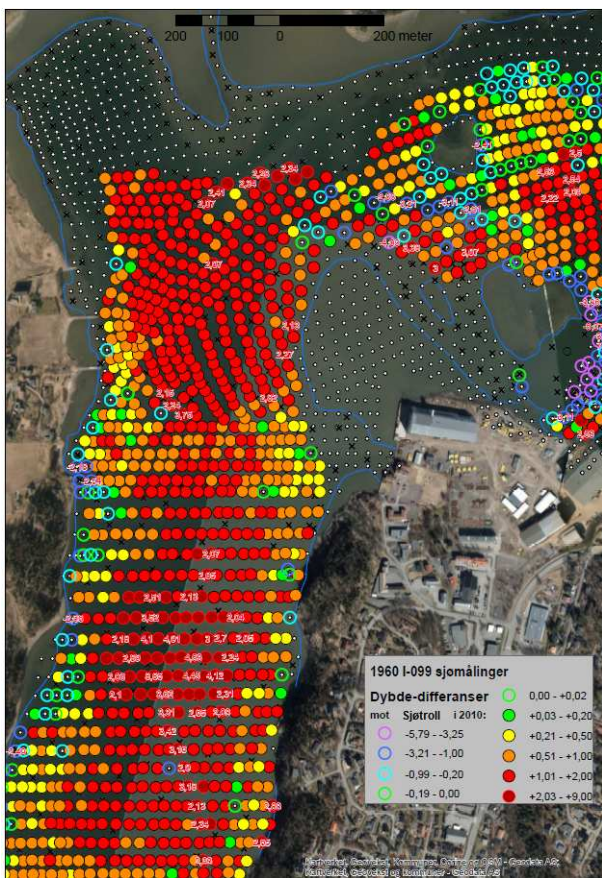
Stasjon	St1	St2	St3	St4	St5	St6	St7	St8	St9	St10
Vanndyp	7,1	8,4	13,7	9,2	1,1	7,2	2,5	11,2	2,8	12,0

14.2 Bunntopografi - sammenligning mot høydegrunnet fra 1960

Det ble gjort en sammenligning av høydeverdiene fra 1960 og 2010, og det ble som forventet påvist stor forskjell mellom datakildene. Fig. 15 viser differansene med forskjeller på 1-3 meter, også langs store deler av det kystnære området som kun har målinger fra 1960. Man kunne ikke enkelt se noen systematisk feil, da den varierer mellom positive og negative verdier. Forskjellen skyldes i stor grad den store unøyaktigheten til ekkoloddmålingene, samt at sjøbunnen også antas å ha forandret seg en god del siden 1960 (mudring, sedimentasjon, osv).



Figur 15: Det er store differanser mellom gammelt og nytt datagrunnlag mange steder der de overlapper langs kanten av området med laserdata. Feil på inntil flere meter er mye i et område som i utgangspunktet er grunt. Man kan anta at feilene er videreført i modellen i det grunne området innover mot land, selv om utslaget i beregningsalgoritmen dempes av den gode nøyaktigheten i laserdataene i tilgrensede områder. Høydeverdiene fra kystkontur og tørrfallsgrense innover mot land bidrar i samme retning. Området i det gråskraverte området er altså beregnet på grunnlag av veldig dårlige data.



Figur 16: Høydedifferanse mot laser for I-099 ekkolodd målingene fra 1960. De hvite prikkene markerer steder der man ikke har laserdata.



Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO
Tlf: (+47 915) 02030
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen