



Teknisk rapport

Fosenbrua som en energikonstruksjon



Gruppe 16

Edvard Granskogen Kjørstad

Olve Skjerdal Lysne

Pernille Moe Sagli

Ole Kristian Urke

1. Forord

I sjette semester på byggingeniørutdanningen ved NTNU er Ingeniørfaglig systemtenkning et obligatorisk emne for alle bachelorstudenter. Emnet er basert på problembasert læring (PBL), en læringsmetode der man blir stilt ovenfor problemer som løses innenfor de rammebetingelsene som studentene bestemmer med faglærer.

Faget i seg selv er tenkt å fungere som en kobling mellom universitetet og næringslivet, der studentene skal løse oppgaver bedriften selv ikke har ressurser til å gjennomføre.

Med totalt rundt 25 000 arbeidstimer kan faget være en betydelig ressurs for næringslivet. Faglærer delte studentene inn i grupper og tildelte oppgaver.

Undertegnede gruppe fikk i oppgave å lage en energiproduserende bru mellom Trondheim og Fosen.

Emnet har forberedt gruppen på hva de har i vente med skrivingen av bacheloroppgaven samt arbeidsmetoder og situasjoner de vil møte i arbeidslivet etter endte studier.

Vi ønsker å takke Jomar Tørset for veiledning underveis i prosjektet. Vi vil også takke Bernhard Kvaal fra TrønderEnergi som har tatt seg tid til å snakke med oss og bistå med oppgaven.

Trondheim, 13.02.18

Edvard Granskogen Kjørsdad

Olve Skjerdal Lysne

Pernille Moe Sagli

Ole Kristian Urke

2. Sammendrag

Denne tekniske rapporten omfatter en mulighetsstudie for energiproduksjon på Fosenbrua.

Bakgrunnen for prosjektet er å integrere Fosenhalvøya i Stor-Trondheim. Dette vil være til stor nytte for pendlere samt utvikling på Fosen. Trondheim kommune er ikke positiv til en brukryssing over Trondheimsfjorden da dette gir utfordringer knyttet til klimaplanen. Det er derfor sett på muligheten for å bygge en nullutslippsbru; grønn energiproduksjon integrert på brua kan bidra til at CO₂-avtrykket blir null.

På grunn av lengden på brupassasjen, dybden og bunnforholdene vil det bli svært kostbart med en bunnforankret bru. Det er derfor tatt utgangspunkt i en leddet flytebru.

Det er sett på fem ulike metoder for energiproduksjon; bølgekraft, vindkraft, solkraft, utnyttelse av energien i leddene og piezoelektrisitet. Flere av disse metodene er lovende, men det krever mer forskning for å avgjøre aktualiteten for Trondheimsfjorden.

Vind- og solkraft er per i dag ansett som mest aktuelle, og det er gjort en forenklet LCA-analyse på disse. Her er det sett på hvorvidt de energiproduserende elementene kan redusere det estimerte CO₂-avtrykket på brua.

Innholdsfortegnelse

1. Forord.....	1
2. Sammendrag.....	2
3. Innledning	5
4. Bakgrunn for prosjektet	6
4. 1. Integrering av Fosen i Stor-Trodheim	6
4. 2. Det grønne skiftet	7
5. Om brua	9
6. Mulighetsstudie	13
6. 1. Bølgekraft	13
6. 1. 1. Værdata og teoribakgrunn.....	13
6. 1. 2. Metode	15
6. 1. 3. Resultat	17
6. 1. 4. Diskusjon	18
6. 1. Solkraft	18
6. 1. 1. Værdata og teoribakgrunn.....	18
6. 1. 2. Metode	19
6. 1. 3. Resultat	21
6. 1. 4. Diskusjon	22
6. 2. Vindkraft.....	23
6. 2. 1. Værdata og teoribakgrunn.....	23
6. 2. 2. Metode	25
6. 2. 3. Resultat	27
6. 2. 4. Diskusjon	27

6. 3.	Ledd	29
6. 3. 1.	Værdata og teoribakgrunn	29
6. 3. 2.	Metode	30
6. 3. 1.	Resultat	31
6. 3. 2.	Diskusjon	32
6. 4.	Piezoelektrisitet	33
6. 4. 1.	Teoribakgrunn	33
6. 4. 2.	Metode	34
6. 4. 3.	Resultat	35
6. 4. 4.	Diskusjon	36
7.	Vurdering av Fosenbrua som energikonstruksjon	37
7. 1.	Sammenligning av metoder	37
7. 2.	Livsløpsvurdering	38
7. 3.	Konklusjon	39
7. 4.	Videre arbeid	39
8.	Vedleggsoversikt	40
9.	Kilder	41

3. Innledning

Etter oljeeventyret må Norge posisjonere seg for å dra nytte av teknologiske fremskritt gjort på norsk sokkel. Det vil derfor være naturlig å gå foran med nytenkende brute teknologi basert på teknologi som allerede har vært brukt i Nordsjøen.

Prosjektgruppens ønske er at bruprojektet gjennom innovative og bærekraftige løsninger skal skape engasjement mot en endelig bru over Trondheimsfjorden.

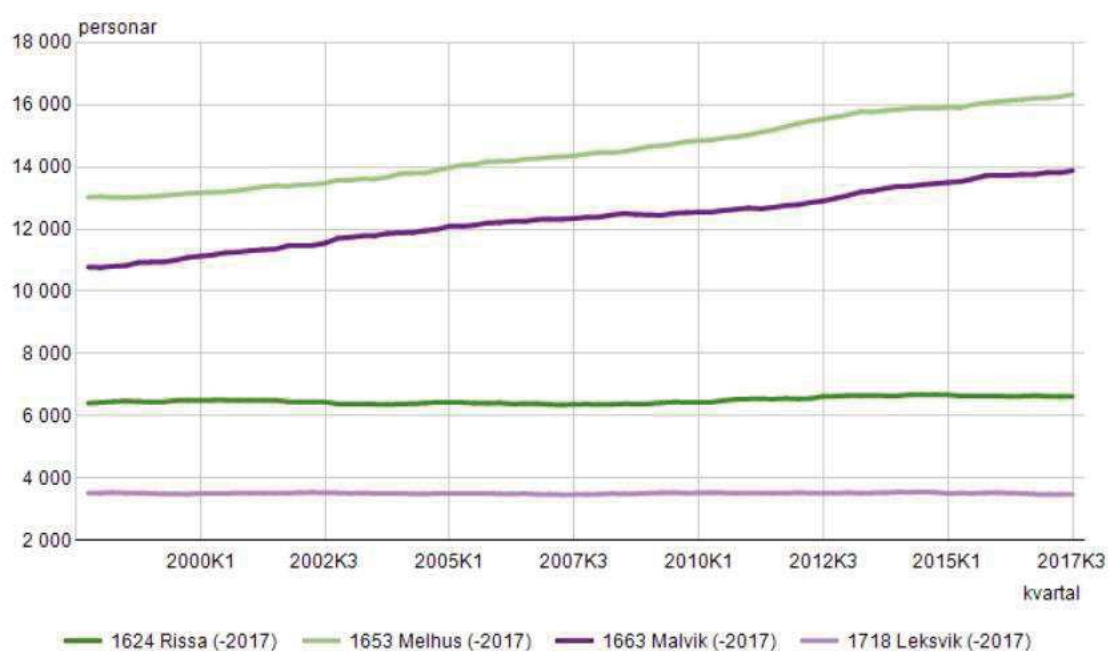
Brua som skal drøftes i oppgaven skal erstatte fergesambandet mellom Flakk ved Trondheim og Rørvik på Fosen. Brua står i dag ovenfor utfordringer knyttet til både finansiering og miljøhensyn. Finansiering av brua tas imidlertid ikke i betraktning, da strømproduksjon på brua ikke vil kunne oppnå priskonkurrerende kilowattpris til dagens marked i følge Bernhard Kvaal i TrønderEnergi. Energiproduksjonen på brua vil dermed ikke kunne bidra i finansieringen. Det er derimot fokusert på bærekraftige løsninger med lavest mulig karbonavtrykk. En av løsningene er ved å la konstruksjonene produsere strøm til eget bruk og eventuelt til strømmettet.

Det vil bli foretatt en mulighetsstudie der ulike metoder for energiproduksjon betraktes. Aktualitet for Trondheimsfjorden bli vurdert ut i fra værdata, og sannsynlig virkningsgrad vil videre bli evaluert. Kjente metoder, som vind- og solkraft blir studert samt mer innovative løsninger som bølgekraft, piezoelektrisitet og utnyttelse av tidevannsstrømningene. Gruppen vil foreta litteraturstudier av liknende prosjekter og forsøke å finne aktuelle verdier for mulig kraftproduksjon.

4. Bakgrunn for prosjektet

4. 1. Integrering av Fosen i Stor-Trondheim

Fosen er en region som omfatter seks kommuner med et samlet folketall på nesten 25 000 (Frydenlund, Flaate og Østlid, 2013). I dag er Fosen i hovedsak tilknyttet Trøndelags sørlige del ved de to ferjesambandene fv. 710 Brekstad-Valset og fv. 715 Flakk-Rørvik. Trondheim kommune har rundt 190 000 innbyggere og har en kraftig vekst (Fosenbrua AS, u.d.). Særlig stor vekst viser områdene langs aksen Orkanger-Trondheim-Stjørdal, som ofte kalles Stor-Trondheim. De geografiske avstandene fra Trondheim sentrum og områder som Stadsbygd på Fosen er omtrent tilsvarende avstandene fra Trondheim sentrum til kommuner som Malvik og Melhus, som har tatt del i den positive utviklingen til Stor-Trondheim. Likevel synes ikke den samme utviklingen i Fosen-regionen. Befolkningsutvikling er illustrert i diagrammet under, hentet fra Statistisk sentralbyrå sin statistikkbank.



Figur 1: Befolkningsvekst i Trøndelag. Kilde: Statistisk sentralbyrå

I dag ligger Stadsbygd, som er det tettstedet på Fosen som ligger nærmest Trondheim, omtrent 30km fra Trondheim sentrum der 7,5km av strekningen er fergesambandet mellom Flakk og Rørvik. Alternativ fergefri rute rundt fjorden er over 200km lang. Reisetider mellom Stadsbygd og Trondheim er beregnet til over 60 minutter, mens øvre grense for akseptabel reisetid for dagpendling anses å være rundt 45-60 min. Videre nordover finner man også flere tettsteder som er avhengige av ferjesambandet, disse med enda lengre reisetid.

Dagens trafikkmengde fra Fosen til Trondheim er målt til en ÅDT på 2060 kjøretøy etter tall fra rapporten «Trafikkanalyse og potensielle virkninger av vegtiltak» av Norconsult AS (Blindheim og Sundgot, 2017). Dette er stort sett trafikk som baserer seg på de to fergesambandene og som må innrette seg etter de gitte rutetidene på dagtid og redusert eller ingen fremkommelighet på kvelds- og nattestid. Disse ferjene er også utsatte for vær og vind og kan til tider innstilles som følge av moderat vindstyrke.

I tillegg til fergene på tvers av fjorden, er det også skipstrafikk inn og ut av fjorden. Blant annet er det både cruiseskip og lasteskip som legger til ved havnen i Trondheim, men også trafikken til Verdal er stor på grunn av verftet til Kværner Verdal AS. Her blir det produsert store komponenter og konstruksjoner til oljeindustrien som må transporteres ut fjorden.

4. 2. Det grønne skiftet

I 2017 ble en ny klimalov vedtatt; Lov om klimamål. Målet er at Norges klimagassutslipp skal reduseres med 40 % i forhold til 1990 innen 2030 (Klimaloven, 2017). Innen 2050 skal utslippene være redusert med 80 – 95 % sammenliknet med 1990, og dermed være kategorisert som et lavutslippsamfunn. Regjeringens mål er med andre ord et grønt skifte innen 20 – 30 år. Dette er Norges bidrag til Parisavtalen, og regjeringen ønsker å samarbeide med EU for å oppnå målene som er satt.

Trondheim kommune har liknende mål i sin klimaplan for 2017 – 2030; i forhold til 1991 skal byens klimagassutslipp reduseres med 25 % innen 2020 og 80 % innen 2030 (Klimaplan for Trondheim, 2017). Visjonen i klimaplanen er følgende:

«Som Norges teknologiske hovedstad, har Trondheim en særskilt mulighet til å gå foran i det grønne skiftet. Et klimavennlig og klimarobust Trondheim vil bli en bedre by å bo, arbeide og leve i. I denne planen setter Trondheim kommune ambisiøse klimamål for både byen og egen virksomhet. Utslippsreduksjoner skal gjennomføres gjennom samhandling mellom offentlige aktører, næringsliv, organisasjoner og Trondheims innbyggere. Det er en forutsetning for denne planen at kommunen er villig i årene framover til å sette av tilstrekkelige ressurser til både gjennomføring av tiltak og koordinering av overnevnte samhandling med eksterne aktører. Klimahensyn må bli prioritert i saksbehandling og politiske vedtak framover.»

Trondheim er altså beskrevet som «Norges teknologiske hovedstad» og har «en særskilt mulighet til å gå foran i det grønne skiftet.».

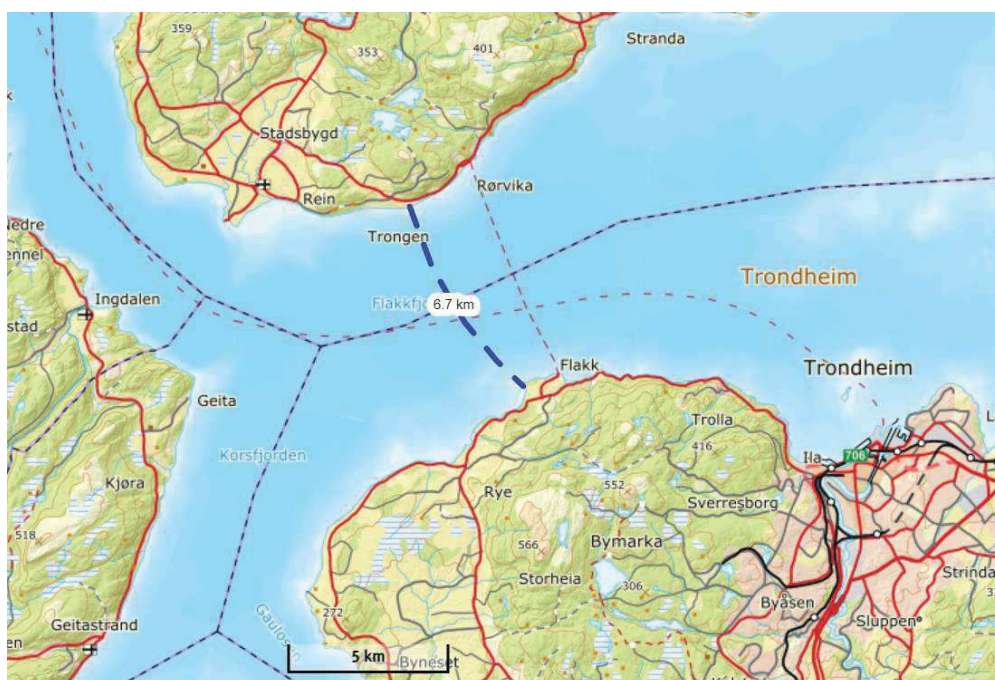
Å gjennomføre et grønt skifte er ingen enkel oppgave, spesielt for land som er avhengig av kull og fossilt drivstoff i sin energiproduksjon. Norge får det aller meste av energibehovet sitt dekket av vannkraft. Vannkraft er en fornybar energikilde uten vesentlige klimagassutslipp. En fornybar energikilde har kontinuerlig tilførsel av energi og vil ikke ta slutt i menneskenes levetid.

For å oppnå klimamålene til både Trondheim kommune og regjeringen vil det være nødvendig å tenke bærekraftig i alle ledd. En «Zero Emission Building» vil være svært gunstig, i dette tilfellet en nullutslippsbru. En ZEB produserer like mye energi i bruksfasen som det materialene, konstruksjonsfasen, bruksfasen og slutfasen bruker til sammen, slik at totalregnskapet blir null.

Trondheim kan opptre som et forbilde innen bærekraftig energiproduksjon og inspirere andre land og kommuner til å tenke langsiktig, ta ansvar og bidra til å redusere klimagassutslipp. Gjennom innovative løsninger kan man gi Trondheim anerkjennelse som en miljøby og en streber innenfor bærekraft. Fosenbrua kan være en arena for innovasjon og utvikling av nye løsninger. Den kan fungere som en forskningsplattform og et pilotprosjekt for ulike energiproduksjonsmetoder under utvikling.

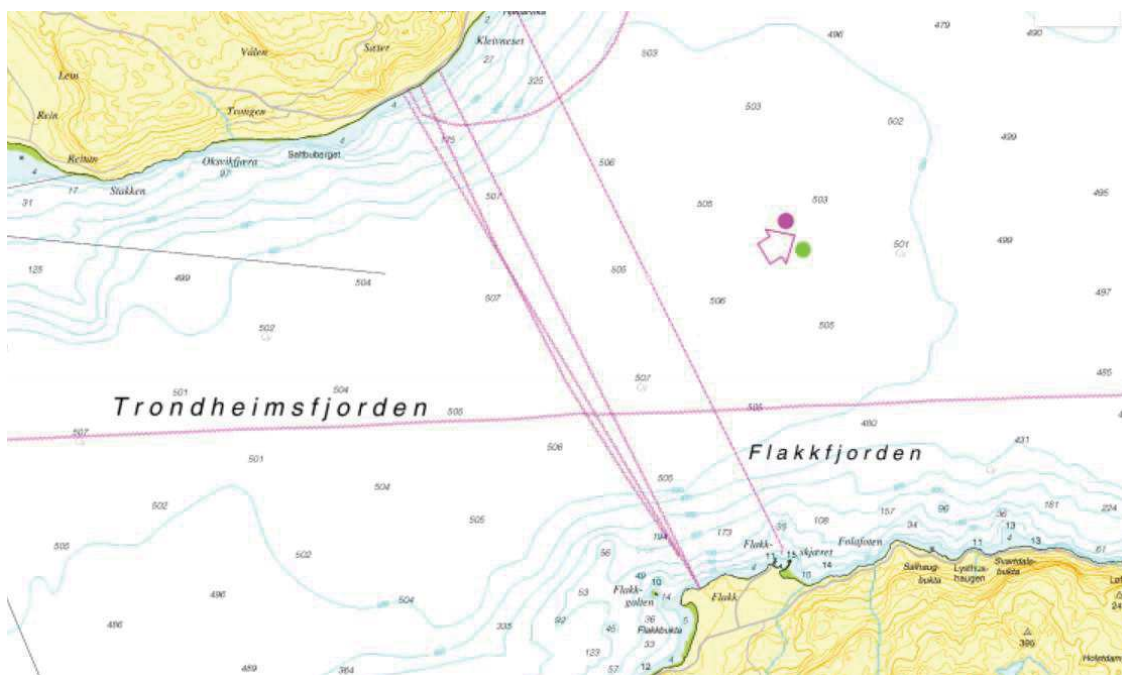
5. Om brua

Mest hensiktsmessige plassering av en bru over Trondheimsfjorden vil være omtrent på samme sted som fergesambandet går i dag, mellom Flakk og Rørvik. Brua vil da få en lengde på rundt 6,7km med en buet form for økt motstandsevne mot tidevannsstrømninger og andre krefter normalt på brua. Tenkt plassering og trasé er illustrert på kartet under med blå stiplet linje.



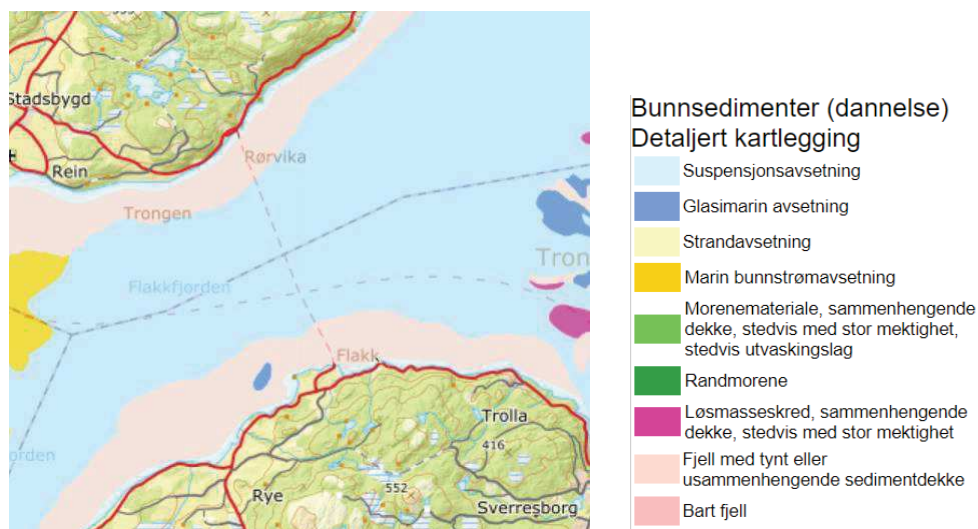
Figur 2: Kartdata fra norgeskart.no

Trondheimsfjorden regnes imidlertid som en dyp fjord, noe som skaper en del utfordringer. Den aktuelle passasjen for en bru har en maksdybde på 500m. Dette er illustrert i dybdekartet hentet fra Norges Geologiske Undersøkelse.



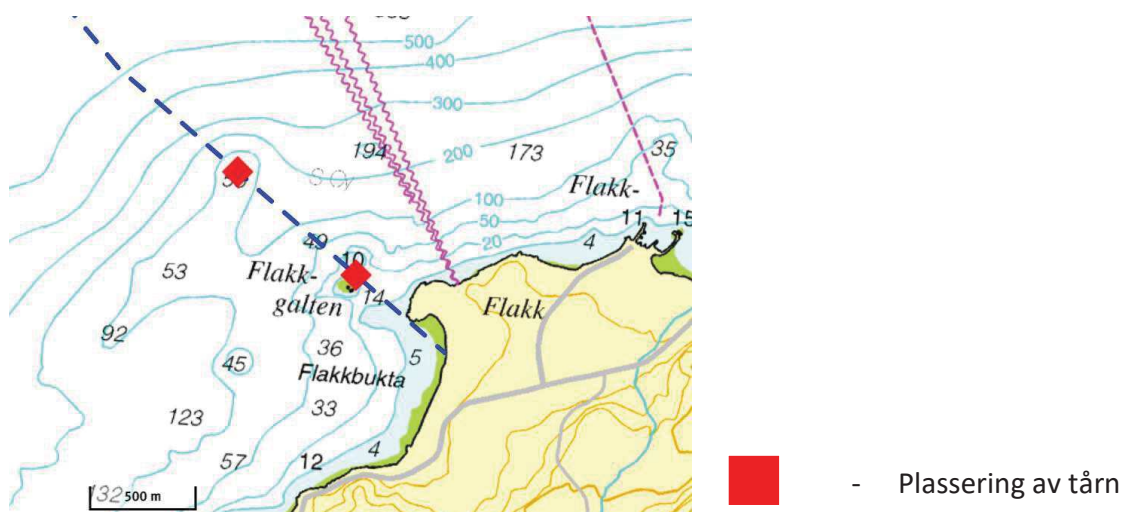
Figur 3: Dybdekart. Illustrasjon: NGU

Temakartet i figur 4 viser bunnsedimenter i fjorden. Bunnen består hovedsaklig av marine suspensjonsavsetninger. Dette er finkornige sedimenter som silt og leire som er avsatt med suspensjon. I en rapport fra Statens vegvesen er det anslått at dybden ned til fast fjell er over 1100m på deler av passasjen. Bunnfundamentering med søyler på fjellgrunn er derfor ikke aktuelt og det er derfor sett på løsninger med flytende fundament. Flytende fundament vil være det mest hensiktsmessige både med tanke på konstruksjonsmessig gjennomførbarhet og kostnad.



Figur 4: Bunnsedimentet i Trondheimsfjorden. Illustrasjon: Mareano

En løsning med flytende fundament over hele fjorden vil kunne skape utfordringer for skipstrafikk inn og ut fjorden da det vil være vanskelig å konstruere brua med tilstrekkelig høyde for passering samtidig som den overholder krav om stabilitet og sikkerhet. En mulig løsning på skipspassasjen kan derfor være å bygge delen av brua som er nærmest Flakk som en fast skråkabelbru. Det er da tenkt et spenn på 1400m med to tårn som kan fundamenteres på et grunnere parti der man finner fjellgrunn på bare 55m dybde. Mulig plassering av tårnene er illustrert under med dybdekoter som viser det grunne partiet.



Figur 5: Kartdata fra norgeskart.no

En slik løsning vil kunne gi tilstrekkelig bredde, høyde og dybde for all skipstrafikk som er aktuell i Trondheimsfjorden.

Løsningene som er nevnt over er løsninger utredet på vegne av interessenter som Statens vegvesen og Fosenbrua AS. På vegne av Fosenbrua AS er det også, som nevnt tidligere, foretatt en trafikkanalyse av Norconsult i rapporten «Trafikkanalyse og potensielle virkninger av vegtiltak» fra 2017. I denne fremgår et estimat av trafikkveksten på strekningen Fosen-Trondheim dersom brua blir realitet. Dette estimatet er en trafikkvekst på mellom 140% og 190% fra dagens trafikk innen 2022 (Blindheim og Sundgot, 2017). Denne veksten vil da være et resultat av utvikling på Fosen og viser den positive effekten av brua for Fosen. Likevel vil dette også føre til økt personbiltrafikk i Trondheim, som ikke er forenlig med Trondheim kommunes klimaplan.

6. Mulighetsstudie

6. 1. Bølgekraft

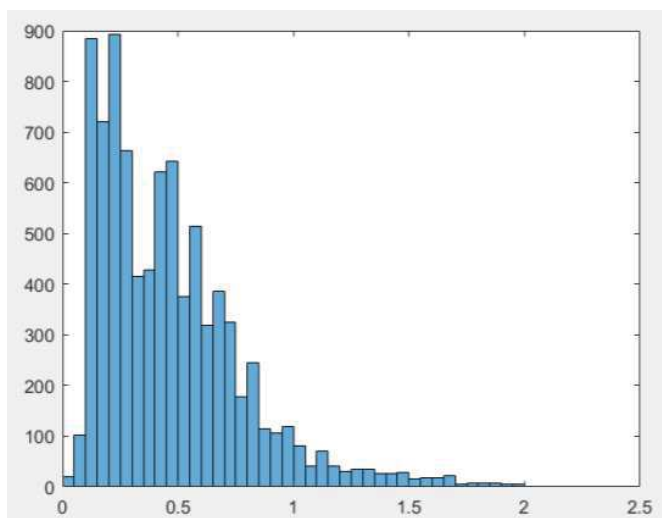
6. 1. 1. Værdata og teoribakgrunn

Bølgekraft er i dag en ressurs med stort potensiale som i liten grad blir utnyttet. Norge har, med den lange kysten, spesielt stor mulighet til å utnytte denne energien. Likevel har Norge enda ikke begynt utbygging av bølgekraftverk i større skala, mye på grunn av tilgjengeligheten av andre kraftressurser som vann- og vindkraft. Vannkraft spesielt har ført til at Norge har stor tilgjengelighet av grønn energi og dermed generelt lave strømpriser. Dette fører til at det er vanskelig å utvikle nye, konkurransedyktige energikilder i Norge sammenlignet med i utlandet. I Europa er det Storbritannia som går fremst med utbygging av pilotprosjekt og satsing innen bølgekraftverk grunnet høye strømpriser, samt sterk satsing med subsidiering til utvikling av fornybar energi.

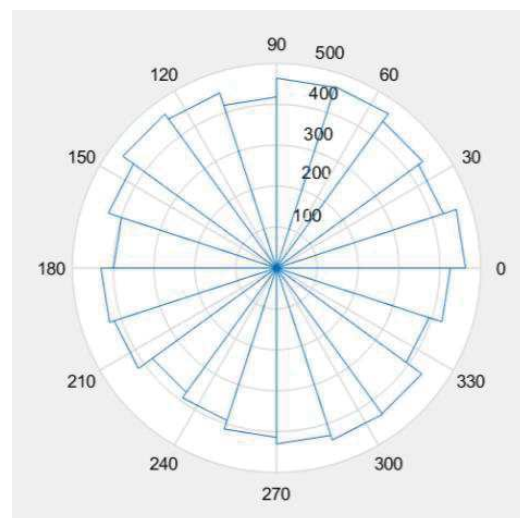
Forskning innen bølgekraft tar lang tid da teknologien må testes over lange perioder med lav effekt og deretter med økende effekt. Før løsningene kan bli kommersielle og kobles på nett må man være helt sikker på at de er pålitelige og leverer en jevn strøm. Det har vist seg at svingningsvariasjonene byr på mange praktiske problemer. Når pilotprosjektene da som oftest befinner seg på åpent hav og konstruksjonene blir utsatt for store påkjenninger ved ekstreme bølgeforhold, blir kostnadene for oppfølging og vedlikehold store. Noe som medfører stor økonomisk risiko for initiativtakere og investorer.

Etablering av en forskningsplattform i tilknytning til en bru vil da kunne gjøre konstruksjonene mer tilgjengelige og lettere å gjennomføre. Selv om bølgepotensialet inne i en fjord som Trondheimsfjorden er av mindre dimensjoner enn ute på åpent hav, kan dette være en god plattform for pilotprosjekter for mindre energiproduserende konstruksjoner. Vi har derfor vurdert to muligheter for integrering av bølgekraftverk på Fosenbrua.

Våren 2017 gjennomførte en prosjektgruppe i Ingeniørfaglig Systemtenkning en liknende mulighetsstudie på Fosenbrua som en energionstruksjon (Strøm *et al.*, 2017). De var i kontakt med Metrologisk Institutt og fikk tilsent bølgedata for en periode på ett år. Denne inneholdt 8569 målinger som gruppen brukte til å produsere et histogram og en bølgerose for strekningen Flakk-Rørвик.



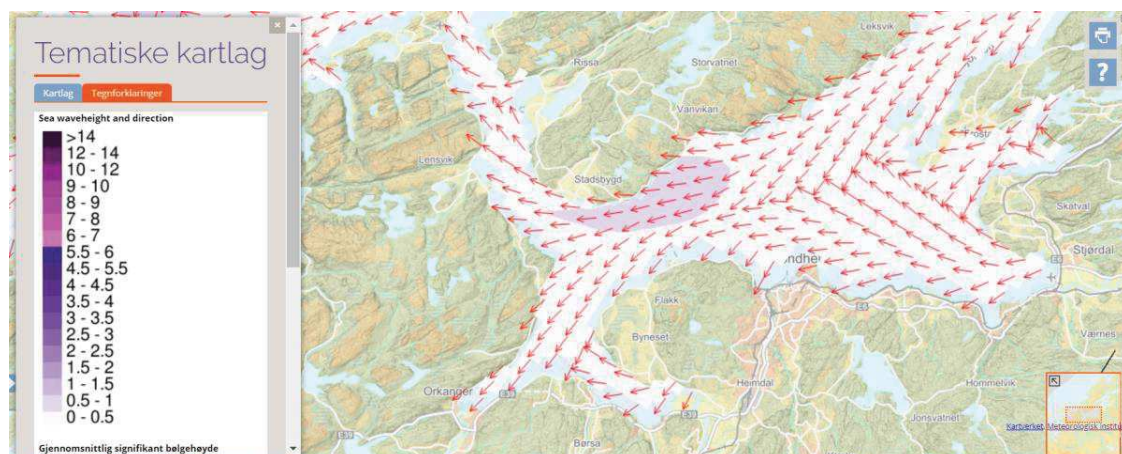
Figur 6: Histogram med maksimale bølgehøyder for Flakk-Rørвик. x-aksen viser bølgehøyden i m, mens y-aksen viser hyppigheten av hver bølgehøyde.



Figur 7: Bølgerose som viser bølgeretninger for Flakk-Rørвик.

Fra histogrammet ser man at den største andelen bølgehøyder ligger mellom 0 – 0,5 m. Bølgeretningen er relativt varierende, og det er ikke én retning som utpeker seg med størst antall bølger.

Liknende data kan leses ut fra bilde 5. Bølgehøyden ligger mellom 0 – 0,5 m, men ligger opp mot 1 m i den sørlige delen av Fosenhalvøya. Her ser bølgeretningen ut til være mer konsekvent fra øst til vest for den aktuelle strekningen Flakk-Rørвик.

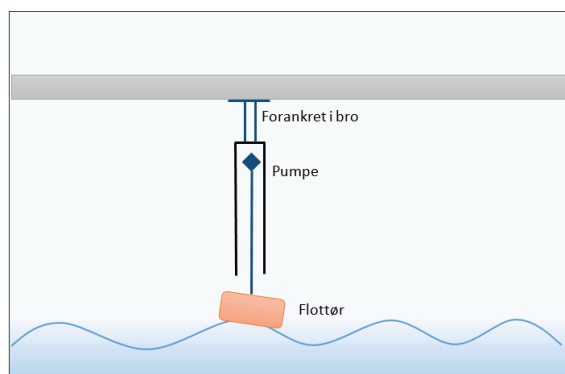


Figur 8: Bølgedata for Trondheimsfjorden. (Geonorge, 2018)

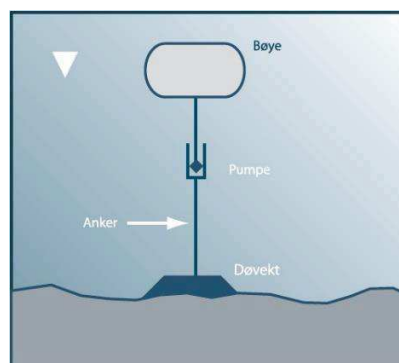
6. 1. 2. Metode

Bølgepumpe (Punktaborbator)

Bølgepumpe er en type strømgenererende konstruksjon som baserer seg på å samle energien fra bølger inn mot ett punkt ved at en flottør er forankret til et fast punkt. Mellom forankringen og flottøren er det et stempel som ved hjelp av bølgesvingninger pumper vann eller annen væske gjennom en generator som overfører energien til elektrisitet. Tradisjonelt sett er disse forankret på sjøbunnen med en flottør på overflaten, noe som ikke er aktuelt ved så store dybder som i Trondheimsfjorden. Det er da tenkt en løsning der mekanismen er forankret i brua og generatoren er forbundet med flottøren på vannoverflaten med et stivt stag.



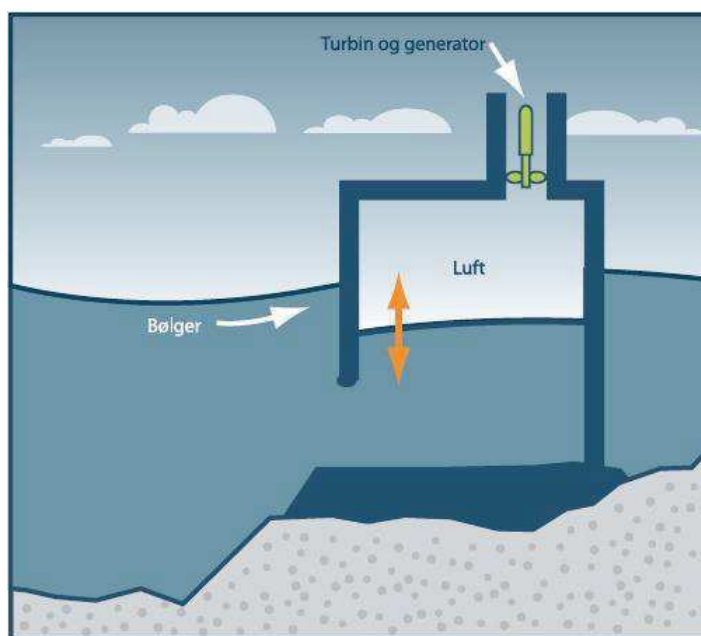
Figur 9: Prinsippskisse for bølgepumpe forankret i bru.



Figur 10: Prinsippskisse for tradisjonell bølgepumpe. (NVE et al., 2016b)

Oscillerende vannsøyle

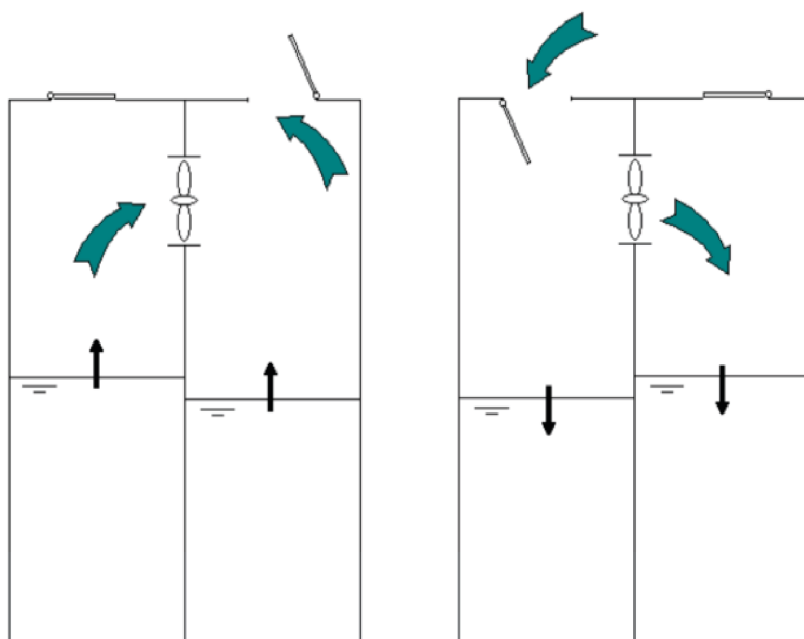
Et annet konsept som er sett på er oscillerende vannsøyle som er en konstruksjon med hul struktur som er delvis nedsenket i vannet. Den har åpning i underkant av vannoverflaten og en luftlomme i øvre del. Denne benytter seg av bølger til å skape svingninger i vannsøylen i konstruksjonen. Disse svingningene danner så trykkendringer i luftlommen som deretter fører til luftstrømninger gjennom en turbin med strømgenererende generator i toppen av konstruksjonen.



Figur 11: Oscillerende vannsøyle. (NVE et al., 2016b)

For å integrere denne løsningen på brua er det tenkt å bygge deler av pongtongene som danner flyteelementene til brua med slike svingekammer med turbin og generator. For å kunne generere strøm både ved over- og undertrykk i kammeret kan man plassere to kammer vegg i vegg med to separate lufteluker og generatoren mellom kamrene. På denne måten kan man ved hjelp av åpning og lukking av luftelukene bestemme hvilken

vei luftstrømmen skal gå gjennom turbinen. Dette prinsippet er vist i figuren under. Da pongtongene uansett må utvikles spesielt til brua, medfører ikke det veldig store ekstrakostnader å integrere en slik løsning på alle eller noen av pongtongene.



Figur 12: Prinsipp for tvilling OWC med konstant luftgjennomstrømning i turbinen. Kilde: "An investigation of wave-energy absorption by single and double oscillating water column converters" av Arne Brendmo

6. 1. 3. Resultat

Mulighetene for å integrere løsninger for utnyttelse av bølgekraft i brukonstruksjoner er utredet i rapporten «Ferjefri E39 – Subproject ENERGY» av Statens vegvesen med bakgrunn i mulighetsstudier utført av Rambøll, Norconsult, NPRA og SP Technical Research Institute of Sweden. Grunnet mangler i datagrunnlag var det umulig å utføre skikkelige estimat for den forventede strømproduksjon for bølgekraft. SP gjorde likevel noen svært omtrentlige estimat som viste at bølgekraft kunne produsere mellom 20 og 236GWh/km/år på fjordkryssingene over Boknafjorden, Moldefjorden og Bjørnafjorden. Sannsynligvis ligger potensialet for strømproduksjon mot den nedre grensen av intervallet (Statens vegvesen, 2012). Dette estimatet var basert på antagelser av at gjennomsnittlig bølgehøyde var større enn 1m. I Trondheimsfjorden ligger derimot

bølgehøyden for det meste rundt 0-0,5m og potensialet for strømproduksjon ved bølgekraft her vil derfor være mye mindre.

6. 1. 4. Diskusjon

Vi anser ikke bølgekraft som et gunstig alternativ for strømproduksjon i Trondheimsfjorden i dag. Likevel vil det kunne være en mulighet for å utforske løsninger for strømproduksjon i forhold med lave potensialer. Tilknytningen til brua vil gjøre vedlikehold og oppfølging av konstruksjonene enklere og vil kunne kombineres med vedlikeholdsarbeid på brukonstruksjonen. Tilknytning til strømmettet vil også ha en redusert kostnad i forhold til anlegg i havet da elementer som belysning allerede må ha tilknytning til strømmettet. I tillegg forventes investeringskostnadene for kraftverkskonstruksjonene å bli redusert med rundt 40% dersom utstyret integreres i brukonstruksjonen (Statens vegvesen, 2012).

6. 1. Solkraft

6. 1. 1. Værdata og teoribakgrunn

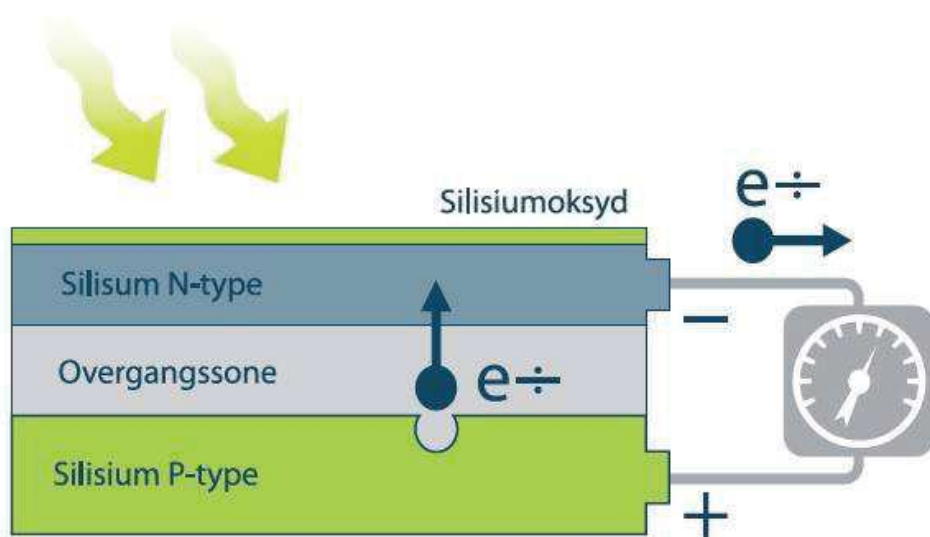
Statsmeterolog Unni Nilssen publiserte i 2014 en artikkel med oversikt over antall soltimer ulike steder i Norge vanligvis hadde i løpet av et år. Værstasjonen på Tyholt i Trondheim har 1346,5 soltimer (Nilssen, 2014). Det er antatt at samme verdier gjelder for Trondheimsfjorden.

Det er flere faktorer som påvirker solmengden, blant annet været, terrenget og himmelretningen. Siden Trondheim ofte har mye skyer vil dette redusere antall soltimer. Breddegraden har også innvirkning på solmengden. Den fører til færre soltimer enn enkelte steder lengre sør, som for eksempel Oslo. Antall daglige soltimer varierer også på grunn av breddegraden; om sommeren vil det være mange flere soltimer per dag enn i vinterhalvåret.

6. 1. 2. Metode

Til direkte omdanning av solenergi til elektrisitet er en forståelse av den fotoelektriske effekten helt essensiell. Denne ble oppdaget så tidlig som 1887 av Heinrich Rudolf Hertz og videre undersøkt av Max Planck og Albert Einstein som i 1921 fikk Nobelprisen for sitt arbeid med den fotoelektriske effekten.

I dag er 95% av alle solceller basert på Silisium. De består da av en halvleder med dopet bak- og forside. Vanligvis har da forsiden et overskudd av frie elektroner, mens baksiden har et underskudd. Mellom de to feltene dannes et elektrisk felt som driver frie elektroner mot fremsiden av cellen. Nå sollys treffer solcellens flate kan bundne elektroner absorbere fotoner og dermed bli frie. Dersom disse frie elektronene ledes inn i en elektrisk krets mellom for- og bakside vil de generere en elektrisk strøm som kan utnyttes.



Figur 13: Prinsippkisse for solcelle. (NVE et al., 2016a)

De dominerende solcelleteknologiene er krystallinske solceller og tynnfilmteknologier. Krystallinske solceller lages av silisiumskiver og har som regel en virkningsgrad mellom 14-20%. Virkningsgraden avhenger mye av krystallstrukturen som igjen påvirker produksjonskostnadene. Som eksempel har monokrystallinske celler med bare en

eneste krystall en virkningsgrad på 15-20%, men krever mye energi til produksjon.

Multikrystallinske celler har til sammenligning en virkningsgrad på 14-16%, men en rimeligere produksjon.

Tynnfilmteknologiene har generelt mindre virkningsgrad enn de krystallinske cellene, men har til gjengjeld bare behov for 1-5% av mengden råstoff som går inn i produksjonen av krystallinske celler. Virkningsgraden til tynnfilmteknologiene varierer fra type til type og produsent til produsent, men ligger typisk fra 7-10%. Noe som er betydelig lavere enn de krystallinske. Likevel er det fordeler ved tynnfilmteknologiene også utenom den redusert bruken av råstoffer. En fordel er muligheten for å produsere store flater i en operasjon som vil skape gunstige produksjonsprosesser. De kan også produseres med en sammensetning som gjør de bøyelige og tilpassingsvennlige til formede overflater. Selv om virkningsgraden er oppgitt som noe lavere enn krystallinske solceller, er dette tall som er produsert ved testing i optimale forhold med mye direkte sollys. Det har derfor, til tross for oppgitt virkningsgrad, likevel vist seg at tynnfilm-systemer i noen tilfeller produserer mer strøm enn krystallinske celler. Dette er særlig i mindre gunstige forhold som ved indirekte, diffus innstråling. (NVE *et al.*, 2016a)

De siste årene har det flere steder i verden også blitt forsket på å integrere solceller i dekket på trafikkerte veger. Det er kommet dit at pilotprosjekter innen denne type teknologi er realisert. I landsbyen Tourouvre-au-Perche i Frankrike ble en strekning på én kilometer dekket med 2800m² solcellepaneler i mai 2017. Disse panelene skal være beskyttet mot trafikk og dekkslitasje ved at de er dekket med en harpiksholdig overflate av silisium. Veien som er utviklet av transportinfrastrukturselskapet Colas i tett samarbeid med det franske nasjonale instituttet for solenergi, skal kunne gi nok strøm til å belyse alle gater i landsbyen med 5000 innbyggere (Alsén, 2017). Noe nyligere ble også verdens første solcellemotorvei bygget i Kina. Strekningen på to kilometer i den kinesiske byen Jinan åpnet 28. desember 2017 og består av tre lag. Øverst et lag med gjennomsiktig betong for å slippe gjennom lys til laget med solceller i midten og nederst et tett lag for å forhindre fuktighet å trenge opp i solcellene. Den gjennomsiktige betongen skal ha en ruglete overflate for å skape nesten tilsvarende friksjon som vanlig

asfaltdekke. Begge de to typene nevnt over skal tåle all type tungtrafikk og har slik sett ikke noen tydelige begrensninger innen motstandsevne mot trafikk. Dette er likevel teknologi som er tidlig i utviklingsfasen og som trenger å testes ut i flere miljøer og under ulike forhold.



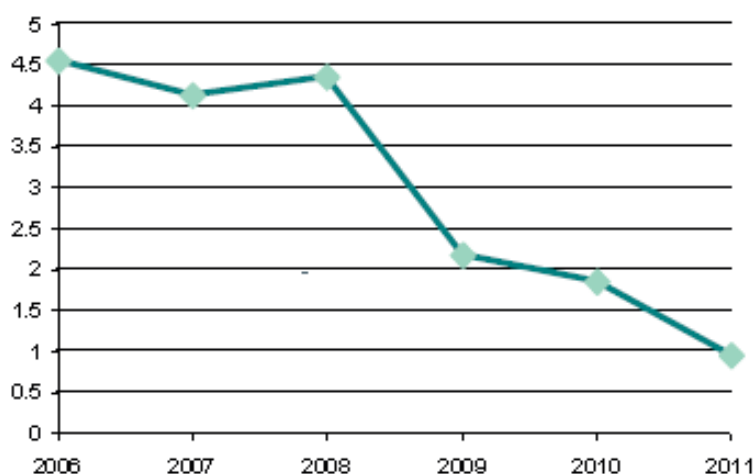
Figur 64: Motorvei med solceller i Jinan. (Ramsdal, 2018)

6. 1. 3. Resultat

Ved å integrere denne typen solcelleteknologi i vegdekke på Fosenbrua får vi muligheten til å utnytte solenergien på hele strekningen. Da solcellene vil bli lagt horisontalt vil vi ikke få optimal innstrålingsvinkel og solforholdene vil også sette en demper for potensialet for strømproduksjon. Likevel vil det være en stor verdi i forskningsmulighetene for teknologien. Blant annet vil man kunne teste ut bestandigheten til løsningene mot piggdekkslitasje. Noe som ikke vil være like aktuelt i Kina og Frankrike. Da teknologien er såpass ny og lite utprøvd er det lite tall på strømpotensial og et estimat på denne typen strømproduksjon vil da være vanskelig å fremstille.

6. 1. 4. Diskusjon

I samband med fergefri E39 har vegvesenet utredet ulike muligheter for strømproduksjon på fjordkryssinger. De har da vurdert muligheten for montering av solceller som tak over bruer. De har da gjort et anslag på at en slik løsning kan produsere opp mot 2 GWh/km/år med omtrent de samme solforholdene som i Trondheimsfjorden (Statens vegvesen, 2012). Dette tilsvarer en årlig produksjon på rundt 13 GWh for brustrekningen til Fosen. Denne løsningen vil være svært kostbar og etter dagens tall ikke økonomisk gunstig. Likevel viser utviklingen svært positive tall i form av kraftig prisreduksjon ved produksjon av solceller og en stadig økende virkningsgrad, også i diffuse lysforhold.



Figur 15: Pris for krystallinske solcellemoduler produser i Kina (US\$/Wp). (NVE et al., 2016a)

Denne utviklingen kan tyde på at løsninger med solceller på bru og vei kan være gunstig allerede innen en 5-10års periode (Statens vegvesen, 2012).

6. 2. Vindkraft

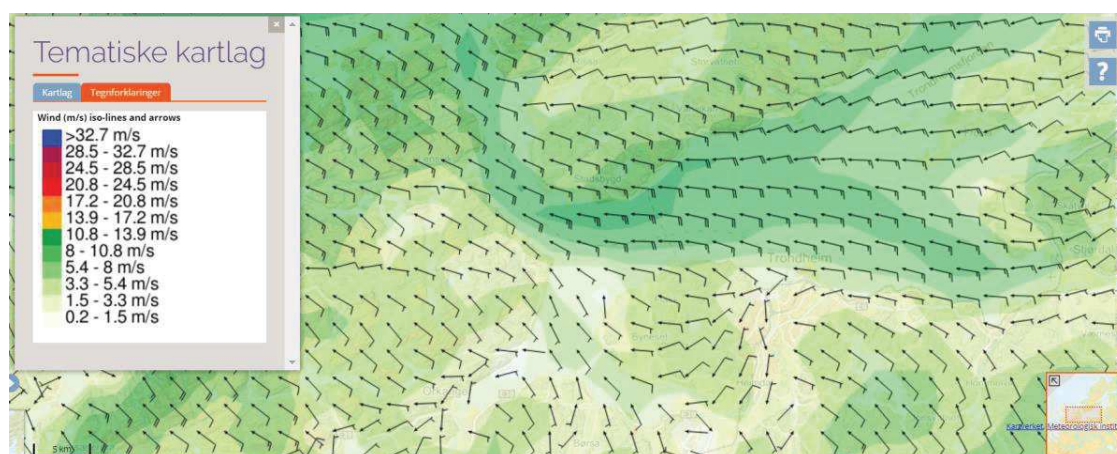
6. 2. 1. Værdata og teoribakgrunn

Gjennomsnittlig vindstyrke i Trondheim i perioden 1985 – 2015 har ligget på 4 m/s hele året (Time and Date AS, 2015).

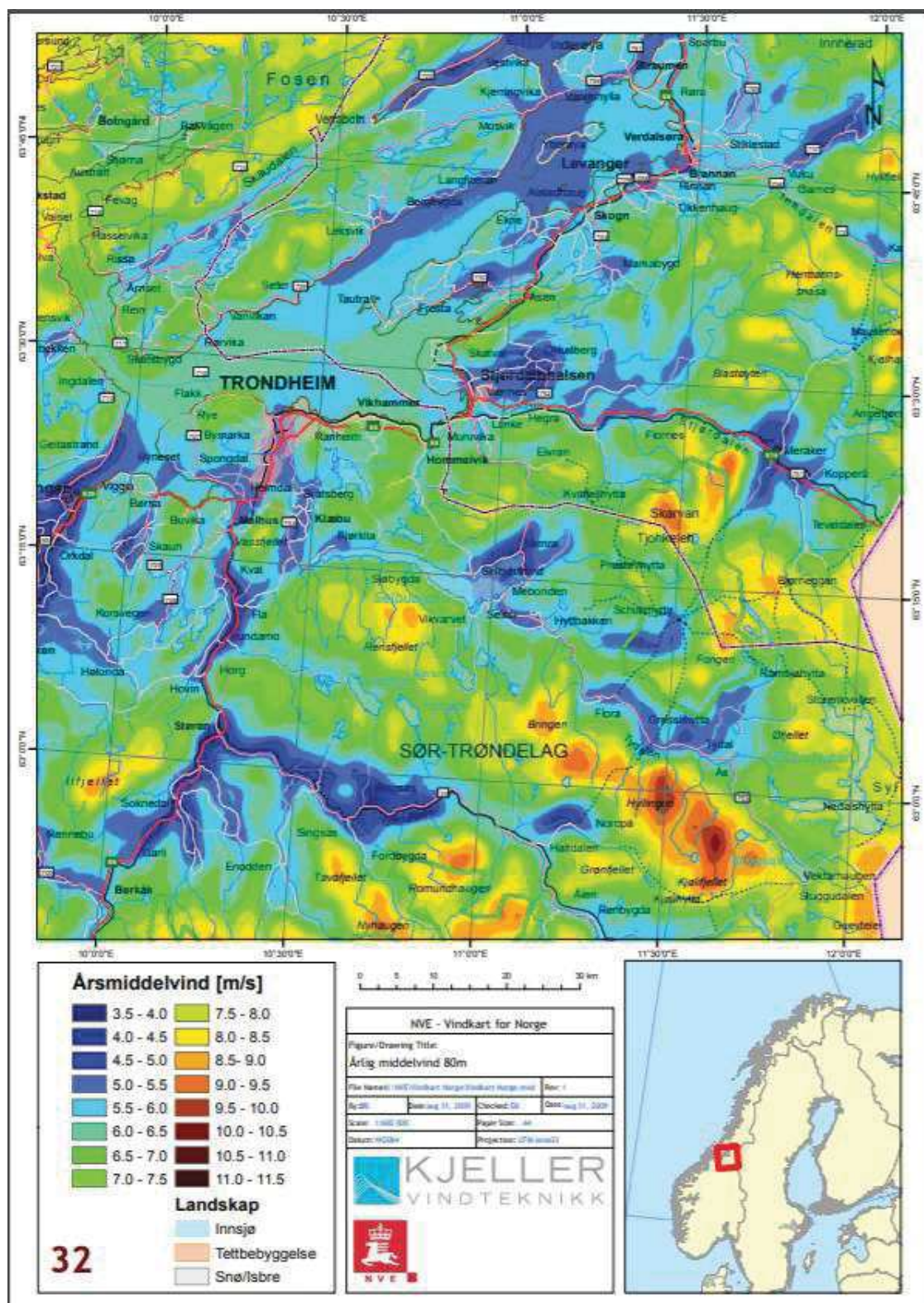
I samarbeid med Kjeller Vindteknikk har NVE utarbeidet vindkart for hele Norge.

Vindhastigheten vil avhenge av høyden målingene er gjort fra, og verdiene i vindkartene gjelder for 80 m høyde. Vindkart 32 viser Trondheimsregionen (NVE, 2009). Store deler av Trondheimsfjorden har en middelvind på 6,0 – 6,5 m/s. Dette inkluderer den aktuelle passasjen for Fosenbrua mellom Flakk og Rørvik.

Havområder er ofte mer vindutsatt enn innlandet; det er ofte høyere vindhastigheter, men samtidig jevnere og mer forutsigbare vindforhold. Dette er godt illustrert i figur 16.



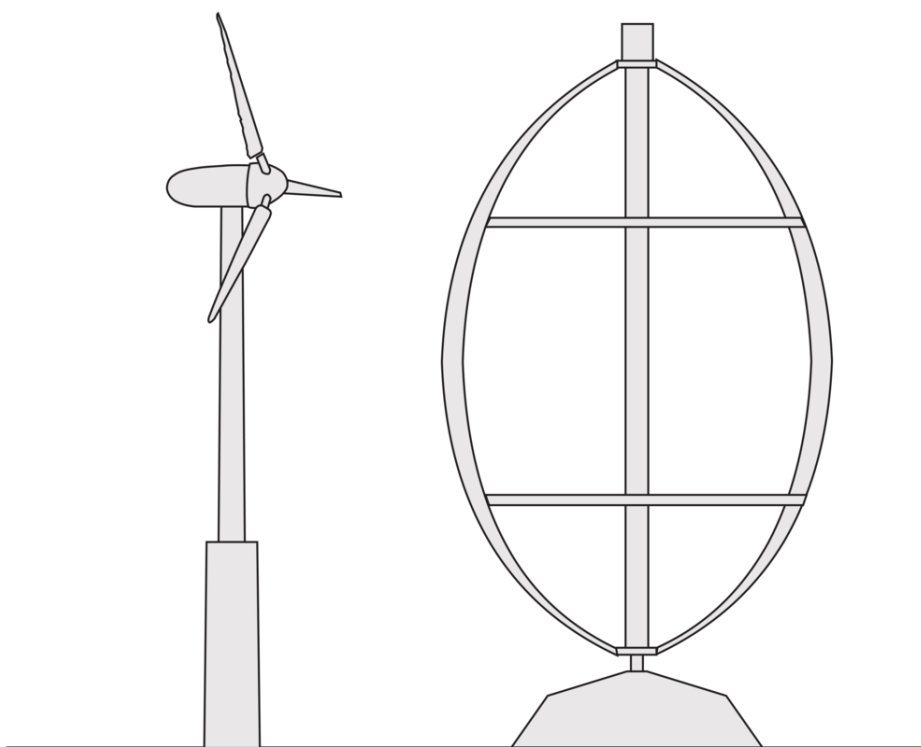
Figur 16: Vinddata for Trondheimsfjorden. (Geonorge, 2018)



Figur 17: Vindkart for Trondheimsregionen, årlig middelværdi ved 80 m høyde. (NVE, 2009)

6. 2. 2. Metode

Det finnes i hovedsak to ulike konsepter for vindturbiner; horisontale og vertikale turbiner. Forskjellen ligger i utformingen av akslingen på turbinen. Horisontale vindturbiner har horisontal aksling og roterer vinkelrett på vindretningen. Vertikale vindturbiner roterer derimot med vindretningen da akslingen er vertikal. Det er fordeler og ulemper med begge variantene.



Figur 18: Prinsipp for utforming av horisontale (høyre) og vertikale (venstre) vindturbiner. (Rosvold, Rauboti og Hofstad, 2017)

Horisontale vindturbiner

Horisontale turbiner er i dag, og har historisk sett vært mest vanlig. De er som oftest utformet med tre turbinblader på en aksling i et maskinhus på toppen av et tårn

(Rosvold, 2016). En generator i maskinhuset omdanner mekanisk energi til elektrisk energi.

Det er mye kunnskap rundt denne type utforming av vindturbiner, noe som har gjort de svært effektive. Effekten avhenger hovedsaklig av rotasjonsdiameteren, og kan finnes med følgende formel:

$$P = \frac{1}{2} A \times \rho \times v^3$$

A er rotasjonsarealet i m², ρ er vindens tetthet lik 1,225 kg/m³ og v er vindhastigheten i m/s (Eidsiva, 2011). Effekten angis i W, og er proporsjonal med arealet. Hvis vindhastigheten holdes konstant vil man ved å bygge større turbiner altså få større effekt.

I følge Betz' lov kan turbinen fange opp maksimalt 59% av energien i vinden (Rosvold, Rauboti og Hofstad, 2017). Vinden som går inn i turbinen bremses ned når den kinetiske energien tas ut. Dersom mer enn 59% av energien blir tatt ut vil oppstuvet luft inne i turbinen hindre ny vind i å komme inn. Dette fører til at turbinen til slutt stopper opp. Utformingen av vindturbinen er gjerne slik at 40% av energien tas ut.

En moderne vindturbin starter gjerne ved en vindhastighet på 3 m/s. Hvis hastigheten overskrider 25 m/s låses bladene for å unngå skade på turbinen. Det finner mange leverandører med ulike vindturbiner, men optimal vindhastighet ligger gjerne på rundt 13 m/s.

Vertikale vindturbiner

Vertikale vindturbiner er langt mindre utbredt. Hovedårsaken til dette er sannsynligvis at de er mindre effektive enn de tradisjonelle turbinene med horisontal aksling. De er gjerne mindre i størrelse, og med en liten rotasjonsdiameter blir effekten også redusert.

Fordelen med horisontale vindturbiner er derimot at de kan utnytte energien fra alle vindretninger. Det er også hensiktsmessig at generatoren kan plasseres under selve

turbinen, nær bakken. Dette gjør den lettere tilgjengelig for nødvendig vedlikeholdsarbeid.

6. 2. 3. Resultat

I Trondheimsfjorden er den gjennomsnittlige vindhastigheten 6 m/s. Dette er lavere enn den optimale vindhastigheten på 13 m/s. Det er fare for at det store deler av tiden vil være vindhastigheter lavere enn 3 m/s, som ikke kan utnyttes.

Turbinene må forankres til brua. For å få best mulig effekt fra vindenergien trengs store rotordiametre. Dette medfører at også tårnene blir høyere og gir en tyngre konstruksjon totalt sett. Store installasjoner vil dermed gi nye dimensjonerende krefter på brulegemet. Ved kraftige vindkast vil brua bli påført rotasjonskrefter, og jo høyere tårnene er jo større krefter. På en flytebru kan dette være særlig problematisk da brua ikke er forankret til fast grunn.

6. 2. 4. Diskusjon

På grunn av kreftene de vil påføre brulegemet er det konkludert med at store turbiner er lite aktuelt. Det er heller valgt å se på bruk av flere små turbiner.



Figur 19: Illustrasjon på bruk av flere små turbiner, her vertikale. Illustration: NorNet.no

En mulighet kan være såkalte "hybrid street lights", eller hybridgatelys. Det finnes i dag eksempler på steder hvor slike er bygd, blant annet i Shanghai. Gatelysene utformes med en liten vindturbin som genererer strøm til opplysning av vegen. Gatelysene kan kobles til strømnettet slik at overskuddsstrøm kan selges til industrien. Dette sikrer også at gatelysene til enhver tid har tilgang på nok strøm. Med mulighet for ekstern strømtilførsel i tillegg har man en reserveløsning for opplysning av brua skulle vindhastigheten være utenfor virkningsområdet til turbinen.



Figur 20: Konsept for lyktestolper med vinturbiner og solceller, laget av Green Urban Energy. (Mainhold, 2009)

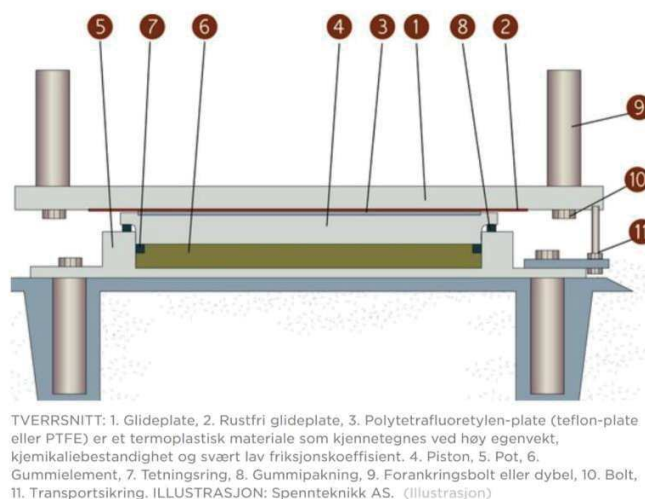
Phono Solar produserer slike hybridgatelys. En modell har en effekt på 300W tilsvarende 2625 kWh årlig (Phono Solar, u.d.). Gatelysene er utstyrt med LED-lys med en effekt på 30W. Da gjenstår 270W tilsvarende cirka 2365 kWh årlig. Vindhastigheten og heller ikke solmengden er spesifisert, så det vil sannsynligvis være en noe lavere effekt på Fosenbrua. Gatelysene fra Phono Solar anbefales å plasseres med 20 – 25m avstand. Med en bru på 6,7km svarer dette til rundt 300 gatelys. Dersom effekten på 270W er reell kan dette produsere 709 500 kWh per år.

6.3. Ledd

6.3.1. Værdata og teoribakgrunn

En bru mellom Flakk-Rørvik bygget som flytebru vil i hovedsak bli påført laster langs med og vinkelrett på kjøreretningen. Dimensjonerende laster sideveis er vind, bølger og vannstrømmer, og på langs vil det kunne være eventuelle tvangskrefter på grunn av termiske laster og krefter på grunn av momenter. Løsningen på termiske utvidelse er ofte å la brua få bevege seg fritt mellom pongtongene på glidelager og dermed verken få noen tvangskrefter eller momenter. Spenneteknikk AS er en leverandør av slike løsninger i en produktserie som heter TOBE, som har en følgende oppbygging:

TOBE® potlager er utformet som en sylinder (pot) med stempel (piston). Mellom pot og piston ligger en gummipute, produsert i kulderesistent gummi. Gummiputen er fullstendig omsluttet og kan betraktes som et flytende medium under trykk, noe som derved tillater rotasjon mellom lagerdelene (KB Spenneteknikk AS, u.d.).



TOBE potlager er i stand til å bevege seg inntil 100mm en retning og kan rotere inntil 20‰.

Flytebruer i dag er enten stive og tar opp momenter på tvers av kjøreretning, eller så er de leddet og forankret sideveis. Det er altså lite ønsket med sideveis forskyvning i dagens konstruksjoner. Leddet flytebru uten sideveis forankring er et konsept foreslått av blant annet Multiconsult, og skal fungere som et sykkelkjede. Når brua får forskyve seg til å ligge som en bue vil strekkbelastningen ved forankringene bli mindre. En leddet

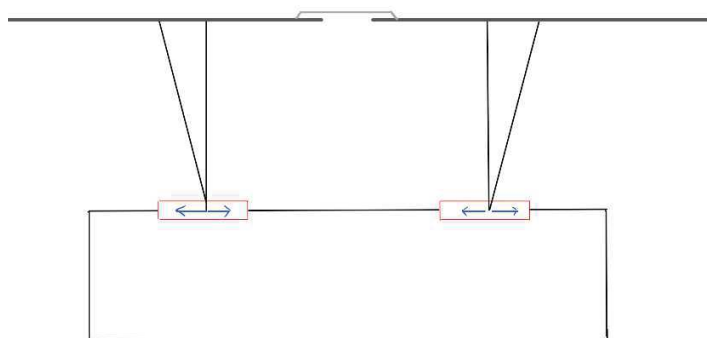
flytebru vil være gunstig ved lange, dype overganger, og vil derfor egne seg over Trondheimsfjorden.

Flere konsulentfirma i Norge har sett på muligheten med kjedet flytebru og mener det er gjennomførbart (Seehusen, 2011). Den største utfordringen de ser er utviklingen av et ledd som tåler påkjenningen uten betydelig vedlikeholdsbehov. For at en bru konstruert som et sykkelkjede skal være kjørbar må også bevegelsene være rolige og kontrollerte.

6. 3. 2. Metode

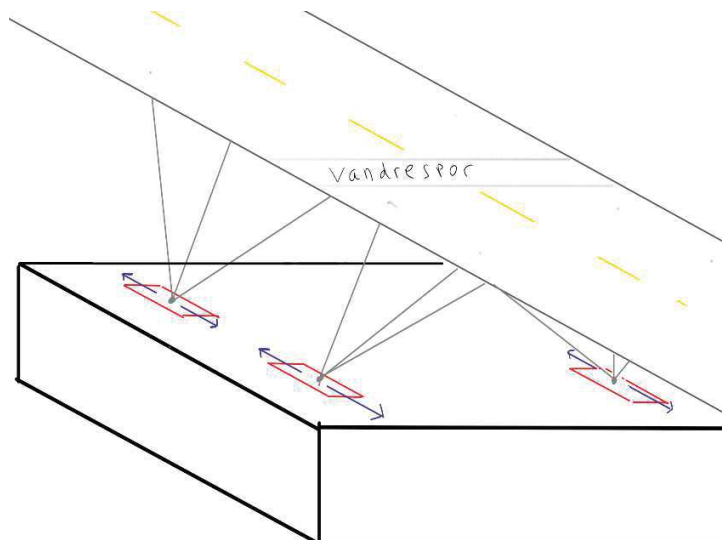
Det finnes per i dag ingen bruer hvor leddene som sammenkobler elementene kan omdanne bevegelsesenergien om til elektrisk energi. Konseptet flytebru med energiproduserende ledd er foreslått utredet av universitetslektor Jomar Tørset og utredet av gruppen. Det er drøftet to mulige konsept, og antatt effekt er kalkulert for det ene konseptet. Det listes opp fordeler og ulemper for hvert konsept.

Konsept 1 er energiproduserende ledd. Her vil hvert ledd produsere strøm uavhengig av hverandre. En enkel skisse er vedlagt for å vise tenkt sammenkobling av bruelementene.

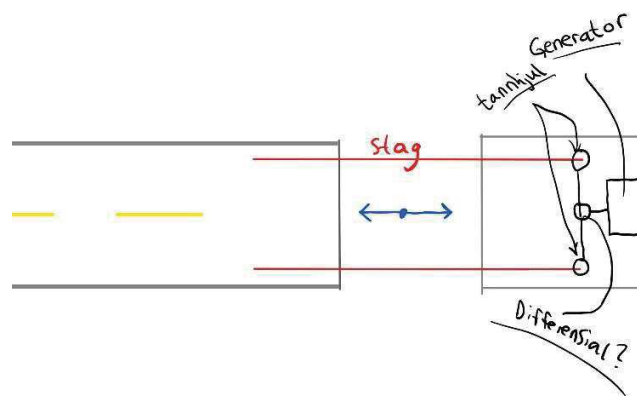


Fordeler: Nye ledd som tåler forskyvningene; strøm produseres av alle horisontale bevegelser; kan serieproduseres; utvidelse i lengderetning kan tas opp i hvert ledd.

Ulemper: Mange enheter som skal produsere fører til flere vedlikeholdspunkt og så videre; ledd for en flytebru må designes helt på nytt.

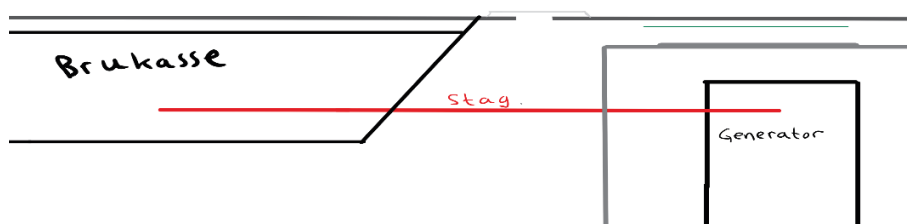


Konsept 2 er energiproduserende endeforankring. Her tas energien fra arbeidet utført av strekkraften opp. En enkel konseptskisse er vist.



Fordeler: kan produsere strøm med en enhet ved endeforankring; færre vedlikeholdspunkt; ledd for flytebru trenger bare forbedring (les: POT-lager).

Ulemper: bevegelser i lengderetning tas kun opp i endeforankring.



6. 3. 1. Resultat

For å gjøre et overslag av kreftene som må tas opp i konstruksjonen ser vi på brua som et tau påkjent av en jevnt fordelt last lik q som er F ganger antall pongtonger dividert med lengden. Så ser vi på strekkbelastningen konstruksjonen må ta opp. Beregninger

foretas kun for endeforankringene for å holde det enklest mulig. Det sees på en tidevannshastighet på 0,5 knop (Strøm *et al.*, 2017), tilsvarende cirka 0,26 m/s som tas opp i pongtonger med vått areal lik 126m^2 .

Ut i fra overslag som ble gjort vil strekk i brukonstruksjonen på grunn av tidevannsstrøm kunne produsere 48,3MWh i året. Det forutsetter 200m utslag som fører til 16,4m lengdeutvidele av brua og 0,26 m/s vannstrøm og produksjon 24 timer i døgnet med en utnyttelsesgrad på 60%. En gjennomsnittsvind på 6 m/s som virker ortogonalt av bruen vil kunne gi en motsatt rettet kraft mye høyere enn den av tidevannskraften.

Uregelmessige og ugunstige vind- og vannstrømmer vil derfor kunne føre til uregelmessig strømproduksjon. Krefter i endeforankring på grunn av tidevannsstrøm er estimert til 505,5kN. Til sammenligning kan vindlaster føre til krefter i endeforankring på 79,8MN ved 20 m/s vindstyrke.

6. 3. 2. Diskusjon

En løsning på uforutsigbar vind kan kunne være fangarmer eller større pongtonger som tar opp kreftene vannstrømningene. På grunn av kreftene fra vindlast vil nok energiproduserende ledd kunne skape mer strøm enn energiproduserende endeforankring.

For å kunne ha et utslag på 200m hver vei med 240m bruelement må det skapes ledd som klarer rotasjon på 70‰. Et POT-lager fra nevnte produsent vil måtte kunne tåle 3,5 ganger mer rotasjon.

6. 4. Piezoelektrisitet

6. 4. 1. Teoribakgrunn

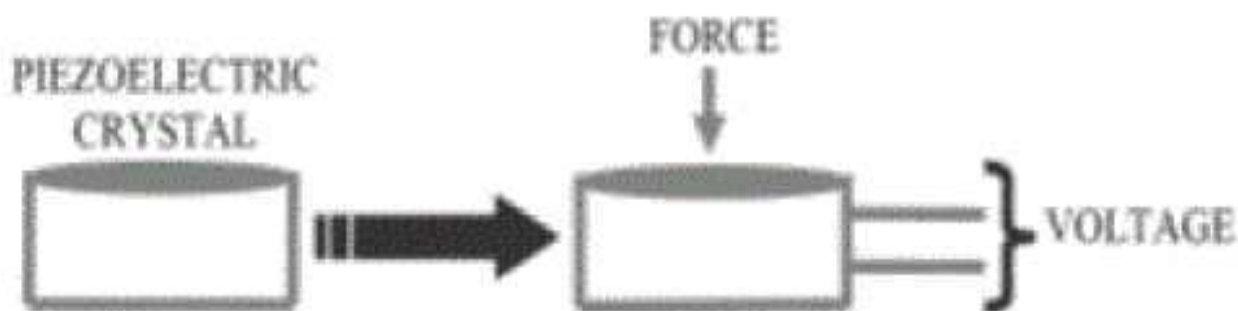
Piezoelektrisitet oppstår i visse keramiske, krystalline og biologiske materialer når de kommer under mekanisk stress (Wikipedia, 2018). Altså, når de klemmes sammen.

Dette er en reversibel egenskap, så motsatt vil materialet komprimeres eller strekkes dersom det utsettes for et eksternt elektrisk felt. Denne effekten blir utnyttet i utstyr som skal detektere og produsere lydsignaler, i komponenter som skal generere høye spenninger, i kvarts-klokker, i lightere og tenningsknappen på gassgriller.

Piezoelektronikk er en veletablert vitenskap, og har stor rekkevidde i industrien.

Typiske materialer som brukes for å generere piezoelektrisitet er (engelsk):

- Quartz
- Lead zirconate titanate ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ med $0 \leq x \leq 1$), kjent som PZT
- Barium titanat (BaTiO_3)
- Bismuth ferrite (BiFeO_3) – et lovende alternativ til blyfrie materialer.



Figur 21: Prinsipp for effekten av piezoelektrisitet (Kour og Charif, 2016).

På 2000-tallet, har det blitt lansert en idé om at man kan bruke denne effekten til å generere strøm gjennom biltrafikk ved å plassere piezoelektriske komponenter under vegbanen på trafikkerte veger.

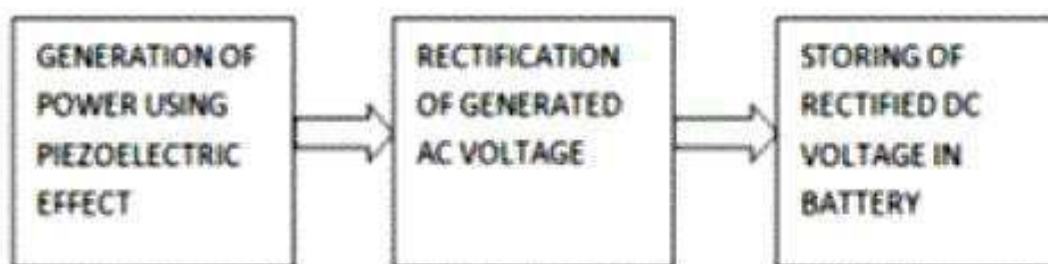
Flere firmaer har dukket opp og startet prosjekter her og der for å forske på potensialet til denne anvendelsen av teknologien.

Israelske Innowatech var tidlig ute med positive prognoser for dette konseptet. I en rapport fra 2016, skrevet av Raveet Kour og Ahmad Charif ved ONCampus Coventry, har de enkelt utredet for konseptet og sammenfattet data fra feltet (Kour og Charif, 2016). Rapporten er en enkel fremstilling av temaet, men den viser til data fra flere av de mest kjente aktørene.

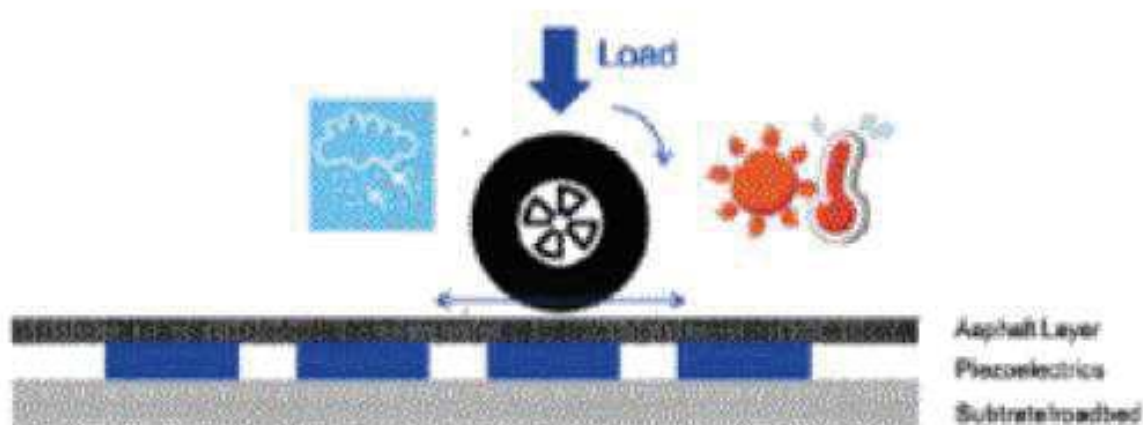
Flere mindre installasjoner har blitt gjort, der man høster energi fra fotgjengere (Chapa, 2008) og dansende mennesker på nattklubb (Rosenthal, 2008).

6. 4. 2. Metode

Konseptet går ut på at ved å plassere piezoelektriske elementer under vegbanen, skal man kunne «høste» energien fra passerende biler ved å lagre strømmen i batterier som er utplassert langs vegbanen. Denne strømmen kan igjen bli brukt av de omkringliggende gatelysene og elektriske skilt langs vegbanen.



Figur 22: Blokkdiagram (Kour og Charif, 2016).



Figur 23: Tverrsnitt av piezoelektrisk vegoverbygning (Kour og Charif, 2016).

For å teste potensialet til de ulike aktørenes piezoelektriske komponenter, måles produksjonen av elektrisitet i et måleområde. Resultatene måles over en strekning på en kilometer i én fil, og tar høyde for antall passerende biler per time.

Her er det samlet inn data fra Innowattech, Genziko, ODOT, og Berkley og Virginia Tech.

6. 4. 3. Resultat

Tabell 1: Data oppgitt av ulike aktører (Kour og Charif, 2016).

Parameter	Genziko	ODOT	Innowattech	Berkeley and Virginia Tech
Power per km (single lane)	13-51 MW	486 kW	100-200 kW	0.0018-0.5 kW
Vehicles per hour (single lane)	600-2250	600	600	600
kW per km per vehicle per hour	21.6-22.6	0.81	0.16-0.3	.000003-0.00083

6. 4. 4. Diskusjon

Som vi ser er det et stort gap mellom høyeste og laveste målte verdier. Alle data er spredt, og det er knyttet stor usikkerhet til validiteten til de ulike dataene, da det er stor grad av hemmelighet knyttet til de ulike patentene fra hver aktør. Berkley og Virginia Tech, er den aktøren med minst økonomisk interesse i å gjøre dette konseptet kommersielt, og dataene de viser til er et sobert anslag, målt opp i mot Genziko. Det skal også nevnes at flere av disse aktørene gikk hardt ut i tiden før 2010, og lovte gode resultater. Siden dette har det vært lite fremgang og nyvinninger på feltet, og det kan se ut som det koster mer enn det smaker å utvikle denne teknologien. Genziko-sjefen er også i denne tiden blitt siktet for bedrageri (The United States Attorney's Office, 2015), og hele hans foretak settes derfor i dårlig lys.

Piezoelektrisitet er en teknologi som er lovende, men med for stor grad av usikkerhet tilknyttet effekten til at den kan brukes i dette prosjektet. Det trengs nye data, flere aktører og ideelt sett open source-forskning, så man kan dele erfaringer og finne løsningen på problemet.

7. Vurdering av Fosenbrua som energikonstruksjon

7. 1. Sammenligning av metoder

Det er blitt sett på flere lovende metoder for strømproduksjon i Trondheimsfjorden, men noe som går igjen for de ulike teknologiene er manglende forskning innen utnyttelse av energi i forhold med middels til lave energipotensialer. Som eksempel er det sett på bølgekraft i en fjord med der bølgehøyden sjeldent er over 0,5m. Selv om dette gir mye mindre energipotensial enn de forhold det forskes mest på, som ute i havet med meter høye bølger, vil det fortsatt kunne være store mengder energi som kan gi grunnlag for miljøvennlig strømproduksjon. I tillegg vil dette være forhold som er mer gunstige med tanke på slitasje og vedlikeholdskostnader. I dette prosjekt er det likevel sett at bølgekraft har lite å bidra med i arbeidet mot en nullbru.

I veien mot en nullbru har det også blitt vurdert teknologier som utnytter Piezoelektrisitet til å ikke kunne gi betydelige bidrag med dagens teknologier. Metoden anses lovende, men alt for stor usikkerhet tilknyttet effekten og at det er utført for lite forskningsarbeid innen feltet gjør det vanskelig å gjøre en fullverdig vurdering av potensialet. Det samme gjelder strømproduksjon ved utnyttelse av energi i leddene på brua.

Tanken om å utnytte energien i ledd på bruer til å produsere strøm er nokså ny og så vidt gruppen vet er det enda ikke utført annen forskning på dette enn det som fremgår i denne rapporten. Teknologien baserer seg også på et brukonsept som heller ikke er utprøvd. Dette gjør at det er snakk om løsninger som trenger langt mer utredning før det er mulig å si noe om gjennomførbarheten og eventuelt hvor gunstig effekten vil være. Gruppen vurderer imidlertid konseptet som lovende og mener det vil være verdt å utrede ytterligere.

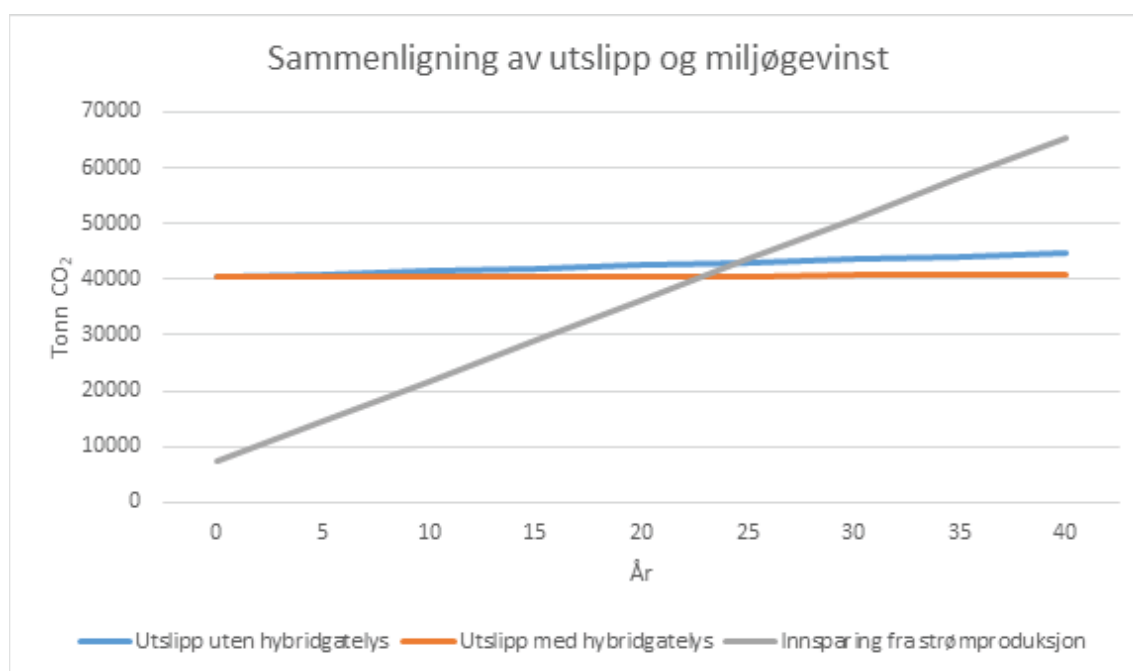
Teknologiene som er igjen som de mest lovende for integrering på Fosenbrua er strømproduksjon ved sol- og vindkraft. Dette er begge teknologier som er kommet langt i utviklingen også for forhold som ikke er optimale. Vindkraft er spesielt godt utviklet for

norske forhold, men de optimale dimensjonene for strømproduksjon vil kunne påføre så store laster på brua at gjennomførelsen blir urealistisk. Vindkraft er derfor tenkt utnyttet ved bruk av hybridgatelys. Selv om dette ikke vil gi særlig stor strømproduksjon vil det kunne være med å bidra uten store ekstrakostnader. Solkraft har stort potensiale for strømproduksjon og med den stadige utviklingen av teknologien vil dette potensialet bare øke også for løsninger som solceller i vegdekke.

På bakgrunn av vurderingen av hvilke løsninger som virket mest lovende og hvilke teknologier det var grunnlag for å si noe om potensiell strømproduksjon er det valgt to metoder for videre vurdering av miljøeffekt: Sol- og vindkraft.

7. 2. Livsløpsvurdering

Med sol- og vindkraft som strømgenererende energikilder er det gjort en vurdering av muligheten for å lage Fosenbrua som en null- eller plussbru. Beregninger er basert på tall presentert i denne rapporten, samt rapporten «Metode for beregning av energiforbruk og klimagassutslipp for vegprosjekter» av Statens vegvesen v/Johanne Hammervold. Fullstendig utredning finnes i vedlegg 3.



Resultatet av livsløpsvurderingen er presentert i diagrammet over som viser sammenhengen mellom CO₂-avtrykket fra bruas bygge- og bruksfase og tonn CO₂-utslipp spart ved miljøvennlig strømproduksjon. I følge denne vurderingen vil bruas CO₂-avtrykk være i null etter en 25års-periode. Denne vurderingen er basert på tall med stor usikkerhet og bør ikke sees på som en endelig vurdering. Likevel gir den en pekepinn på muligheten for å produsere en nullbru og miljøgevinsten ved å integrere strømproduserende løsninger på brua.

7. 3. Konklusjon

Det er mange spennende og lovende metoder å ta i bruk på veien mot en nullbru, men for gruppen virker sol- og vindkraft til å være de mest lovende med dagens teknologi. Brua kan likevel være interessant å bruke som en plattform for videre forskning innen andre teknologier som enda ikke har nådd sitt fulle potensiale. Det er da spesielt snakk om forskning på løsninger for mindre optimale forhold som kan utnytte middels eller lave energipotensialer. Mange av de løsningene vi har sett på krever bedre datagrunnlag og videre utredninger før de kan settes bort eller til live.

7. 4. Videre arbeid

Som videre arbeid bør de fleste av metodene beskrevet i denne rapporten utredes ytterligere og gjerne hver for seg. Spesielt er løsninger for strømproduksjon i ledd lite utredet og andre løsninger enn de presenterte her bør også undersøkes. Piezoelektrisitet er også et felt som virker lovende, men som har stort behov for videre utvikling for å kunne være konkurransedyktig.

8. Vedleggsoversikt

Vedlegg 1: Tankekart

Vedlegg 2: Beregning av krefter på leddet flytebru

Vedlegg 3: Livsløpsvurdering av broen

Vedlegg 4: Plakat

Vedlegg 5: Artikkel

9. Kilder

- Alsén, K. W. L. (2017) *Verdens første vei brolagt med solceller*. Tilgjengelig fra: <https://samferdselinfra.no/artikler/verdens-forste-vei-brolagt-med-solceller/407217> (Hentet: 4. februar 2018).
- Blindheim, S. og Sundgot, S. (2017) *Trafikkanalyse og potensielle virkninger av vegtiltak*. Ålesund: Norconsult AS.
- Chapa, J. (2008) *Energy-Generating Floors to Power Tokyo Subways*. Tilgjengelig fra: <https://inhabitat.com/tokyo-subway-stations-get-piezoelectric-floors/> (Hentet: 12. februar 2018).
- Eidsiva (2011) *Energi i vinden*. Tilgjengelig fra: http://hovedprosjekter.hig.no/v2011/tol/elektro/vindkraft/energi_i_vind.html (Hentet: 23. januar 2018).
- Fosenbrua AS (2017) *Styremøte for Fosenbrua AS*. Tilgjengelig fra: https://studntnu.sharepoint.com/:w:/r/sites/Ingenirfagligsystemtenkninggruppe16/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=%7BA4E892CE-57B6-48BF-ABC9-EA257028D212%7D&file=Oppgavebeskrivelse%20og%20visjon.docx&action=default (Hentet: 16. januar 2018).
- Fosenbrua AS (u.d.) *Fosenbrua.no*. Tilgjengelig fra: <https://fosenbrua.no/om-fosenbrua/> (Hentet: 16. januar 2018).
- Frydenlund, T. E., Flaate, K. og Østlid, H. (2013) *Strait Crossings 2013*. (231). Bergen: Statens Vegvesen. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/Fag/Publikasjoner/Publikasjoner/Statens+vegvesens+rapporter/attachment/514239?ts=140a4ee85f0&fast_title=svv%20rapport%20231.pdf.
- Irgens, F. (2008) *Statikk*. Fagbokforlaget.
- KB Spennteknikk AS (u.d.) *Spennteknikk*. Tilgjengelig fra: <http://www.spennteknikk.no/brosjyrer/TobeFR4.pdf> (Hentet: 7. februar 2018).
- Klimaloven (2017) *Lov om klimamål*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/ny-klimalov/id2547098/> (Hentet: 16. januar 2018).
- Klimaplan for Trondheim (2017) *Kommunedelplan: Energi og klima 2017 - 2030*. Tilgjengelig fra: https://www.trondheim.kommune.no/globalassets/10-bilder-og-filer/10-byutvikling/miljoenheten/klima-og-energi/vedlegg-1---kommunedelplan-energi-og-klima--171116_endelig.pdf (Hentet: 16. januar 2018).
- Kour, R. og Charif, A. (2016) *Piezoelectric Roads: Energy Harvesting Method Using Piezoelectric Technology*. Tilgjengelig fra: <https://www.omicsonline.org/open-access/piezoelectric-roads-energy-harvesting-method-using-piezoelectrictechnology-ier-1000132.php?aid=73891> (Hentet: 12. februar 2018).
- Nilssen, U. (2014) *Hvor mange soltimer har du?* Tilgjengelig fra: <http://www.yr.no/artikkel/hvor-mange-soltimer-har-du-1.11558246> (Hentet: 31. januar 2018).
- NVE (2009) *Vindkart for Norge*. Tilgjengelig fra: https://www.nve.no/media/2462/vind_80m_kartbok1a_4140.pdf (Hentet: 31. januar 2018).
- NVE et al. (2016a) *Solenergi*. Tilgjengelig fra: <http://www.fornybar.no/solenergi/teknologi> (Hentet: 4. februar 2018).
- NVE et al. (2016b) *Bølgekraft*. Tilgjengelig fra: <http://www.fornybar.no/nye-teknologier/bolgekraft#top> (Hentet: 31. januar 2018).

- Phono Solar (u.d.) *Hybrid Street Light*. Tilgjengelig fra: http://www.phonosolar.com/Down/PDF/PS_hybrid-street-light_US.pdf (Hentet: 5. februar 2018).
- Ramsdal, R. (2018) Kina har bygget verdens første solcelle-motorvei. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/kina-har-bygget-verdens-forste-solcelle-motorvei/415578>.
- Rosenthal, E. (2008) *Partying helps power a Dutch nightclub*. Tilgjengelig fra: <http://www.nytimes.com/2008/10/24/world/europe/24rotterdam.html> (Hentet: 12. februar 2018).
- Rosvold, K. A. (2016) *Vindturbin*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/vindturbin> (Hentet: 4. februar 2018).
- Rosvold, K. A., Rauboti, J. og Hofstad, K. (2017) *Vindkraftverk*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/vindkraftverk> (Hentet: 4. februar 2018).
- Seehusen, J. (2011) Denne broen kan bevege seg 600 meter. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/denne-broen-kan-bevege-seg-600-meter/275276>.
- Statens vegvesen (2012) *Ferjefri E39-Subproject Energy*.
- Strøm, B. F. et al. (2017) *Mulighetsstudie av energiproduserende flytebro over Trondheimsfjorden*. NTNU. Tilgjengelig fra: <https://fosenbrua.no/wp-content/uploads/2017/05/NTNU-studentoppgave-gruppe-22-TestsenterBolgerVindEnergi.pdf>.
- The United States Attorney's Office (2015) *Alpharetta Business Owner Convicted of Defrauding NASA and National Science Foundation of Almost \$800,000*. Tilgjengelig fra: <https://www.justice.gov/usao-ndga/pr/alpharetta-business-owner-convicted-defrauding-nasa-and-national-science-foundation> (Hentet: 12. februar 2018).
- Time and Date AS (2015) *Klima og gjennomsnittsvær i Trondheim, Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.timeanddate.no/vaer/norge/trondheim/klima> (Hentet: 31. januar 2018).
- Wikipedia (2018) *Piezoelectricity*. Tilgjengelig fra: <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity> (Hentet: 12. februar 2018).

Realistisk

Sikker strømproduksjon

Finansiering

Selge overskuddsstrøm
til industrienGünstig for
TrønderEnergiØkonomisk
günstigBEHOV og
LØSNINGSELEMENTERFergefri passasje
mellom Fosen
og TrondheimSamfunns-
økonomisk
günstigUtvikle
turistnæringen

Landemerke

Bru

Funksjonelt

Kortere reisetid
for pendlereEngasjement
for den reelle
FosenbruaTrondheim som
en teknologi-
og miljøby

Innovasjon

Prøve ut nye
metoderInspirere
andre land
og kommuner
til å tenke
bærekraftigInternational
anerkjennelseBruke media
aktivtLage en
prototypeKlimamålene til
regjeringen og
Trondheim kommune

Nullutslippsbru

Bærekraft i
alle leddLangsiktig
tankegangMaterialbruk
Bølgekraft
Vindkraft
Solceller
Piezoelektrisitet

Vedlegg 2

Beregning av krefter på leddet flytebru

$$F = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A = 4,37 \text{ kN}$$

$$q = \frac{F * 28}{L} = 19 \text{ N/m}$$

$$S_{tot} = \sqrt{\left(\frac{qL^2}{8f}\right)^2 + \left(\frac{qL}{2}\right)^2} = \underline{\underline{505,5 \text{ kN}}}$$

Vi merker oss at kraften mellom elementene er omvendt proporsjonal med utslaget f .

Derfor er det gunstig med en bru som ikke er helt stiv.

A=arealet mot strømmereining, her: $18 * 7 = 126 \text{ m}^2$ (neddykket pongtongvolum på $55 \text{ m} \times 18 \text{ m} \times 9 \text{ mm}$)

ρ = Tettheten på fluid, her: 1025 kg/m^3

v =strømmehastighet, her: $0,26 \text{ m/s}$

f = Utslag

q = jevnt fordelt last

Δ =endring i lengde av brua. Tilnærmet lik $\Delta = L * \left[1 + \frac{8}{3} * \left(\frac{f}{L}\right)^2 \right] - L$, her: 16,4 m

(Irgens, 2008)

Effekten P fra fullt negativt til positivt utslag kan videre finnes med $2 * S_{tot} * \frac{\Delta}{t}$, her:

9,2 kW, (48,4 MWh med en utnyttelsesgrad på 60%)

*Til sammenligning vil strekk på grunn av vind komme opp i 79,8 MN hvilket er 160 ganger mer last enn fra tidevann. (antar en sideflate på brua til $6 \text{ m} * 6500 \text{ m}$ og vind på 20 m/s .*

*Beregnet med trykk + sug = $2 * \text{trykk}$, og uten korreksjonsfaktorer)*

Livsløpsvurdering av broen

Arbeidet mot en nullutslippsbro er avhengig av energipotensialer i fjorden, samt utslipp knyttet til bygging og drift av broen. Da prosjektet med Fosenbrua er i en svært tidlig fase og det foreligger lite detaljplaner for broen er det vanskelig å fastslå nøyaktige mengder til beregning av miljøbelastning. Med tanke på energipotensialer er det også få nøyaktige målinger og store usikkerheter på utnyttingsgraden ved forskjellige løsninger. Det vil derfor ikke være grunnlag til å gjøre en detaljert livsløpsanalyse og det blir derfor her heller gjort en enklere vurdering av miljøbelastningene broen utgjør satt opp mot miljøgevinstene man kan få ved integrering av strømproduserende elementer på broen. Beregninger for miljøbelastninger er utført i henhold til rapporten «Metode for beregning av energiforbruk og klimagassutslipp for vegprosjekter» av Statens vegvesen v/Johanne Hammervold.

Mengder

Lengde: 6,7km

Bredde: 12m

Effektiv brooverflate: 80 400m²

CO₂-avtrykk fra brokonstruksjonen

Byggefasen

Tabell 5: materialmengder per m² effektiv bruoverflate for betong- og stålruer

Material	Enhet	Betongbru	Stålbru
Betong	m ³ / m ²	1,31	0,71
Stål	tonn / m ²	0,00	0,22
Armering	tonn / m ²	0,22	0,11
Asfaltmembran	m ² / m ²	1,00	1,00

Kilde: (Hammervold, 2009)

Asfaltmembran benyttes som oftest i en tykkelse på 12mm som tilsvarer en tetthet på 26kg/m².

I tillegg må også asfaltering tas hensyn til. Denne utregningen gjøres etter følgende formler (Hammervold, 2009):

$$AS_{veg} [tonn] = (Tsl * Lv * Bv * 2,5 \text{ tonn/m}^3) * 25/40$$

Der:

Tsl : Tykkelse på slitelag (avhenger av ÅDT)

Lv : Lengde på veglenken

Bv : Vegbredde (Vegbredde inkluderer skulderbredde)

Ved å omforme denne får vi tonn/m² effektivt bruareal:

$$AS_{veg} [tonn/m^2] = (Tsl * 2,5 \text{ tonn/m}^3) * 25/40$$

Tsl blir 0,06m dersom man går ut fra en ÅDT mellom 1500 og 4000. Får da:

$$AS_{veg} [tonn/m^2] = (0,06m * 2,5 \text{ tonn/m}^3) * 25/40 = 0,09 \text{ tonn/m}^2$$

Tabell 2: Koeffisienter for klimagassutslipp

Material	Enhet	kg CO ₂ -ekvivalenter
Asfalt	tonn	30,60
Pukk	tonn	2,39
Asfaltert grus	tonn	28,50
Sprengstein	tonn	1,80
Asfaltmembran	kg	0,21
Stål	tonn	1 610,00
Betong	m ³	236,00
Armering	tonn	837,00
PE-skum	kg	2,47
Sprengstoff	kg	2,38
Aluminium	tonn	7 033
Maling	tonn	2 841,00
Kobber	tonn	1 693,00
Plast	tonn	2 264,00
Transportarbeid	tkm	0,13
Diesel, anleggsmaskineri	l	3,19
Elektrisitet	kWh	0,21

Kilde: (Hammervold, 2009)

Material	Mengde	Mengdeenhet per effektive bruareal	CO ₂ -ekvivalent	Utslipp [kg CO ₂ /m ²]
Betong	1,31	m ³ /m ²	236,00kg CO ₂ /m ³	309,16
Armering	0,22	tonn/m ²	837,00kg CO ₂ /tonn	184,14
Asfaltmembran	26,00	kg/m ²	0,21kg CO ₂ /kg	5,46
Asfalt	0,09	tonn/m ²	30,60kg CO ₂ /tonn	2,75
SUM:				501,51

Drift og vedlikehold

Drift og vedlikehold er ikke inkludert i utregninger for bro i rapporten til Statens vegvesen, men skal inkluderes ved å legge til brostreknningen ved utregning av veg i dag. I vår vurdering regner vi derfor ut utslippene for drift og vedlikehold i henhold til disse utregningene. Drift- og vedlikeholdsperioden er satt til 25 år. Som CO₂-ekvivalent for strømbruk bruker vi oppdaterte tall fra NVE på **0,53kg CO₂/kWh** (NVE, 2017). Dette tallet reflekterer ikke direkte utslipp fra norsk kraftproduksjon, men tar hensyn til sammenhengen mellom kraft og utslipp knyttet til ordningen med varedeklarasjoner og opprinnelsesgarantier basert på RE-DISS prosjektets beregningsmetode.

Utslipp fra vedlikehold:

$$AS_{vedl\ veg} [tonn/m^2] = 0,65 * AS_{veg} * 2$$

Her er det antatt 65 % av opprinnelig asfaltmengde benyttet ved reasfaltering og 2 reasfalteringer i løpet av 25 år. $AS_{veg} = 0,09 \text{ tonn/m}^2$

$$AS_{vedl\ veg} [tonn/m^2] = 0,65 * 0,09 \text{ tonn/m}^2 * 2 = 0,12 \text{ tonn/m}^2$$

Utslipp fra reasfaltering i en 25års periode:

$$0,12 \text{ tonn/m}^2 * 30,60 \text{ kg CO}_2/\text{tonn} = 3,67 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$$

Årlig utslipp fra reasfaltering:

$$\frac{3,67 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2}{25 \text{ år}} = 0,15 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$$

Utslipp fra drift:

Antall kWh forbrukt til drift gjennom 25 år:

$$EL_{lys, veg\ i\ dagen} [kWh] = 26,5 \text{ kWh} / \text{lm} * L_{lys} * 25 \text{ år}$$

26,5 kWh / lm = el-forbruk per løpemeter belyst i ett år

L_{lys} : antall løpemeter belyst blir antatt lengden til broen i meter.

For belysning per løpemeter får vi da:

$$EL_{lys, veg\ i\ dagen} [kWh] = 26,5 \text{ kWh} / \text{lm} * 25 = 662,5 \text{ kWh/lm}$$

Med CO₂-ekvivalent på 0,53kg/kWh blir utslipp for drift i 25 år:

$$662,5 \text{ kWh/lm} * 0,53 \text{ kg/kWh} = 351,12 \text{ kg CO}_2/\text{lm}$$

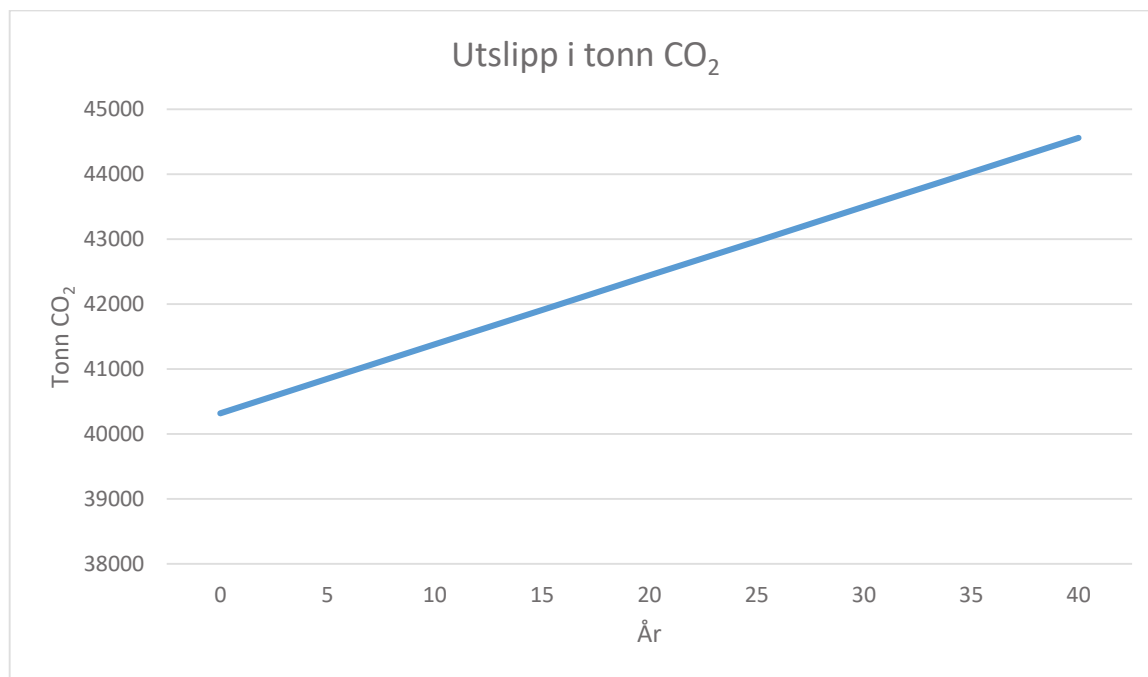
Årlig utslipp for drift:

$$\frac{351,12 \text{ kg CO}_2/\text{lm}}{25\text{år}} = 14,04 \text{ kg CO}_2/\text{lm}$$

Totalt utslipp

	UTSLIPP		MENGE		TOTALT UTSLIPP	
BYGGEFASEN	501,51	kg CO ₂ /m ²	80 400	m ²	40 321	tonn CO ₂
VEDLIKEHOLD	0,15	kg CO ₂ /m ²	80 400	m ²	12	tonn CO ₂ /år
DRIFT	14,04	kg CO ₂ /lm	6 700	m	94	tonn CO ₂ /år

Vi får da et utslipp fra byggefasen ved ferdigstilling av broen og deretter utslipp knyttet til drift og vedlikehold som kommer utover bruksfasen. Denne utviklingen av utslipp er vist i diagrammet under.



Miljøeffekt av integrerte strømproduserende konstruksjoner

Vi ser at drift og vedlikehold bidrar med en jevn økning av CO₂-avtrykket til broen ved reasfaltering og strømforbruk til belysning. Dersom man integrere løsningen med «hybrid street lights» beskrevet i kapittel 7.2.4 kan utslippene knyttet til drift bli kraftig redusert ved at all belysning drives av strøm produsert av vindkraft. Hybridgatelysene skal også kunne produsere et overskudd av strøm som kan leveres ut på strømnettet som «grønn» strøm og bidra med en besparelse av CO₂-utslipp ved å erstatte mindre miljøvennlige metoder for strømproduksjon. Det antas at hybridgatelysene på broen kan gi en årlig produksjon på rundt 0,7GWh i tillegg til strøm til belysning.

Det er også sett på andre produksjonsmetoder som piezoelektrisitet, utnyttelse av krefter i ledd, bølgekraft og solceller, men datagrunnlagene har vært mangelfulle og teknologier har vist seg å ikke være tilstrekkelig utviklet for gjeldende forhold. Det er derfor vanskelig å gi estimat på årlig produksjon for disse metodene, men solceller virker å være den mest lovende metoden i kombinasjon med vindkraft. Det er derfor disse metodene for strømproduksjon vi legger til grunn for denne livsløpsvurderingen.

Som beskrevet i kapittel 7.1.4 har vi med grunnlag fra lignende tilfeller gjort et estimat på at solceller som tak over hele Fosenbrua kan gi en årlig produksjon på rundt 13GWh.

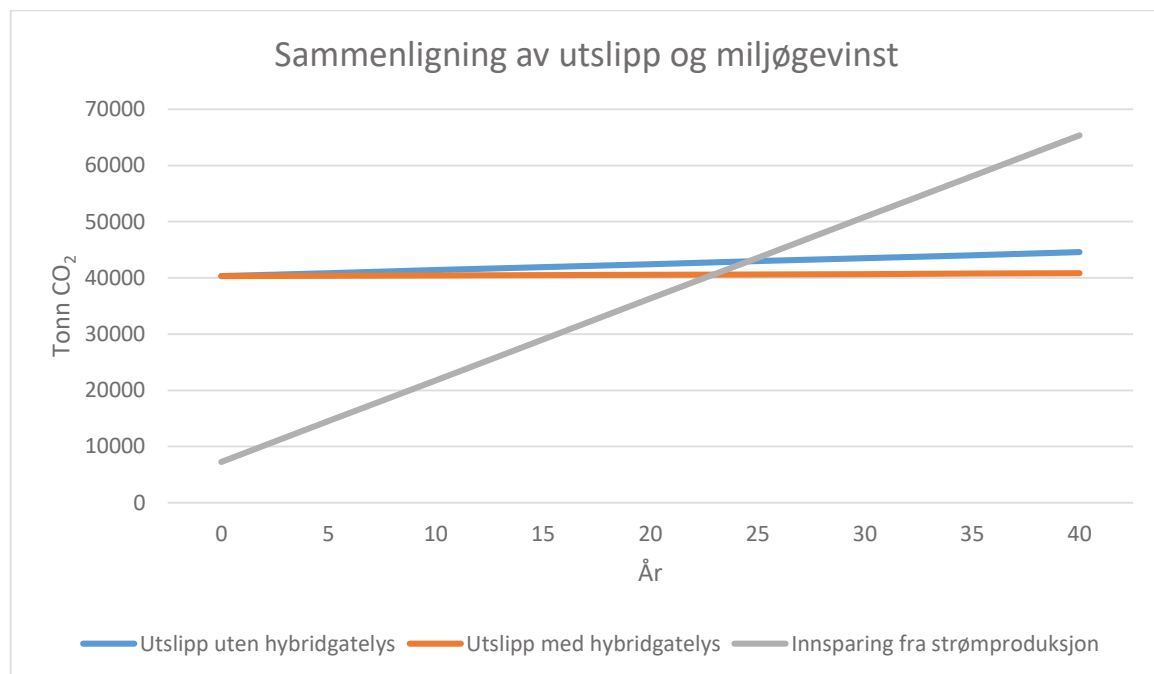
Ved å se på potensiell strømproduksjon fra vind- og solkraft som «grønne» energikilder opp mot typisk CO₂-ekvivalent for strømproduksjon kan vi gjøre et estimat på hvor mange tonn CO₂ som kan spares inn ved å integrere slike løsninger på broen.

Årlig produksjon: 13,7GWh

CO₂-ekvivalent for strøm: 0,53 kg CO₂/kWh

Årlig innsparing av CO₂-utslipp:

$13\,700\,000\text{kWh} * 0,53\text{kg CO}_2/\text{kWh} = 7\,261\,000\text{kg CO}_2 = 7\,261\text{tonn}$



Fra diagrammet ser vi at innsparingen av CO₂-ekvivalenter fra den tenkte strømproduksjonen går forbi utslippene fra broens bygge- og bruksfase mellom 20 og 25år etter ferdigstillelse.

Diskusjon

Dette er ikke en fullverdig livsløpsanalyse, men heller en vurdering av muligheten for å produsere en null- eller plussbro ved å integrere grønn kraftproduksjon på broen. Tallene er stort sett basert på andre rapporter og utredninger for lignende tilfeller, men hvor stor forskjell det er i forholdene og innvirkningene disse forskjellene har på potensialene for strømproduksjon er vanskelig å avgjøre. Denne vurderingen har derfor stor usikkerhet og det er måttet gjort noen tilpasninger i valg av løsninger for at vurderingen skulle være gjennomførbar.

På grunn av slike mangler i datagrunnlag er solcellene her antatt montert som tak over broen og ikke lagt i vegdekke som utredet i kapittel 7.1. Dette vil medføre et noe høyere produksjonsestimat enn ved bruk av solceller i dekke da utnyttelsesgraden for denne løsningen antas noe lavere enn takmonterte solceller.

Denne vurderingen har ikke tatt i betraktning verken utslipp knyttet til produksjon av vindmøller og solceller eller innsparinger knyttet til gjenbruk av materialer når broens levetid er over. Det er antatt at utslippene fra produksjon av de strømproduserende elementene og innsparinger fra gjenbruk av materialer omtrentlig vil kunne oppheve hverandre i miljøregnskapet.

Estimatet på en nullstatus for CO₂-regnskapet innen en 25års-periode har altså svært stor usikkerhet og skal ikke brukes som en endelig vurdering. Det kan derimot fungere som en pekepinn på muligheten for å skape en nullbro og verdien i å integrere strømproduserende løsninger på broen.

Referanser

Hammervold, J., 2009. *Metode for beregning av energiforbruk*, s.l.: Statens vegvesen.

NVE, 2017. [Internett]

Available at: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten-for-energi-rme-marked-og-monopol/varedeklarasjon/nasjonal-varedeklarasjon-2016/>

[Funnet 30 01 2018].

Fosenbrua – en energikonstruksjon

En brukryssing over Trondheimsfjorden står ovenfor utfordringer, både knyttet til miljø og finansiering.

Å integrere energiproduserende elementer på Fosenbrua kan bidra til en realisering av Fosenbrua.

Eksisterende metoder for energiproduksjon, som vind- og solkraft, kan integreres på brua for å utnytte de kreftene som vær og vind medbringer.

Power Roads gir økt engasjement rundt prosjektet – kanskje kan Trondheim bli anerkjent internasjonalt som en miljøby.

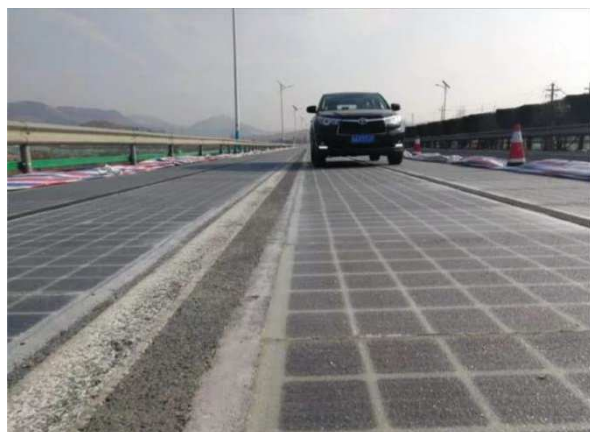


Fosenbrua - energikonstruksjon

På NTNU i Trondheim har fire studenter ved instituttet for bygg -og miljøteknikk sett på muligheter til å bygge den fremtidige Fosenbrua som en energikonstruksjon.

Med menneskets stadig grensesprengende konstruksjoner og dagens økende fokus på klima må ingeniører skape mer integrerte konstruksjoner som ikke bare utfører hovedoppgaven. I dag bygges noen få store pilotprosjekter som over et livsløp ikke bare er usynlig i et klimaregnskap, men som blir en ressurs i seg selv.

Over en 500m dyp og 6,5km lang fjordkrysning vil bølger, tidevann, vind og sol utgjøre enorme utemmede energiresurser som en tenkt bru skal motstå. Studentene stiller derfor spørsmålsteget på hvorfor man prøver å bekjempe naturkreftene når man heller kan temme dem.



Gjennom en mulighetsstudie har gruppen sett på bruelementer som utnytter energien gjennom solceller i vegdekke og gatelys, vindturbiner på gatelys, piezoelektrisk vegdekke, bølgeabsorbatorer, og innfestninger som tar opp energi fra forskyvninger. Det vil være for lite trafikk for at piezoelektrisk veidekke kan forsvares. Det er også nok

ugunstige forhold for utnytting av energien fra tidevann og bølger i Trondheimsfjorden med teknologien som finnes i dag. På grunn av senere års utvikling av solcellepanel og vindmøller vil likevel en plussbro være realiserbar i nær framtid. I rapporten fremkommer det at med strømmiksen i 2015 iht. RE-DISS-prosjektets beregningsmetoder vil en fremtidig bro mellom Trondheim og Fosen være karbon-nøytral innen 25år.