



Statens vegvesen

Vurdering av potensialet for kraftproduksjon i forbindelse med bruer langs ferjefri E39

Statens vegvesens rapporter

Nr. 105



Vegdirektoratet
Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen
Geoteknikk og skred
Mars-2012

Tittel

Vurdering av kraftproduksjon fra strømn-
ing langs ferjefri E39

Undertittel**Title****Subtitle****Forfatter**

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

Author**Avdeling**

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavde-
lingen

Department

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavde-
lingen

Seksjon

Geoteknikk og skred

Section

Geoteknikk og skred

Prosjektnummer

603251

Project number

603251

Rapportnummer

Nr. 105

Report number

No. 105

Prosjektleder

Olav Ellevset

Project manager**Godkjent av**

Olav Ellevset

Approved by**Emneord**

Strømforhold, tidevannstrøm, energitet-
thetm energifluks, strømhastighet, turbin-
er, ferjefri E39, fjorder, bølger

Key words**Sammendrag**

Rapporten ser på potensialet for kraft-
produksjon i forbindelse med mulige
brukryssinger langs en fergefri E39. Da
tidevannsstrømmen er den mest sta-
bile strømmen har vi konsentrert oss om
denne. Energien i strømmen er anslått på
grunnlag av etablerte formler for energi-
tetthet og energifluks. Andre former for
energiuttak er også kort omtalt. Både strø-
mobservasjoner og estimater av strøms-
styrke basert på tidevannsforskjeller og fjord-
arealer er brukt i estimatene. Generelt viser
våre beregninger at potensialet for ener-
giuttak fra tidevannsstrøm er begrenset.
Dette skyldes at de planlagte bruene vil
gå over relativt breie og dype fjorder hvor
en må regne med små strømhastigheter.
Det finnes flere kjente sterke tidevanns-
strømmer nær den aktuelle veitraseen der
det bør være mulig å produsere energi fra
tidevannsstrøm ved hjelp av turbiner. Noen
av disse er omtalt.

Summary

Antall sider 21

Dato Mars-2012

Pages

Date

Vurderinger av potensialet for kraftproduksjon i forbindelse med bruer langs ferjefri E39

av

Bjørn Gjevik¹, Elisabeth Gundersen², Hilde C. Sandbo³

Dato 29. mars 2012

1. Innledning

Denne rapporten er utarbeidet på oppdrag for Statens vegvesen. Oppgaven er å vurdere hvordan bruer og tekniske anlegg ved planlagte fjordkryssinger langs ferjefri E39 mellom Kristiansand-Trondheim kan utnyttes til produksjon av elektrisk kraft. De mest aktuelle potensielle energikildene er bølger, tidevann/strøm og vind. Fjordkryssingene er i rekkefølge fra sør til nord: Boknafjorden, Bjørnafjorden, Sognefjorden, Nordfjord, Voldafjorden, Storfjorden, Romsdalsfjorden, Moldefjorden og Halsafjorden.

De fysiske tilstanden i mange norske fjorder har blitt undersøkt i forbindelse med kraftverksutbygging. Fokus har vært på hvordan endringer i ferskvannstilførselen påvirker strøm- og temperaturforholdene, blanding av vannmasser, vannkvaliteten og utvekslinger med havet utenfor. Resultatet av disse undersøkelsene finnes for det meste i oppdragsrapporter som er vanskelig tilgjengelige, men noe er publisert i åpen vitenskapelige tidsskrifter.

I det siste har det også blitt gjennomført flere undersøkelser for oppdrettsnæringen (fisk, skjell) hvor fokus har vært på vannkvalitet, blandingsmekanismer og spredning av parasitter og sykdomer.

Fra rapporter som er utarbeidet i forbindelse med de nevnte undersøkelsene kan en finne endel informasjon om strøm-, temperatur- og sjiktningsforholdene som kan være nyttige for arbeidet med å kartlegge potensialet for kraftproduksjon ved brukryssinger av fjorder.

Sjøkartverket, Stavanger (Statens kartverk) har over en årrekke utført strømmålinger i seilingsleia langs norskekysten. Disse målingene finnes i Sjøkartverkets arkiv. Målinger fra Julsundet og Romsdalsfjorden er omtalt i avsnitt 8-5.

I denne rapporten er hovedvekten lagt på muligheten for energifangst fra tidevannsstrømmen fordi den er mest stabil for utnyttelse. Andre strømsystemer som vinddrevet strøm, ferskvannstilførsel og estuarin sirkulasjon etc. er mer episodisk og ikke regelmessig tilgjengelig for utnyttelse.

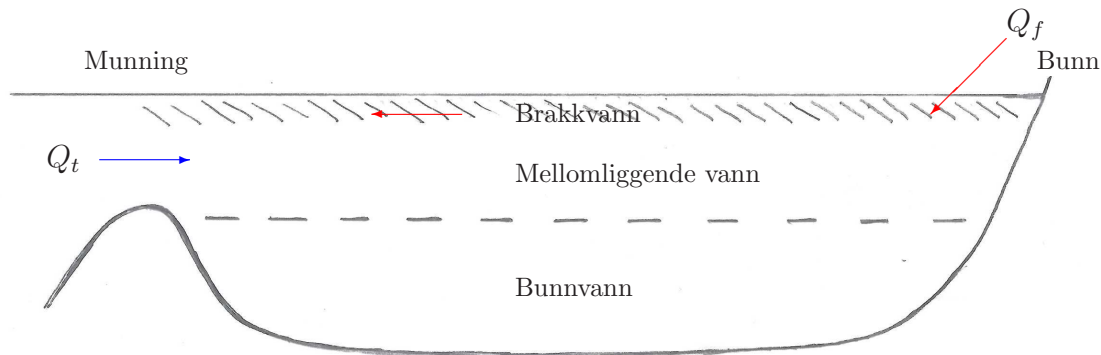
2. Kort oversikt over fysiske prosesser i fjorder

Strømforholdene i fjorder er i hovedsak bestemt av følgende faktorer: Ferskvannstilførselen fra større elver og ved direkte avrenning fra landskapet rundt fjorden (Q_f), inn- og utstrømning av vann

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

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

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



Figur 1: Skisse av vannmasser og sirkulasjon i en dyp fjord. Etter Gade 1986.

med tidevannet (Q_t), vinddrevet strøm på grunn av vinddraget på havoverflaten og episodisk utveksling av vannmassene i fjorden. De episodiske utvekslingene er drevet av forskjeller i tetthetsjiktningen utenfor og innenfor innløpet av fjorden og de atmosfæriske forhold (lufttrykk og vind).

2-1 Tetthetssjiktningen i norske fjorder

Tetthetssjiktningen på grunn av saltholdighet og temperaturforholdene har stor innvirkning på hvordan strømmen fordeler seg nedover i dypet. Horisontale forskjeller i tetthetssjiktningen kan også påvirke strømforholdene horisontal retning, både på tvers av fjorden og i fjordens lengderetning. I dype fjorder vil en som regel både om sommeren og vinteren finne et markert sprangsjikt med lettere vann i overflaten og tyngere vann nedover i dypet. Sprangsjiktet ligger på 10-100 m, dypest om vinteren grunnere om sommeren. Det lette vannet over sprangsjiktet har mindre saltholdighet på grunn av ferskvannstilførselen enn vannmassene i dypet. Om sommeren blir overflatevannet varmet opp, mens vannmassene i dypet har en temperatur på 7-8 °C hele året. På grunn av sesongmessige variasjoner i lufttemperatur og ferskvannstilførsel kan det bli betydelige årstidsvariasjoner i tetthetssjiktningen.

2-2. Sirkulasjon pga. ferskvannstilførselen

Tilførselen av ferskvann fører til at saltholdigheten og derved tettheten av overflatevannet i fjorder blir vesentlig lavere enn i havet utenfor fjordmunningen. Dette fører til en horisontal trykkgradient i fjordens lengderetning som driver en utgående strøm av brakkvann og en kompensierende innstrømning av saltare vann i de mellomliggende vannlag dypere ned. Denne sirkulasjonen er kjent ved den internasjonale betegnelsen *estuarine circulation* og den spiller en viktig rolle også i norske fjorder (Gade 1986, Buitenhuis 2003).

Strømhastigheten i overflatelaget er typisk av størrelsesorden 20 cm/s. Kompensasjonsstrømmen i dypet er vanligvis svakere, men tetthetssjiktningen kan bevirke at strømmen blir konsentrert i et tynnere lag enn vanlig og derved oppnå større hastighet.

Jordrotasjonen vil ha innflydelse på den estuarine sirkulasjonen slik at utstrømningen av brakk-

vann har en tendens til å følge kysten med land til høyre for strømretningen. Det betyr at i en fjord som er orientert i øst-vest retning vil utstrømningen være sterkere på nordsiden enn på sørsiden av fjorden.

2-3. Tidevannet

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 innefor snittflaten. Den tidsderiverte

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

er endringen i vannstand per tidsenhet. Vi har sett bort fra små variasjoner i vannstanden h som skyldes bunntopografi og forsinkelser som skyldes tidevannsbølgens forplantning i fjorden. Dette er en god tilnærming dersom fjorden er mye kortere enn bølgelengden for tidevannsbølgen. Dette er tilfelle for de fleste norske fjorder.

I første omgang skal vi bare se på den dominerende M_2 -komponenten av tidevannet og skriver

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

hvor h_0 er amplituden av vannstandsvariasjonen i den indre delen av fjorden og $T = 12,4$ timer er perioden. Innsatt i formel (1) finner vi

$$\bar{u}_t = 2\pi \frac{A h_0}{S T} \cos(2\pi \frac{t}{T}) \quad (3)$$

Den største middelstrøm i tversnittet

$$U_m = 2\pi \frac{A h_0}{S T} \quad (4)$$

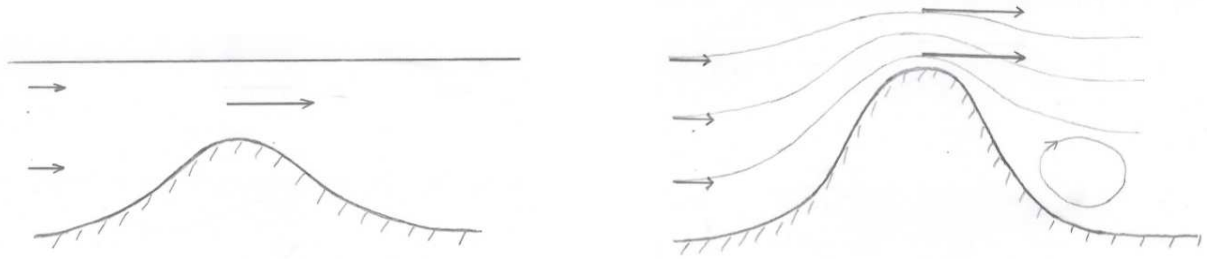
opptrer ved halvflødd og halvfalt sjø, i.e. for $t = 0, \frac{T}{2}$.

For at det skal bli sterk middelstrøm må tversnittsarealet være lite i forhold til flatearealet i fjorden innenfor. De fleste sterke tidevannstrømmer 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).

Dersom innløpet til fjorden er svært trangt slik at tversnittsarealet 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. I Saltstraumen 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.

For fjordkryssingene som er aktuelle i denne undersøkelsen spiller struping liten rolle.

2-4. Topografiens innvirkning på strømforholdene



Figur 2: Forsterkning av strømmen over fjordterskel (venstre) og utenfor odde (høyre).

Det er ofte grunne terskler både ved innløpet og lengere innover i fjorden. Tersklene er formet av forskjellige geologiske prosesser f.eks. lagt opp av morenemasser under istider som kan ha delt fjorden inn i flere dypere bassenger. Over ter skelen forsterkes den inn- og utgående strømmen betydelig. Nedstrøms for terskelene oppstår det ofte en sone med sterk turbulens og blanding av vannmassene på grunn av brytende indre bølger og hydrauliske vannstandssprang (Farmer and Smith 1980, Berntsen et al. 2008).

Innsnevring i fjordens bredde f. eks. ved utstikkende nes eller odder vil også føre til en forsterkning av strømmen med sterkest strøm rett utenfor neset eller odden og ofte med bakevjer på lesiden (fig. 2).

Dersom det på samme sted som innsnevringen også er en terskel vil det føre til en ytterligere forsterkning av strømhastigheten.

Over grunne fjordterskler kan strømhastigheten i noen spesielle tilfeller komme opp i 5-10 m/s, men vanligvis er det snakk om lavere strømhastighet.

2-5. Episodiske hendelser

I tillegg til prosessene nevnt i avsnitt (2-1) - (2-4), som gir 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 skiftende vindforhold. Hver av disse prosessene kan noen ganger føre til kortvarig sterk strøm av skiftende retning. Dette gjør det teknisk vanskelig og neppe økonomisk lønnsomt å utnytte energien i strømmen til f. eks. å drive turbiner som produserer elektrisk kraft. Vi skal derfor ikke gå nærmere inn på dette her.

3. Energifluksen i strømmen

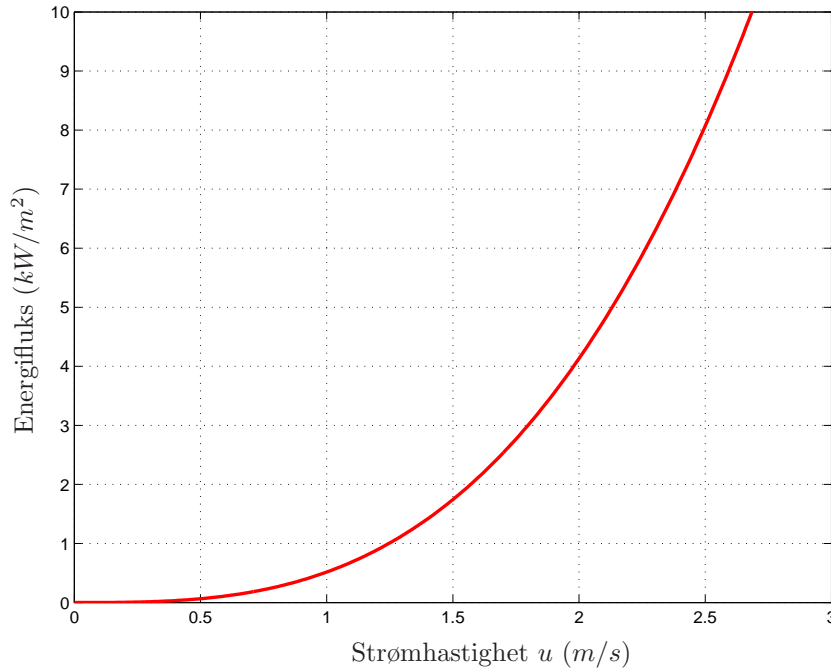
Energifluksen, per flateenhet normalt strømretningen, er gitt ved

$$E_k = \frac{1}{2} \rho u^3 \quad (5)$$

hvor ρ er tetthet av sjøvann og u er strømhastigheten gjennom flaten. For små strømhastigheter, $u \leq 1$ m/s, er energifluksen liten. En må opp i strømhastigheter $u \geq 1,2$ m/s før energifluksen E_k overskrider 1 kW/m² (fig. 3).

Dersom en periodisk tidevannsstrøm \bar{u}_t er pålagt en stasjonær bakgrunnsstrøm, \bar{U} , kan strømhastigheten skrives

$$u = \bar{U} + \bar{u}_t = \bar{U} + U_m \cos(2\pi \frac{t}{T}) \quad (6)$$



Figur 3: Energifluksen per flateenhet normalt strømretningen (E_k) som funksjon av strømhastigheten u , heltrukket rød kurve.

Uten bakgrunnsstrøm, $\bar{U} = 0$ vil energifluksen variere mellom 0 og maksimalverdien

$$E_m = \frac{1}{2} \rho U_m^3$$

Retningen av energifluksen skifter to ganger i løpet av tidevannsperioden T . Middelerdien av fluksen i den halve perioden da strømmen går i samme retning er

$$\bar{E}_k = \frac{4}{3\pi} E_m \approx 0,42 E_m$$

Med bakgrunnsstrøm vil energifluksen bli redusert i den delen av tidevannssyklusen når tidevannsstrømmen går mot bakgrunnsstrømmen, se fig. 4.

Den totale energifluksen E_k^{tot} per tidsenhet gjennom et tvernsnittsareal S av fjorden finnes ved å integrere uttrykket (5) over tvernsnittet.

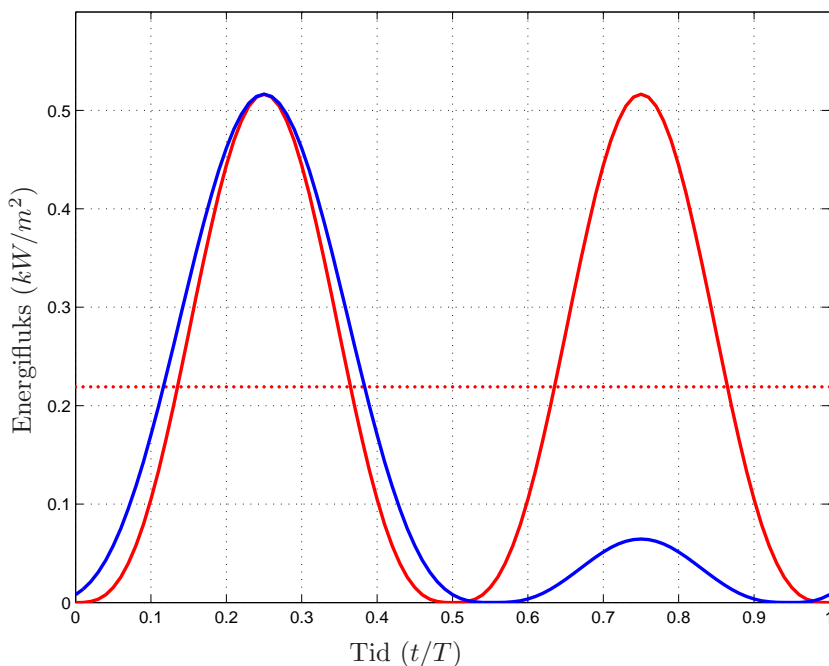
$$E_k^{tot} = \int_S E_k dS = \int_S \frac{1}{2} \rho u^3 dS$$

Dersom strømhastighet u approksimeres med middelerdien for tidevannsstrømmen i tvernsnittet \bar{u}_t blir

$$E_k^{tot} \approx \frac{1}{2} \rho \bar{u}_t^3 S$$

Denne formelen kan også brukes til å anslå energifluksen gjennom tvernsnittet av en elv. Benyttes uttrykket (1) kan E_k^{tot} omskrives til

$$E_k^{tot} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}_t^2 Q_t = \frac{1}{2} \rho \bar{u}_t^2 A \frac{dh}{dt} \quad (7)$$



Figur 4: Variasjonen av energifluksen, E_k , gjennom en periode (T) av tidevannsstrømmen, heltrukket rød kurve $U_m = 1 \text{ m/s}$, $\bar{U} = 0$. Stiplet rød linje er middelveiden (\bar{E}). Blå heltrukket kurve er energifluksen med både tidevannsstrøm og bakgrunnsstrøm ($U_m = 0.75 \text{ m/s}$, $\bar{U} = 0.25 \text{ m/s}$). På dette plottet er tidsaksen forskjøvet en kvart periode i forhold til i likning (6)

hvor Q_t er volumstrømmen gjennom tversnittet, A er flatearealet av fjorden innenfor og $\frac{dh}{dt}$ er endringen i vannstand per tidsenhet.

4. Kraftproduksjon med turbiner i strømmen

I løpet av de siste 5-10 årene har det blitt utviklet effektive turbiner for å høste energien i havstrømmer. Flere konsepter med såkalte vannmøller, utformet på liknende måte som moderne vindmøller, er under utprøving i flere land, bl.a. i Skottland og Norge. Det er stor aktivitet og en rask utvikling mot mer effektive turbiner på dette området (se nettsideref. W1 og W2). To norske firma, Hammerfest Strøm (nettsideref. W3) og Hydra Tidal, Harstad (nettsideref. W4) prøver nå ut sine nyeste turbiner henholdsvis i Skottland og i Gimsøystrømmen i Lofoten. Om noen av de nye turbintypene kan tilpasses for montering i tilknytning til brukonstruksjoner er et uavklart spørsmål.

I alle de nevnte konseptene kan bare en viss del av bevegelsesenergien i strømmen som kommer inn mot turbinen utnyttes. Den utvindbare elektriske energien (power extracted), E_f , med en turbin som dekker et flateareal A_f kan skrives

$$E_f = c_p E_k A_f \quad (8)$$

hvor E_k er energifluksen i strømmen, definert i avsnitt 3, og c_p er kraftkoeffisienten (power coefficient). Den uttrykker hvor stor del av den innkommende energien som kan omformes til elektrisk energi (Douglas et al. 2011). Koeffisienten c_p avhenger av både av utformingen av rotorblad, operasjonsforholdene og de samlede tap av mekaniske og elektrisk energi i maskineriet, men vi skal ikke gå nærmere inn på dette her. Turbinprodusentene oppgir forskjellige verdier av c_p avhengig av den tekniske utformingen av turbinene. I det grove anslag av potensialet for produksjon av elektrisk kraft med turbiner i strømmen, som vi skal gjøre her, skal vi bruke en konservativt verdi og sette $c_p = 0,4$.

En stor turbin som dekker et flateareal $A_f = 314 \text{ m}^2$, tilsvarende turbinblad med lengde på 10 m , vil med en strømhastighet $u = 1 \text{ m/s}$ produsere $E_f = 65 \text{ kW}$ når kraftkoeffisienten settes til $c_p = 0,4$. Dette er under forutsetning av en stasjonær strøm. I en periodisk tidevannsstrøm, hvor strømmen maksimalt går opp i 1 m/s , vil det i gjennomsnitt kunne produseres bare $0,42 \times 65 \text{ kW} = 27 \text{ kW}$. Dersom turbinen og generatoren for elektrisk strøm er utformet slik at maskineriet har en noe bedre virkningsgrad ($c_p > 0,4$) blir energiproduksjonen noe bedre. En fordobling av strømhastigheten u til 2 m/s vil ha langt større utslag. Det vil øke produksjon med en faktor 2^3 til $27 \text{ kW} \times 8 = 216 \text{ kW}$.

Strømmen vil utgjøre en last (kraft) på turbinen. Et estimat av denne lasten kan gjøres med følgende formel

$$F_l = \frac{3}{4} \rho u^2 A_f$$

i det tilfellet at turbinen kjøres mest effektivt (Douglas et al. 2011).

5. Utnyttelse av tidevannsforskjellen

Det er også en energikilde knyttet til tidevannsforskjellen når vannmassene i fjorden løftes og senkes i fjorden i løpet av tidevannssyklusen. Stillingsenergien i tyngdefeltet (potensielle energi) regnet i forhold til middelvannsnivået kan uttrykkes ved

$$E_p = \frac{1}{2} \rho g h^2 \quad (9)$$

per flateenhet av overflaten i fjorden, hvor h er vannstanden regnet i forhold til middelvann, ρ er tettheten av sjøvann og g er tyngdens akselerasjon. Med $h = h_o = 1 \text{ m}$, $\rho = 1033 \text{ kg/m}^3$ gir dette potensiell energi $E_p = 5,1 \text{ kJ/m}^2$. Ved høyvann og lavvann vil det være strømstille i fjorden og all energi i tidevannsbevegelsen er i form av potensiell energi. Den totale potensielle energi i fjorden er:

$$E_p^{tot} = \frac{1}{2} \rho g h^2 A$$

hvor A er flatearealet av fjorden og det er forutsatt at vannstanden h er tilnærmet den samme i hele fjorden. For en stor fjord som f. eks. Sognefjorden utgjør dette en betydelig energimengde. Med $A = 974 \text{ km}^2$ og $h = 1,05 \text{ m}$ (tabell 1-2) gir dette

$$E_p^{tot} = 5,4 \cdot 10^{12} \text{ J} = 5,4 \text{ TJ}$$

Fordi dette fordeler seg over hele tidevannsperioden blir effekten liten. Ved å derivere likningen (8) med hensyn på tiden t og bruke uttrykket (2) finnes effekten

$$\frac{dE_p}{dt} = \rho g h \frac{dh}{dt} = \pi \rho \frac{g h_o^2}{T} \sin\left(4\pi \frac{t}{T}\right)$$

hvor h_o er amplituden av tidevannsutslaget og T er perioden. Med $T = 12,4 \text{ timer}$ og forøvrig samme parameterverdier som i talleksempel til likning (9) gir dette en effekt på opptil $0,71 \text{ W/m}^2$.

En måte å utnytte denne energien på ville være f. eks. være å bruke tidevannsforskjellen til å drive luftpumper og la luftstrømmen drive turbiner. For å få en produksjon av betydning måtte en høste energien fra et forholdsvis stort flateareal. En brukonstruksjon med bredde 20 m og lengde 3 km ville f. eks. gi en effekt på $42,6 \text{ kW}$.

Så vidt bekjent finnes det ikke tilgjengelig utstyr for å høste tidevannsenergien på større skala på denne måten.

6. Utnyttelse av energien i vindbølger

I lange og forholdsvis smale fjorder med høye fjell på begge sider vil vinden i stor grad kanaliseres i fjordens lengderetning. Det betyr at en stor del av de vindgenererte bølgene vil være i samme retning. Lothe og Brørs (2010) finner at dette er tilfellet f. eks. ved den planlagte brukryssingen i Sognefjorden. Det at den fremherskende bølgeretning er normalt til brua betyr selvfølgelig en ekstra belastning på brukonstruksjonen. Men det ligger også et potensiale for å høste bølgeenergien. Det forutsettes at det utvikles effektive bølgekraftverk som kan operere fra brua, eller i tilknytning til den. Med de data som foreligger i Lothe og Brørs (2010) er det mulig å gjøre forholdsvis pålitelige estimater av hvilke energimengder som er tilgjengelig i vindbølgene.

Energifluksen per lengdeenhet langs bølgekammen i en harmonisk (sinusoidal) overflatebølge er

$$F = \frac{1}{4} \rho g a^2 c$$

hvor ρ er som før tettheten av sjøvann, g er tyngdens akselerasjon, a er amplituden av bølgen og c er fasehastigheten. Vi har her forutsatt at bølgelengden er mye kortere enn dypet. Under denne forutsetning kan fasehastigheten uttrykkes ved bølgeperioden T ved formelen

$$c = \frac{gT}{2\pi}$$

Med bølgeamplitude $a = 0,5 \text{ m}$ og bølgeperiode $T = 2,5 \text{ s}$ (tilsvarende en bølgelengde $\lambda = 9,8 \text{ m}$) gir det eksempelvis en energifluks $F = 2,47 \text{ kW/m}$. Det er altså et forholdsvis stort energipotensiale i vindbølger, men mengden produsert kraft over en viss tidsperiode er helt avhengig av varigheten av bølgetilstanden og med hvilken effektivitet kraftverket kan fange opp energien i bølgene.

7. Utnyttelse av varmereservoaret i dypet av fjorden

Vannet i dype norske fjorder holder en temperatur på 6-8 °C året rundt. Dette varmereservoaret kan utnyttes ved varmpumper på tilsvarende måte som endel større norske bygninger blir oppvarmet med varme fra sjøvann i dag. Varmen kan selvfølgelig nyttegjøres i fjernvarmeanlegg, men dette er antagelig ikke økonomisk lønnsomt da brukryssingene i mange tilfeller ligger langt fra tettsteder. At varmen derimot kan brukes til oppvarming av veibanen for å hindre ising er derimot en mulighet.

8. Forholdene ved de aktuelle stedene for fjordkryssing

Energiproduksjon fra bølger og tidevannsstrøm er antagelig mest aktuell i forbindelse med flytebruer. De fjordkryssingene der flytebru vurderes er:

- Boknafjorden, Ryfylke
- Bjørnafjorden, Hordaland
- Sognefjorden, Sogn
- Storfjorden, Sunnmøre
- Sulafjord, Sunnmøre
- Romsdalsfjorden-Moldefjorden

De ulike kryssingspunktene er hentet fra de aktuelle konseptvalgutredinger (KUV), se Overbygningensdokument, Statens vegvesen (2011). Nedenfor kommer en vurdering av muligheten for energi-produksjon i noen av disse fjordene. Forholdene i Halsafjorden på Nord-Møre er også kort omtalt selv om det neppe blir aktuelt med flytebru der.

8-1. Bjørnafjorden Hordaland

I Bjørnafjorden er det aktuelt med flytebru i omtrent samme trasé som fergen går i dag, dvs. fra Halhjem på Bergen siden til Lamøya nordøst på Reksteren. Lengden av traséen er ca. 6 km. Flatearealet av Bjørnafjorden med tilstøtende fjordarmer er ca. 324 km². Fjordmunningen er relativ bred (ca. 6 km) og dyp (ca. 500 m) med et tvernsnittsareal på ca. 2,5 km² (fig. 5).

I følge Den norske Los (1990, bind 3a) gjør strømmen seg lite gjeldende i fjorden. Den setter med svak styrke inn (E) eller ut (W). Vestlige og østlige vinder faller tungt over fjorden og kan sette opp grov sjø for småfartøyer.

Med en tidevannsamplitude for Bjørnafjorden $h_0 = 0,8$ m gir formel (4) en midlere tidevannstrøm i tvernsnittet på $U_m = 1,5$ cm/s. Ferskvannstilførselen til fjorden under flom og snøsmelting er stor, men en kan ikke forvente særlig sterk strøm i tvernsnittet for brukryssingen på grunn av dette.

I den trange delen av Lukksundet, som forbinder Bjørnafjorden med Hardangerfjorden i sørøst, kan tidevannsstrømmen bli sterk, opptil 3-4 knop (1,5-2.0 m/s) ved spring. Strømmen skifter retning annenhver time. Den går mot S i to timer før høyvann (HV), stille på HV, og mot N i to timer etter HV (Den norske Los 1990, bind 3a). At den 4-timers tidevannsperioden er så dominerer som i Lukksundet er uvanlig og liknende fenomen er observert bare få steder langs norskekysten (Gjevik 2009). Den sterke strømmen i Lukksundet gjør at det kan være et aktuelt sted for mindre tidevannskraftverk.

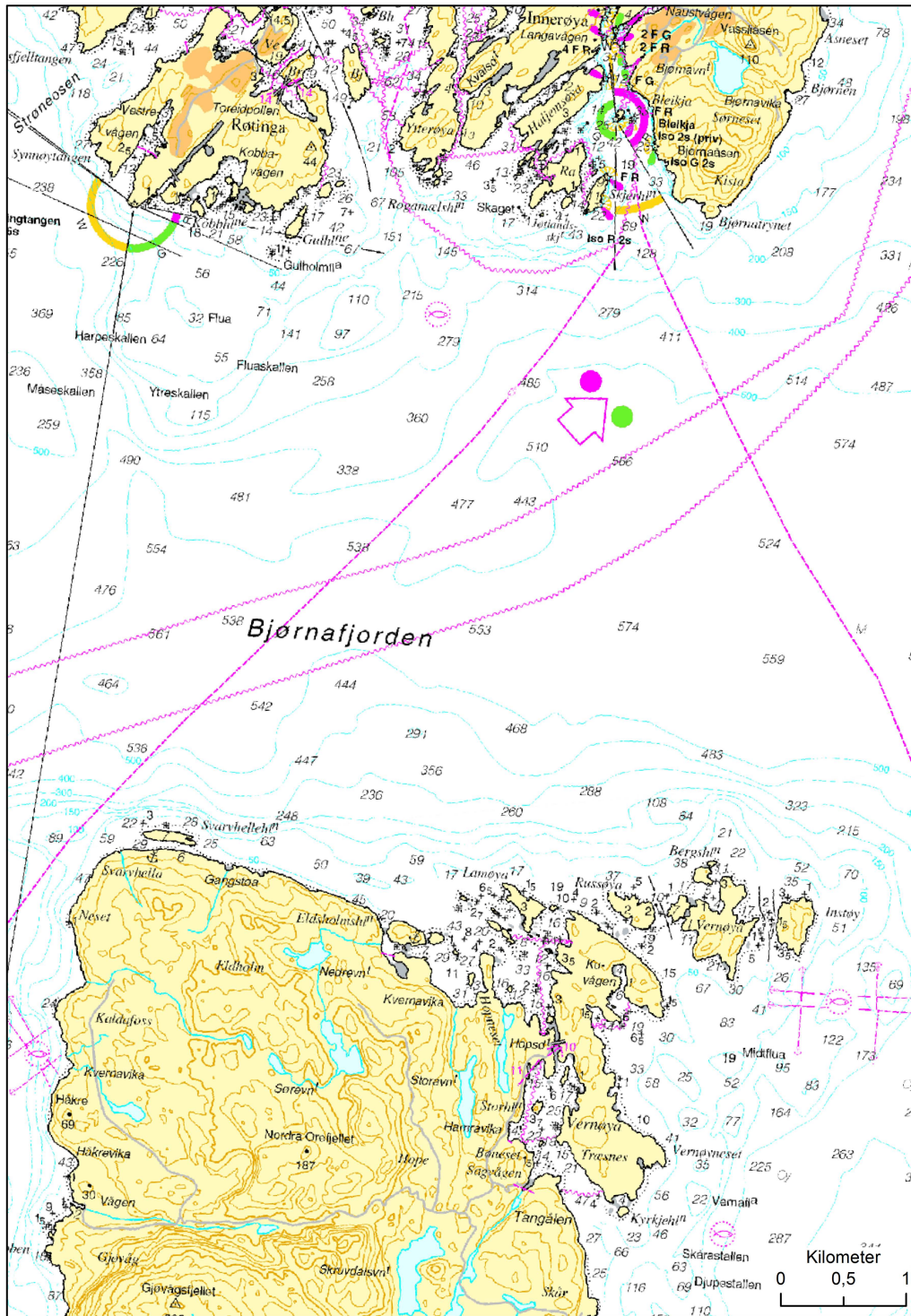
8-2. Sognefjorden

Den planlagte brukryssingen i Sognefjorden er mellom Oppedal på sørsiden og Lavik på nordsiden av fjorden. Stedet ligger ca. 25 km øst for munningen av fjorden (fig. 6).

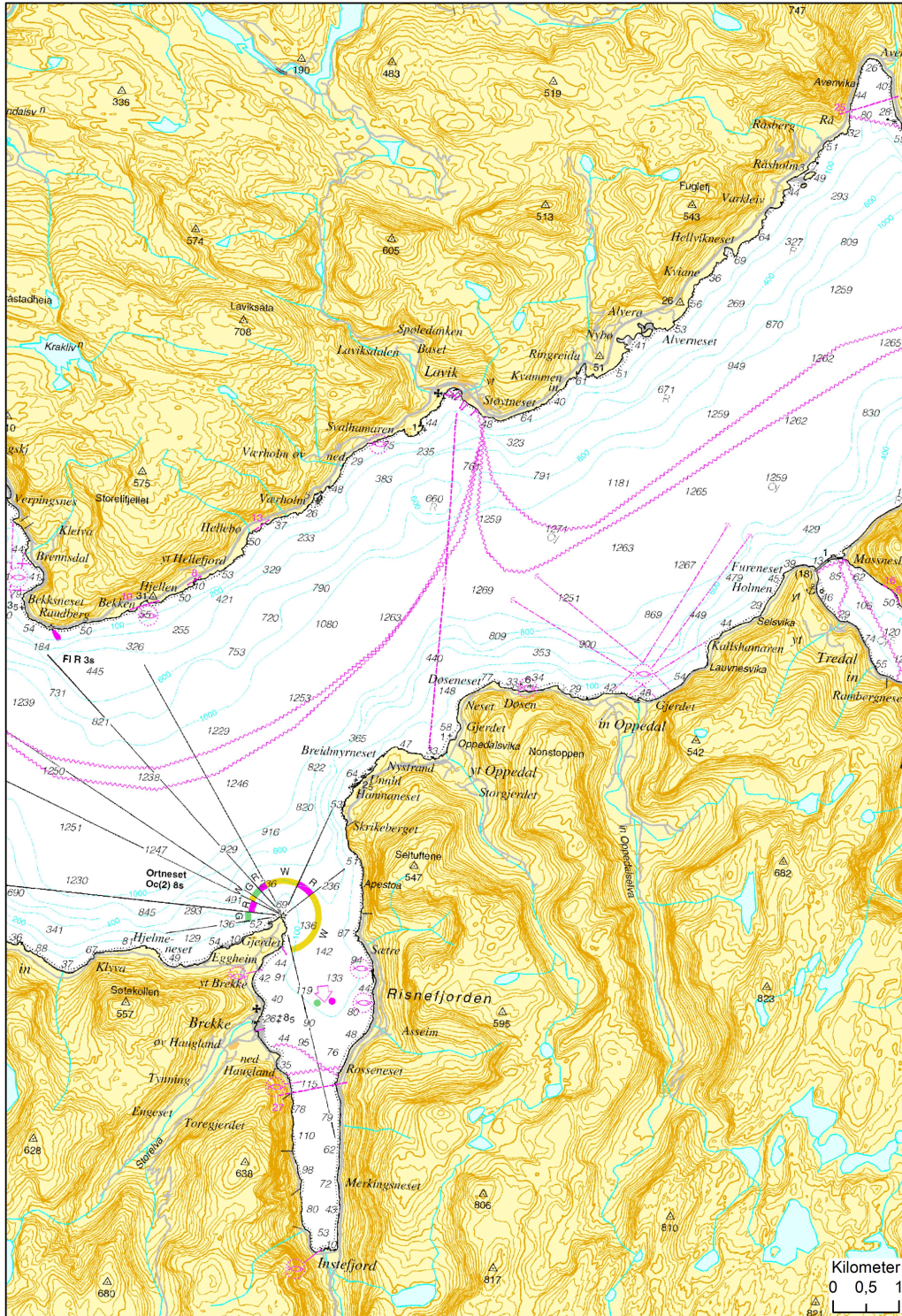
Sognefjorden er ca. 200 km lang, 4-6 km bred og opptil 1300 m dyp. Ved munningen av fjorden er det en grunnere terskel på ca. 160 m. Tvernsnittsarealet av hovedinnløpet mellom Ospeneset på fastlandet og Tronneset på Losna er ca 6,6·10⁵ m² (Staalstrøm 2011). Samme kilde oppgir at den midlere ferskvannstilførsel til Sognefjorden er $Q_f = 500$ m³/s.

Tidevannsforskjellen øker litt innover fjorden og er en faktor 1,05 og 1,15 større enn i Bergen henholdsvis ved Harbakke ytterst og ved Årdalstangen innerst i fjorden. Tidsforsinkelsen av flo sjø i forhold til Bergen er ca. 10 minutter. Tabellen viser tidevannsforskjellene endel steder i fjorden ved største og minste astronomiske tidevann (HAT/LAT), middel spring og middel nipp tidevann.

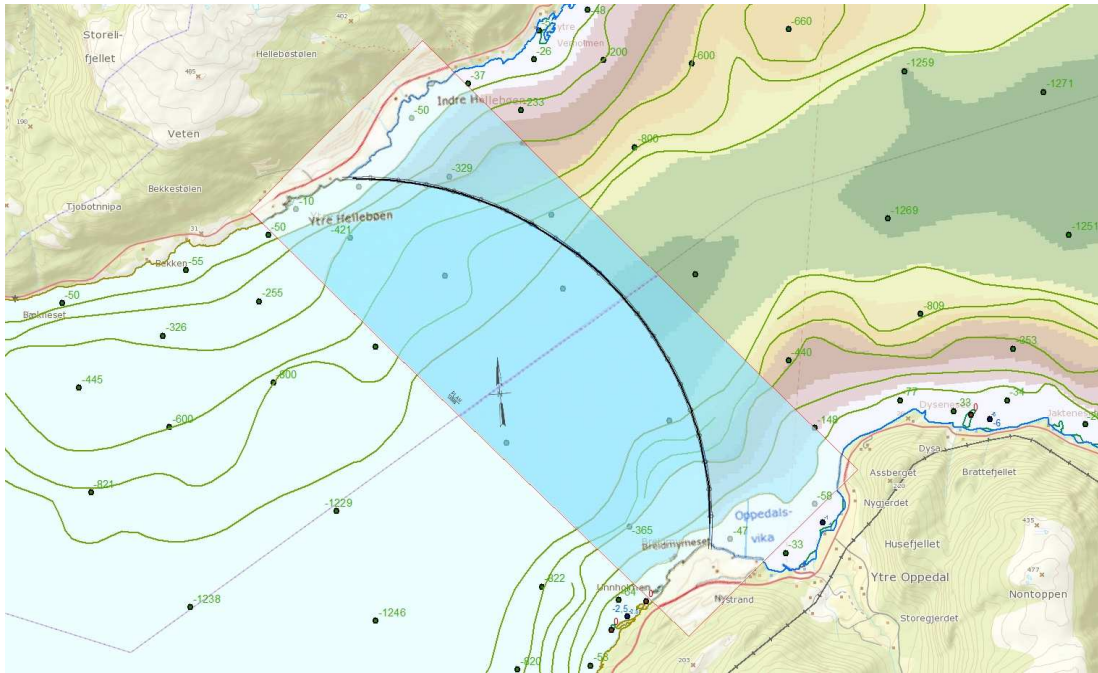
På oppdrag for Statens vegvesen har SINTEF foretatt en vurdering av bølge- og strømforholdene ved stedet for den planlagte brukryssingen av fjorden (Lothe og Brørs 2010). Basert på modellsimuleringer angir de følgende ekstremverdier 0,77 m/s i dyp 0-10 m, 0,23 m/s i dyp 30 m og 0,19 m/s i dyp 75 m. Middelerdiene er langt lavere 0,03 m/s i overflatelaget og enda lavere i de dypere lag. Modellen viser sterkere strøm midt i fjorden enn langs land. Dette kan komme av forholdsvis grov maskenett i modellen (800 m) og for sterk friksjonsdempning. Resultatene fra strømsimuleringene er ikke validert ved sammenlikning med målinger i fjorden.



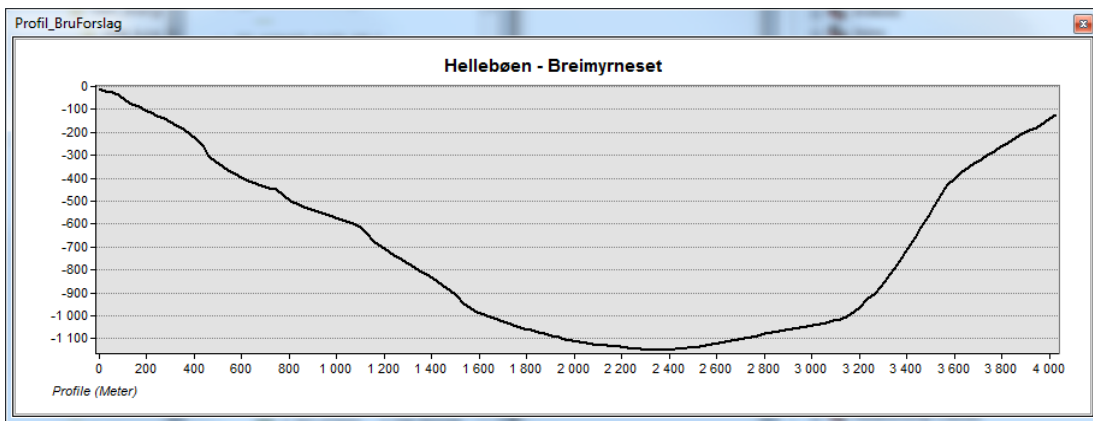
Figur 5: Sjøkart for området ved den planlagte brukryssingen i munningen av Bjørnafjorden. Kartet viser dyp på opptil 570 m. Kilde: norgeskart.no.



Figur 6: Sjøkart for området ved den planlagte brukryssingen av Sognefjorden Oppedal-Lavik. Kartet viser dyp på nesten 1300 m. Kilde: norgeskart.no.



Figur 7: Brutrasé og dybdekonturer for den planlagte flytebrua over Sognefjorden. Kartet viser dyp på nesten 1300 m. Kilde: Hilde C. Sandbo, Statens vegvesen.



Figur 8: Dybdeprofil for den planlagte brukryssingen av Sognefjorden. Enheter på aksene i meter. Kilde: Hilde C. Sandbo, Statens vegvesen.

Tabell 1: Forskjellen på høyvann og lavvann i Sognefjorden i forhold til standardhavnen Bergen. Data fra Tidevannstabellene utgitt av Sjøkartverket, Stavanger.

Havn	Høyest-lavest HAT-LAT (<i>cm</i>)	Middel spring (<i>cm</i>)	Middel nipp (<i>cm</i>)
Bergen	180	122	58
Hardbakke	189	128	61
Høyanger	202	137	65
Flåm	207	140	67
Årdalstangen	207	140	67

I de siste 5-10 år har det vært flere undersøkelser av strømsirkulasjon og vannkvalitet i Sognefjorden, men resultatene foreligger i mange tilfeller ennå ikke i åpne trykte publikasjoner. I et upublisert notat oppsummerer Asplin (2011) resultater fra strømmålinger fra 2001-2004, likeledes beskriver Staalstrøm (2011) validering av en modell av innstrømningen til Sognefjorden med målinger i området ved munningen av fjorden. Ellingsen et al. (2011) har utført modellsimuleringer av hvordan en neddykket ferskvannsutslipp i Gaupnefjorden, en arm av Sognefjorden, blandes med saltholdigvann og påvirker sirkulasjonen og vannkvaliteten i fjorden. En MS-avhandling fra Universitetet i Bergen (Baroni 2009) omhandler strøm og CTD-målinger fra den ytre delen av Sognefjorden og analyserer dataene for å studere forkomsten av indre bølger og innvirkningen de har på blandningene av vannmassene.

Strømmålingene omtalt i nevnte rapporter er i de aller fleste tilfellene utført i god avstand fra land nær midten av fjorden. Det rapporteres om strømhastighet på opptil 0,20 *m/s* for de fleste målestedene med noe sterkere strøm (opptil 0,50 *m/s*) over terskelen ved munningen av fjorden.

Vi har gjort overslag over middelstrømmen i tversnittet av fjorden ved brukryssingen. Det viser små strømhastigheter i samsvar med målingene beskrevet ovenfor (tabell 2). Tversnittsarealet av fjorden ved brustedet (S) og samlet flateareal av fjorden innenfor (A) baserer seg på beregninger utført av Hilde C. Sandbo i Statens vegvesen (fig. 7 - 8). Midlere tidevannsstrøm i tversnittet er beregnet med likning (4) med tidevannsamplitude $h_o = 1,05$ *m* og periode $T = 12,4$ timer. Dette overslaget referer seg til forholdene ved høyest mulig tidevann (HAT).

Det er vanskelig å gjøre overslag over tversnittsarealet av den utgående brakkvannstrømmen i overflaten, men det er rimelig å anta at den i hovedsakelig er konsentret i et relativt tynt lag nær nordside av fjorden. Vi setter anslagsvis tykkelsen av laget 20 *m* og bredden 500 *m*. Det gir et tversnittsareal $S_f = 10^4$ *m*². Med en midlere ferskvannstilførsel til fjorden på 550 *m*³/*s* (Staalstrøm 2011) gir dette en middelstrøm i brakkvannsutstrømningen (U_f) på ca. 6 *cm/s*. Det er da ikke tatt hensyn til innblanding av saltvann. I tider med flom og snøsmelting kan selvfølgelig brakkvannstrømmen få lang større hastighet enn middelverdien viser.

Den norske los (1990, bind 3b) har noen generelle opplysningene om strømforholdene nær land. Her sies det at det er særlig den utgående strømmen som gjør seg gjeldende i fjorden og at den er sterkere langs nordre enn søndre land. Om våren og sommeren kan hastigheten i noen tilfelle gå opp i 1,5-2,5 *knop* (0,7-1,2 *m/s*) rundt forskjellige nes og pynter.

Tabell 2: *Flatearealer og anslått middelstrøm i tversnittet av Sognefjorden ved den planlagt brukryssingen.*

Tverrsnittsareal ved brustedet (S)	2,9	km^2
Flateareal av fjorden innenfor (A)	831,7	km^2
Midlere tidevannsstrøm i tversnittet (U_m)	4,2	cm/s
Midlere ferskvannstilførsel til fjorden innenfor (Q_f)	550	m^3/s
Tverrsnittsareal av brakkevannsstrømmen (S_f)	0,01	km^2
Midlere brakkevannsstrøm ved brustedet (U_f)	6,0	cm/s

Med støtte i opplysningene i Den norske Los, kan en muligens forsvare å legge en strømhastighet på ca. $1 m/s$ til grunn for estimater av energipotensialet for kraftproduksjon med turbiner i et område nær land. For å få et bedre vurderingsgrunnlag må det utføres strømmålinger ved stedet for brukryssing. Det er spesielt viktig å få fastlagt varigheten av eventuelle sterke strømmer på omkring $1 m/s$.

8-3. Storfjorden Sunnmøre

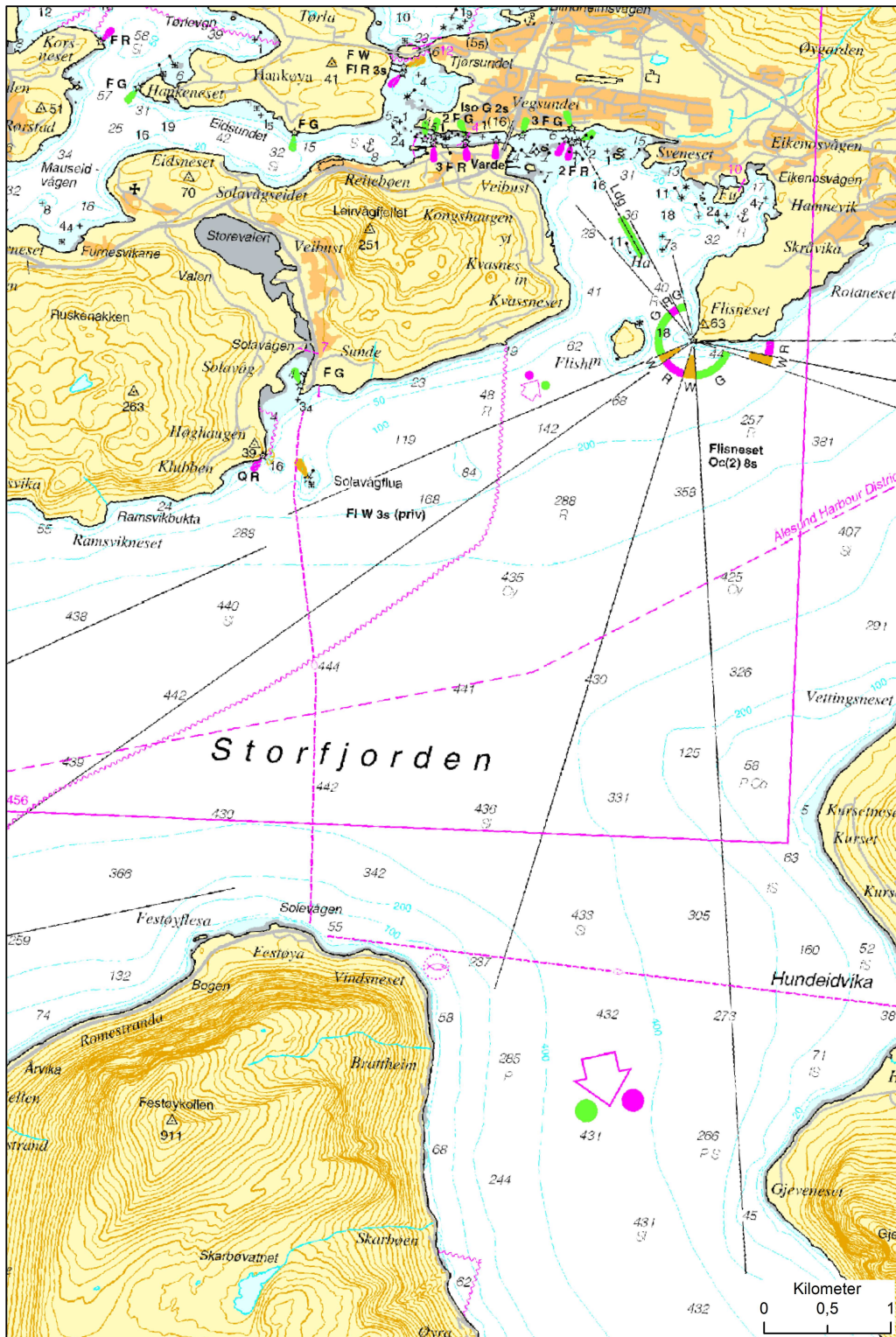
Det er i dag ferje på E39 over Storfjorden mellom Festøya på sørsiden og Solavågen på Sula. Storfjorden har flere forgreninger til lange fjordarmer: Hjørundfjorden, Synnlyvsfjorden, Geirangerfjorden, Nordalsfjorden og Tafjorden. Tilsammen har disse et flateareal på ca. $234 km^2$. Tverrsnittsarealet av fjorden ved dagens ferjested er ca. $1,5 km^2$ (fig.9). Med en anslått tidevannsamplitude for Storfjorden og fjordene innenfor, $h_0 = 1,2 m$, gir formel (4) en midlere tidevannstrøm i tversnittet på $U_m = 2,6 cm/s$. Ferskvannstilførselen til disse fjordene under flom og snøsmelting er stor, men en kan ikke forvente vedvarende sterk strøm i tversnittet for brukryssingen på grunn av dette.

Øst for ferjeleie på Sula går E39 over det smale Vegsund som forbinder Borgundfjorden og Åsfjorden innenfor Ålesund med Storfjorden. Vegsundet er mudret til $4,5 m$ i en bredde av $15 m$ (Den norske Los bind 4, 2003). Opplysninger om strømforholdene i sundet er ikke tilgjengelig, men tidevannsstrømmen er antagelig sterk i sundet.

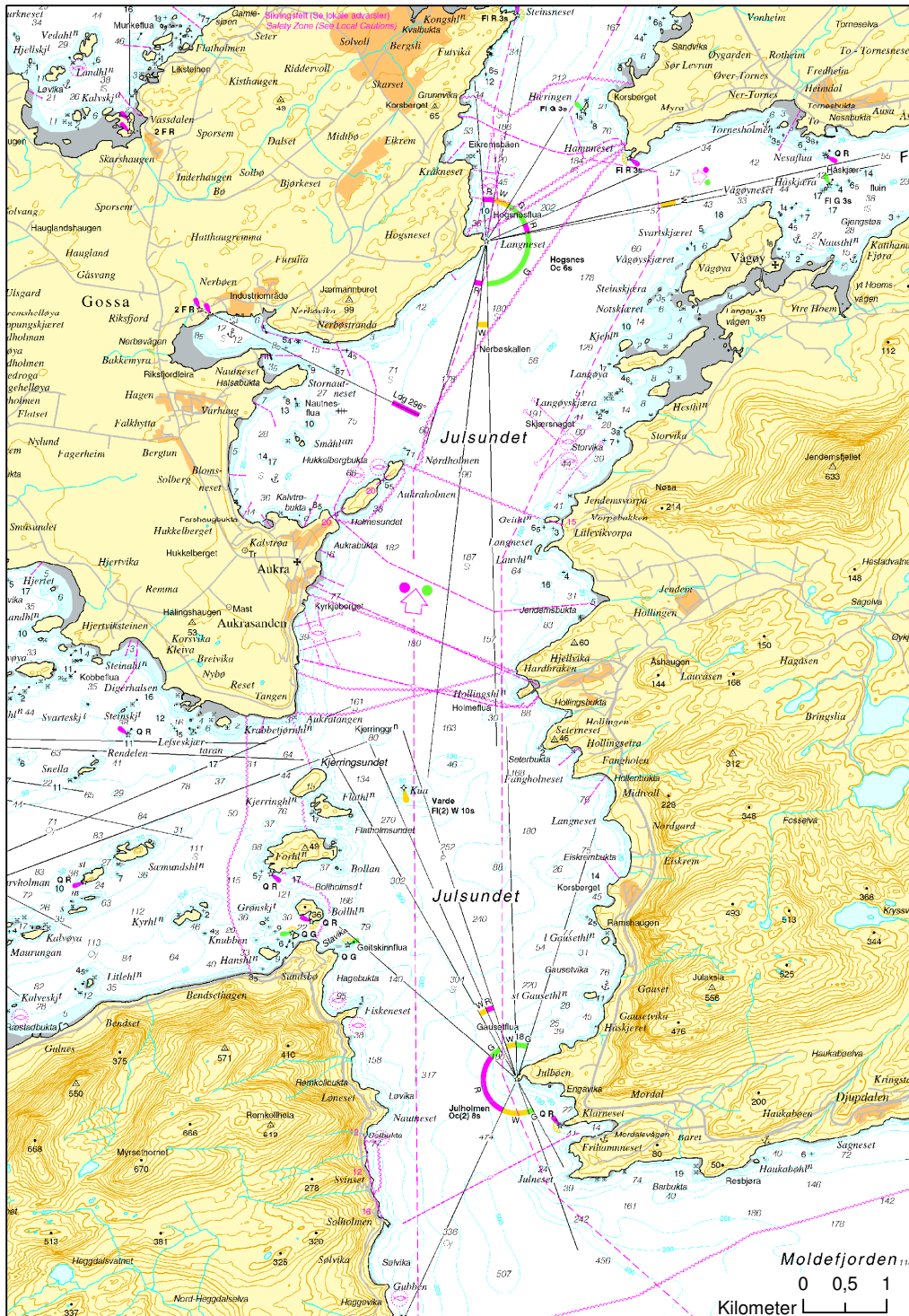
Ca. $15 km$ øst for Ålesund går dagens E39 i bru over en kjent tidevannsstrøm, Skodjebraumen, i sundet mellom Ellingsøyfjorden og Skodjevika. Det nordre løpet er ca. $50 m$ bredt og ca. $4 m$ dypt. Det meget smale Dragsundet leder videre fra Skodjebraumen og inn til Storfjorden. Nærmere opplysninger om strømhastigheter mangler, men Skodjebraumen er antagelig så sterk at det kan være et interessant sted for tidevannskraftverk.

8-4. Sulafjorden Sunnmøre

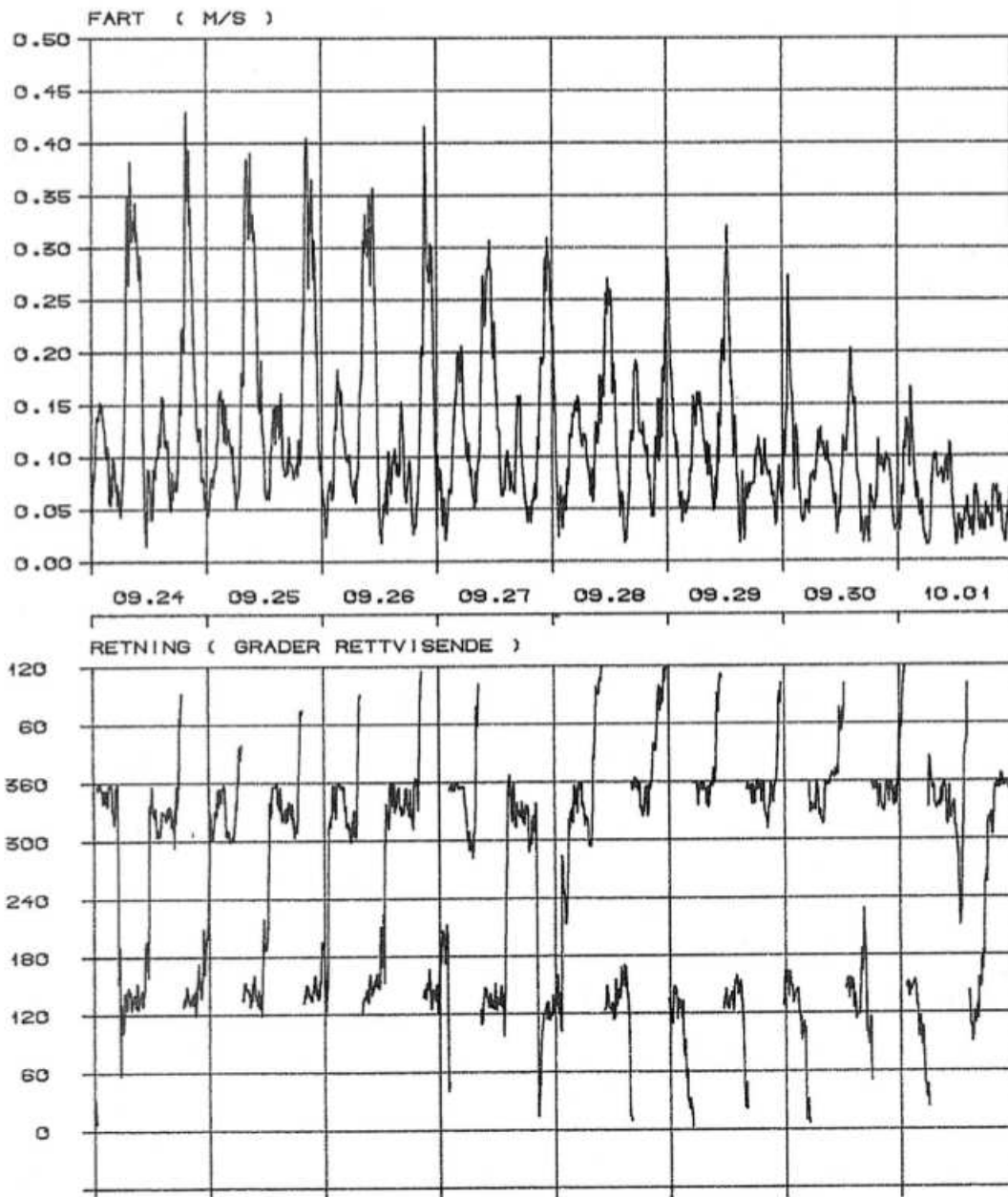
I følge overbygningsdokument (Statens vegvesen 2011) kan det være aktuelt med en kryssing av fjorden mellom Hareid og Sula sørvest for Ålesund. Ved kryssingsstedet er fjorden $4-5 km$ bred og opptil $446 m$ dyp. Stedet ligger vest for kryssingsstedet i Storfjorden (avsnitt 8.3) lenger ut i fjorden. Sulafjorden er åpen mot havet og en kan forvente at dette kryssingsstedet er mer utsatt for vinddrevet strøm og høyere bølger enn i Storfjorden. Tverrsnittsarealet ved kryssingsstedet i Sulafjorden er ca. $2 km^2$. Tidevannsstrømmen i Sulafjorden kan forventes å være omtrent som i Storfjorden, kanskje noe sterkere fordi et noe større fjordområdet innvirker på forholdene i Sulafjorden.



Figur 9: Sjøkart for området ved den planlagte brukryssingen i Storfjorden på Sunnmøre. Kartet viser dyp på opptil 444 m. Kilde: norgeskart.no.



Figur 10: Sjøkart for området for aktuell brukryssing i Julsundet, Møre. Kartet viser dyp på opptil 474 m. Kilde: norgeskart.no.



JULSD. , MØRE&ROMSDAL N 62° 45.00' E 006° 56.48'
 Måledybde : 30.0 m Sjødybde : 300.0 m Sjøkartnr. : 33
 Riggtype : Instrument : AANDERAA RCM4
 Instrumentnr. : 2240 Magnetbåndkode : 2240/105
 Måleperiode : 1976 09.16 KL.1619 - 1976 10.14 KL.1609
 Tidezone : -1 Avtastningsintervall : 10.00 minutter.
 Målingene er utført av BLOM'S OPPMÅLING

NSKV

Figur 11: Strømmålinger i 30 m dyp i Julsundet, Møre, 24. sept. - 1. okt. 1976. Kilde: Sjøkartverket, Stavanger

8-5. Romsdalsfjorden-Julsundet

Overbygningsdokument (Statens vegvesen 2011) nevner flere aktuelle fjordkryssinger. Vi har vurdert fastlandet-Otrøya-Julsundet og fastlandet-Sekken-Molde lenger inn i Romsdalsfjorden. Sjøkartverket, Stavanger har utført strømmålinger på flere steder i dette området. Det dreier seg om forholdsvis korte tidserier med lengde på opptil 1 måned.

Strømmålinger fra Julsundet i 30 m dyp i en posisjon ($62^{\circ}45,00' N, 6^{\circ}56,48' E$), øst for Sundsbø på Otrøya viser tidevannsstrøm med amplitude på ca. 30 cm/s ved spring (fig. 10-11). Tidevannsstrømmen er pålagt en bakgrunnstrøm på ca. 10 cm/s mot sørvest. Det gir strømtopper på litt over 40 cm/s . Samtidige målinger fra 6 m dyp i en nærliggende stasjon viser strømtopper på opptil 65 cm/s . Tidevannsstrømmen er her mindre framtrødende enn i 30 m dyp.

Det er mulig at strømmen lenger sør i Julsundet, hvor det er smalest, er noe sterkere enn på stedet de nevnte målinger er utført.

I Julsundet går tidevannsstrømmen sørover (inn) ved fløende sjø og nordover (ut) ved fallende sjø. Omkring tidspunktet for høy- og lavvann er strømmen svak.

Ved øya Tautra i Romsdalsfjorden, mellom fastlandet og Otrøya, finnes det en kort måleserie på 2 dager. Den viser strømhastigheter på opptil 12 cm/s .

I området omkring Sekken innerst i Romsdalsfjorden vil en ikke forvente særlig sterk tidevannsstrøm bortsett på steder der det ligger tilrette for lokale forsterkninger av strømmen.

Vestnesstrømmen, på E39 ved Vestnes, forbinder Flatevågen med Tresfjorden. Den er farbar bare for lokalkjente folk med småbåter. Her går det en rivende tidevannsstrøm (Den norske Los, bind 4). Nærmere opplysninger om strømhastigheten mangler. Sundet er smale og grunt og den totale tilgjengelige energien i tidevannsstrømmen er antaglig for liten til det vil være lønnsomt med et tidevannskraftverk.

8-6. Halsafjorden Nord-Møre

Halsafjorden med forlengelse i Stangvikfjorden innenfor har en samlet lengde på ca. 45 km . Bredden av de to fjordene er fra $3\text{-}8 \text{ km}$. Det er flere korte og smalere sidefjorder. I dag er det ferjeforbindelse over Halsafjorden mellom Kanestrøm og Halså, hvor fjorden er ca. 6 km bred. Ferjestedet ligger ca. $6\text{-}7 \text{ km}$ innenfor munningen av fjorden.

Det foreligger flere alternative planer for fast forbindelse over Halsafjorden ved munningen, hvor fjorden er noe smalere enn ved det nåværende ferjestedet. De mest aktuelle planene er en undersjøisk tunnel. Høy hengebru er også vurdert (Se web-adresse W5).

I følge Den norske Los (bind 4, 1992) går tidevannsstrømmen inn fjorden på fløende sjø og ut fjorden på fallende sjø. Bortsett fra steder med markerte innsnevninger er tidevannsstrømmene svake. Strømforholdene vil i stor grad være bestemt av vindforholdene og mengden av ferskvann som tilføres fjordene. Munningen av Halsafjorden og området innenfor ligger åpent til for vind fra nord. Ved sterk vind må en derfor regne med at vinden kan sette opp sjø i de ytre deler av fjorden.

9. Konklusjon

De fleste fjordkryssinger hvor det planlegges flytebruer for ferjefri E39 går over relative breie og dype fjorder (bredde $1\text{-}5 \text{ km}$, dyp $300\text{-}1000 \text{ m}$). Tidevannsstrømmene på slike steder vil være små med typiske strømhastigheter mindre enn $0,25 \text{ m/s}$. Det tilsvarer at energifluksen i strømmen er mindre enn 8 W/m^2 .

Innsnevninger i fjordtversnittet ved fjordterskler og/eller utspring i kystlinjen ved nes og odder

kan føre til lokale forsterkninger av strømmen med strømhastighet på opptil 1-1,5 m/s . Det tilsvarer en energifluks på 0,5 - 1,7 kW/m^2 . På et generelt grunnlag er det ikke mulig å si noe mer presist om forekomsten og utstrekningen av områder med strømforsterkning. Til det trenges et nettverk av strømmålere lokalisert i og omkring de aktuelle fjordkryssingene.

I perioder med kraftig nedbør og under snøsmeltingen om våren kan det bli en betydelig strøm ut fjorden, men strømhastigheten vil bare unntakelsesvis gå opp mot 1 m/s i begrenset områder. Likeledes kan det episodisk bli forholdsvis sterk strøm inn eller ut fjorden på grunn av væretes virkning (lufttrykk og vind). For å si noe om varigheten av slike episoder på årsbasis kreves lange tidsserier med strømmålinger.

En nærmere beskrivelse av forholdene ved de aktuelle stedene for fjordkryssinger finnes i avsnitt (8-1)-(8-6).

I nærheten av de aktuelle stedene for fjordkryssing finnes det flere kjente sterke tidevannsstrømmer hvor det kan være mulige å høste tidevannsenergi med turbiner. Det er for eksempel Skjoldastraumen i Rogaland, Lukksundet i Hordaland, Skodjestrømen ved Ålesund og Vestnesstraumen i Romsdalsfjorden. På de smaleste og grunneste partier av disse strømmene kan strømhastigheten gå opp i 2-3 m/s . Det tilsvarer en energifluks på 4-14 kW/m^2 , men tverrsnittsarealene av løpene er forholdsvis små slik at den totale energimengde som kan høstes er begrenset av dette. En kort omtale av noen av disse strømmene er gitt i avsnitt (8-1)-(8-6).

En systematisk gjennomgang av strømmålingsarkivene hos Sjøkartverket, SINTEF, NIVA og andre forskningsinstitusjoner kan nok frambringe flere gamle strømmålinger fra steder i nærheten av de planlagte brukryssingene. De fleste av disse målingene er relativt korte tidsserier med typisk varighet av 1 måned.

En kommer ikke forbi at det må utføres detaljerte og systematiske strømmålinger i nærområdet for å få fastlagt potensialet for energifangst fra tidevannsstrømmen på de stedene som utpeker seg som mest gunstige.

Et alternativ til målinger er modellsimuleringer av strømforholdene i fjorder slik som rapportert bl.a av Ellingsen et al. (2011).

Litteratur

- Asplin, Lars (2011) Strømmålinger i Sognefjorden 2001-2004. Notat fra Havforskningsinstituttet, Bergen.
- Baroni, Itzel Ruvalcaba (2009) Internal waves and mixing in Sognefjorden. MS-thesis, Geophysical Institute, University of Bergen, June 2009.
- 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.
- Buitenhuis, Dieke (2003) The velocity structure og estuarine circulation in fjords. Geophysical Institute, University of Bergen.
- Ellingsen, Ingrid, Thomas Mc Climans and Dag Slagstad (2011) Modelling the physical and biological responses of a stratified fjord to a submerged freshwater discharges. Notat fra SINTEF, Trondheim.
- Den norske los (1990, bind 3a og 3b), (1992, bind 4) og (2003, bind 4). Utgitt av Norges Sjøkartverk, Stavanger.
- Douglas, F. John, et al. (2011) Fluid Mechanics. Prentice Hall, Pearson Education, Harlow, England, Sixth edition. ISBN 978-0-273-71772-0.
- Gade, H., G. (1986) Features of fjord and ocean interaction. *Nordic Seas*, Editor Burton G. Hurdle. Springer New York. p. 183-189.
- 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.
- Gjevik, B. (2009) Flo og fjære langs kysten av Norge og Svalbard. Farleia Forlag. ISBN 978-82-9980331-0-6, 351 sider.
- 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.
- Statens vegvesen (2011) Overbygningsdokument. Konseptvalgutredning E39 Skei-Ålesund, Ålesund-Bergsøya, Bergsøya-Valsøya. Region midt/region vest, oktober 2011.
- Staalstrøm, Andre (2011) Validering av modellen. Notat fra NIVA, Oslo.
- Svendsen, Sturla Winger (2006) Stratification and circulation in Sognefjorden. MS-thesis, Geophysical Institute, University of Bergen.

Nettsider

Ref.	URL	Institusjon/firma
W1	http://www.emec.org.uk/	The European Marine Energy Centre LTD, UK
W2	http://www.marineturbines.com/	Marine Current Turbines, UK
W3	http://www.hydratidal.no/	Hydra Tidal, Harstad
W4	http://www.hammerfeststrom.com/	Hammerfest Strøm, Hammerfest
W5	http://www.halsafjordsambandet.no/	Halsafjordsambandet AS



Statens vegvesen

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

ISSN: 1893-1162