

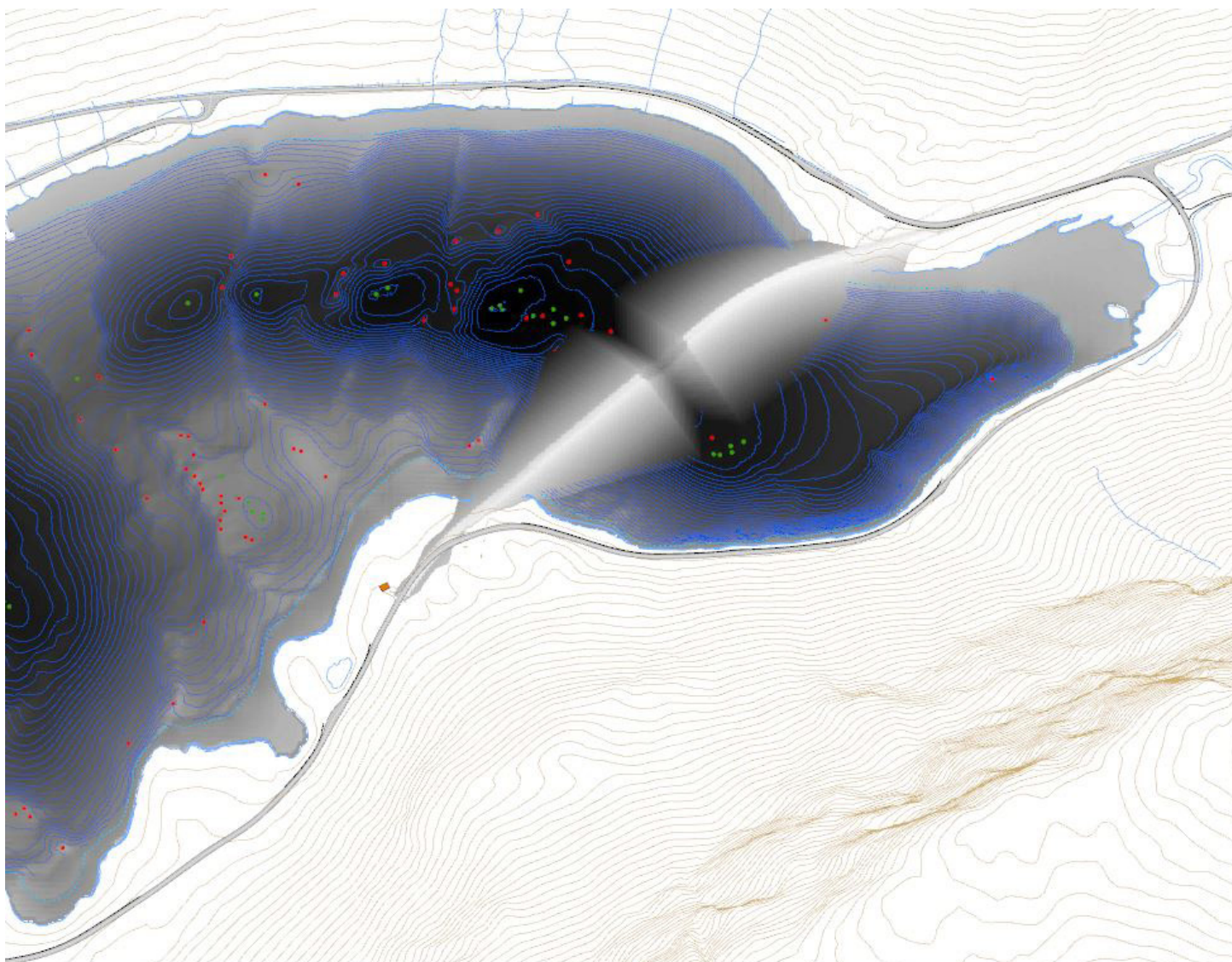


Hvordan kan brufyllinger endre strømforhold i fjorder ?

Vurderinger av endringer i strømforholdene i forbindelse med brufyllinger i Sifjordbotn på Senja.

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 290



Tittel

Hvordan kan brufyllinger endre strømforhold i fjorder ?

Undertittel

Vurderinger av mulige endringer av strømforholdene i Sifjordbotn på Senja.

Forfatter

Bjørn Gjevik (Universitetet i Oslo), Elisabeth Gundersen og Hilde C. Sandbo

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

Seksjon

Geoteknikk og skred

Prosjektnummer

503249

Rapportnummer

Nr. 290

Prosjektleder

Tone Hugstmyr Woie

Godkjent av

Jørn Are Torslien

Emneord

Sjøfylling, strømning, stagnant bunnvann, struping, massebevaring

Sammendrag

Rapporten ser på hvordan brufyllinger ved den planlagte omleggingen av veien langs Sifjorden vil påvirke strømforholdene i fjorden. Vurderingene er basert på en antagelse om at tidevannsstrømmen er den dominerende vedvarende strømkomponenten i fjorden. Store sjøfyllinger kan føre til en struping med redusert tidevannsutslag i bassenget innenfor. Det vil ikke forekomme her. En annen konsekvens er dannelsen av stagnant bunnvann i bassenget innenfor og stagnant vann i bakevjer langs fyllingen. Vi tror at terskeldypet i de planlagte bruåpningene er tilstrekkelig store til at det ikke vil dannes stagnant bunnvann, men dette er ingen sikker konklusjon på bakgrunn av det datagrunnlaget en har for Sifjorden. En liten reduksjon i åpningsstørrelse og friksjon kan endre konklusjonen. Dannelsen av stagnant bunnvann kan ha flere uheldige konsekvenser som for eksempel en endring i fjord faunaen. I rapporten har vi sammenliknet med andre fjorder med liknende forhold.

Title

How can large fillings change flow conditions in fjords ?

Subtitle

A consideration of flow conditions in Sifjordbotn.

Author

Bjørn Gjevik (University of Oslo), Elisabeth Gundersen and Hilde C. Sandbo

Department

Traffic Safety, Environment and Technology Department

Section

Geoteknikk og skred

Project number

503249

Report number

No. 290

Project manager

Tone Hugstmyr Woie

Approved by

Jørn Are Torslien

Key words**Summary**

Vurderinger av endringer i strømforholdene i forbindelse med brufyllinger i Sifjorden på Senja

av

Bjørn Gjevik¹, Elisabeth Gundersen², Hilde C. Sandbo³

Dato 8. april 2014

1. Innledning

Denne rapporten er utarbeidet på oppdrag for Statens vegvesen. Oppgaven er å vurdere hvordan brufyllinger ved den planlagte omleggingen av veien langs Sifjorden vil påvirke strømforholdene i fjorden.

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

Resultatene fra disse undersøkelsene 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, Sigebbrandt og Molvær 1996, Berntsen et al. 2008, Lothe og Brørs 2010, Lyngne 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).

Vi er ikke kjent med at det tidligere har blitt gjennomført undersøkelser av strømforholdene i Sifjorden.

I denne rapporten har vi valgt å beskrive metodene som ligger til grunn for vurderingene av forholdene i Sifjorden forholdsvis detaljert. Dette er gjort fordi det kan komme til nytte ved andre prosjekter hvor en også må vurdere om inngrep i form av veifyllinger i fjordarmer vil føre til struping av tidevannet og dannelse av stagnant bunnvann.

2. Kort oversikt over fysiske prosesser i fjorder

Strømforholdene i fjorder er i hovedsak bestemt av følgende faktorer:

- Ferskvannstilførselen fra elver (Q_f).
- Inn- og utstrømning av vann med tidevannet (Q_t).
- Vinddrevet strøm på grunn av vinddraget på havoverflaten.
- Episodisk utveksling av vannmassene i fjorden.

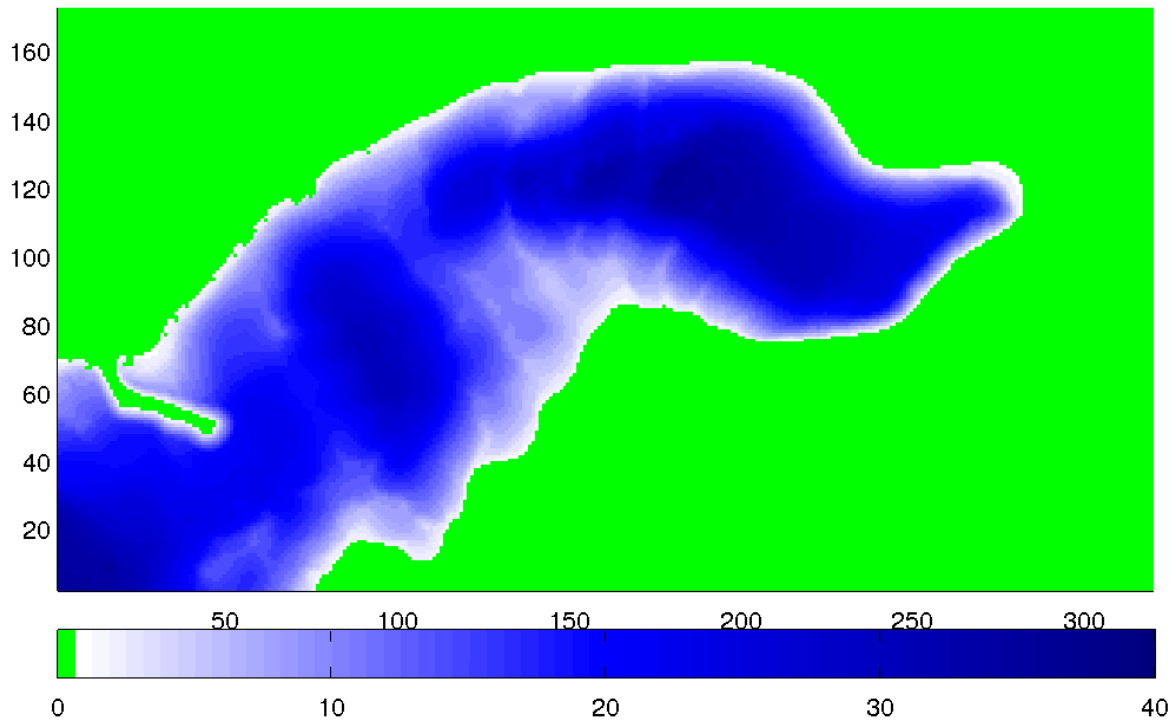
¹Professor emeritus, Matematisk institutt, Universitetet i Oslo. epost: bjorng@math.uio.no

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

³Overingeniør, Vegdirektoratet, epost: hilde.sandbo@vegvesen.no

Tabell 1: Forskjellen på høyvann og lavvann i standardhavnen Tromsø og tre sekundærhavner nær Sifjorden. Tidspunktet for høy- og lavvann i Andenes og Gryllefjord er 35 min. før Tromsø. Data fra Tidevannstabellene utgitt av Sjøkartverket, Stavanger (www.vannstand.no).

Havn	Høyest-lavest HAT-LAT (<i>cm</i>)	Middel spring (<i>cm</i>)	Middel nipp (<i>cm</i>)
Tromsø	316	223	113
Andenes	254	178	88
Gryllefjord	247	174	88
Skrolsvik	253	178	90



Figur 2: Plott av dybdeforholdene i Sifjordbotn. Bunnmatrise med $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ m}$ gitteroppløsning basert på oppmålinger av Sjøkartverket og Parker Maritme AS. Koordinatsystem med x -akse fra vest mot øst (horisontalt), y -akse fra sør mot nord (vertikalt). Enheter på aksene er gitterpunkter (5 m). Dybdeskala i meter nederst i bildet. Referansenivå er NN54 som er 6 cm over middelvann.

4. Tidevannet

I en skjermet fjordbunn som Sifjordbotn, hvor det er forholdsvis liten ferskvannstilførsel, vil tidevannstrømmen være dominerende for strømforholdene og utskiftning av vannmasser i fjorden.

Oss bekjent er det ikke foretatt tidevannsmålinger i Sifjordbotn, men tidevannshøyden i Sifjord kan anslåes fra målinger fra steder i nærheten (tabell. 1).

Styrken av tidevannstrømmen i tversnitt av fjorden kan bestemmes ved følgende enkle betraktninger: Netto volumstrøm av vann (Q_t) gjennom et tversnitt S av fjorden gir en endring av vannvolumet av den delen av fjorden som ligger innenfor tversnittet. Betegner vi middelstrømmen i tversnittet med \bar{u}_t har vi at

$$Q_t = \bar{u}_t S = A \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

hvor A er flatearealet av fjorden og h er vannstanden i forhold til middelvannstand innenfor snittflaten. Den tidsderiverte

$$\frac{dh}{dt}$$

er endringen i vannstand per tidsenhet. Strømmen er rettet innover fjorden ($u_t > 0$) dersom den tidsderiverte er positiv. Vi har sett bort fra små forsinkelser som skyldes tidevannsbølgens forplantning i fjorden og små variasjoner i vannstanden, h , som skyldes bunntopografi. Dette er en god tilnærming dersom fjorden er mye kortere enn bølgelengden for tidevannsbølgen. Dette er tilfelle for de mange norske fjorder og spesielt i den korte fjordarmen i Sifjordbotn.

Det totale vannvolumet som strømmer gjennom tversnittet i løpet av den halvdelen av tidevannssyklusen når strømmen enten går inn eller ut er

$$V_t = 2h_0 A \quad (2)$$

hvor h_0 er amplituden (halve utslaget) av tidevannsvariasjonen i fjorden. Dette volumet tilsvarer altså vannmassen som skal til for å fylle fjorden innenfor snittet fra lav til høy vannstand.

I første omgang skal vi bare ta med de dominerende halvdaglige komponentene av tidevannet og skriver

$$h = h_0 \sin(2\pi \frac{t}{T}) \quad (3)$$

hvor $T = 12,4$ timer er perioden. Innsatt i formel (1) finner vi

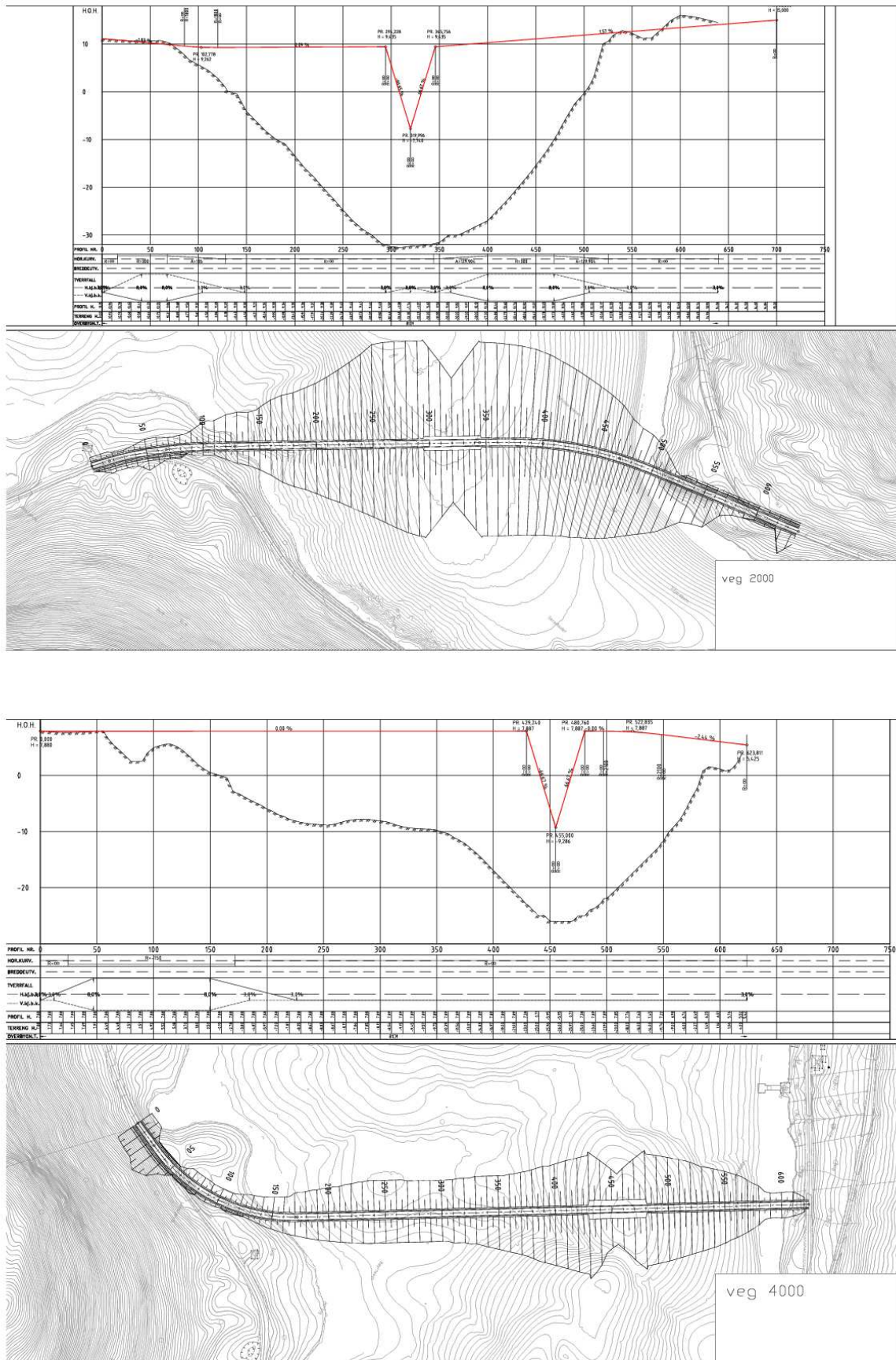
$$\bar{u}_t = 2\pi \frac{A h_0}{S T} \cos(2\pi \frac{t}{T}) \quad (4)$$

Den største middelstrøm i tversnittet

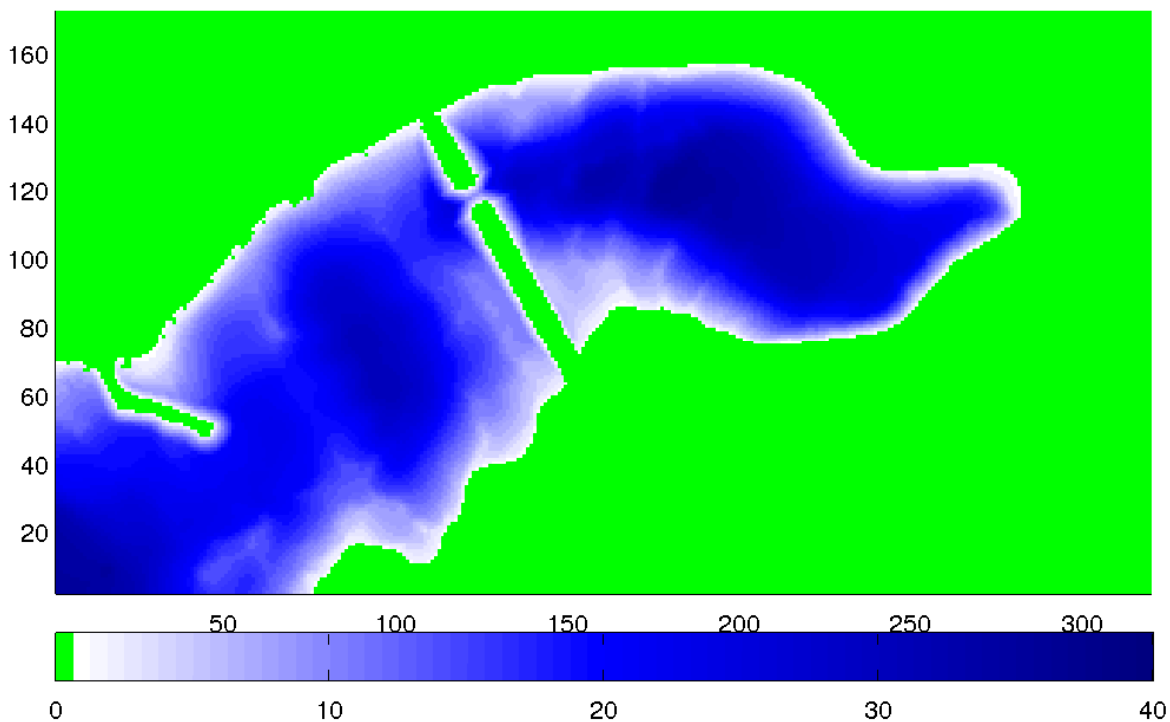
$$U_m = 2\pi \frac{A h_0}{S T} \quad (5)$$

opptrer ved halvflødd og halvfalt sjø, i.e. for $t = 0, \frac{T}{2}$. Den tilsvarende volumstrømmen i tversnittet er

$$Q_m = 2\pi A \frac{h_0}{T} \quad (6)$$



Figur 3: Vegtraséer med foreslåtte fyllinger og bruåpninger for Veg 2000 og Veg 4000.



Figur 5: Bunnmatrise med innlagt fyllinger for Veg 4000. Gitteroppløsning $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ m}$. Koordinat-system med x -akse fra vest mot øst (horisontalt), y -akse fra sør mot nord (vertikalt). Enheter på aksene er gitterpunkter (5 m). Dybdeskala i *meter* nederst i bildet. Referansenivå er NN54 som er 6 cm over middelvann.

For at det skal bli sterk middelstrøm må tvernsnittsarealet være lite i forhold til flatearealet i fjorden innenfor. De fleste sterke tidevannsstrømmer i norske fjorder opptrer der innløpet til fjorden snevres inn både i bredde og dybde. Det mest kjente eksemplet er Saltstraumen ved Bodø hvor forholdet $A/S \approx 4,5 \cdot 10^4$ og middelstrøm i innløpet kan gå opp i ca. 6 m/s (Gjevik 2009).

Fyllingene i forbindelse med omlegging av veien i Sifjorden vil utgjøre store innsnevring-er av tvernsnittsarealet. På den andre siden er flatearealet av fjorden innenfor de planlagte fyllingene forholdsvis lite slik at vi ikke får spesielt sterk strøm gjennom bruåpningene, bortsett for meget trange åpninger (tabell 2).

4-1. Overslag over tidevannsstrømmen i Sifjordbotn.

I mangel av strømmålinger fra Sifjordbotn kan den enkle teorien i forrige avsnitt brukes til å gjøre overslag av styrken av tidevannstrømmen gjennom tvernsnitt innover i fjorden og i de planlagte bruåpningene.

Tabell 2 viser at de planlagte utfyllingene med forholdsvis små bruåpninger vil føre til relativt sterk strøm i åpningene med strømhastigheter ca. $30\text{-}36 \text{ cm/s}$ for de tre vegtraséene Veg 4000, 5000 og 6000. For Veg 2000, hvor flatearealet av fjorden innenfor fyllingene er minst, vil strømhastigheten gå opp i ca. 19 cm/s . En kan forvente at strømmen gjennom bruåpningene vil ha form av en stråle (jet) på nedstrømsiden, mens det på oppstrømsiden vil trekkes inn vann fra et større område. I strømskjæret på begge sider av strålen vil det

dannes turbulens.

Tabell 2: *Overslag over middelstrøm gjennom tversnitt i fjorden og bruåpninger med bredde b og dyp d_m (fig. 3-4). Den topografiske tidevannsfaktoren q_c etter McClimans (1978) er også beregnet. En vannstandsamplitude $h_0 = 1,25$ m tilsvarende $(HAT - LAT)/2$ og periode $T = 12,4$ timer er lagt til grunn ved beregningene.*

Tversnitt	Snittsareal S (m^2)	Flateareal A (m^2)	Forhold A/S	Faktor q_c	Middelstrøm U_m (cm/s)	Volumstrøm Q_m (m^3/s)
Ved molo	$3,5 \cdot 10^3$	$5,151 \cdot 10^5$	$1,47 \cdot 10^2$	0,003	2,6	91,0
Veg 2000 Bruåpning: $b = 22,7$ m, $d_m = 7,74$ m	$0,879 \cdot 10^2$	$0,955 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^3$	0,005	19,2	16,9
Veg 4000 Bruåpning: $b = 27,9$ m, $d_m = 9,29$ m	$1,296 \cdot 10^2$	$2,652 \cdot 10^5$	$2,05 \cdot 10^3$	0,011	36,1	46,8
Veg 5000 Bruåpning: $b = 28,9$ m, $d_m = 9,67$ m	$1,397 \cdot 10^2$	$2,402 \cdot 10^5$	$1,72 \cdot 10^3$	0,010	30,2	42,1
Veg 6000 Bruåpning: $b = 25,0$ m, $d_m = 8,57$ m	$1,071 \cdot 10^2$	$2,100 \cdot 10^5$	$1,96 \cdot 10^3$	0,011	34,4	36,8

Overslagene av middelstrømmen i et tversnitt ved moloen i Sifjorden viser svak strøm med strømhastigheter på opp mot 3 cm/s . Utstikkende nes eller odder kan føre til en forsterkning av strømmen med sterkere strøm rett utenfor neset eller odden og ofte med bakevjer på lesiden. Av den grunn kan en forvente sterkere strøm utenfor moloen ved Sifjorden enn hva middelstrømmen i tabell 2 indikerer.

4-2. Struping av tidevannet.

For fjorder hvor tversnittsarealet av innløpet er svært lite i forhold til flatearealet av fjorden innenfor, $A/S \gg 10^3$, kan det oppstå *struping* (se Gjevik 2009). Strømmen inn til fjorden blir da sterkt påvirket av bunnfriksjonen og dybdeforholdene i innløpet. Høyvann i den indre delen av fjorden får redusert høyde og forsinkes i forhold til høyvann i havet utenfor innløpet. Både reduksjonen i høyde og forsinkelsen vil avhenge av strømforholdene i det trange innløpet (McClimans 1978). I Saltstraumen hvor $A/S = 4,5 \cdot 10^4$ er det betydelig struping. Tidevannsamplituden er redusert med ca. 60 prosent innenfor innløpet i forhold til i havet utenfor og forsinkelse av flo sjø er ca. 2 timer. Av McClimans (1978) fremgår det at stuping oppstår når den såkalte topografiske tidevannsfaktoren:

$$q_c = \frac{A \sqrt{2gh_0}}{S \cdot 2gT} > 0,1 \quad (7)$$

For Saltstraumen er faktoren $q_c = 0,21$. For Oslofjord innenfor Drøbak hvor det er lite struping er $q_c = 0,07$.

Tabell 2 viser at for de planlagte bruåpningene i Sifjorden ligger den topografiske tidevannsfaktoren q_c i området 0,005 til 0,011, dvs. betydelig under grensen for at en kan

forvente sterk struping av tidevannet. Men systemet er følsomt og relativt små endringer av lengde, tvernsnittsareal og bunnfriksjonen i bruåpningene kan føre til strupingen.

Kriteriet ovenfor gjelder for tilfeller hvor friksjonen i innløpet spiller liten rolle. Stigebrandt (1980) har undersøkt hvordan friksjonen innvirker på strupingen. Hans beregninger viser at friksjonen har liten betydning dersom den dimensjonsløse parameter

$$\lambda = 2\kappa \frac{L}{R} \ll 1 \quad (8)$$

Her er κ et dimensjonsløs motstandstall for friksjonen mot bunn og sideflate i innløpet, L er lengden og R er den hydrauliske radius for innløpet. For Veg 4000 (se fig. 3) anslår vi lengden av bruåpningen $L = 58 \text{ m}$ og den hydrauliske radius $R = 3,98 \text{ m}$. Med $\kappa = 10^{-2}$ gir det $\lambda = 0,292$.

Friksjonsvirkningen i slike kanaler angies ofte ved det såkalte *Mannings-tallet*, n eller $M = 1/n$ (Ferus et al. 2011). Relasjonen mellom n og motstandstallet κ er gitt ved

$$n = kR^{\frac{1}{6}} \sqrt{\frac{\kappa}{g}}$$

hvor dimensjoneringsfaktoren $k = 1 \text{ m}^{\frac{1}{3}}/s$ for SI-enheter og tyngdens akselerasjon $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. En liste med samnhørende verdier for Mannings tall og motstandstallet κ finnes i tabell 3.

Tabell 3: *Sammenhengen mellom Mannings tall, n , M og motstandstallet κ . Den tilsvarende "strupingsfaktoren", q_s (lik. 9), for bruåpningen for Veg 4000 er også beregnet. En vannstandsamplitude $h_0 = 1,25 \text{ m}$ tilsvarende $(HAT - LAT)/2$, periode $T = 12,4$ timer, hydraulisk radius $R = 3,98 \text{ m}$ og lengde av bruåpningen $L = 58 \text{ m}$ er brukt ved beregningene av q_s .*

n	M	κ	q_s
0,010	100,0	0,0006	0,0117
0,020	50,0	0,0025	0,0120
0,030	33,3	0,0056	0,0125
0,040	25,0	0,0099	0,0131
0,050	20,0	0,0155	0,0139
0,060	16,7	0,0223	0,0149
0,070	14,3	0,0303	0,0159
0,080	12,5	0,0396	0,0170
0,090	11,1	0,0501	0,0182
0,100	10,0	0,0619	0,0194

Graden av struping er i følge Stigebrandt (1980) bestemt ved en dimensjonsløs parameter hvor friksjonen inngår. Stigebrandts parameter kan skrives

$$q_s = q_c \sqrt{1 + \lambda} \quad (9)$$

For verdier av $q_s \leq 0,1$ viser Stigebrandts beregninger at struping har liten betydning.

Fra tabell 3 ser vi at for bruåpningen i Veg 4000 ligger q_s i området fra 0,0125 til 0,02 når motstandstall M er mellom 33 og 10. Det betyr at det ikke vil oppstå struping av betydning selv med relativ kraftig friksjon i bruåpningen.

Tilsvarende verdier vil en få for Veg 2000, 5000 og 6000.

5. Modellsimuleringer av tidevannet.

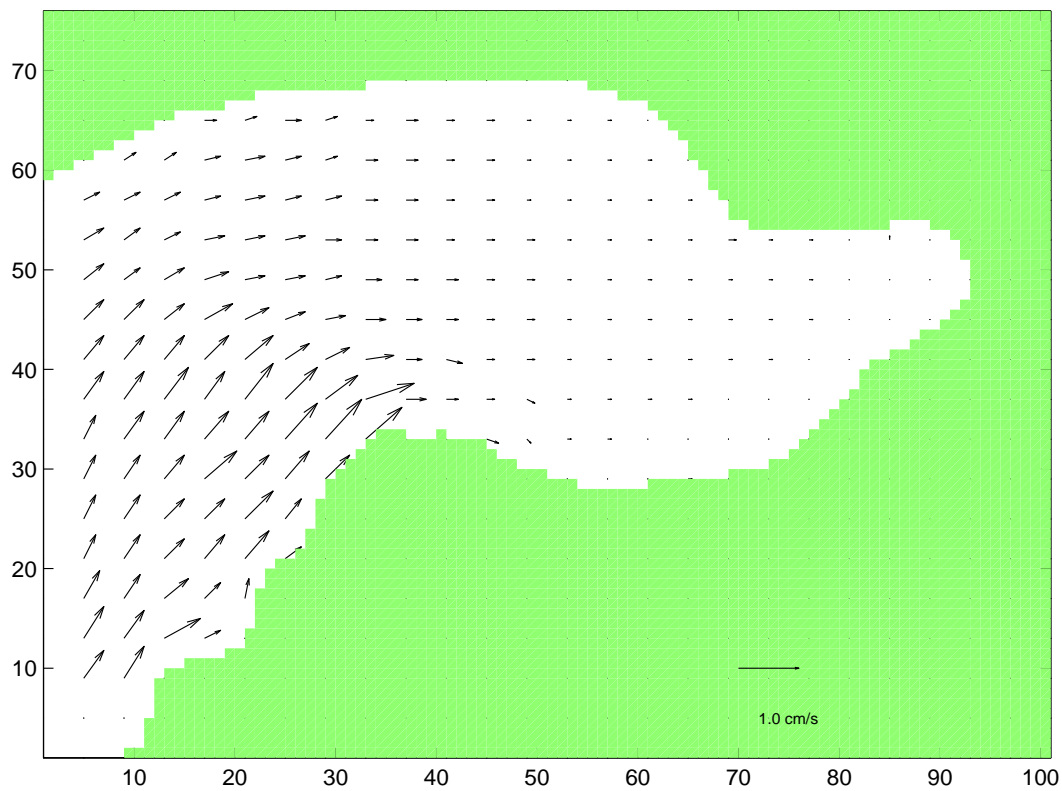
For å få en bedre forståelse av strømforholdene i fjorden før eventuelle utfyllinger blir gjort, har vi utført modellsimuleringer av tidevannsstrømmen for modellområdet vist i fig. 2. Til dette har en modifisert utgave av modellen beskrevet i Lyngne et al. (2013) blitt brukt. Siden overslagene i avsnitt 4.1 viser relativt svake tidevannsstrømmer, har modellen blitt kjørt i en linær mode dvs. de ikke-linære leddene som er viktig når det er sterk strøm og det dannes kraftige virvler er utelatt. Ikke-linær kvadratisk bunnfriksjon er beholdt. I modellsimuleringene har tidevannshøyder og strømflukser blitt implementert i en FRS-sone ved innløpet vest for moloen i Sifjorden.

Resultater av modellsimuleringene slik fjorden er før eventuelle veifyllinger er vist i fig. 6-7. Det viser at tidevannstrøm forsterkes litt utenfor Røyerneset, med strømhastighet mellom 1-2 cm/s . Lenger innover mot Sifjordbotn er tidevannstrømmen mye svakere.

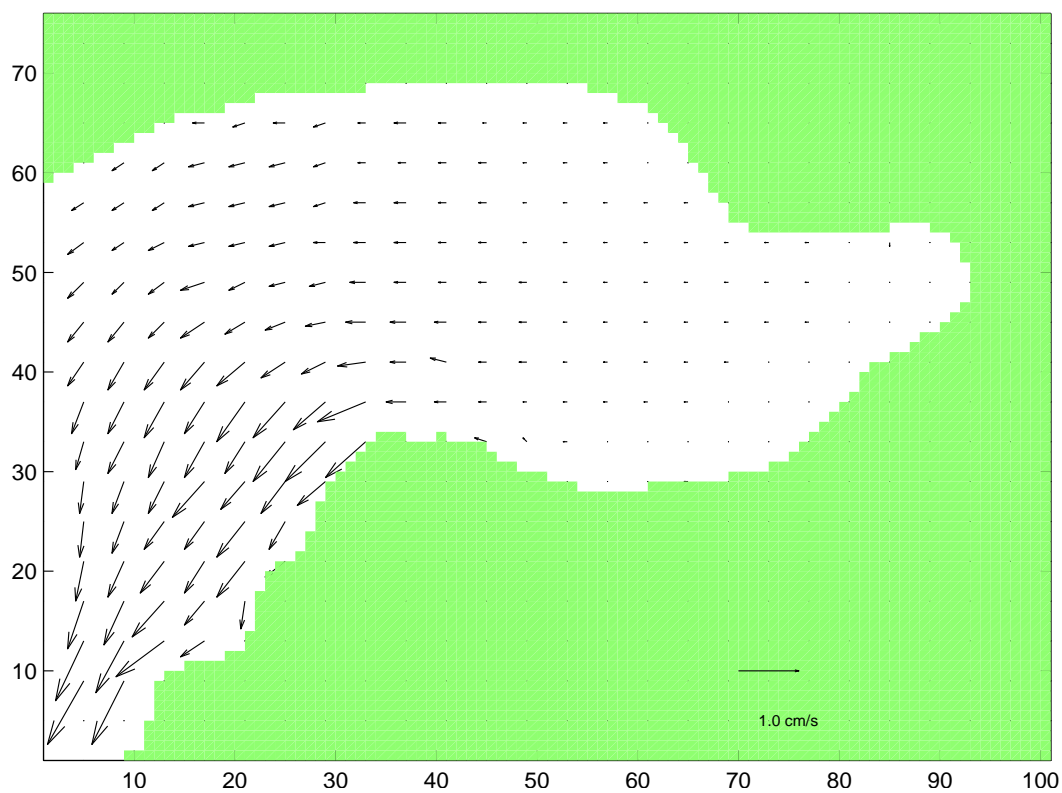
Simuleringer med veifyllinger tilsvarende Veg 4000 viser som forventet et helt annet strømbilde (fig. 8 - 9). En får relativt sterk strøm i selve bruåpningen i overenstemmelse med resultatene i tabell 2. Simuleringene viser at strømstyrken avtar forholdsvis raskt både oppstrøms og nedstrøms fra bruåpningen. Siden modellen er kjørt i en linær mode, og den romlige gitteroppløsningen er forholdsvis grov (sammenlignet med bruåpningen), blir det ikke utviklet en jet som forventet på nedstrømsiden. Det er spesielt svak strøm på innsiden av fyllingene inn mot land. Her kan det oppstå langsomt sirkulerende virvler med mer eller mindre stagnante vannmasser.

6. Betydningen av ferskvannstilførselen.

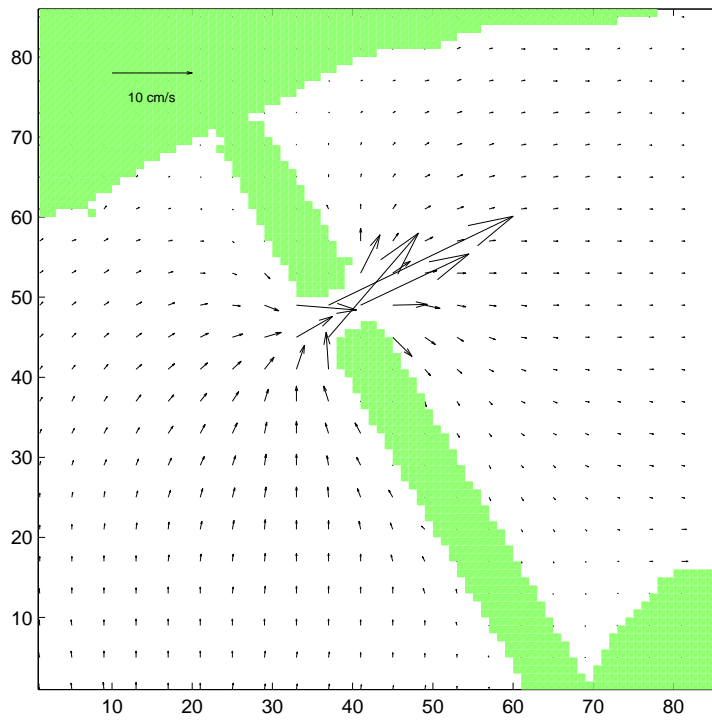
Ferskvannstilførselen til fjorden kommer i hovedsak fra Botneelva som har utløp i bunnen av fjorden. Nedbørsfeltet til elva er ca. $8,5 km^2$, se fig. 10. Da vi ikke har hatt tilgang til målinger av vannføringen i elva har vi anslått avrenningen som følge av intensivnedbør over en viss periode. Til dette har vi brukt den rasjonelle formel fra Håndbok 018. Konsentrasjonstiden, dvs tiden det tar før nedbøren i hele nedbørsfeltet bidrar til avrenningen ved elveutløpet er 230 $min.$. Ved å bruke nedbørsdata fra stasjon 89350 Bardufoss har vi beregnet at en nedbørsperiode på ca. 270 $min.$ vil gi en avrenning $Q_f = 2,6 m^3/s$, med et gjentaksintervall på ca. 2 år. Det hefter selvfølgelig stor usikkerhet til dette anslaget, men det viser at ferskvannstilførselen til fjorden innenfor de planlagte fyllingene er liten i forhold til volumstrømmen gjennom bruåpningene pga. av tidevannet. Vi har lagt dette til grunn ved vurderingene av strømforholdene i fjorden.



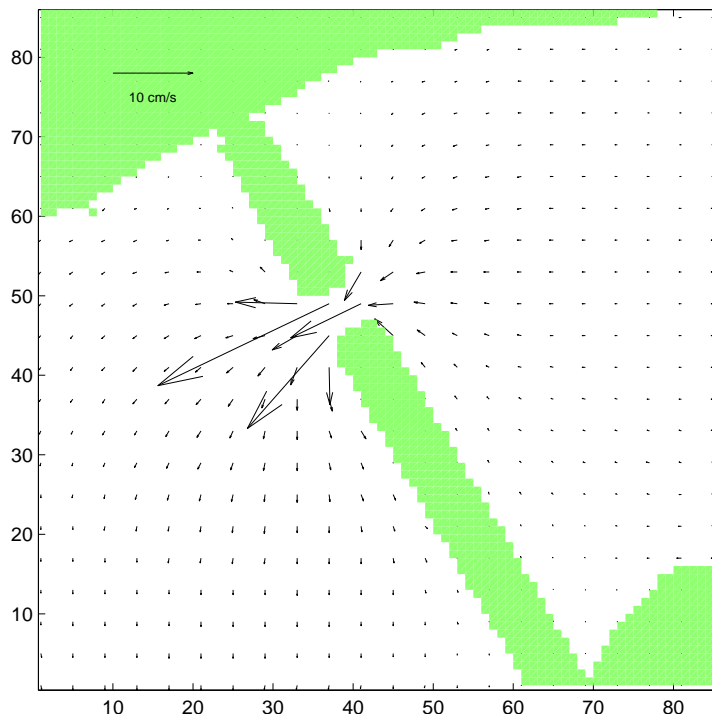
Figur 6: Simulert inngående tidevannsstrøm utenfor Røyerneset (run05). Bunnmatrise med $\Delta x = \Delta y = 10\text{ m}$ gitteropløsning som er enhetene på aksene.



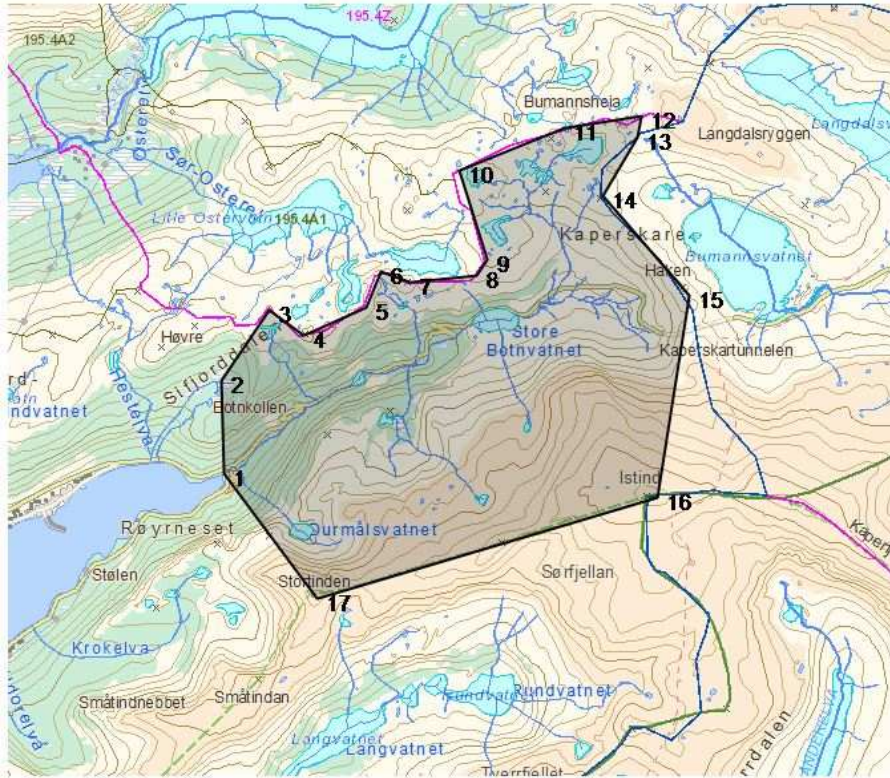
Figur 7: Simulert utgående tidevannsstrøm utenfor Røyerneset slik forholdene er i dag (run05). Bunnmatrise med gitteropløsning $\Delta x = \Delta y = 10\text{ m}$ som er enhetene på aksene.



Figur 8: Simulert inngående tidevannsstrøm gjennom bruåpningen Veg 4000 (run01). Bunnmatrise med gitteropløsning $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ m}$ som er enhetene på aksene.



Figur 9: Simulert utgående tidevannsstrøm i bruåpningen Veg 4000 (run01). Bunnmatrise med $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ m}$ gitteropløsning som er enhetene på aksene.



Figur 10: Nedbørsfelt for Botneelva

7. Dannelse av stagnert bunnvann.

Det er vel kjent at stagnert anoksisk bunnvann kan dannes i relativt dype fjorder og poller med trange og grunne innløp. Forholdene i Hopavågen ved Agdenes i Sør-Trøndelag har blitt grundig studert fordi NTNU i Trondheim har en biologisk stasjon der (van Marion 1996). Vågen har et flateareal på $A = 3,7 \cdot 10^5 \text{ m}^2$ og tverrsnittsarealet av innløpet, $S = 18 \text{ m}^2$, er svært lite i forhold. Vågen er ca. 30 m på det dypeste, mens terskeldypet i innløpet er bare ca. 1 m ved lavvann. På større dyp enn 10-15 m er det stagnert anoksisk bunnvann som bare episodisk får tilførsel av frisk vann fra fjorden utenfor. Liknende forhold finner en i Rossfjordvatn i Malangen (Magnusson 1985) og i Borgepollene på Vestvågøy i Lofoten (Gjevik 2009). Felles for alle disse stedene er at terskeldypet i innløpet er svært lite i forhold til dypet i vågen eller pollen innenfor.

Bruåpningene i fyllingene (fig. 3-4) planlegges med et terskeldyp på ca. 8-10 m. For Veg 4000 - 6000 er det et basseng med dyp på ca. 36 m innenfor fyllingene. Bassenget innenfor Veg 2000 er grunnere. I dag er det en naturlig terskel på ca. 15 m dyp ca. 100 m vest for bruåpningen i Veg 4000.

Hvorvidt det vil dannes stagnert bunnvann i bassengene innenfor Veg 4000 - 6000 er vanskelig å avgjøre fordi det mangler data om tetthetssjiktningen i fjorden og hvordan den blir etter at fyllingene er bygd. Sammenliknet med f. eks. Hopavågen og de andre vann og poller som er nevnt innledningsvis tyder det på at terskeldypet i de planlagte bruåpningene er tilstrekkelig stort og at det ikke vil dannes stagnert anoksisk bunnvann.

Avgjørende her er om turbulensen i strålen (jet) av innkommende tidevannet gjennom bruåpningene er sterk nok til å blande opp vannet. Bruåpningen i Veg 4000 (fig. 5) er gunstig plassert slik at strålen er rettet mot den dype delen av bassenget.

I perioder med stor ferskvannstilførsel, f.eks. ved snøsmelting og flom, vil det kunne føre til en tetthetssjiktning av vannmassene innenfor fyllingene med forholdsvis ferskt vann i overflaten og saltere vann i dypet. Tilsvarende tetthetssjiktning kan etableres av oppvarmingen i sommerhalvåret. Dette kan gjøre det vanskeligere for turbulensen i den innkommende strålen å blande opp vannmasser fra dypet.

8. Episodiske hendelser

I tillegg til tidevannstrømmen som vil gi tilnærmet uforandret strømforhold over forholdsvis lang tid, er det flere prosesser av mer episodisk karakter. Det kan f.eks. være generering av interne bølger ved terskler i fjorden, utskiftning av bunnvann når forholdene ligger til rette for det og strøm satt opp av vind og endringer i lufttrykket. Hver av disse prosessene kan noen ganger føre til kortvarig og relativ sterk strøm av skiftende retning.

Landtopografien rundt Sifjordbotn, med relativt høye fjell, tilsier at vind henholdsvis fra vestlig eller østlig retning vil gi et vedvarende vinddrag på vannmassene i fjordens lengderetning. Med vind fra vest kan en forvente at overflatevannet i fjorden vil strømme innover med eventuelt en kompensierende utstrømning i dypet. Tilsvarende vil en vedvarende vind fra øst sette opp en utstrømning av overflatevannet med en kompensierende innstrømning i dypet. Styrken av slike vindrevet strømmer er vanskelig å anslå, men vil over tid neppe overskygge virkningen av tidevannsstrømmen. Varigheten av slike strømmer vil også være knyttet til styrken og varigheten av vinddraget på havoverflaten.

9. Is i fjorden

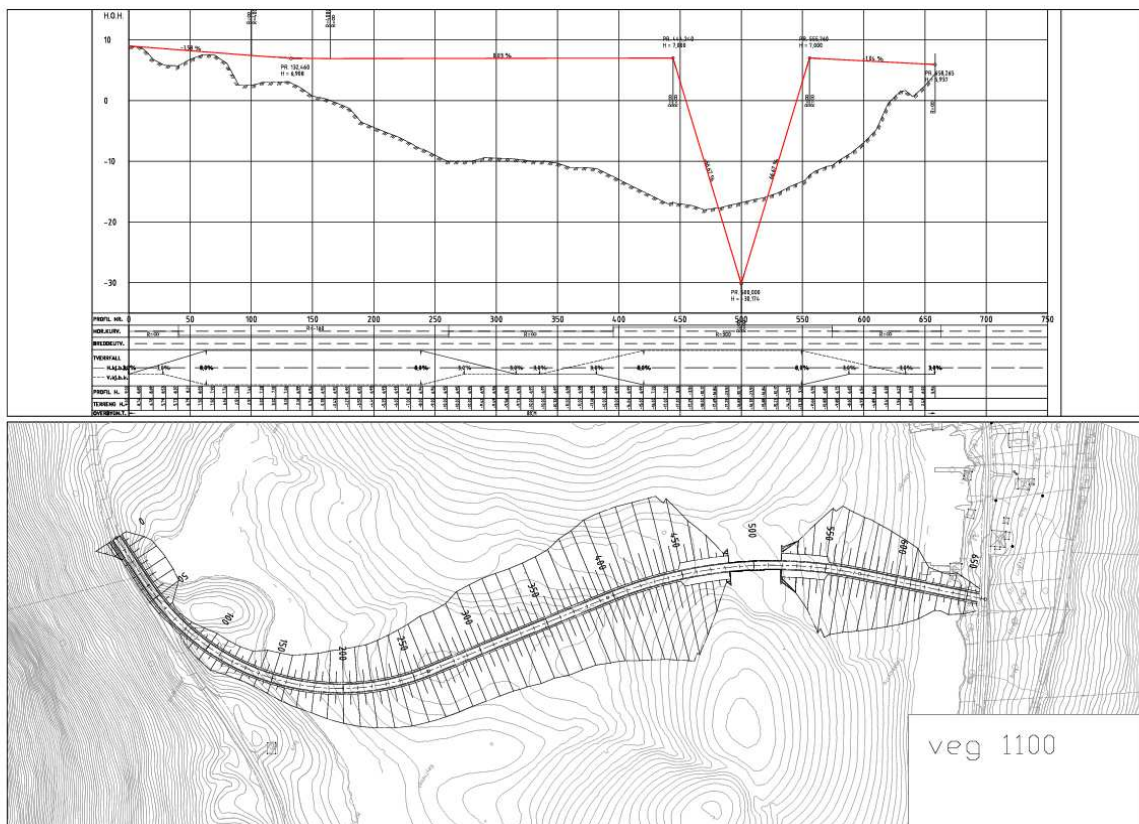
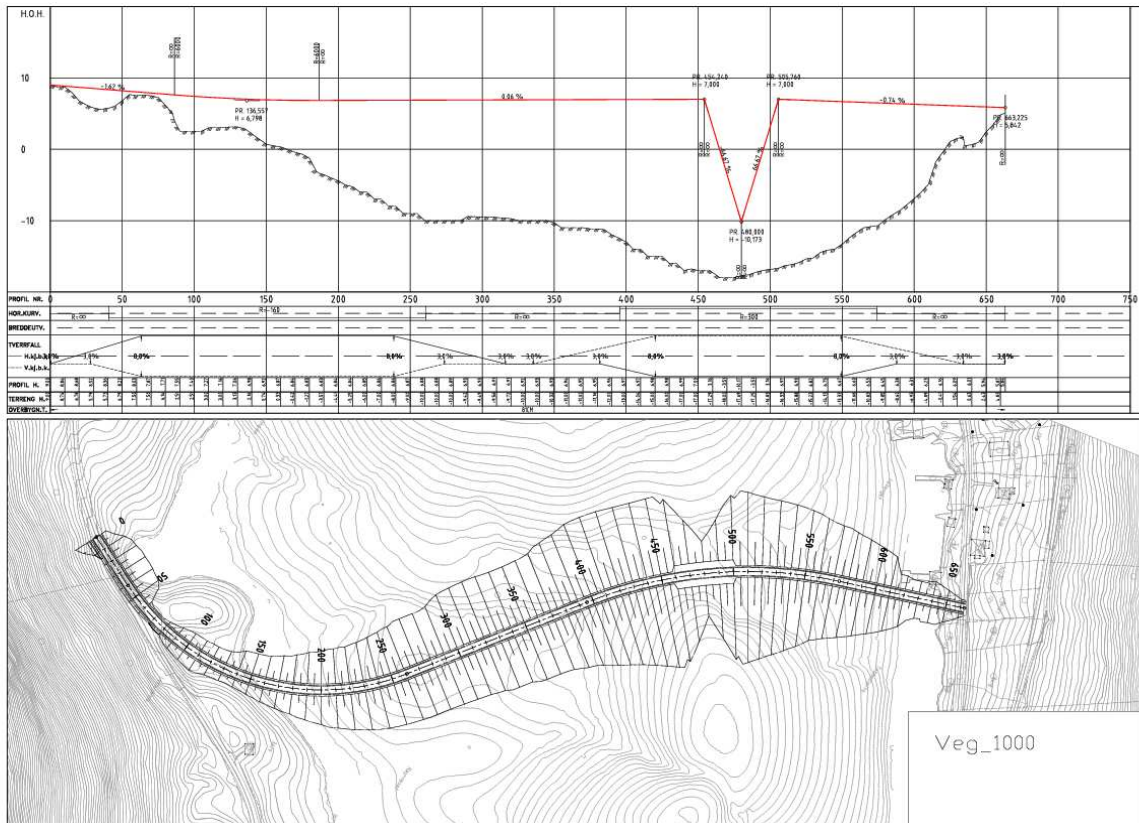
Folk i Statens vegvesen som kjenner de lokale forholdene i Sifjorden opplyser at det ikke legger seg is i Sifjordboten slik forholdene er i dag. Dette kan endre seg ved utfyllinger med de relative små bruåpningene som er planlagt. Spesielt utsatt vil alternativet Veg 2000 være, hvor basseng innenfor fyllingen blir relativt lite. Her kan det være fare for isdannelse i sterk kulde etter perioder med stor ferskvannstilførsel.

10. Nye alternativ: Veg 1000, 1100, 6000b og 6100

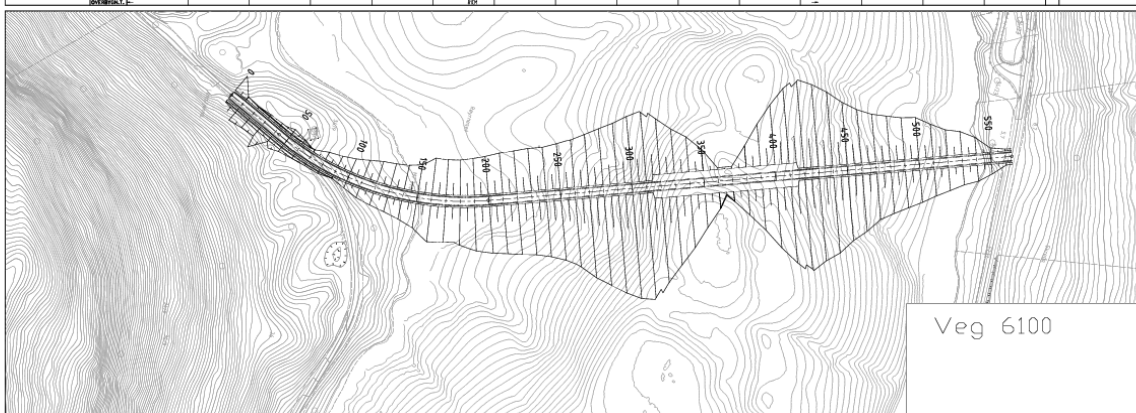
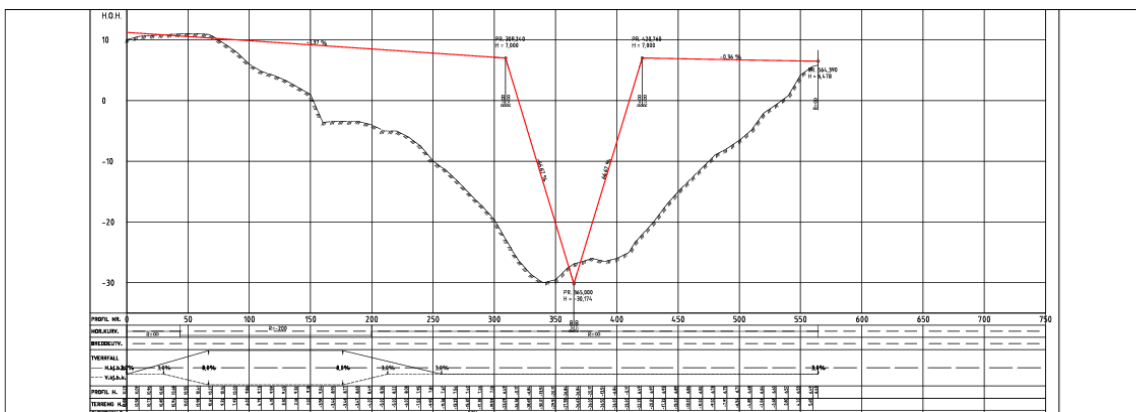
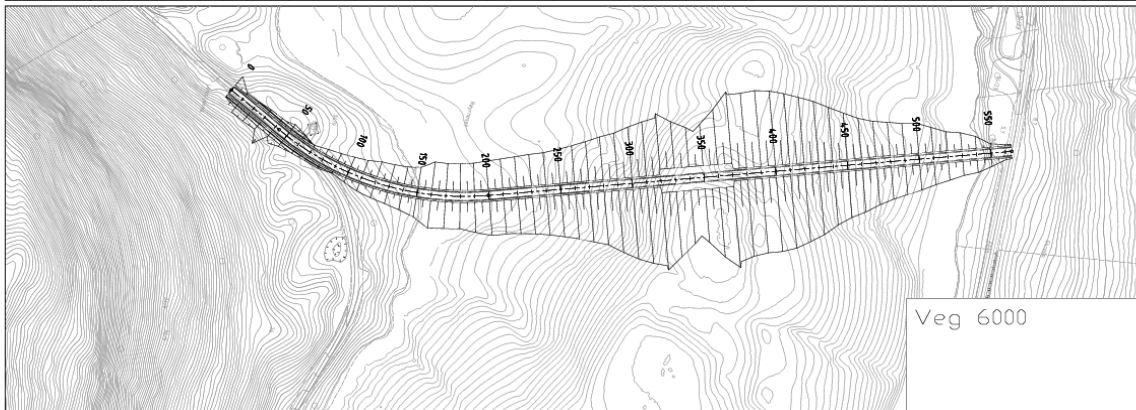
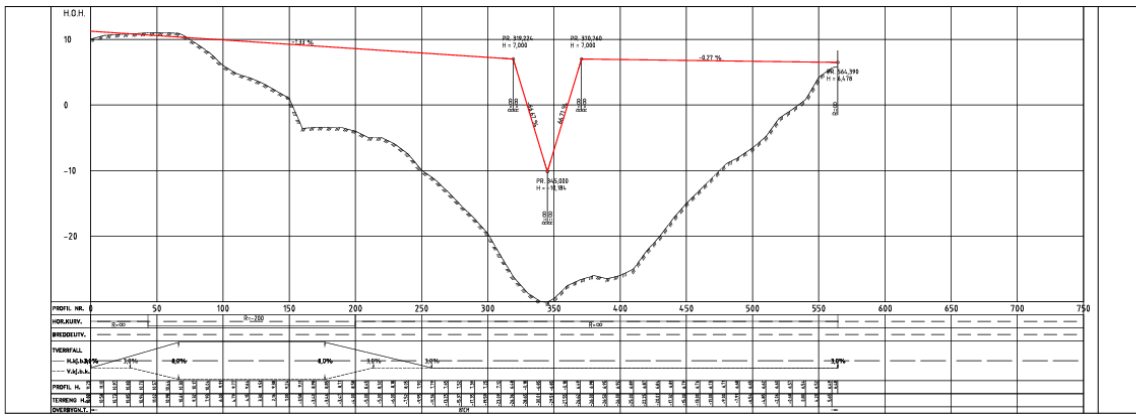
Etter at vurderingene av de opprinnelige forslagene Veg 2000 og 4000-6000 på det nærmeste var ferdige fikk vi Veg 1000, 1100, 6000b og 6100 til vurdering (fig. 11 - 12).

På nordsiden av fjorden følger Veg 1000 og Veg 1100 en ny trasé på ryggen ca. 100 m vest for Veg 4000, men begge kommer innpå traséen for Veg 4000 på sørsiden av fjorden. Bruåpningen tenkes lagt ved den naturlige terskelen i ryggen hvor dypet er ca. 16 m. Veg 1000 og 1100 er planlagt med bruer med lengder på henholdsvis 40 og 100 m. Veg 1100 skiller seg fra Veg 1000 bare ved en lengere bruåpning.

Veg 6000b og 6100 følger samme trasé som Veg 6000, men høyden av fyllingene er endret noe. Det fører til at bruåpningen for Veg 6000b er noe endret i forhold til Veg 6000. Veg 6100 skiller seg fra Veg 6000b ved en lengere bruåpning.



Figur 11: Vegtraséer med foreslåtte fyllinger og bruåpninger for Veg 1000 og Veg 1100.



Figur 12: Vegtraséer med foreslåtte fyllinger og bruåpninger for Veg 6000b og Veg 6100.

Tabell 4: Tversnittsarealer for bruåpningene (under middelvann/NN54) og flateareal av fjorden innenfor Veg 1000-1100 og Veg 6000b-6100 (fig. 11-12). Den topografiske tidevannsfaktoren q_c etter McClimans (1978) er også beregnet. En vannstandsamplitude $h_0 = 1,25$ m tilsvarende $(HAT - LAT)/2$ og periode $T = 12,4$ timer er lagt til grunn ved beregningene.

Tversnitt	Snittsareal S (m^2)	Flateareal A (m^2)	Forhold A/S	Faktor q_c	Middelstrøm U_m (cm/s)	Volumstrøm Q_m (m^3/s)
Veg 1000	$1,67 \cdot 10^2$	$2,93 \cdot 10^5$	$1,75 \cdot 10^3$	$0,99 \cdot 10^{-2}$	30,8	51,5
Veg 1100	$1,10 \cdot 10^3$	$2,93 \cdot 10^5$	$2,67 \cdot 10^2$	$1,51 \cdot 10^{-3}$	4,7	51,5
Veg 6000b	$1,55 \cdot 10^2$	$2,10 \cdot 10^5$	$1,36 \cdot 10^3$	$0,77 \cdot 10^{-2}$	23,9	37,0
Veg 6100	$1,31 \cdot 10^3$	$2,10 \cdot 10^5$	$1,60 \cdot 10^2$	$0,91 \cdot 10^{-3}$	2,8	37,0

Tabell 4 viser tversnittsarealer for de planlagte bruåpningene og flatearealer for fjorden innenfor fyllingene for vegtraséene Veg 1000, 1100, 6000b og 6100. For de minste bruåpningene (Veg 1000 og Veg 6000b) kan tidevannsstrømmen henholdsvis komme opp mot 31 og 24 cm/s . Den topografiske tidevannsfaktoren q_c (lik. 7) er under grensen der en kan forvente struping av tidevannet.

Hvordan friksjonen innvirker kan anslås slik som beskrevet i avsnitt 4-2 (lik. 9). Den hydrauliske radius for bruåpningen på Veg 1000 er $R = 4,2$ m. Settes lengden $L = 60$ m og motstandstallet $\kappa = 0,01$, tilsvarende Mannings tall $n = 0,041$, gir det $q_s = 0,011$ som viser at struping ikke vil oppstå selv med forholdsvis stor friksjonen.

For de største bruåpningene, Veg 1100 og 6100 er som forventet stømhastighetene vesentlig mindre og den topografiske tidevannsfaktoren q_c er langt under grensen der en kan forvente struping av tidevannet.

11. Vurderinger

Mangelen på strømmålinger i Sifjorden gjør at vi må basere konklusjonen på anslag og modellsimuleringer av strømforholdene. Det hadde selvsagt vært best om måledata hadde vært tilgjengelig for å validere modellsimuleringene, men i den foreliggende situasjonen kan allikevel en del nyttig informasjon trekkes ut fra analytiske formler og modelldata. Vurderingene baserer seg på antagelsen om at tidevannsstrømmen, selv om den er svak, er den dominerende vedvarende strømkomponenten i fjorden.

De planlagte bruåpningene i Veg 2000 og Veg 4000-6000 i det opprinnelige forslaget, ser ut til å være store nok til at det ikke inntreffer kraftig struping med redusert tidevannsutslag i bassenget innenfor fyllingene. Men størrelsene av åpningene ligger i et område hvor relativ små endringer både i åpningenes størrelse og bunnfriksjon (som avhenger av ruheten av fyllmassene) kan føre til struping. Det er derfor viktig at åpningene ikke innsnevres i forhold til planene f. eks. ved uheldig plassering av fyllmasse under byggingen.

Sammenliknet med fjorder og våger hvor det er stagnant anoksisk bunnvann (se avsnitt 7) ser terskeldypet i de planlagte bruåpningene til å være tilstrekkelig stort nok og at det ikke vil dannes stagnant bunnvann i bassenget innenfor fyllingene. Men det må understrekes at det er vanskelig å avgjøre dette fra det datagrunnlaget en har for Sifjorden. Er en uheldig under byggingen slik at dypet og størrelsen av bruåpningene blir vesentlig mindre enn planlagt kan en komme inn i et strømningsregime hvor bunnvannsdannelse er

mulig. Det kan føre til at faunaen i bunnvannet endres over tid og blir mer lik faunaen i stillestående vann.

Det er også en viss fare for at bassenget over tid vil bli utsatt for sedimentering av løsmasser som vaskes ut og føres med elvevannet. På innsiden av fyllingene inn mot land kan det oppstå svakt sirkulerende virvler i overflaten med mer eller mindre stagnante vannmasser.

Dersom større bruåpninger i Veg 2000-6000 krever at det må fylles opp rundt pelegruppen er det tvilsomt om en vinner mye med hensyn til bedre gjennomstrømning.

Hvis man velger å bygge Veg 2000-6000 med den planlagte størrelsen på bruåpningene vil antagelig Veg 2000 være den av de fire opprinnelige alternative som vil gi minst endringer av forholdene i fjorden. Dette fordi bassenget innenfor fyllingen er relativt lite og grunt i forhold til terskeldypet i bruåpningen.

De alternative traséene Veg 1000, 1100, 6000b og 6100 (fig. 11 - 12) som kom til senere i prosessen er diskutert i avsnitt 10. Det er som forventet ikke fare for struping av tidevannet for noen av disse traséene. For Veg 1000 og 1100 hvor bruåpningen spenner over den naturlige terskelen på ca. 16 m vil faren for bunnvannsdannelse i det dype bassenget innenfor med dyp ca. 36 m ikke bli vesentlig endret i forhold til slik situasjonen er i dag. Faktisk vil en med den minste bruåpningen (Veg 1100) få en forholdsvis kraftig jet (stråle) av innstrømmende tidevann, noe som vil bidra til å øke turbulensnivå i overflatelaget over det dype bassenget. Dette kan forventes å ha en gunstig innvirkning på blanding og utveksling av vannmassene.

12. Konklusjon og anbefalinger

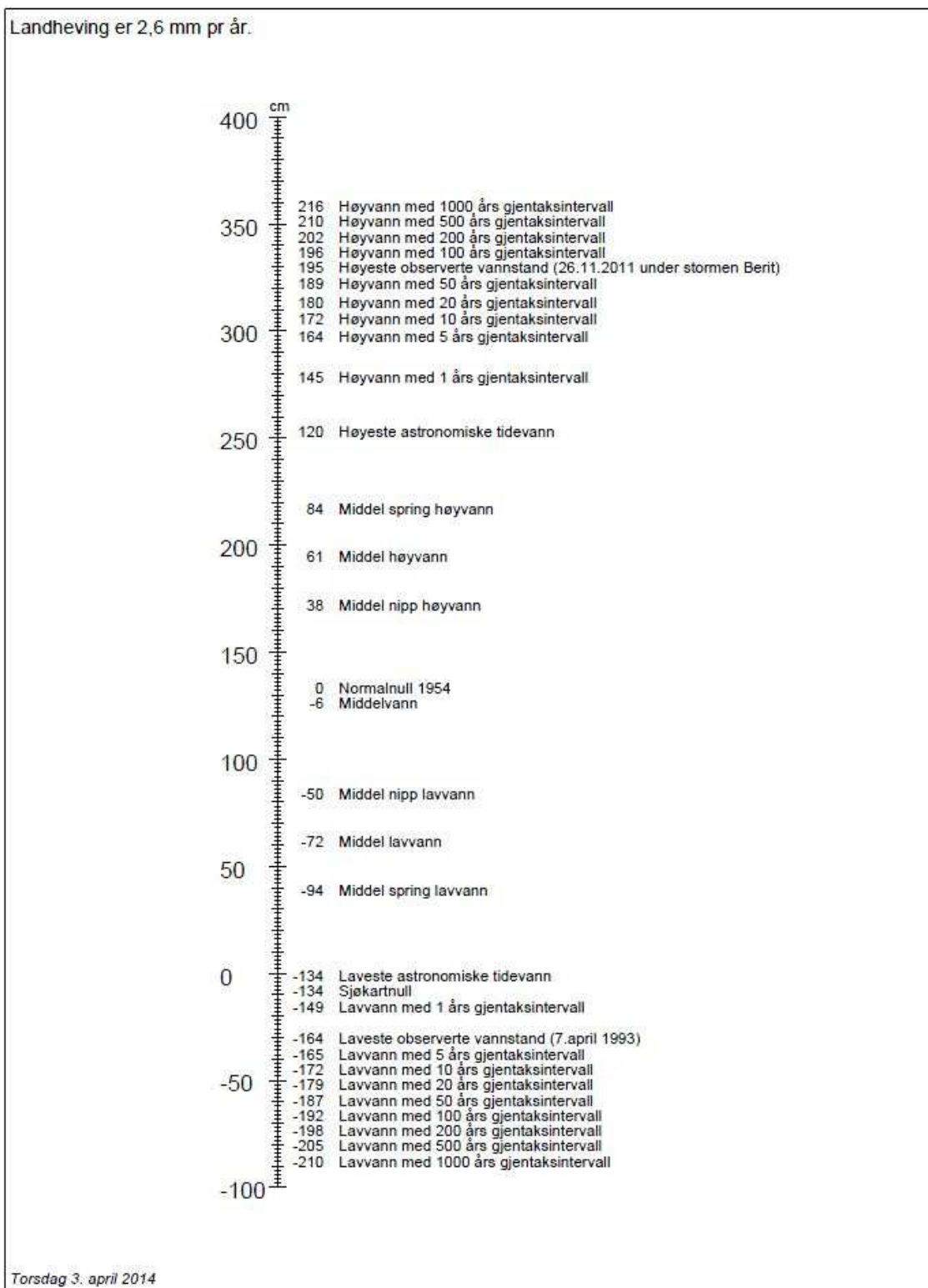
På grunnlag av diskusjonen ovenfor kan følgende konklusjoner trekkes med hensyn til valg av vegtraséer og størrelsen på bruåpninger:

1. Selv for alternativene med de minste bruåpningene ser det ut til at disse er store nok til at det ikke vil oppstå struping av tidevannet med redusert tidevannshøyde og forsinket tidspunkt for flo og fjære i bassenget innenfor fyllingene.
2. Det er en viss fare for at det periodevis kan dannes stagnant bunnvann i det dype bassenget innenfor fyllingene for noen av alternativene. Spesielt gjelder det de opprinnelige forslagene: Veg 4000, 5000 og 6000 hvor terskeldypet i fyllingen er forholdsvis liten sammenliknet med dypet i bassenget.
3. For de nye alternative forslagene, spesielt Veg 1100, Veg 6100, er terskeldypet i bruåpningen så stort at faren for dannelse av stagnant bunnvann er liten.
4. Veg 1000 har noe mindre terskeldyp enn Veg 1100, men med den forholdsvis sterke strøm gjennom bruåpningen vil faren for stagnant bunnvann være liten også for dette alternativet.
5. En må forvente at det langs land særlig på innsiden av fyllingene kan oppstå bakevjer hvor det kan bli mindre utveksling av vannmassene.
6. Dersom tvernsnittsarealet og terskeldypet av bruåpningene blir redusert vesentlig i forhold til planene, f. eks. ved støtter for pelerekker eller uheldig plassering av fyllmasse, kan det påvirke strømforholdene i ugunstig retning.

Anbefalingene er gjort på bakgrunn av forventet endringer av strømforholdene i fjorden. Stabiliteten av fyllingene eller av grunden under fyllingene er ikke vurdert i denne rapporten.

Litteratur

- 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.
- Fergus, Tharan, Knut Aune Hoseth og Einar Sæter (2010) Vassdragshåndboka. Håndbok i vassdragsteknikk. Tapir akademisk forlag, Trondheim.
- Gade, H., G. (1986) Features of fjord and ocean interaction. *Nordic Seas*, Editor Burton G. Hurdle. Springer New York. p. 183-189.
- Gjevik, B. (2009) Flo og fjære langs kysten av Norge og Svalbard. Farleia Forlag. ISBN 978-82-9980331-0-6, 351 sider.
- Holtan, Hans og Jan Magnusson (1985) Vurderinger av Finnfjordvatn, Rossfjordvatn og Rossfjordstraumen som resipient. NIVA-rapport nr. 1781, ISBN 82-577-0978-6.
- Jacobsen, Per (1983) Physical Oceanography of the Trondheimsfjord. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, Vol. 26, pp. 3-26.
- 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.
- Sigebbrandt, Anders (1980) Some aspects of tidal interaction with fjord constrictions. *Estuarine and Coastal Marine Science*, Vol. 11, pp. 151-166.
- Sigebbrandt, 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.
- Tverberg, V., B. Cushman-Roisin and H. Svendsen (1991) Modeling of internal tides in fjords. *J. Marine Res.*, 49, 635-658.
- van Marion, Peter (1996) Ecological studies in Hopavågen, a landlocked bay At Agdenes, Sør-Trøndelag, Norway. *Gunneria* No 71, Trondheim.



Figur 13: Vannstandsdata for Sifjordbotn fra Statens kartverk. Nullnivået i denne tabellen (til høyre) er Norsk normalnull (NN54) som ligger 6 cm over middelvannstand (MV).



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

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen