

PowerBridge

- Integrasjon av solcelleteknologi i design og konstruksjon av PowerBridge: Utnyttelse av infrastruktur for energiproduksjon

PowerBridge

- Integration of Solar Cell Technology in the Design and Construction of PowerBridge: The utilization of infrastructure for energy production

Trondheim Mai 2023

Navn studenter:

Hawan Sætrum Hika
Marita Førde

Intern veileder:
Jomar Tørset

Ekstern veileder:

Prosjektnr:
2023 - 17

Rapporten er ÅPEN



NTNU

Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Rapporten er ÅPEN

Problemdefinering, problembeskrivelse, resultatmål

Problemdefinering: Energiforsyningssvikt

Europa befinner seg for øyeblikket midt i en energikrise. En årsak til energiunderskuddet er krigen i Ukraina. Den har ført til store sanksjoner mot Russland som er den største leverandøren av olje, gass og kull i regionen [8]. Denne kombinasjonen av konfliktsituasjon og stadig økende energiforbruk har ført til økende etterspørsel og dermed høyere strømpriser. I Norge har strømprisene tredoblet seg det siste året[12], noe som gjør forskning på nye energikilder viktig og mer lønnsomt. Dette energiunderskuddet har tydelig innvirkning både på privatøkonomien og den industrielle økonomien.

Problembeskrivelse: Implementering av fornybar energi på en bro

I Namsos kommune planlegges det bygging av en bro til øyen Jøa. I denne bacheloroppgaven skal vi undersøke hvordan Jøa-broen kan utformes på best mulig måte for å kunne integrere fornybare energikilder. Vi ønsker å bruke dette som et pilotprosjekt for konseptet vi har kalt "PowerBridge". Videre vil vi undersøke den økonomiske lønnsomheten av dette konseptet. Vi vil utforske hvilke festemetoder, materialer og utforming av bro som egner seg best, og i hvilken grad de økte lastene som oppstår påvirker broens konstruksjonsmessige egenskaper.

Resultatmål: Montering av fornybar energi har lite innvirkning

Målet er å finne en mulig løsning for å integrere fornybar energi på en bro samtidig som energiproduksjonen optimaliseres og er økonomisk lønnsomt. Vi ønsker å minimere den påførte lasten og eventuelle påvirkninger på broens kapasitet, slik at løsningen enkelt kan implementeres på andre allerede eksisterende broer. Vi vil finne ut hvordan monteringen av fornybare energikilder på en stålbro påvirker bæreevnen til broen, med fokus på bærebjelkene, og om dette er økonomisk lønnsomt.

Stikkord fra prosjektet: PowerBridge, Konstruksjon, Bærekraft, Lønnsomhet, Solceller, Økonomi, Klima og miljø, Vindlast, Egenlast, Trafikklast, Kapasitet, Forskning

Forord

Vår bacheloroppgave markerer avslutningen på vår utdanning innen bygg- og miljøfag ved NTNU Trondheim. Denne oppgaven er skrevet av Hawan Sætrum Hika og Marita Førde, begge med fordypning innen konstruksjon. Etter å ha hatt et utvekslingssemester i Australia, ble vi inspirert av et fag som fokuserte på brokonstruksjoner, noe som ga oss motivasjon til å utforske dette emnet videre.

Målet vårt er å videreutvikle vår kunnskap om broer samtidig som vi fokuserer på bærekraft, noe vi begge engasjerer oss for. Vi ønsker å oppnå en dypere innsikt og forståelse innen disse fagområdene, og vi har derfor valgt å undersøke konseptet “PowerBridge”. Dette konseptet handler om å implementere fornybare energikilder på en flytebro. Vi vil anvende den kunnskapen vi har tilegnet oss i løpet av studiene våre, samtidig som vi ønsker å bruke vår kunnskap til å løse reelle problemer. Oppgaven utnytter vår fordypning innen konstruksjon, med hovedtemaer som mekanikk, stålkonstruksjoner, havromskonstruksjoner, vegbygging, samt en ingeniørfaglig tilnærming til systemtenkning. Oppgaven er skrevet med tanke på lesere som allerede er kjent med disse fagområdene, samt norske standarder og byggforsk.

Idéen til oppgaven stammer fra vår veileder, Jomar Tørset. Han har kunnskap om fjordkrysningen til Jøa og har utforsket mulighetene for å integrere fornybare energikilder på broen. Dette passet perfekt med våre interesser, og begge parter ble fort engasjert. Vi ønsker derfor å takke Jomar Tørset for hans engasjement. Han har vært en verdifull medspiller som har bidratt til å sikre det beste mulige resultatet. Vi vil også takke for muligheten til å jobbe med hans konsept, “PowerBridge”.

Arbeidet med dette prosjektet har også gitt oss muligheten til å komme i dialog med flere bedrifter og nøkkelpersoner innen bygg, fornybar energi og politikk. Vi vil rette en stor takk til Multiconsult, spesielt til Per Norum Larsen og Kim Hugo Sivertsen, som har bidratt med mye informasjon angående den planlagte prosjekteringen av broen og deres rapport “Jøa ’t land”, som er utarbeidet for prosjekteringen. Til slutt vil vi takke alle som har deltatt i møter med oss, og ikke minst medstudenter for verdifulle innspill til forbedringer og muligheter. Det har vært et utrolig spennende prosjekt, og vi har mottatt mange positive tilbakemeldinger.

Vi håper at næringslivet kan dra nytte av konseptet PowerBridge og videreutvikle det i fremtiden.

Trondheim, 22. mai 2023

UNDERSKRIFTER

Marita Førde

Marita Førde

Hawan Sætrum Hika

Hawan S. Hika

Sammendrag

Bacheloroppgaven tar for seg konseptet “PowerBridge”. PowerBridge definerer vi som en bro som utnytter fornybar energi, og vi har i denne oppgaven valgt å se på solenergi, og solceller. Konseptet kan sammenlignes med et plusshus. Implementeringen av fornybare energikilder på broer er lite utforsket i dag. Mangelen på forskning på dette området fører til at utbyggere sjelden vurderer denne løsningen i nye byggeprosjekter. Etter en samtale med Nordconsult, hvor vi diskuterte hvorfor slike løsninger ikke blir brukt, fikk vi tilbakemeldinger om begrenset kapasitet og mangel på økonomiske incentiver til å gjennomføre slike prosjekter. Denne oppgaven vil bidra til økt forskning på konseptet og øke kunnskapen om de mulighetene det kan gi.

Vi tar utgangspunkt i fergeleiet fra Jøa til fastlandet som et case-studie. Det har vært diskusjoner om å erstatte denne strekningen med en flytebro, men per dags dato blir dette ikke ansett som et lønnsomt prosjekt. Vi ønsker derfor å undersøke om montering av solceller kan generere inntekter for en bro.

Den tekniske delen av oppgaven er delt i to. Først analyserer vi broens kapasitet før solcellemontering, og deretter undersøker vi kapasiteten etter montering. For å forsikre at tallene våre er reelle, er det valgt å sammenligne kapasiteten i vårt tverrsnitt med tverrsnittet oppgitt i “Jøa ’t Land” rapporten. Det er i denne oppgaven utredet innvirkningen av flere laster, men kun regnet på vindlast og trafikklast. Vi identifiserte det punktet i snittet med høyest spenning og brukte Von Mises’ flytekriterium for å beregne lastfordelingen. Dette punktet ble deretter analysert for å vurdere effekten av solcellemontering. Vi tok kun hensyn til krefter i horisontal (x-retning) og vertikal (z-retning), og så bort ifra krefter langs broen (y-retning). Resultatene viste at spenningen var høyest i midten av broen ved overgangen mellom steg og flens. Profilen ble dimensjonert med en flenstykkelse på 25 mm og stegtykkelse på 20 mm. Ved montering av nesen økte utnyttelsen av tverrsnittet kun med 1,2%, noe som ble ansett som en liten endring og ikke signifikant.

Vi har også designet solcellesystemet nøye. Rammeverket som solcellene monteres på skal ha en aerodynamisk utforming både for å redusere vindlasten, men også for at solcellene kan benytte sin optimale energivinkel, dette vil gi rammeverket en “nese” form. Nesen er dimensjonert for å tåle vekten av solcellene og har en innebygd gangbro for vedlikehold av nesen og bærebjelken. Rammen består av 1/2 IPE 100-bjelker, med avstand tilpasset størrelsen på solcellene. Nesen er montert på begge sider av broen, men solcellene er kun montert på den sørlige siden, da den nordlige siden ikke produserte tilstrekkelig med energi for å være økonomisk lønnsom.

De gjenværende flatene på nesen vil være dekket med aluminiumsplater for å opprettholde utformingens aerodynamiske egenskaper, og sørge for en jevn vektfordelingen på broen, da flytebroen er svært sensitiv for vektendringer.

Etter en grundig økonomisk analyse ble det gjennomført en sammenligning mellom montering av solceller på rammeverket med en helning på 50° (en kalkulert optimal solenergi vinkel for dette området) og montering av solcellene vertikalt på bærebjelken. På grunn av flytebroens ekstreme vektsensitivitet ble det konkludert med at det for øyeblikket ikke er særlig lønnsomt å installere et slikt system, til tross for at det bidrar til økt energiproduksjon. En energy payback price (EPP) ble beregnet over en periode på 25 år, som er den antatte økonomiske levetiden til solcellene. EPP-estimatet økte fra 57 øre per kilowattime (kWh) med vertikal montering av solcellene, til 69 øre per kWh med optimal helning på solcellene. Dette tyder på at det er mer lønnsomt å ikke montere på nesekonstruksjonen. Dersom det kommer videreutviklinger av solcelleteknologien, kan det imidlertid være mer lønnsomt å beholde den optimale energivinkelen.

Abstract

Our bachelor's thesis focuses on the concept PowerBridge. We define PowerBridge as a bridge with implemented sources of renewable energy, and in this thesis we have chosen to focus on solar-panels. The concept can be compared to a zero-emission building. This area is currently under-researched. The lack of research in this field often leads developers to overlook this solution in new construction projects. Following a conversation with Nordconsult, where we discussed why such solutions are not being utilized, we received feedback about limited capacity and a lack of economic incentives to implement these types of projects. This thesis will contribute to increased research on the concept and enhance our understanding of the possibilities it offers.

We use the ferry-crossing from Jøa to the mainland as a case-study. There have been discussions about replacing this route with a floating bridge, but currently, it is not considered a profitable project. Therefore, we aim to explore whether the installation of solar-panels can generate income for the bridge.

The technical part of the thesis is divided into two sections. Firstly, we analyze the bridge's capacity before installing solar-panels, and then we investigate the capacity after the installation. To ensure our dimensions and values are correct, we have compared our design capacity with the capacity in the projected section from Multiconsult in the report "Jøa 't land". A floating bridge is extremely exposed to a great variety of external loads. The thesis explores the effects of these forces, but wind and traffic load are the only forces included in the calculations. We identified the point in the cross-section with the highest stress, and applied Von Mises' yield criterion to calculate the load distribution. Subsequently, we examined the effect of solar-panel installation on this specific point. We have considered forces only in the horizontal (x-direction) and vertical (z-direction) planes, disregarding forces along the bridge (y-direction). The results indicated that the stress was highest in the middle of the bridge at the transition between the web and the flange. The profile was designed with a flange thickness of 25 mm and a web thickness of 20 mm. Upon installing the nose structure, the utilization of the cross-section increased by only 1.2%, which was considered not significant.

We also carefully designed the solar-panel system. The frame where the solar-panels are mounted will have an aerodynamic shape to both reduce windloads, as well as allow for the solar-panels to utilize its optimal tilt angle. This frame can be compared to the shape of what we call a "nose". The framework was dimensioned to withstand the weight of the solar-panels and a built-in footpath for maintenance inside the aerodynamic nose, and on the supporting beams.

The framework consists of 1/2 IPE 100 beams, with the spacing adjusted to accommodate for the size of the solar-panels. The nose is installed on both sides of the bridge, but the solar-panels are only installed on the southern side, as the northern side did not produce sufficient energy to be economically viable. The remaining surfaces on the nose structure will be covered with aluminum plates to maintain its aerodynamic properties and make sure the weight on the bridge is evenly distributed, as the floating bridge is highly sensitive to weightchanges.

After a thorough economic analysis, a comparison was made between mounting solar-panels on the framework at a 50° incline (the calculated optimal tilt angle for the region) and vertically on the support beam. Due to the floating bridge's extreme sensitivity to weight, it was concluded that installing an aerodynamic nose is currently not particularly cost-effective, despite it's contribution to increased energy production. An energy payback price (EPP) was calculated for a period of 25 years, which is the estimated economic lifespan of the solar-panels. The EPP estimate increased from 57 øre per kilowatt-hour (kWh) for vertical installation of the solar-panels to 69 øre per kWh for the nose and solar-panels mounted at a 50° incline. However, with further advancements in solar technology, it may become more profitable to maintain the optimal tilt angle.

Innhold

Problemdefinering, problembeskrivelse, resultatmål	i
Forord	ii
Sammendrag	iv
Abstract	vi
Begrepsliste	x
Symbolliste	xi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	2
1.2 Avgrensning	4
1.3 Bestemmelser for dimensjonering	4
2 Teori og statikk	5
2.1 Statikk	6
2.2 De seks bevegelses frihetsgradene	6
2.3 Permanente laster	7
2.4 Variable laster	9
2.5 Ulykkeslaster	12
3 Lastbildet	13
3.1 Trafikklast	13
3.1.1 Sentrifugallast	15
3.2 Vindlast	15
3.3 Resonans og egenfrekvens	16
3.4 Egenlast	17
3.5 Temperaturlast	17
3.6 Lastkombinasjoner	18
4 Design og utforming av bro	19
4.1 Valg av brotype	19
4.2 Forutsetninger	19
4.3 Dimensjonering av tverrsnitt	21
4.4 Sammenligning med Multiconsult sitt tverrsnitt	29
5 Design og utforming av solcellesystemet	32
5.1 Utforming	32
5.2 Dimensjonering	35
5.3 Egenlast	39
5.4 Vedlikehold av bro	40
6 Effekt av solceller på Jøa flytebro	41
6.1 Endring av laster	41
6.2 Resultat	41
7 Økonomisk lønnsomhet	42
7.1 Kost av solceller	42

7.2	Lover og regler, og endring	43
8	Utvidelse, utfordringer og fremtidig forskning	45
8.1	Bærekraft	45
8.2	Usikkerhetsmomenter	46
8.3	Fremtidige regelverksendringer	46
9	Diskusjon	47
9.1	Den dynamiske nesen	47
9.2	Kostnader rundt vedlikehold og montering	47
9.3	Dimensjonering av tverrsnitt	48
9.4	Dimensjonering av nesen	49
9.5	Nesekonstruksjonens påvirkning på broen	49
10	Konklusjon	51
A	Tabell: Jøa 't Land Forutsetninger	I
B	Pvsyst analyse 50°	II
C	Pvsyst analyse 90°	IX
D	Trafikklast Utrekninger	XVI
E	Vindlast Utrekninger	XVII
F	Egenlast Utrekninger	XVIII
G	Kapasitet jøa utregninger	XIX
H	Totale laster x og z retning	XXII
I	Lastkombinasjoner	XXIII
J	Kapasitet utregninger før Nese	XXIV
K	Kapasitet utregninger etter nese	XXVII
L	Resultat	XXX
M	Pvsyst analyse Nordside 50°	XXXI
N	Pvsyst analyse Nordside 90°	XXXVIII
O	Solceller	XLV
P	Solregnskap	XLVII

Begrepsliste

EPP	Energy payback price, hvor mye man må betale tilbake for å lønnsomtgjøre konseptet over en viss tidsperiode
Loadmodel 1	Konsentrerte og jevnt fordelte laster, som dekker de fleste virkningene av trafikk med biler og lastebiler. Denne modellen bør brukes for generelle og lokale verifikasjoner.[6]
NA	Nøytralakse
NA/NS	Nasjonat Annex / Norsk Standard
NVE	Norges Vassdrag- og energidirektorat
Plusskunde	En plusskunde er en nettkunde som både forbruker og produserer elektrisitet. Plusskunder betaler ikke fastledd for innmating og må ikke betale nettleie for forbruket som dekkes av egenprodusert strøm
Produksjonspeak	Hvor mye strøm et solcellepanel maks kan produsere i det gitte området
Resonans	Når et system blir påvirket av en kraft med samme frekvens som egenfrekvensen til systemet
RME	Reguleringsmyndighetene for energi i NVE
Tandem System (Boggilast)	To påfølgende aksler som anses å være samtidig belastet[7]
ULS	Ultimate Limit State (Grensetilstand)
VM	Von Mises flytkriterium
Drag	Beskriver graden av luftmotstand til et materiale
ÅDT	Årsdøgntrafikk - Antall biler som i gjennomsnitt passerer ett punkt på en veistrekning i løpet av ett år i begge retninger

Symbolliste

A	Areal
A_{ref}	Referanseareal
a_1	Areal av kontaktflaten til et hjul
B	Tverrsnitt bredde
b	Bremselast / Akselerasjonslast
b_f	Bredde flens
b_s	Bredde steg
C	Vindlastfaktor
C_{alt}	Faktor for vindøkning med høyden over havet
C_{dir}	Retningsfaktor
$C_e(Z)$	Eksponeringsfaktor
$C_{fx,0}$	Reduksjonsfaktor for vindlast i x-retning
C_o	Terrengformfaktor
C_{prob}	Sannsynlighetsfaktor
C_r	Ruhetsfaktor
C_{season}	Årstidsfaktor
F	Punktlast
f_d	Dimensjonerende flytespenning
f^*d	Dimensjonerende flytespenning med utmatting
fk	Knekkspenning

F_w	Resultantkraft fra vind
H	Tverrsnitt høyde
h_f	Høyde flens (tykkelse)
h_s	Høyde steg
I	2. Arealmoment
I'	2. Arealmoment for rotert aksesystem
$I_v(Z)$	Turbulensintensitet
K	Parameter avhengig av ekstremverdi for helning
k_p	Toppfaktor for vind
k_r	Terrengruhetsfaktor
L	Lengde
M	Moment
M_{Ed}	Dimensjonerende moment
M_{Rd}	Momentkapasitet
n	EkspONENT
p	Sannsynlighet for å overskride vinden et tilfeldig valgt år
q	Jevnt fordelt last
Q_{ki}	Konsentrert last i kjørefelt i
Q_{kr}	Konsentrert last i resterende kjørefelt
Q_{tk}	Sentrifugalkraft
$q_p(Z)$	Vindkasthastighetstrykk

q_r	Dimensjonerende last
R	Kurveradius på bro
r	Resterende bredde
S	1. arealmoment
S (Trafikklast)	Spenn mellom pongtonger
V	Skjærkraft
V_b	Basisvindhastighet
V_m	Stedsvindhastighet
w	Bredde på kjørefelt
W	Total bredde på vei
Z	Arm
Z_{min}	Minimumshøyde
Z_0	Ruhetslengde
$\alpha_{i,r}$	Tilsvarende ψ i lastkombinasjoner NS-EN 1990:2002 (Tabell A2.1) Siden både ψ_0 og ψ_1 er 0,4, og ψ_2 gjelder kun for tilnærmet permanente laster, settes denne som 0,4 siden det ikke er en veldig trafikkert vei og kan ikke regnes som en tilnærmet permanent last, gjelder både kjørebane (i) og resterende vegbredde (r)
γ_{Mo}	Materialfaktor
ψ_0	Faktor for kombinasjonsverdi for en variabel påvirkning
ψ_1	Faktor for ofte forekommende verdi for en variabel påvirkning
ψ_2	Faktor for en tilnærmet permanent verdi for en variabel påvirkning

INNHold

ρ	Luftens densitet
σ	Momentspenning
σ_v	Standardavvik for turbulensintensitet
τ	Skjærspenning

Figurer

1.1	Jøa plassert på norgeskartet (Norgeskart.no)	2
1.2	Alternativer for plassering av broen, fra Jøa 't Land	3
1.3	Alternativer for plassering av broen i 3D, fra Jøa 't Land	3
2.1	Tverrsnitt av bro viser hvordan rammeverket er utformet for å gi forbedret aerodynamiske egenskaper	6
2.2	De seks bevegelser frihetsgradene	7
3.1	Boggilast, og en jevnt fordelt last som virker på vegbanen[6]	14
3.2	Karakteristiske verdier for Aksellaster og Jevnt fordelte laster i henhold til NS [6]	14
3.3	Karakteristiske verdier for sentrifugalkrefter i henhold til NS[18]	14
3.4	Retninger for vindpåvirkning for broer [5]	15
3.5	Reduksjonsfaktor for vindkraft med skråstilt lo side [5]	16
3.6	svingninger i horisontale retninger	16
4.1	Fritt opplagt bjelke med jevnt fordelt last[25]	20
4.2	Kontinuerlig bjelke med to like spenn og jevnt fordelt last [25].	20
4.3	Fritt opplagt bjelke med punklast [25]	23
4.4	Punkter for S skal identifiseres	25
4.5	Fordeling av spenning fra moment i tverrsnitt	28
4.6	Spenningsfordeling i bjelken	28
4.7	Multiconsult sitt forslag til tverrsnitt[1]	29
4.8	Forenklet snitt fra Multiconsult med navn på deler som samsvarer med utregninger i vedlegg G	30
5.1	Vinkler på tverrsnittet	33
5.2	Alternativer for plassering av solcellene	34
5.3	Rammeverket montert på broen med gangbro	36
5.4	Laster på nesekonstruksjonen	37
5.5	Momentdiagram til nesekonstruksjonen	37
5.6	Kapasitet til nesekonstruksjonen	38
5.7	Nytt tverrsnitt, illustrerer utforming med navn på konstruksjonsdelene	39

Tabeller

3.1	Vindlast i x,y,z retning	16
4.1	Inngangsverdier for å finne moment- og skjærkraft	24
4.2	Moment- og skjærkrefter i utvalgte snitt	24
4.3	2. Arealmoment om x og z aksene	25
4.4	Tabell over verdier for S	26
4.5	Spenningsverdier utifra Von Mises kriterium	27
5.1	Årsproduksjon fra solcellene basert på ulike monteringsvinkler.	32
5.2	Antall paneler og reduksjonskraftfaktor, $C_{fx,0}$ for vind	35
7.1	Energy payback price for montering av solceller	43
7.2	EPP med pongtonger	43

1 Innledning

I dag er den eneste koblingen fra Jøa til fastlandet et fergeleie som går fra Ølhammaren til Seierstad fergekai i Namsos kommune. Det har lenge vært diskutert om det skal bygges bro over denne strekningen, og ett av forslagene er av Multiconsult med deres konseptskisse “Jøa ´t land,” som er nevnt flere ganger i denne oppgaven. Den innebærer å bygge en 640 meter lang *flytebro* over strekningen. Fylkestinget ønsker å utfordre industrien og kompetansemiljøet i hvordan fjordkryssningen mellom fastlandet og Jøa kan løses på en bedre måte enn den som er idag. Bacheloroppgaven tar tak i denne utfordringen, og kommer til å se på muligheten for å integrere fornybare energikilder på broen. Oppgaven skal se på hvilke innvirkninger det nye systemets egenvekt og utforming kan ha på de konstruksjonsmessige egenskapene til broen, og hvilke positive og negative sider som følger et slikt konsept.

Konseptet PowerBridge går ut på å utnytte de ubrukte arealene på en flytebro til å produsere ren energi. Dette omfatter utnytting av alle typer fornybare energikilder som sol, tidevann, bølger, vind, strøm osv. Vind og solceller ble vurdert til mest aktuelle siden det er disse som i størst grad blir brukt idag. Solceller er allerede brukt i flere områder for å forsyne både privat og offentlige bygg med strøm, og dermed er det valgt å videreutvikle bruket av solceller i denne oppgaven. PowerBridge sikter seg inn på en av de største utslippverstingene som står for 40% av det globale CO₂ utslippet, nemlig byggesektoren[26]. En stor fordel her er at solcellene ofte kan monteres i ettetid og bidra til at både nye og allerede eksisterende konstruksjoner kan produsere ren energi. Dette er med på å dra byggesektoren i riktig retning mot å nå nullutslipp i det totale klimaregnskapet. Ved å produsere fornybar energi på en bro vil behovet for å bygge ut strømproduserende fasiliteter på ellers ubrukt areal bli mindre samtidig som energiunderskuddet reduseres.

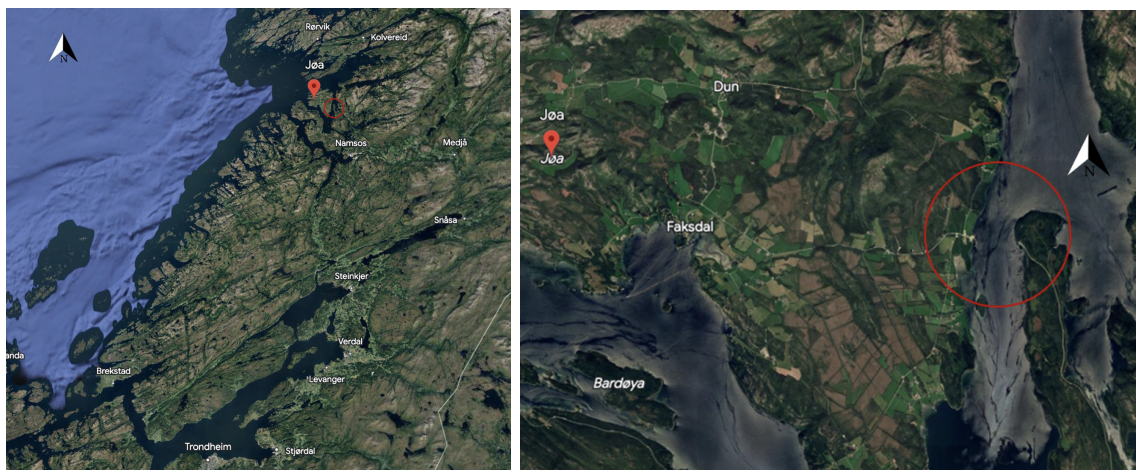
Bare i Norge er det om lag 18 000 broer hvor de fleste er bygd etter 1970 [28], og flere kommer det til å bli. Konseptet PowerBridge begrenser seg ikke bare til Norge, men har potensiale til å implementeres i hele verden. Dette vil si at konseptet kan ha et enormt stort marked, gitt gunstige forhold for energihøsting, og den ekstra belastningen ikke har store negative konstruksjonsmessige innvirkninger.

Hensikten med oppgaven er å bidra til forskningen på bruksområdene til fornybare energikilder. Utnyttelsen av ubrukte arealer til å høste fornybar energi kan ha et enormt potensiale, ikke bare når det kommer til lønnsomhet, men også med tanke på å dra Norge og verden mot en mer bærekraftig framtid. Dette tema er idag viktigere enn noensinne. Denne oppgaven vil bidra til økt

kunnskap om PowerBridge, og de ulike aspektene rundt dette. Oppgaven kommer forhåpentligvis til å gi et svar på lønnsomheten rundt denne idéen, og hva som må til for at konseptet eventuelt kan gjøres mer lønnsomt. Et mål er å se på hvordan det kan bli en økonomisk gunstig løsning for bedriftene å ta på seg et slikt byggeoppdrag i både nye og allerede eksisterende broer og annen type infrastruktur.

1.1 Bakgrunn

I 2018 ble det akseptert å etablere prosjektet “Jøa ’t land 24/7” [9]. Prosjektet går ut på å bygge en flytebro fra fastlandet til øyen Jøa. Øyen ligger i Namsos kommune og en ny bro her vil ikke bare øke tilgjengeligheten til fastlandet, men det vil også gjøre det mer attraktivt å etablere industri på Jøa. I dag er det en ferje som tar seg av all trafikk fra og til øya. Denne løsningen er tidkrevende og ikke veldig bærekraftig. Multiconsult er prosjektledere i dette prosjektet og har kommet med flere forslag til den nye broen. Bacheloroppgaven kommer til å ta utgangspunkt i ett av Multiconsult sine alternative løsninger for broen og analysere hvordan innvirkning integrering av solceller vil ha på kapasiteten, samt vurdere hvor lønnsomt dette er med tanke på økonomi og bærekraft.

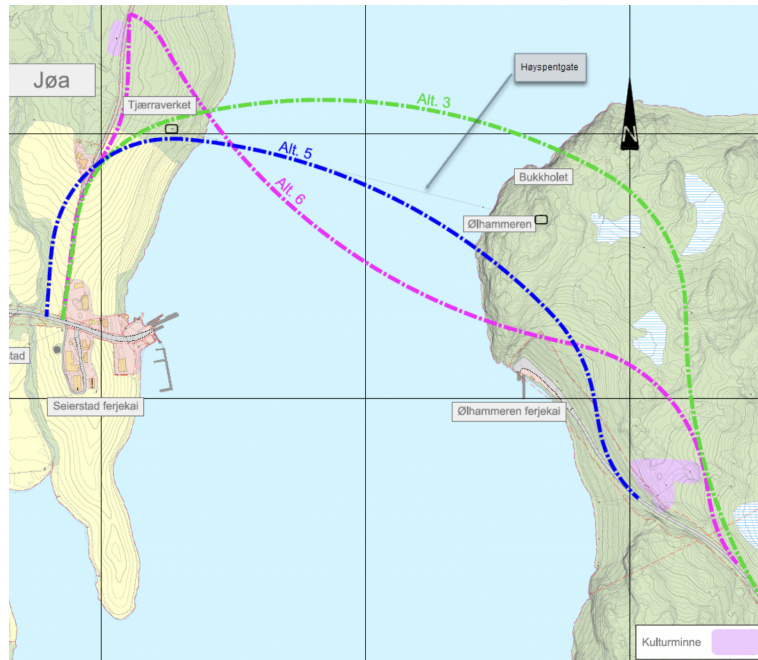


Figur 1.1: Jøa plassert på norgeskartet (Norgeskart.no)

Figur 1.1 viser hvor på kartet Jøa er plassert med rød sirkel. Broen går rett øst-vest som vil si lengdeprofilene vender mot nord og sør. På nordsiden anses solinnstrålingen å være lav og ikke lønnsom for utbygging av solceller. Dette vil si at solcellene kun vil monteres på sørsiden av broen. For å analysere solforholdene er det blitt benyttet programmet PVsyst. I programmet kan man se hvordan endringer i helning på solcellene påvirker energiutbyttet, gitt lokasjonen på broen. Det kan også brukes til å beregne energiproduksjonen for ulike typer solceller, inverttere og mengden solceller. I vedlegg B er det gjort en PVsyst analyse på solcellepanelene for å finne

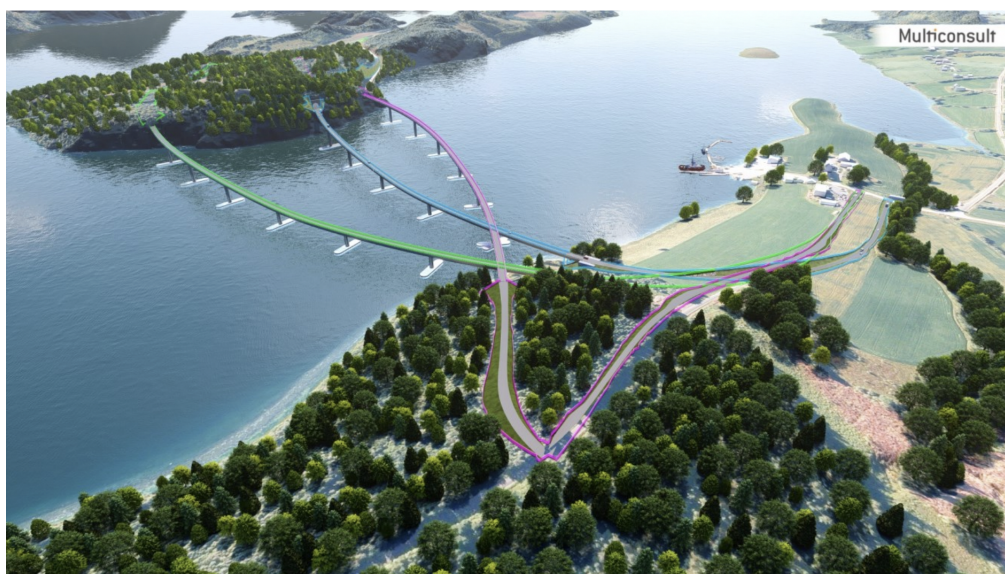
1 INNLEDNING

den optimale helningen til panelene for akkurat denne lokasjonen. Her ser man også mengden energi produsert med en gitt helning. Denne optimale helningsvinkelen er funnet til å være 50° .



Figur 1.2: Alternativer for plassering av broen, fra Jøa 't Land

Multiconsult har laget flere alternativer, men bacheloroppgaven kommer til å utnytte alternativ 5, som er den blå stiplede linjen i figur 1.2. Dette er også det alternativet Multiconsult har utredet mest i sin rapport. Alternativ 5 tar utgangspunkt i en 640m lang bro fordelt på seks spenn, hvor hvert spenn er 106,7m[9].



Figur 1.3: Alternativer for plassering av broen i 3D, fra Jøa 't Land

Figur 1.3 er en rendret illustrasjon av hvordan området ser ut iforhold til de ulike

broalternativene.

1.2 Avgrensning

Det er gjort flere avgrensinger i denne oppgaven. Dette er for at arbeidsmengden skal samsvare med hva som er forventet nivå på en bacheloroppgave. Det er valgt å lage et nytt tverrsnitt isteden for å bruke det som er brukt i rapporten til Multiconsult for å ha bedre kontroll på hvilke dimensjoner som er brukt. Dette gir oss bedre kontroll over hvordan lastene virker på broen og gjør det mulig å fokusere på kun innvirkningen solcellene har på tverrsnittet etter de er montert. Det vil derfor bli gjort kapasitetsberegninger på et tverrsnitt vi selv har dimensjonert, med fokus kun på bærebjelkene. Lastene vil kun bli beregnet i horisontal x-retning, og vertikal z-retning. Det vil si de langsgående kreftene vil bli sett bort ifra.

Det er også valgt å se på det økonomiske aspektet rundt det å ha på solceller på broen. En beregning av dette vil bli gjort for å finne lønnsomheten i et slikt prosjekt. Siden Multiconsult allerede har et godt overslag på hva deres prosjekterte bro kommer til å koste, anses det som unødvendig å regne ut kosten på det nye tverrsnittet som blir designet i denne oppgaven. Det er heller prioritert å se på kostnadene av hele det påmonterte systemet, og hvor mye et slikt system kan produsere i form av strøm og inntekter. For å finne endringen i kapasiteten når solcellesystemet er påført, vil konstruksjonen bli sett på som en rett, fritt opplagt bjelke. Det vil si kurven broen følger er sett bort ifra når det er regnet på kapasitet. Tverrsnittet vil ha en rektangulær utforming.

1.3 Bestemmelser for dimensjonering

Oppdragsbeskrivelsen fra kommunen gir visse forutsetninger som er nødvendig for å dimensjonere tverrsnittet. I vedlegg A er en tabell over forutsetningene til broen og vegen som er gitt, men det er noen hovedfunn som er essensielle for å kunne dimensjonere tverrprofil.

1. Broen skal være en to-feltsveg med fri bredde på 6,5m mellom rekkverkene. Det er dermed bestemt ved hjelp av N100 at broen skal ha 8m bredde.
2. Seilingshøyden skal være minimum 25 moh. som vil påvirke vindlasten.
3. Dimensjonerende trafikkmengde er satt til å være 300 kjøretøy/døgn.

2 Teori og statikk

En flytebro påvirkes konstant av krefter som varierer i både størrelse og frekvens. Som bachelorstudenter har vi verken kunnskap eller kapasitet til å regne på alle disse kreftene, men kan gi gode teoretiske forklaringer på hva som skjer for å videre forstå seg på resten av bacheloroppgaven, samt bruke kunnskap opparbeidet underveis i studie til å foreta estimeringer der det er nødvendig. Temaer som bevegelses frihetsgrader, utmatting og svingninger skal utredes, men ikke regnes ut. Kapitlet vil omhandle teori om hvordan en flytebro oppfører seg i forhold ulike laster. For å enklere forstå fordelingen av kreftene, er det beskrevet under hvordan utformingen av broen og solcellene kommer til å bli:

Design av bro: Etter samtale med Multiconsult og Norconsult ble det valgt å bruke brotypen kassebro i stål. Dette er hovedsakelig fordi den har en lavere egenvekt, noe som er viktig å ta hensyn til siden en flytebro er svært sensitiv til vekt. Etersom kostnadene rundt dimensjonering av pongtongene, som er flyteelementene til broen, er en såpass dyr prosess, er det viktig at disse dimensjoneres etter lastene broen utsettes for, samt forsøke å redusere lastene der der lar seg gjøre.

Design av solcellesystemet: Målet med PowerBridge er å utvinne mest mulig fornybar energi. Siden den optimale helningen på solcellene er 50 grader for Namsos kommune, blir det høyt prioritert å beholde denne vinkelen. Det er valgt å montere et rammeverk som festes langs ytterkanten av sidene på broen. På grunn av dårlige solforhold på nordsiden er det kun lønnsomt å ha solceller på den sørlige siden. Et slikt tverrsnitt ser man bilde av i figur 2.1. Den detaljerte utredningen av dette er gjort i kapittel 5 om solcellesystemet. Som illustrert på figur 2.1 er solcellene montert på et rammeverk formet som en nese. Dette gir broen en ny og mer aerodynamisk utforming, noe som er gjort for å redusere vindlastene som virker på broen, samtidig som solcellene beholder sin optimale energivinkel.



Figur 2.1: Tverrsnitt av bro viser hvordan rammeverket er utformet for å gi forbedret aerodynamiske egenskaper

Denne figuren viser kun rammeverket og ikke solcellene på den øvre sørlige siden, eller platene på de resterende flatene.

2.1 Statikk

Broen er delt opp i 6 spenn på 106,7m som kobles sammen over hver søyle. Det er valgt å ta i bruk en bro som er festet i en ende, og fritt opplagt med glidelager i andre enden. Dette fører til at deformasjoner i broen som kan komme av for eksempel temperaturforskjeller, ikke vil bidra til krefter i broens lengderetning ettersom den kan bevege seg fritt i denne retningen. Mer om statikk kommer i kapittel 4.2.

2.2 De seks bevegelses frihetsgradene

Når man skal regne på laster som påvirker broer er det først og fremst viktig å være klar over hvordan en slik konstruksjon kan bevege seg. De seks bevegelses frihetsgradene beskriver disse, og hver og en av disse må tas hensyn til på ulike måter. En illustrasjon av bevegelses frihetsgradene er i figur 2.2.

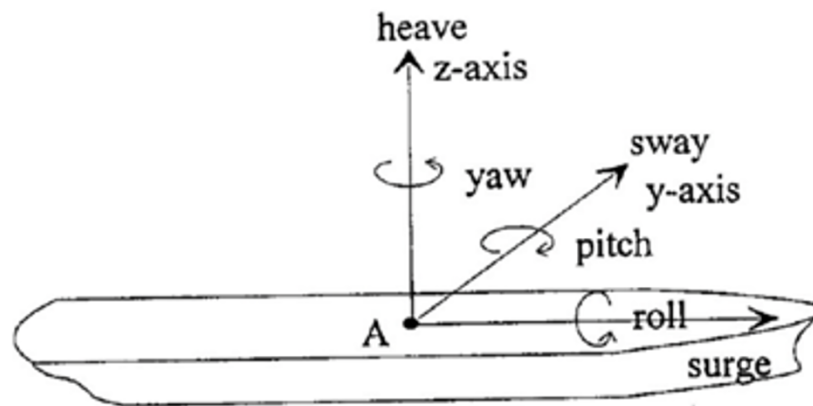


Fig.3.1: Definition of the WADAM Coordinate System.
X- and Y-axis in the still water plane.
Z-axis through the centre of gravity.

Figur 2.2: De seks bevegelses frihetsgradene

Hver last som virker på broen vil ha både en størrelse og en retning. Disse x-, y- og z-retningene bidrar henholdsvis til “sway”, “surge” og “heave”. Avstanden disse kreftene har fra rotasjonsaksene bestemmer omfanget av torsjonskreftene i “pitch”, “roll” og “yaw” retning. Broens evne til å bevege seg i alle disse retningene gjør det nødvendig å ta hensyn til utmatting. Broen er i konstant bevegelse, noe som gjør at integriteten i bærekonstruksjonen og stålet svekkes med tiden. For å ta hensyn til dette settes kapasiteten til S420-stålet som brukes i konstruksjonen, ned med 100 MPa, fra 420 til 320 MPa. Dette skal igjen multipliseres med en materialfaktor som setter denne verdien ned til 290 MPa [10]. Dette er gjort i henhold Eurocode og Norsk Standard (NS), og skal dekke 100 driftsår.

For å få en oversikt over alle kreftene som virker på en bro er det valgt å dele de inn i tre kategorier: permanente laster, variable laster og ulykkeslaster.

2.3 Permanente laster

De permanente lastene som virker på en bro er de lastene som regnes til å være tilnærmet lik over lengre perioder. I følge NS er permanente påvirkninger egenvekten til konstruksjonen, faste installasjoner og vegdekker, mens indirekte påvirkninger er forårsaket av svinn og ujevne setninger.[13]

Permanente laster **Beskrivelse**

Egenlast

De permanente lastene på en bro som kommer av gravitasjonslast, er egenlast. Dette er lasten på selve broen, i tillegg til installasjoner, som rekkverk, belysning, asfaltering og andre tekniske installasjoner.
Frihetsgrad: z (Heave)

Vanntrykk

Flytebroen bruker pongtonger som flyteelement, og det er det fortrenge vannet fra disse som gir oppdrift til broen og sørger for at den flyter. Når det ikke er bølger vil det virke et konstant vanntrykk på pongtongene, men dette trykket vil variere når bølger oppstår. Bølgelaster står det mer om under.
Frihetsgrad: z (Heave)

2.4 Variable laster

De fleste lastene som virker på en flytebro er variable laster, dette er laster som varierer over tid, og kan oppstå midlertidig i byggefasen og ved vedlikehold, eller i driftsfasen. De variable lastene kan deles inn i fire undergrupper: Trafikklast, Miljølast, deformasjonslast, og laster under konstruksjon og vedlikehold.

Hver og en av disse lastene har forskjellig innvirkning på broen og virker også i større og mindre grad utifra hvilke deler av broen man ser på.

Variable laster	Beskrivelse
Trafikklast	Trafikklast en av de mer omfattende lastene man tar hensyn til. Denne avhenger av hvordan type vei det er snakk om og hva ÅDT i det gjeldende området er. Trafikklast har innvirkning på flere av broens bevegelses frihetsgrader. Frihetsgrad: z (Heave), y (Roll, surge), x (Pitch, sway)
Akselerasjon/ Bremselast/ Sentrifugallast	I lengderetningen (y) vil det virke krefter når et kjøretøy akselererer, og siden broen er kurvet med en radius på mindre enn 1500m må man også ta hensyn til sidelast og sentrifugalkrefter når man regner på bremselast, se 3.3. Disse lastene virker horisontalt på vegbanen. Frihetsgrad: y (Surge), x (Sway)

Miljølaster Beskrivelse

Miljølaster	<p>Miljølaster kan variere mye utifra lokale forhold, terreng, tid på året etc.</p>
Vindlast	<p>Vindlast påvirker broen i alle retninger ettersom vinden kan komme fra alle retninger, men størrelsen på lasten vil variere. En av grunnene til at det er viktig å ta hensyn til vindlast er at kreftene som broen utsettes for kan bli ekstremt store om vinden “resonerer” med broens egenfrekvens. Dette kan gi broen store svingninger noe som over tid kan føre til at broen kollapser. Et eksempel på dette er “The Tacoma Narrows Bridge” som i 1940 kollapset som resultat av dårlig design med tanke på aerodynamiske krefter som førte til store svingninger påført av vindlast.[3] Frihetsgrad: Påvirker alle bevegelses frihetsgradene i ulik grad</p>
Snø	<p>Snølast vil virke som en vertikal jevnt fordelt last på broen (z), og ettersom tverrsnittet til broen i x,y-planet utvides ved å montere en nese er det sannsynlig at snølasten vil bli noe økt. Siden det verken er så mye snø i området, i tillegg til at trafikk og evt. brøyting av vei vil hindre oppbygging av betydelige mengder snø er det valgt å se bort ifra snølast. Frihetsgrad: z (Heave)</p>
Jordskjelv/ Seismiske laster	<p>Det er generelt lite jordskjelv i Norge, men det hender så det er viktig å ta hensyn til. Det største skjelvet som har blitt målt i Trøndelag var i 1913, hvor det ble målt et jordskjelv med 5 på Richters skala.[2] Jordskjelv regnes vanligvis etter EN 1998 Eurocode 8, men etter samtale med veileder er det kommet fram til at flytelementene ikke påvirkes i vesentlig grad av skjelv. Dette er derfor sett bort ifra. Frihetsgrad: z(Heave)</p>

Bølger og strøm	<p>En bro som flyter på vann påvirkes naturligvis av bevegelse i vannet. Dette inkluderer strømminger som følge av tidevann som heves og senkes, i tillegg til bølger. Endringer i strømmingen skjer over lengre perioder, noe som gir en last som er tilnærmet konstant. Dette er med på å gi bro en akselerasjon, men denne vil være tilnærmet null når dette skjer over såpass lang tid. Bølger derimot gir broen en vesentlig akselerasjon, på samme måte som en båt som gynger på havet. Bølger har også en egenfrekvens, noe som vil si at den virker på broen med jevne mellomrom. Dette gjør at den kan “resonere” med broen, noe som på samme måte som vindkrefter kan påføre store svingninger over tid, dette kan ha store konsekvenser.</p> <p>Frihetsgrad: z (Heave), men vil også kunne få broen til å “vugge” (Roll)</p>
Torsjonslaster som følge av ugunstig fordeling av trafikklaster	<p>Når kjøretøy befinner seg på på broen, vil det i de fleste tilfeller ikke være en symmetrisk belastning på de to kjørefeltene. Dette fører til en ugunstig fordeling av last på broen, som gir opphav til torsjon om broens (y) akse.</p> <p>Frihetsgrad: y (Roll)</p>
Deformasjonslaster	<p>Deformasjonslaster er lastvirkning som følge av setninger, oppspenning/ forspenning, trykk- eller temperaturvariasjon, svinn og kryp[4]. I Jøa ’t Land er det regnet med en temperaturforskjell på +/- 30 grader. Lastene som følger denne deformasjonen virker langs med broen (y), men ved å ha en ende på broen fritt opplagt kan broen bevege seg fritt, og denne lasten vil være neglisjerbar.</p> <p>Frihetsgrad: y (Surge)</p>
Montering- og Vedlikeholdslaster	<p>Ett av alternativene for konstruksjonen av broen som nevnes i Jøa ’t Land er å delvis prefabrikkere broen i store fabrikker, for så å frakte og montere de på stedet. Denne prosessen utsetter broen for laster som ellers ikke er til stede under driftsfasen. Montering av tekniske installasjoner som belysning, nese, solceller etc. bidrar også til laster i form av for eksempel last fra maskiner. Det samme vil også gjelde kjøretøy og maskiner som sørger for vedlikehold av broen.</p> <p>Frihetsgrad: Påvirker alle bevegelses frihetsgradene men i ulik grad</p>

2.5 Ulykkeslaster

Ulykkeslaster kan ha en innvirkning på samtlige av broens seks bevegelses frihetsgrader, og defineres som laster som opptrer ved unormale tilstander, ulykker, eller naturkatastrofer. Alle anlegg skal kontrolleres i forhold til aktuelle ulykkeslaster.

Ulykkeslast	Beskrivelse
Kollisjonslast	Kollisjonslaster oppstår i form av både kjøretøy på broen som kolliderer med rekkverk, føringskant eller andre deler av broen, og av båter som kolliderer med pongtongene, søylene eller andre bærende deler av broen. Dette er ekstra viktig siden det er lagt til rette for sjøfartstrafikk i den ene enden av broen.
Eksplosjonslast	Dette er laster som kan oppstå som følge av sabotasje, terror eller eksplosjoner som følge av uhell.
Brannlast	Brannlast kan bidra til temperaturdeformasjoner, og ved ekstremt høye temperaturer vil integriteten til konstruksjonsmaterialer svekkes.
Utmatting	Beskriver virkningen gjentatte laster har på en konstruksjon. Alle lastene på broen er med på å akselerere broen, noe som over tid vil slite på broen, som virker negativt på bærekapasiteten.

3 Lastbildet

For å kunne dimensjonere broens tverrsnitt må man skape et lastbilde på konstruksjonen for å bestemme den aktuelle lastsituasjonen. Lastsituasjonen blir valgt av den mest ugunstige kombinasjonen for å sikre at tverrsnittet kan motstå de største moment- og skjærbelastningene som kan oppstå.

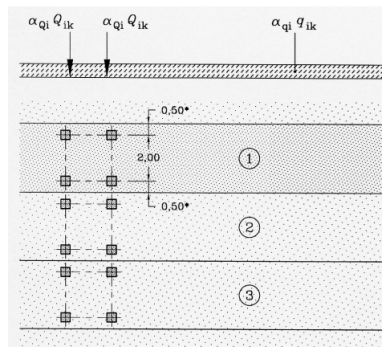
De kritiske lastene som blir regnet med i denne oppgaven er egenlast, vindlast og trafikklast. For å avgrense oppgaven er det ikke tatt hensyn til den dynamiske lastfrekvensen som kan komme av varierende laster. Snølast for Namsos kommune er 4,0 kN/m [19], men blir neglisjert siden den ikke kommer til å opptre samtidig som trafikklaster.

Ett av hovedmålene med denne oppgaven er å utforske effekten av å sette på solceller. Egenlasten og vindlasten på broen kommer til å endre seg etter solcellene og den aerodynamiske nesen er påført. For å utrede lastbildet vil først trafikklaster regnes ut og deretter tas det hensyn til egenlast og vindlast før og etter installeringen av nesen.

3.1 Trafikklast

Det er tatt utgangspunkt i rapporten Jøa 't Land når trafikklaster har blitt beregnet.

Ved beregning av dominerende trafikklast er det oppgitt i Jøa 't Land at Lastmodell 1 (LM1) blir brukt. Det er derfor den eneste lastmodellen som er regnet på i denne rapporten. I LM1 opptrer både en konsentrert trafikklast (punktlaster), i tillegg til en jevnt fordelt last (UDL) som virker langs hele broen. Disse er regnet ut i henhold til Norsk standard, og gjort i to steg; a) To-aksel-konsentrert last (tandem system: TS), og b) Jevnt fordelt last. Ved bruk av LM1 skal dette dekke trafikkork med høy konsentrasjon av tunge kjøretøy. Punktlaster virker over kontaktflaten mellom hjul vei og regnes til å være 40x40 cm. I utregningene er dette regnet som en konsentrert last, eller en punktlaster. Den jevnt fordelte lasten virker over hele bredden på broen, inkludert den resterende bredden av veien, i motsetning til den konsentrerte lasten som ikke virker på den resterende bredden.



Figur 3.1: Boggilast, og en jevnt fordelt last som virker på vegbanen[6]

Table 4.2 - Load model 1 : characteristic values

Location	Tandem system TS	UDL system
	Axle loads Q_{ik} (kN)	q_{ik} (or q_{ik}) (kN/m ²)
Lane Number 1	300	9
Lane Number 2	200	2,5
Lane Number 3	100	2,5
Other lanes	0	2,5
Remaining area (q_{ik})	0	2,5

Figur 3.2: Karakteristiske verdier for Aksellaster og Jevnt fordelte laster i henhold til NS [6]

I tabell 3.2 er det oppgitt trafikklastene som opptrer i kjørefeltene på en vei. Broen i denne oppgaven består av to kjørefelt, så det er kun verdiene i de to første radene i tabellen som er brukt. Tallene beskriver lastene som virker i én aksel. En boggilast har to aksler så denne verdien må doubles. Lasten fra to-aksel systemet fordeles vanligvis på to hjul, slik vist i figur 3.1, men når spennet på veien, altså spennet mellom pongtongene er større enn 10m kan disse regnes som en en-akslet-konsentrert last [16], dette gjelder i dette tilfellet. Justeringsfaktorene som har blitt brukt er de anbefalte verdiene fra NS som er lik 0,4 [14]. Siden det ikke er spesifisert noe annet er justeringsfaktorene til kjørebanelene satt som like hverandre [17]. Dette gjelder også for justeringsfaktoren til resterende vegbredde “ α_r ”.

Table 4.3 - Characteristic values of centrifugal forces

$Q_{ik} = 0,2Q_v$ (kN)	if $r < 200$ m
$Q_{ik} = 40Q_v / r$ (kN)	if $200 \leq r \leq 1500$ m
$Q_{ik} = 0$	if $r > 1500$ m

Figur 3.3: Karakteristiske verdier for sentrifugalkrefter i henhold til NS[18]

De gitte tabellene er tatt utgangspunkt i når det er regnet på trafikklast i vedlegg D. I utregningene kom det fram at det virker en konsentrert aksellast på hver av vegbanene på henholdsvis 480 og 320 kN som til sammen gir en total konsentrert aksellast på 800kN. Denne kommer i tillegg til en jevnt fordelt last som ble kalkulert i samme vedlegg til å være 14,3 kN/m.

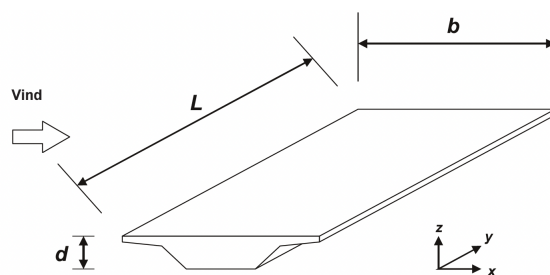
3.1.1 Sentrifugallast

Broen har en radius på 1100m, og siden denne er lavere enn 1500m, skal det i følge tabell 3.3 fra NS[18] tas hensyn til sentrifugallast. Dette er laster som virker på broen når et kjøretøy følger kurven til broen, og gir broen en akselerasjon. Denne lasten regnes ofte sammen med akselerasjonslast og bremselast, men virker i x-retning, på tvers av broen. I utregningene i vedlegg D er denne lasten funnet til å være lik 29,1kN/m.

3.2 Vindlast

Ved bestemmelse av vindlasten er det tatt hensyn til NS-EN 1991-1-4 vindlast [5] og det nasjonale tillegget som følger dette, se vedlegg E for utregninger.

Vindhastigheten i Namsos kommune er egentlig 26m/s [20], men ved kombinasjonen av vind og trafikklaster blir den satt ned til 23m/s isteden. Returperioden er satt til 100 år for å kunne dimensjonere broen med et langsiktig mål om bærekraft, og terrengkategori er 0, altså kyststrøk som er eksponert for åpent hav [20]. Disse to faktorene øker referansevindhastigheten fra 23m/s [21] til 32m/s [20]. Dette gir en basisvindhastighet på ca. 33m/s. Stedsvindhastighet er regnet fra punktet hvor broen er på sitt høyeste, altså 25m, fordi her er det antatt å være mest vind, og mer vind gir en større last på tverrsnittet. Det er viktig å legge merke til at det er kun ett spenn hvor broen har denne høyden, men det velges å dimensjonere for broens mest belastede snitt. Terrengruhetskategori er valgt å være 1 [22] ved hjelp av vedlegg A1 i standarden[23].



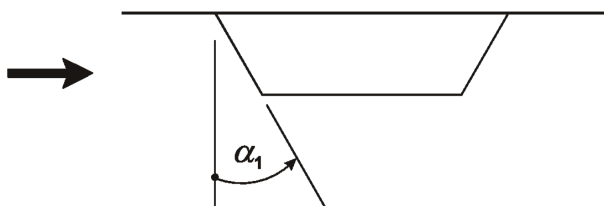
Figur 3.4: Retninger for vindpåvirkning for broer [5]

Figur 3.4 viser den valgte akse for beregningen av vindlasten. Det er kun tatt hensyn til kreftene i x-retning. Kreftene i z-retningen [21] virker både oppover og nedover og er sett på som løftekraftfaktorer. Dette kan gi solcellekonstruksjonen et løft, siden nesene er utformet som en slags “vinge”, og beregninger med dette ble svært komplisert. Det ble derfor valgt å avgrense oppgaven ved å ikke inkludere dette. Y-retning skal kun beregnes om det er nødvendig [21], og det er i dette tilfellet ikke sett på som nødvendig.

Tabell 3.1: Vindlast i x,y,z retning

Vindlast	Uten nese	Med nese
x-retning	8,1 kN	5,7 kN

Tabell 3.1 gir de endelige vindlastene i x-retningen. Det kan observeres at med den påførte nesen reduseres vindlasten med 30% i x-retningen. Det kan tenkes at vindlasten i z-retning øker i og med tverrsnittet blir bredere med den påførte nesen.

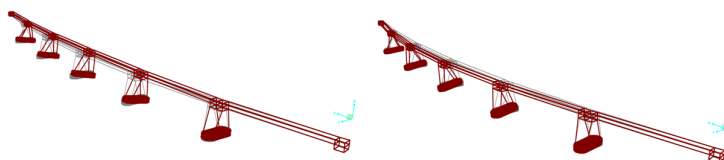


Figur 3.5: Reduksjonsfaktor for vindkraft med skråstilt lo side [5]

Grunnen til at nesen reduserer vindlasten i x-retning er fordi kraftfaktoren, “ $C_{f,x,0}$ ”, reduseres med 0,5% for hver helningsgrad, α_1 , nesen har på undersiden. α_1 for prosjektets valgte konstruksjon 70° . Selv om reduksjonsfaktoren hadde blitt $70^\circ * 0,5\% = 35\%$, kan α_1 maks redusere opp til 30% [21], som vil si $C_{f,x,0}$ kun reduseres med 30%.

3.3 Resonans og egenfrekvens

En flytebro er spesielt utsatt for resonans. En bro er allerede en ekstremt utsatt konstruksjon, både for miljølaster, samt trafikklaster, hvor begge er variable laster. Det at broen da er en flytebro gjør den mer bevegelig enn fastmonterte broer, og den kan bevege seg i flere av de seks bevegelses frihetsgradene. Krefter som virker på broen med en frekvens vil da kunne resonere med broens egenfrekvens. Dette inkluderer laster som vind og bølger. Det er ved hjelp av SAP2000 funnet at broens egenfrekvens ligger på 0.2Hz, eller 5 sekunder per svingning. For å hindre at det påmonterte systemet bidrar til svingninger vil det være gunstig at systemet har en egenfrekvens som er forskjellig fra broen, samt ha demping som sørger for å begrense kreftene som potensielt kan bygges opp skulle dette skje.



Figur 3.6: svingninger i horisontale retninger

Figur 3.6 viser hvordan svingningene er antatt å se ut for broen etter alle lastene er påført. Broen har også en radius på 1100m som sørger for at broen ikke beveger seg fra høyre til venstre, men bare vugger isteden (roll).

3.4 Egenlast

Egenlasten på tverrsnittet består i hovedsak av tre deler. Disse er (1) slitelag (asfalt) og alt som ligger over stålkassen, (2) stålkassen, og (3) nesen med sine tekniske installasjoner. Egenlasten av broen regnes først uten nesen, og deretter på nytt etter nesen er montert for å sammenligne hvordan nesen påvirker denne lasten.

Det er i vedlegg F regnet ut den påførte egenlasten av solcellekonstruksjonen. Dette inkluderer solceller, rammeverk, plater og gangbro. Denne kalkulerte lasten er påført begge sider av broen. Det vil ikke bli montert solceller på nordsiden av broen, men det vil i likhet med sørsiden monteres en aerodynamisk nese. Isteden for solceller på nordsiden, monteres en plate på den øvre delen av nesen. Platen dimensjoneres til å ha en tykkelse som gir en egenvekt lik den av solcellene. Dette gir nordsiden de samme aerodynamiske egenskapene som er på sørsiden, samtidig som det sørger for likevekt i tverrsnittet, som igjen hindrer torsjon i "Roll"-retningen.

Det er valgt å se på laster fra Jøa 't Land rapporten for å sammenligne verdier og bruke de som en pekepinn på hvor stor egenlasten uten nesen kan forventes å være. Lasten oppgitt av Multiconsult er 5,3 tonn/m for gjennomsnittlig stålvekt for brobjelke, og 1,4 tonn/m for slitelag og rekkverk. Dette gir Multiconsult sitt design en egenlast på 67kN/m [1].

Utregningene av egenlasten for denne oppgaven er i vedlegg F, og det er funnet at den totale egenlasten på broen uten nesen er på 50,5 kN/m. Dette er inkludert slitelaget (asfalt), rekkverk og stålkassen. Etter nesen er montert er denne på 54,8 kN/m. Mer om hvordan egenlasten til nesen er regnet ut står det om i kapitlet om design og utforming av solcellesystemet.

3.5 Temperaturlast

I Jøa 't Land er det dimensjonert med en temperaturforskjell på +/-30 grader. Det er tatt utgangspunkt i at det samme gjelder her. Broen i dette tilfellet er fritt opplagt i den ene enden, samt alle ledd mellom spenn. Dette medfører at deformasjonen som kommer av dette ikke vil bidra til økt aksialkrefter i bærebjelkene.

3.6 Lastkombinasjoner

Funksjonen til broen er å transportere kjøretøy fra fastlandet til Jøa, og kunne motstå alle kreftene den utsettes for [11]. Lastene som er påkjent en konstruksjon kan som regel deles inn i egenlast, nyttelast, og miljølast. Disse lastene må settes sammen i angitte kombinasjoner for å kunne beregne lastvirkningene og de dimensjonerende lastene.

Disse lastene kan igjen skilles ved deres variasjon i størrelse, tid og rom. Her er det permanente påvirkninger (G), variable påvirkninger (Q) og ulykkespåvirkninger (A). Denne oppgaven benytter kun de to første, G og Q.

Justeringsfaktorene som er brukt i utregningen av lastkombinasjoner er i henhold til NS-EN 1990 [15] og er som vist i vedlegg I. For denne broen er de variable lastene vind og nyttelast som ganges med en faktor på 1,35. De permanente lastene, som her er egenlasten ganges med en justeringsfaktor på 1,05. Det er disse lastene som blir dimensjonerende. Tabellen under viser en oppsummering av verdiene fra vedlegg I.

4 Design og utforming av bro

Flytebroen har flere komplekse krefter som opptrer samtidig, og beregning av flere av disse er utenfor vår kompetanse. For å få et mest mulig reelt dimensjonert tverrsnitt, er det gjort flere forenklinger. Etter utregning av kapasiteten ble det sammenlignet med kapasiteten fra tverrsnittet til Multiconsult for å kontrollere.

4.1 Valg av brotype

De brotypene som viste seg å være mest gunstige var en kassebro i stål og en fagverksbro. Etter samtaler med Multiconsult, spesielt med Per Norum Larsen og Kim Hugo Sivertsen, som arbeider med dimensjonering og design av broen til Jøa, ble det besluttet at en kassebro i stål er den mest hensiktsmessige for dette prosjektet. Betongbro ble raskt utelukket på grunn av materialets lavere styrke sammenlignet med stål. For å oppnå samme kapasitet ville betongen kreve et større tverrsnitt, noe som ville medført høyere egenvekt. Økt egenvekt er ugunstig for en flytebro som er svært følsom for vekt. Dette vil kunne medføre betydelige økonomiske og miljømessige utfordringer, samt øke risiko for at prosjektet verken blir lønnsomt eller bærekraftig. De påpekte også at stål har et høyere CO₂-utslipp per kilo materiale sammenlignet med betong, men mengden stål som trengs for å oppnå samme styrke som betong er langt lavere. Dette gjør at de totale utslippene reduseres. Diskusjonen omhandlet også en sammenligning mellom fordelene og ulempene med fagverksbroer og kassebroer. En fagverksbro krever mindre stål enn en kassebro, men krever mer vedlikehold. På grunn av begrenset tid ble det ikke utført nøyaktige beregninger av stålmengde og CO₂-utslipp for materialene. Derfor ble det besluttet å følge rådene fra Multiconsult angående valg av brotype, og det ble bestemt å bruke en kassebro i stål.

4.2 Forutsetninger

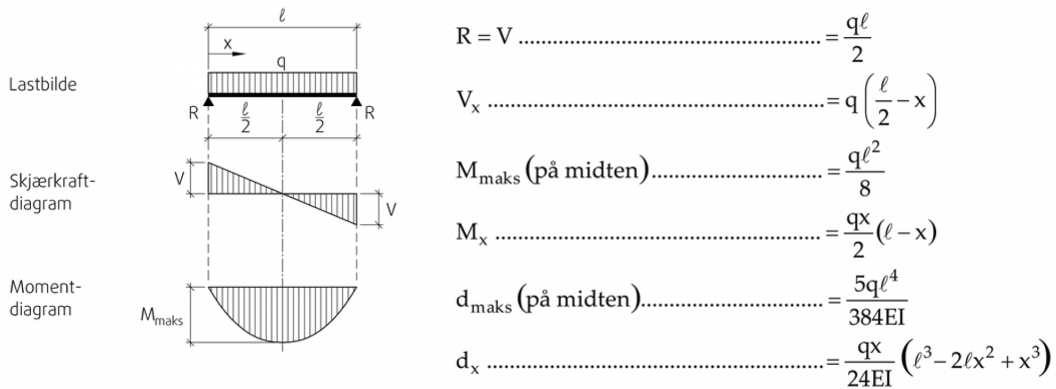
Multiconsult har valgt en stålkvalitet på S420 for den prosjekterte flytebroen til Jøa, og oppgavens nye tverrsnitt også derfor også blitt dimensjonert med denne stålkvaliteten. Under dimensjoneringen av broen blir den for enkelhets skyld betraktet som en rett linje i stedet for en kurve med en radius på 1100 meter, som broen egentlig har (merk at sentrifugalkraften likevel er beregnet med hensyn på denne radiusen). Ved bestemmelse av opplagerkreftene ble det valgt å se på broen som en fritt opplagt bjelke med en ende festet og den andre fritt opplagt med glidelager. Dette fører til at deformasjoner i broen ikke vil føre til ekstra krefter i broens lengderetning. Deformasjon som kommer av temperaturendringer og større svingninger, vil derfor ikke gi opphav til aksialkrefter i bærebjelkene. Det er derfor valgt å se bort ifra dette

4 DESIGN OG UTFORMING AV BRO

når det er regnet på kapasitet. I stedet for å ha broen som én kontinuerlig bjelke er det også valgt å ha leddforbindelsen mellom hvert spenn, noe som deler broen i seksjoner.

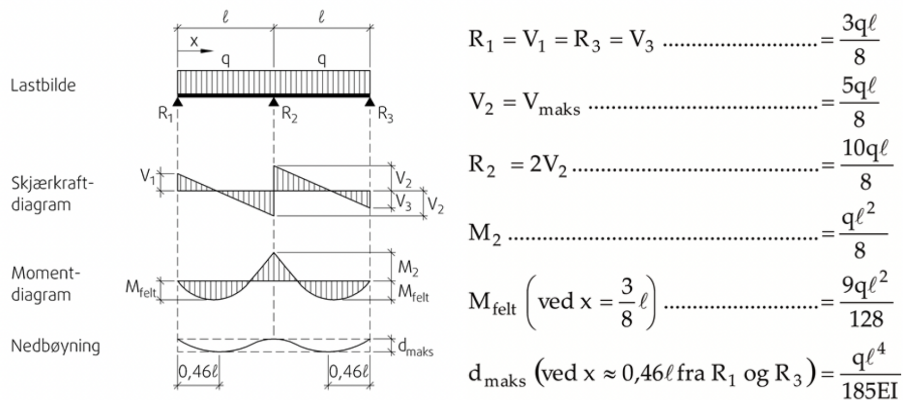
På figurene nedenfor, kan det observeres at bjelke 71, i figur 4.2, har sine største moment og skjærkrefter i samme punkt. Dette skaper en ekstra stor spenning i dette ene punktet, siden disse skjærspenningene og momentspenningene blir lagt sammen. Hvis vi ser på bjelke 21 i figur 4.1, har den skjær- og momentkrefter i to forskjellige punkter. Dette betyr at den maksimale globale spenningen blir mindre. En annen fordel er at bjelken blir rotasjonsfri, det vil si at kraften ikke overføres videre, noe som også reduserer spenningen. Hver bjelke er fritt opplagt med feste i den ene enden.

21 Jevnt fordelt last



Figur 4.1: Fritt opplagt bjelke med jevnt fordelt last[25]

71 Jevnt fordelt last



Figur 4.2: Kontinuerlig bjelke med to like spenn og jevnt fordelt last [25]

Her kan man observere at M_{maks} fra bjelke 21 er den samme som M_2 fra bjelke 71, men ved bjelke 71 må man i tillegg legge til spenningen fra skjær, V_2 med M_2 .

4.3 Dimensjonering av tverrsnitt

Broens dimensjonering startet med utviklingen av et tverrsnitt, etterfulgt av en kapasitetssjekk. Valget falt på en fritt opplagt, statisk bestemt bjelke med et rektangulært tverrsnitt med bredde på 8 meter og 3,5 meter høyde. Deretter ble spenningen beregnet for ulike snitt, og det mest kritiske punktet i snittet ble identifisert. Dette punktet ble ansett som det med høyest spenning og ble brukt til å vurdere effekten av å installere solcellesystemet. Spenningen ble beregnet fra snitt med en avstand på 5 meter, hvor punktene i det mest kritiske snittet ble brukt i disse beregningene.

I et tverrsnitt oppstår det spenninger når en last påføres. Det er viktig at lasten ikke overstiger materialets karakteristiske verdi, som er 420 MPa for denne konstruksjonen. Spenningen kan deles inn i dimensjonerende kapasitet (f_d), karakteristisk kapasitet (knekkspenning) (f_k), og flytespenning (f_y) som angir flytegrensen. F_k er den spenningen stålet maksimalt tåler før det knekker. I en konstruksjon kan man ikke bruke denne verdien direkte, da det ikke er inkludert noen form for sikkerhetsfaktor i tilfelle broen blir utsatt for større belastninger enn det som er planlagt. Derfor brukes en lavere dimensjonerende verdi som tar hensyn til dette. Spenningen tverrsnittet tåler avhenger av den valgte stålqualiteten. Det er her valgt å bruke S420-stål som gir en f_k på 420 MPa. For at denne verdien skal bli dimensjonerende deler man f_k på materialfaktoren γ_{M0} , som for broer er 1.1, i motsetning til 1.05 som gjelder for bygg i Norge. Dermed blir den dimensjonerende verdien 382 MPa. Siden vår bro er en flytebro som er sterkt påvirket i alle bevegelses frihetsgradene, blir belastningen mer sensitiv for utmatting. Etter veilederens råd, ble flytespenningen redusert med 100 MPa, noe som gir en ny dimensjonerende flytespenning på $f_d = 290$ MPa, (se formel 4.1).

$$\frac{f_y - 100}{\gamma_{M0}} = f_d = \frac{420 - 100}{1.1} = 290 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

Dette gir et grunnlag på hvor mye tverrsnittet kan tåle. Den maksimale *påførte* spenningen kan ikke overstige kapasiteten på 290 MPa. Dette vil si:

$$\text{Påført spenning} < \text{Kapasitet, } f_d, \text{ til stålet}$$

For å finne den totale påførte spenningen i alle tverrsnittene må bøyepeningene og skjærspenningene i x- og z-retning regnes ut. En formel som legger disse sammen er Von Mises flytekriterium. Dette elastiske kapasitetskriteriet er definert i det punktet i tverrsnittet hvor den påkjente snittkraften, eller kombinasjonen av snittkrefter skaper flyting [10]. Dette er det vanligste kapasitetskriteriet for metalliske konstruksjoner[10]. En spenningstilstand med to

dimensjoner vil gi flyt når spenningskomponentene σ_x , σ_z og τ_{xy} tilfredsstiller kriteriet i formel 4.2 i det mest påkjente punktet. Dette er implementert i NS-EN 1993-1-1.

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau_{xz}^2} = f_d = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.2)$$

Det første steget i en elastisk tverrsnittkontroll innebærer å bruke fasthetslære for å beregne de ulike spenningskomponentene som oppstår, og deretter bekrefte at flytekriteriet ikke overskrides i materialet. Når det gjelder bjelker som er utsatt for bøyningmoment, vil σ_{maks} oppstå i de ytterste fibrene i tverrsnittet, mens skjærkreftene τ_{maks} vil oppstå ved nøytralaksen. I dette tilfellet hvor profilen på broen er et hult rektangulært profil, kan det da være nytting å sjekke flytekriteriet i overgangen mellom steget og flensen. Skulle Von Mises kriteriet fra ligning 4.2 være mindre eller lik f_d , vil det si at materialet er elastisk i tverrsnittet. Dersom verdien skulle bli større enn f_d , vil det si materialet er overbelastet og vil få plastiske deformasjoner[10].

Gjennom broens spenn, opptrer det både bøyepenninger, σ , og skjærspenninger, τ . Disse kommer fra bøyemoment og skjærkraften som dannes når lasten er påført. De valgte aksene for tverrsnittet vises i figur 3.4. Formlene for σ , og τ vises under:

$$\sigma = \frac{M}{IZ} \quad (4.3)$$

der:

I = 2. arealmoment

Z = Avstand fra spenningspunkt til NA, nøytralaksen

$$\tau = \frac{VS}{Ib} \quad (4.4)$$

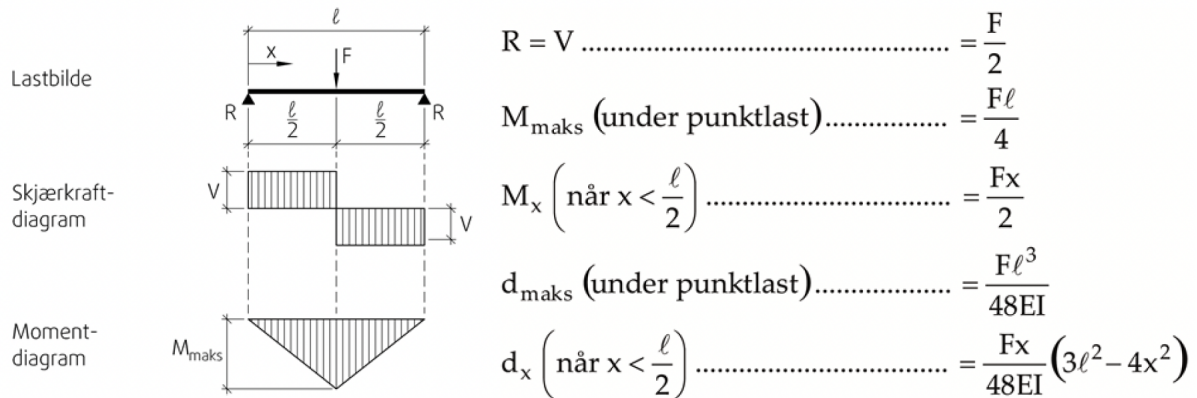
der:

S = 1. arealmoment

b = $\frac{h}{2}$

Med dette kan det videre bestemmes de ukjente faktorene i formlene for å deretter kunne dimensjonere tverrsnittet, og så sjekke at kapasiteten er ok. De ukjente verdiene som må identifiseres er: M_x , M_z , V_x , V_z , I_x , I_z , S_x , S_z , og til slutt Z og b. Utregning av dette vil bli vist videre.

24 Sentrisk punktlast



Figur 4.3: Fritt opplagt bjelke med punktlast [25]

I dette steget bestemmes momentkreftene: M_x , M_z , og deretter skjærkreftene: V_x og V_z langs bjelken i forskjellige snitt. Broen har en jevnt fordelt last som virker både horisontalt og vertikalt. Det virker også en punktlast fra aksiallasten som kun virker i vertikal retning. Det kan observeres at fra diagrammene i bjelke 21 på figur 4.1, og bjelke 24 fra figur 4.3, varierer skjær og moment over hele bjelken. Formelene gir de opptredende kraftdiagrammene i gitte punkter. De nødvendige formlene som er brukt for å finne momentet er:

$$Mx = \frac{qx}{2}(l - x) \tag{4.5}$$

Hvor:

Mx = Moment ved lengde x på bjelken

x = Lengde

q = Jevnt fordelt last

$$Mx = \frac{Fx}{2} \tag{4.6}$$

Hvor:

F = Punktlast

Legger man disse to formlene sammen får man følgende:

$$Mx = \left(\frac{ql}{2} + \frac{F}{2}\right)x - \left(\frac{qx^2}{2}\right) \tag{4.7}$$

For skjærkraft blir dette:

$$Vx = q\left(\frac{l}{2} - x\right) \tag{4.8}$$

4 DESIGN OG UTFORMING AV BRO

for den jevnt fordelte lasten, og for punklast:

$$V = \frac{F}{2} \quad (4.9)$$

addert sammen får man:

$$Vx = \frac{ql}{2} + \frac{F}{2} - qx \quad (4.10)$$

Formlene 4.7 og 4.10 vil bli brukt for å videre beregne de opptredende kreftene. Det ble gjort beregninger i snitt hver 5. meter, inkludert starten, midten, og enden. Under er en oppsummering av verdiene som inngår i formelene for å finne momentet og skjærkraft:

Tabell 4.1: Inngangsverdier for å finne moment- og skjærkraft

Beskrivelse	Symbol	x-retning	z-retning	Enhet
Lengde	l	106,7		m
Fordelt last	q	11	74	kN/m
Punklast	F	30	800	kN/m

Den fordelte lasten og punktlasten ble beskrevet i kapittel 3 om lastbildet. Videre kan maks moment og skjærkraft i x- og z- retning regnes ut. Tabell 4.2 under viser et utdrag fra vedlegg J med kreftene i seks forskjellige snitt. Det er blitt brukt formel 4.7 og 4.10.

Tabell 4.2: Moment- og skjærkrefter i utvalgte snitt

Avstand X [m]	Mz [kNm]	Mx [kNm]	Vz [kN]	Vx [kN]
0	0	0	4 5000	600
25	89 000	12 000	2 600	300
53,4 (midten fra v side)	134 000	17 000	540	20
53,4 (midten fra h side)	134 000	17 000	-540	-20
80	93 000	12 000	-2 500	-300
0	0	0	-4 500	-600

Med dette er M_x , M_z , V_x og V_z funnet i de nødvendige snittene langs bjelken. Neste som må finnes er 2. arealmoment om x- og z-aksen. Detaljerte utregninger er vist i vedlegg J. For å finne 2. arealmoment er det benyttet Steiners teorem, som blir følgende formel:

$$I = \sum I = I + AZ^2 = \frac{bh}{12} + bh(NA - TP)^2 \quad (4.11)$$

Hvor: I = 2. arealmoment

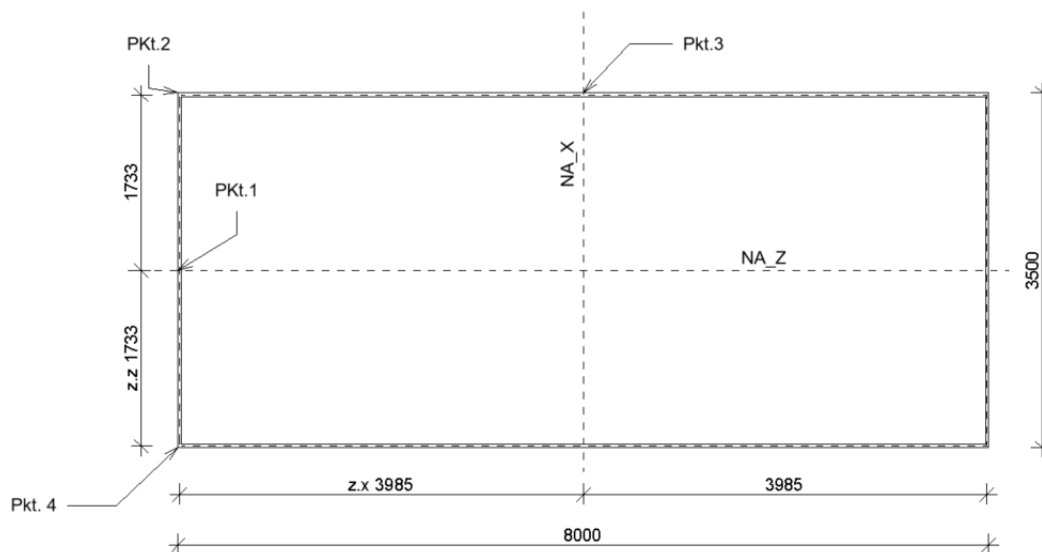
Z = NA-TP som er nøytralakse - tyngdepunkt av bjelken som skal finnes.

I tabellen under vides utregnede I_x og I_z .

Tabell 4.3: 2. Arealmoment om x og z aksene

Beskrivelse	Symbol	Verdi	Enhet
2. Arealmoment om x	I_x	$1,3 \cdot 10^{12}$	mm^4
2. Arealmoment om z	I_z	$4,3 \cdot 10^{12}$	mm^4

Det siste steget er å finne S_x og S_z . Når disse er funnet, skal de identifiseres i forskjellige punkter i snittet. Ser man på spenningsdiagrammet til skjær og moment i et snitt, er det nødvendig å sjekke hva som skjer i de forskjellige delene, ikke kun i toppen. Det ble nevnt tidligere at det er viktig å sjekke spenningen i hjørnet, altså overgangen mellom flens og steg. Dette er fordi her opptrer både skjærspenning fra x- og z- kraften, men også bøyepeningen fra x- og z- retning. Snitter man et vilkårlig sted langs bjelken, vil normalspenningen, σ_x , altså bøyepeningen, som kommer fra bøyemomentet variere lineært over bjelkehøyden. Fordelingen av skjærspenningen blir mer som en slags parabel. Figur 4.4 viser valgte punkter som kan være interessant å sjekke kapasiteten til.


 Figur 4.4: Punkter for S skal identifiseres

For å finne S , 1. arealmoment, i disse punktene, er det brukt følgende formel:

$$S = \sum ZA \quad (4.12)$$

der

z = Arm fra NA til tyngdepunkt

A = Areal fra tyngdepunkt

For å finne spenningen i et gitt punkt i tverrsnittet, finner man S for det spesifikke punktet,

dette vil si S varierer for alle punkt 1-4. Tabell 4.4 viser en oppsummering av verdiene funnet, se vedlegg J for utregningene.

Tabell 4.4: Tabell over verdier for S

Punkt	Symbol	Verdi	Enhet
1	$S_{z,1}$	$6,13 \cdot 10^7$	mm^3
2	$S_{x,2}$	$6,75 \cdot 10^8$	mm^3
3	$S_{x,3}$	$4,00 \cdot 10^8$	mm^3
4	$S_{z,4}$	$7,55 \cdot 10^8$	mm^3

Det følgende steget er å beregne bjelkens påførte spenning. Den dimensjonerende kapasiteten er på 290 MPa, her er målet at den totale påførte spenningen skal være under dette. Altså Von Mises flytekriteriet må være oppfylt, se formen 4.2. Fra tabellene over, og vedleggene i dette kapitlet, kan man så beregne verdiene med de følgende formlene:

$$\sigma_x = \frac{M_z}{I_z} Z \quad (4.13)$$

der:

$I_z = 2$. arealmoment om z-aksen

$$Z = \frac{h}{2}$$

Momentspenning er kun nødvendig å regne ut i punkt 1, fordi den er tilnærmet 0 i punkt 4.

$$\sigma_z = \frac{M_x}{I_x} Z \quad (4.14)$$

der:

$I_x = 2$. arealmoment om x-aksen

$$Z = \frac{b}{2}$$

Momentspenningen er kun nødvendig å regne ut i punkt 3, fordi den er tilnærmet 0 i punkt 2.

$$\tau_z = \frac{V_z S_x}{I_x b} \quad (4.15)$$

der:

$S_x = 1$. arealmoment om x-aksen

$$b = \frac{h}{2}$$

Denne skal regnes ut for punkt 2 og 3.

$$\tau_x = \frac{V_x S_z}{I_z b} \quad (4.16)$$

der:

$S_x = 1$. arealmoment om z-aksen

$$b = \frac{b}{2}$$

Denne skal regnes ut for punkt 1 og 4.

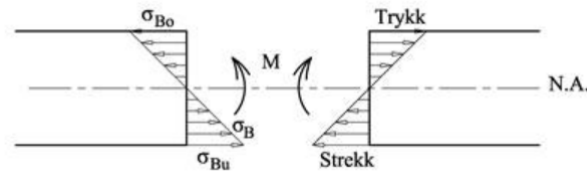
Tabell 4.5: Spenningsverdier utifra Von Mises kriterium

X [m]	Pkt 1	Pkt 2	pkt 3	pkt 4
0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	8,6	30,7	28,0	25,3
10	16,4	58,7	53,6	48,5
15	23,4	84,1	76,8	69,5
20	29,6	106,8	97,6	88,4
25	34,9	126,8	115,9	105,1
30	39,5	144,2	131,9	119,6
35	43,2	158,9	145,5	132,0
40	46,1	170,9	156,6	142,3
45	48,2	180,3	165,3	150,4
50	49,4	187,0	171,7	156,3
53,35	49,8	190,0	174,6	159,1
53,35	49,8	190,0	174,6	159,1
55	49,7	188,7	173,3	157,9
60	48,7	182,9	167,8	152,7
65	46,9	174,4	159,8	145,3
70	44,3	163,3	149,5	135,8
75	40,8	149,5	136,8	124,1
80	36,6	133,0	121,6	110,3
85	31,5	113,9	104,1	94,3
90	25,6	92,1	84,1	76,2
95	18,9	67,6	61,8	55,9
100	11,4	40,5	37,0	33,4
105	3,0	10,7	9,8	8,9
106,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Scale	0	100	200	300

Tabell 4.5 viser alle kalkulerte spenninger i snittene langs bjelken og punktene i tverrprofilen. Her er det brukt Von Mises kriteriet og det kan observeres at alle punktene er godt under 290 MPa. Siden det ble brukt Excel til å gjøre utregningene, var det enkelt å endre tykkelsen på flensen og steget, noe som har stor innvirkning på kapasiteten og tverrsnittsutnyttelsen. Her har flensen en tykkelse på 25mm, og steget en tykkelse på 20mm. Man kan observere at tverrsnittsutnyttelsen er på rundt 65,5%, hvor høyeste opptredende spenning er 190 MPa. Punktet med mest spenning er snittet i midten av bjelken ved punkt 2, altså overgangen fra topp flens og steg. Punktet med

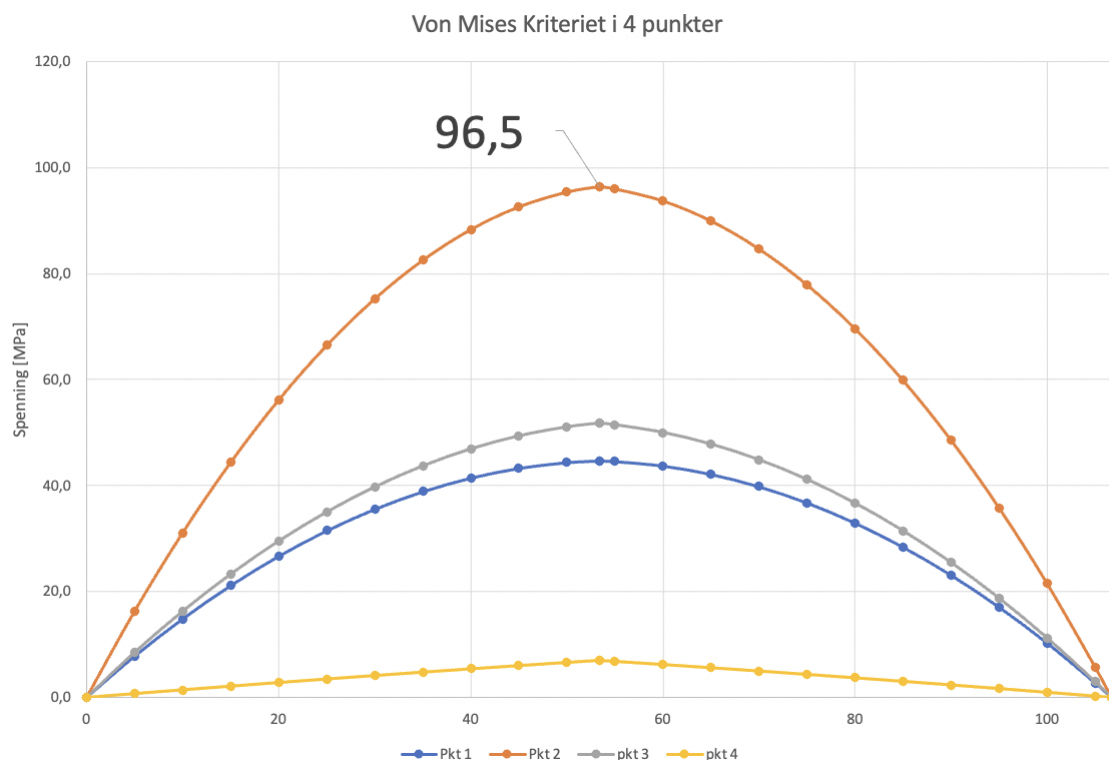
4 DESIGN OG UTFORMING AV BRO

minst spenning er pkt 4. Dette kan komme av at de største kreftene på broen er trafikklaster og egenlast, som begge i hovedsak virker i vertikal z-retning. Etersom bøyenspenningene fordeles lineært fra toppen til bunnen i tverrsnittet slik illustrert i 4.5, ser man at det i midten av tverrsnittet oppstår lite spenning.



Figur 4.5: Fordeling av spenning fra moment i tverrsnitt

Graf 4.6 viser spenningen gjennom bjelken i de fire forskjellige punktene. Her ser man også tydelig at punkt 2 har den høyeste spenning. Den laveste spenningen er i pkt 4, som er de nederste hjørnene. Punktens lokasjon er bestemt i figur 4.4.



Figur 4.6: Spenningsfordeling i bjelken

Denne oppgaven regner kun om spenningen er ok, og tar ikke hensyn til knekking eller nedbøyning. Det antas at selv om spenningen er ok, kan disse to fortsatt være et problem. Knekkning av flater er utenfor gruppens kompetanse, men her er et alternativ som kan være

4 DESIGN OG UTFORMING AV BRO

en mulig løsning. I tverrsnittet fra Multiconsult sin rapport Jøa 't land [1], er det lagt inn tverravstivere både for å unngå knekking i tverretningen (om x-akse), og langs bjelken (om y-akse). Disse er lagt inn med jevne mellomrom. I tverrprofilen dimensjonert i denne oppgaven kan det blir lagt inn lignende avstivere for å øke styrken.

4.4 Sammenligning med Multiconsult sitt tverrsnitt

For å være sikker på at utregninger av trafikklast og vindlast er gjort riktig, er det regnet ut kapasitetene på tverrsnittet i Jøa 't Land rapporten, som har blitt designet av Multiconsult. Kapasiteten i dette tverrsnittet har blitt sammenlignet med den kalkulerete kapasiteten til tverrsnittet som er valgt å bruke i denne rapporten. Når dette er gjort er det tatt utgangspunkt i formel 4.17.

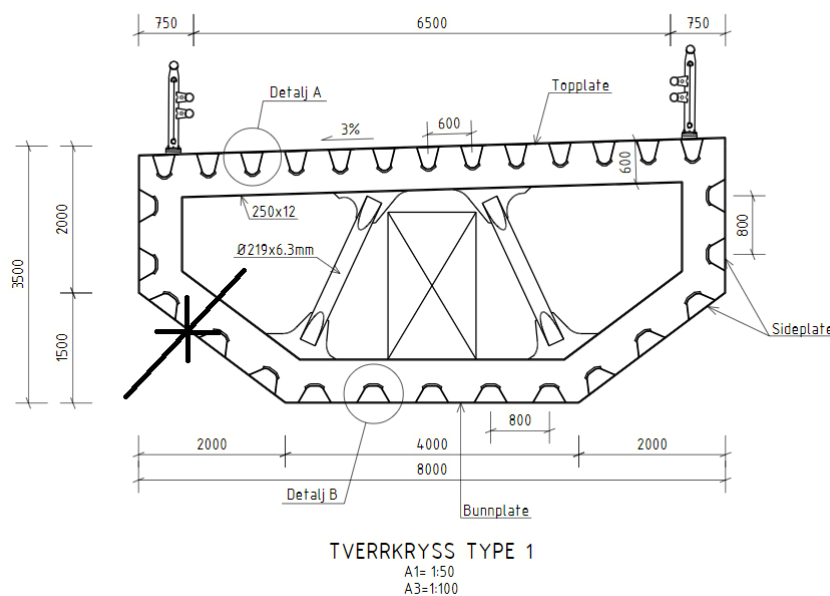
$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{\frac{ql^2}{8}}{\frac{f_d I_{x,y}}{Z}} \leq 1 \quad (4.17)$$

Hvor:

M_{Ed} = Dimensjonerende moment

M_{Rd} = Momentkapasitet

Her er det kun q som er ukjent, resten er mulig å beregne.

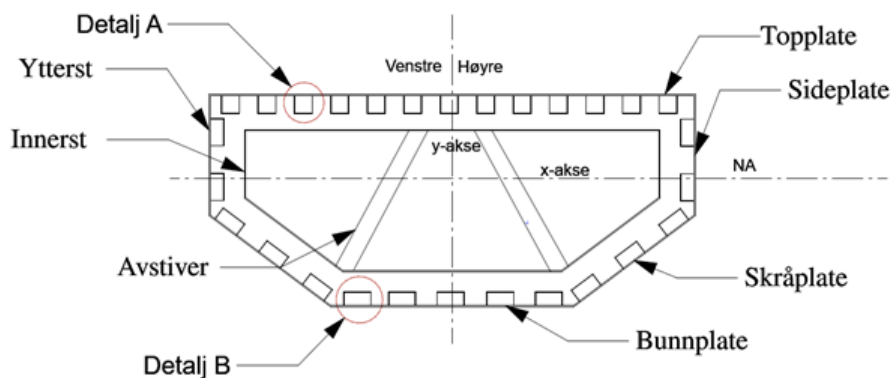


Figur 4.7: Multiconsult sitt forslag til tverrsnitt[1]

Når kapasiteten til Multiconsult sitt tverrsnitt er regnet ut er det gjort noen estimat, samt

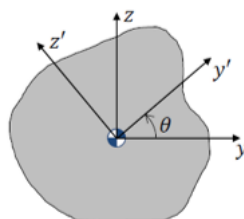
4 DESIGN OG UTFORMING AV BRO

forenklinger av utforming. Dette er gjort for å gjøre det mer overkommelig å gjennomføre utregningene. Det har vært fokus på at de endringene som er gjort skal ha minimal innvirkning på de faktiske resultatene, med tanke på arealmoment og kapasitet. Helningen på 3% er sett bort ifra, og de avstivende bøyene, som i tegningene er markert som “Detalj A” og “Detalj B” har ikke blitt regnet del for del, men isteden lagt til som en utvidelse av både de indre og ytre platene i tverrsnittet. Bøyene har en tykkelse på 8mm, og det har blitt valgt å legge til 4 mm både på innside plater og 4mm på ytterste plater. Avstiverene i midten av tverrsnittet er regnet som plater med dimensjoner gitt i Jøa ’t Land (Ø219*6.3mm) og rotert med en vinkel estimert til å være $ATAN(800/2300) = 0,335$ radianer. Dette er illustrert i 4.8.



Figur 4.8: Forenklet snitt fra Multiconsult med navn på deler som samsvarer med utregninger i vedlegg G

Tyngdepunktet, og samtidig nøytralaksene i tverrsnittet er kalkulert i vedlegg G i del 1 og 2. Dimensjoner og tyngdepunkter til hver enkelt konstruksjonsdel er først blitt plottet i regneark, for så å bruke formel 4.22 til å kalkulere koordinatene til tyngdepunktet i tverrsnittet. Videre er det kalkulert andre arealmoment “I” for alle de individuelle delene, ved bruk av formel 4.21. For å finne andre arealmoment i de skråstilte platene, og avstiverene i midten av tverrsnittet er det brukt formelene for transformasjon av andre arealmoment, 4.18, 4.19 og 4.20



$$I_{y'} = I_y * \cos^2\Theta + I_z * \sin^2\Theta - 2 * I_{yz} * \sin\Theta * \cos\Theta \tag{4.18}$$

$$I_{z'} = I_y * \sin^2\Theta + I_z * \cos^2\theta + 2 * I_{yz} * \sin\Theta * \cos\Theta \quad (4.19)$$

$$I_{y'z'} = (I_y - I_z) * \sin\Theta * \cos\theta + I_z + I_{yz} * (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \quad (4.20)$$

$$\frac{b * h^3}{12} + A * z^2 \quad (4.21)$$

$$\frac{\sum A_i * z_i}{\sum A_i} \quad (4.22)$$

$I_{x,y}$ er satt til å være 0, ettersom det ikke er regnet med noen krefter i y retningen. Summen av arealmomentene i alle delene av tverrsnittet er brukt for å finne det globale andre arealmomentet til tverrsnittet.

Ved hjelp av formel 4.17, ble den omjustert til å bli slik:

$$q = \frac{1f_d I_{x,y} 8}{Zl^2} \quad (4.23)$$

Med dette ble det funnet at den maksimale jevnt fordelte lasten som kan påføres tverrsnittet til Multiconsult er som følger:

Horisontalt: $q_{Rd} = 406kN/m$

Vertikalt: $q_{Rd} = 360kN/m$.

Da disse verdiene ble sammenlignet med profilet utregnet i denne oppgaven, var det ganske forskjellig fra kapasiteten i tverrsnittet gitt av Multiconsult. Dette kan komme av ulike grunner, og feilkilder som ulik utforming, feilkalkulerte laster, eller at utregningene ikke tar hensyn til nedbøyning. At avstiverene som Multiconsult har med ikke er med i designet i denne oppgaven er også en mulige feilkilde.

5 Design og utforming av solcellesystemet

Hva som er den beste og mest effektive løsningen for innfesting av solcellene er en kompleks problemstilling. Utformingen må føre til at konstruksjonen er økonomisk lønnsom, og ha minimal effekt på konstruksjonen.

Faktorer som er viktig å ta med i betraktning er størrelsen og egenvekten på systemet, vindfang og vedlikehold. Dette er viktig ikke bare for solcellene og monteringsystemet, men også for bærebjelken under. I tillegg til dette er det viktig å ha fokus på det økonomiske aspektet rundt systemet, og samtidig finne en løsning som er bærekraftig. For å tilfredstille dette, er målet at solcellene skal ha en så høy strømproduksjon som mulig, og samtidig ha et monteringsystem med minst mulig vekt. I et forsøk på å kompensere for den økte vekten, er det gjort et forsøk på å utforme nesen på en aerodynamisk måte for å redusere vindfang og vindlast. Dette kapitlet omhandler prosessen av å finne en løsning som tilfredsstiller alle disse faktorene. Siden gruppen har lite kunnskap om aerodynamikk, er det kun tatt hensyn til reduksjonsfaktoren for vindlast ved en gitt nesevinkelen.

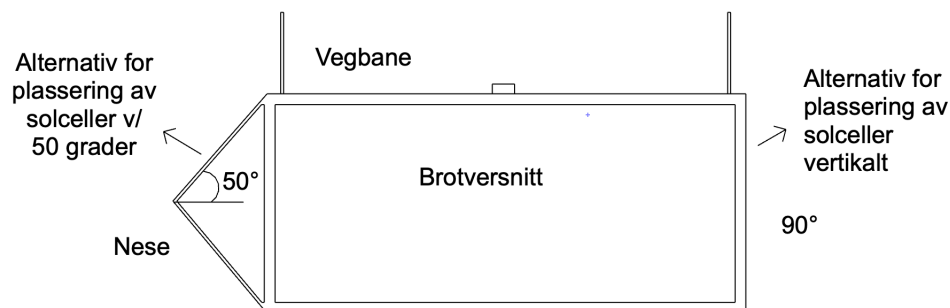
5.1 Utforming

Å vinkle solcellene på en måte slik at energiproduksjon blir så stor som mulig er høyt prioritert, med mål om at dette ikke skal gå på bekostning av andre faktorer. Ved hjelp av programmet PVsyst er denne vinkelen funnet til å være 50° , se vedlegg B. I et forsøk på å kompensere for den økte egenlasten på solcellene, har vi sett på muligheten til å forme rammeverket på en måte som gir broen et mer aerodynamisk tverrsnitt, som også tar hensyn til solenergivinkelen.

Tabell 5.1: Årsproduksjon fra solcellene basert på ulike monteringsvinkler.

Vinkel	Optimal (50°)	Vertikal (90°)
Årsproduksjon	425.5 MWh	343.1 MWh

Tabell 5.1 viser to ulike simuleringer gjort i PVsyst. Dette er en sammenligning av den optimale vinkelen for maksimal energiproduksjon, mot energiproduksjonen av å montere solcellene vertikalt på siden av broens bærebjelke. Monterer man solcellene med en helning på 50° kan det genereres mer energi, men man trenger også fler konstruksjonsdeler som påfører konstruksjonen en høyere egenlast. Monteres solcellene vertikalt genereres det omtrent 20% mindre energi, men man slipper eventuelt å dimensjonere om pongtongene.



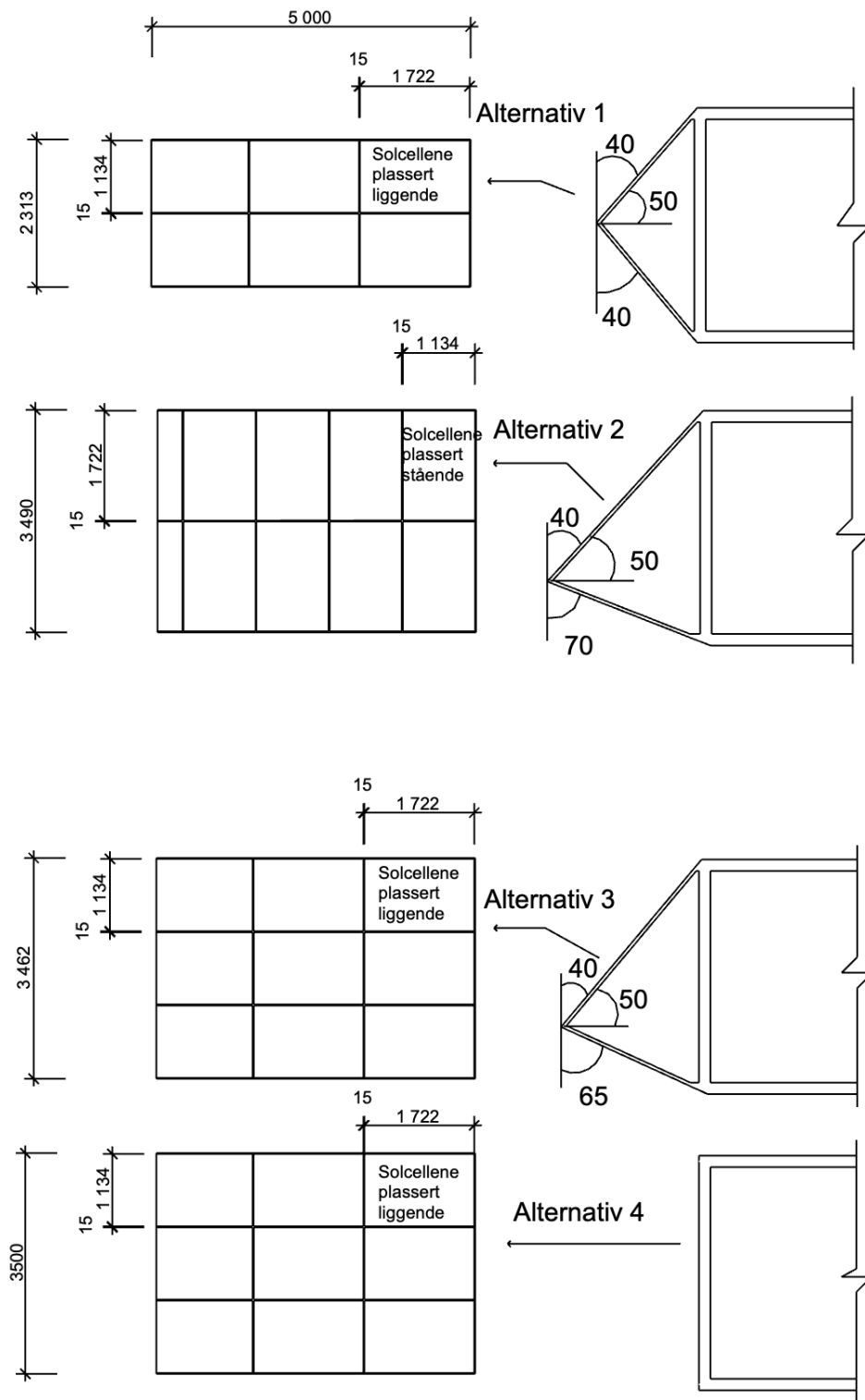
Figur 5.1: Vinkler på tverrsnittet

I figur 5.1 er det illustrert et forslag på hvordan solcellene kan være montert med 50° (på venstre side) mot vertikalt (på høyre side). I kapitlet om økonomi blir det gjort en økonomisk sammenligning mellom disse to løsningene.

Thor Thinius Tuv fra FUSen, en spesialist på solcellemontering med erfaring fra større prosjekter, anbefalte at PowerBridge benyttet solceller fra 400-420M. Dette vil si en “produksjonspeak” på 400-420 Pmax/w, se vedlegg O for informasjon om solcellene. Her er det spesifisert at solcellene har en størrelse på 1722 x 1134 x 30mm og en vekt på 20.8 kg per enhet. Merk at dette kun er solcellepanelene, ikke inkludert skinner, inverttere, ledninger, klemmer og annet utstyr som trengs for å få en solcelle i gang. Mellom hver solcelle må det være 15mm mellomrom for å gi plass til disse ekstra installasjonene. Disse størrelsene er relevante når man skal optimalisere antall paneler som kan monteres på nesen.

Målet er å finne en måte å plassere panelene slik at flest mulig kan monteres, uten at konstruksjonen blir for stor. Fra delkapitlet om vindlast, beskrives det at for hver grad vinkelen mellom solcellene og horisontallinja øker, kan man redusere den horisontale vindlasten med 0,5% [21]. Her er det gunstig å ha en vinkel som kan redusere vindlasten mest mulig. Vindlasten kan ha en maksimal reduksjonsfaktor på 30%, som vil si at etter 60° har det ikke noe mer reduserende effekt på vindlastene på broen.

5 DESIGN OG UTFORMING AV SOLCELLESYSTEMET



Figur 5.2: Alternativer for plassering av solcellene

Det ble utredet fire forskjellige måter man kan plassere solcellene ved å justere på antallet i bredden, og om de er montert liggende eller stående, se figur 5.2. Som en referanselengde er det valgt å ta et utsnitt av broen med lengde 5 meter for å illustrere hvordan solcellene kan

plasseres. De vertikale målene vil si hvor bredt solcelleanlegget blir.

Tabell 5.2: Antall paneler og reduksjonskraftfaktor, $C_{f_x,0}$ for vind

Alternativ	1	2	3	4
Antall panel [stk]	734	1114	1101	1101
$C_{f_x,0}$ [%]	20	30	30	0

I tabell 5.2 er det spesifisert hvilken grad nesen får med tanke på utregningene av den reduserte vindlasten, $C_{f_x,0}$, og hvor mange paneler denne løsningen rommer. Når lastene skal beregnes, er det valgt å ikke ta hensyn til den vertikale vindlasten, men i realiteten vil en bredere nese utvide den totale bredden på broen, noe som vil øke vindlasten i den horisontale retningen. Det vil bli plassert en nese på begge sider av tverrsnittet for å unngå skeivfordeling i broen slik at man oppnår likevekt. Av alternativene over, er det valgt å utforske alternativ 2. Dette er fordi den har høyest antall paneler, og er ikke svært mye lenger enn alternativ 3 og 4.

5.2 Dimensjonering

En mer aerodynamisk utforming av tverrsnittet til broen vil føre til en redusert horisontal vindlast. Det er bestemt at nesa ikke skal være en bærende konstruksjonsdel, altså den skal ikke ta opp krefter fra broen.

Her er to alternativer til hvordan nesekonstruksjonen kan bli:

1. *Heldekkende plater* kan gi mer beskyttelse for stålkassen, men den krever mer vedlikehold med et større egetareal der solcellene er plassert oppå.
2. Et *rammeverk* reduserer mengden stål, som igjen reduserer egenlasten betydelig. Designet kan tilpasses solcellene slik at montering og vedlikehold gjøres lettere. Flatene blir da også mer tilgjengelig slik at man ikke trenger å demontere panelene for å komme til under panelene.

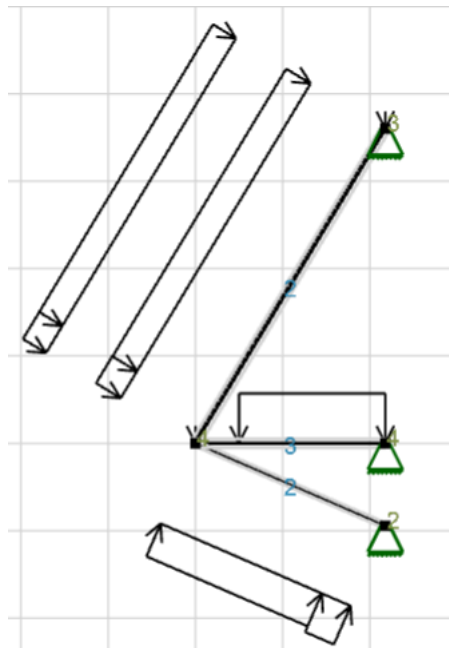
De sensitive flytelementene til broen gjør det viktig å minimere den påførte lasten, noe som gjør rammeverket til den mest gunstige løsningen. Når solcellene er montert på oversiden av den sørlige flaten, vil de "fylle" mellomrommet i konstruksjonen. På de resterende flatene, altså nesen på den nordlige siden, og undersiden på sørsiden, blir det montert aluminiumsplater for at nesen kan beholde sin aerodynamisk funksjon, samt redusere vindlasten på begge sider av tverrsnittet. Konstruksjonen kommer til å ha en høyde på 3,5m og stikke direkte 2,3 m ut fra stålkassen. Inne i nesen kommer det til å bli montert en gangbro som gjør tilkomst enklere, noe som er fordelaktig for vedlikehold av nesen og bærebjeldene under. Dette er illustrert i figur 5.3.



Figur 5.3: Rammeverket montert på broen med gangbro

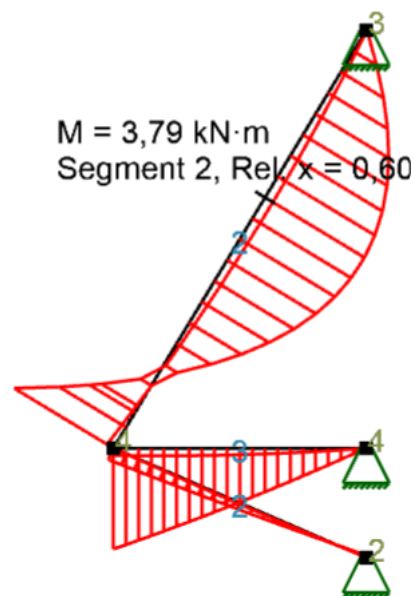
Når “nesekonstruksjonen” blir dimensjonert, er det tatt hensyn til egenvekt, vindlaster og effekten til solcellene. For å unngå problemer med deformasjon fra temperaturendringer og torsjon vil rekkverket ha mellomrom som gir rammeverket plass til å bevege seg. Dette betyr det er flere seksjoner i systemet. Dette er en fordel når det kommer til monteringen av nesen, ettersom den kan monteres i de allerede gitte seksjonene. For å unngå at nesen bidrar til svingninger er det en fordel å unngå at nesen har samme egenfrekvens som broen. Dette er slik at den ikke bidrar til svingninger når broen utsettes for for eksempel bølger eller vind. Rammeverket er fritt opplagt og festet i ett hjørne for hver seksjon, med en jevnt fordelt last fra solcellene. Slik illustrert i figur 5.4.

Selve dimensjoneringen av konstruksjonen ble gjort i programmet Focus Konstruksjon. Dette er et dimensjoneringsprogram som analyserer konstruksjoner. De tre illustrasjonene under, 5.4, 5.5 og 5.6 er fra dette programmet.



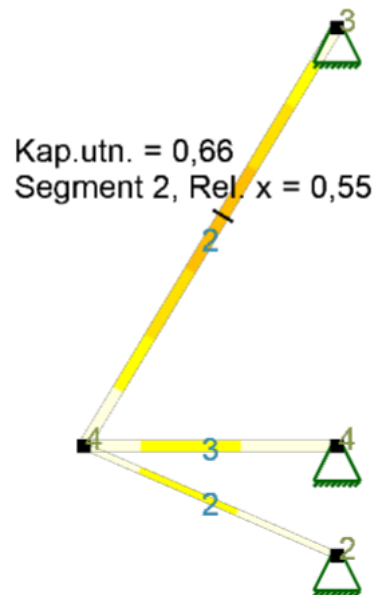
Figur 5.4: Laster på nesekonstruksjonen

I figur 5.4 er vindlasten over og under nesen satt til å være 8 kN/m^2 som kommer fra utregningene av vindlasten justert med dimensjonerende faktorer. Summen av vekten på rammeverket, solcellene, skinner, invertere, kabler og andre installasjoner som følger med solcellene er på $2,3 \text{ kN/m}^2$. Gangbroen er satt til å tåle 2kN . Den nederste konstruksjonsdelen (ut fra opplager 2) vil bli pålagt en plate, denne vekten er svært liten og neglisjeres derfor i dette regnestykket, men kommer fortsatt til å måtte tåle vindlasten som virker oppover.



Figur 5.5: Momentdiagram til nesekonstruksjonen

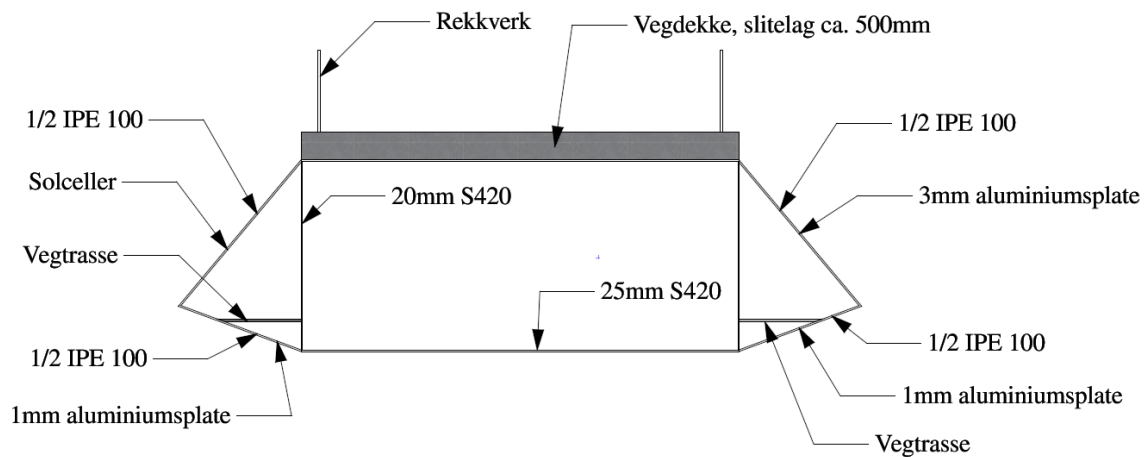
Under er det tilsvarende momentdiagrammet som følge av lastene. Her observeres det at det maksimale momentet fra konstruksjonen er på bjelke 2 fra opplager 3, dette momentet er på 3,8 kNm.



Figur 5.6: Kapasitet til nesekonstruksjonen

Som konstruksjonsmateriale er det med dette valgt en 1/2 IPE 100 bjelke i stål. Størrelsen ble valgt for å tåle moment, skjær, og spenningen som oppstår. Den mest påkjente bjelken er bjelke 2 fra opplager 3, tverrsnittsuttnyttelsen er 66% av kapasiteten. Siden en slik flytebro har en del utmatting, kommer denne til å øke med tiden, noe som gjør det viktig at den er lav i starten. Det er en fordel å bruke et lett materiale med høy kapasitet som krever lite vedlikehold. I dette tilfellet er stål brukt, men her kan det også benyttes aluminium eller komposittmateriale som kan være mer gunstig for å få ned vekten på konstruksjonen, men aluminium har en lavere styrke som kan være ugunstig i en bro mye bevegelser og høy utmatting.

Temperaturendringen vil føre til ulik deformasjon i broen og nesen. Forskjellen i deformasjon kan føre til ødeleggende krefter om det ikke blir håndtert riktig. Dette har blitt tatt opp med Multiconsult og vi kom fram til bruk av dilatasjonsfuger mellom rammeverket og stålkassen vil gi nesen mulighet til å bevege seg uavhengig av broen. Dette i tillegg til den 15mm avstanden som er mellom solecellene, samt åpningen til tilkomstveiene sørger for at deformasjon ikke vil føre til problemer i nesen.



Figur 5.7: Nytt tverrsnitt, illustrerer utforming med navn på konstruksjonsdelene

I figur 5.7 er et sammendrag av de forskjellige materialene som vil bli brukt for å lage konstruksjonen. Materialene kommer fra hva som har blitt dimensjonert i løpet av oppgaven, i både dette kapittelet om solcellesystemet, samt brodesignet av tverrsnittet.

Den påførte egenlasten av systemet kommer av tre ulike deler. Disse er solcellene med tilhørende installasjoner, nesene i form av rammeverket og plater, og gangbroen. Det er valgt å bruke stål av typen 1/2 IPE 100 som rammeverk, og plater med tykkelse 1 mm på sørsiden av broen. Etersom solcellene er vesentlig tyngre enn platen er det valgt en tykkere topplate på nordsiden av broen for å utjevne lasten på broen. Denne platen vil være 3 mm tykk. Den totale påførte egenlasten fra hele nesekonstruksjonen med gangbro er i vedlegg F regnet ut til å være 4,3 kN/m

5.3 Egenlast

Etter å ha vært i kontakt med Multiconsult har de kommet med potensielle problemer med dette konseptet, som det er forsøkt å løse her.

Den økte egenlasten, samt vertikale vindlasten, vil føre til at pongtongene må dimensjoneres opp, noe som vil redusere lønnsomheten til prosjektet. Å dimensjonere om pongtongene er en kostbar prosess, og etter samtalen med Per Norum Larsen er det kommet frem at for hver kilo påført last, må pongtongene økes med 0,4kg betong, og for hver kilo betong som legges til følger en kost på 60kr. Viser det seg at systemet er lite aerodynamisk, for eksempel fra ujevne overflater som følge av mellomrommene mellom solcellene, eller ugunstige vinkler, vil dette føre til økt "drag". Dette medfører økte laster på broen. En løsning kan være å gjøre overflatene på hele

på nesen glattere ved å bruke delitasjonsfuger. Dette går ikke ut over solcellene og rammeverket sin evne til å bevege seg uavhengig av broen. Siden nese-konstruksjonen er uavhengig av broen, er dette viktig. I hvert spenn på broen vil det være åpninger i nesen som er utstyrt med stiger for å gi enkel tilkomst for vedlikeholdsarbeidere. Disse åpningene i tillegg til mellomrom mellom seksjonene i rammeverket, vil sørge for at systemet har rom til å bevege seg uavhengig av broen.

5.4 Vedlikehold av bro

En av problemene som oppstår når noe monteres og dekker bærebjelkene, er at man gjør vedlikehold på delene under vanskeligere. Dette er et problem fordi sjøsprøyt og andre partikler som sliter på bærebjelken gjør at den jevnlig må vedlikeholdes. For å løse dette problemet har det blitt gjort tiltak for å øke tilkomsten til disse flatene.

Etter ny samtale med Larsen fra Multiconsult, kom det fram at vedlikehold av bærebjelkene burde være et sentralt tema når man integrerer slike systemer. Bærebjelkene er dekket i en maling som beskytter mot slitasje og må påføres hvert 20. år for å opprettholde sin beskyttende effekt. Gjøres ikke det vil kreftene bjelkene utsettes for tære på stålet og det vil redusere den konstruksjonsmessige integriteten til broen. Det er derfor viktig å utforme nesen på en måte som gjør vedlikehold mulig.

En nese vil redusere tilgjengeligheten til bjelkene i broen, men vil også til en viss grad være med på å skjerme bjelkene for slitasje som kan komme fra sjøsprøyt, trafikkstøv, snøbrøyt ol. For å gjøre vedlikehold av bjelkene mulig og mer tilgjengelig vil en gangbro monteres inni nesa, slikt vist i figur 5.3. Med en høyde på over 3 meter, er det mer enn nok plass til å gjøre dette. Det vil også med jevne mellomrom settes opp tilkomstveier i nesa som gjør det mulig for vedlikeholdsarbeidere å komme seg ned.

6 Effekt av solceller på Jøa flytebro

Hovedmålet med denne oppgaven er å finne effekten av solcellekonstruksjonen på broen, og deretter i hvilke grad dette kan være lønnsomt. Etter de tidligere beregningene, er det kommet frem til i hvilken grad solcellene har en effekt på kapasitetutnyttelsen av broen.

6.1 Endring av laster

Det er i hovedsak kun to av lastene som endres ved å montere nesene med solceller på broen. Disse er egenlasten og vindlasten. Ettersom trafikklasten er den samme både før og etter nesene er montert, vil det ikke bli endring i trafikklast, verken av punktlaster, den jevnt fordelte lasten, eller retningen disse virker i. Den påførte lasten har økt med 4kN/m som kommer av egenvekten til rammeverket på begge sidene av broen, solcellene og tekniske installasjoner som følger med disse, platene, samt gangbroen. De aerodynamiske egenskapene nesene gir broen bidrar til en reduksjon av de jevnt fordelte vindlastene i x retningen. Denne reduksjonen er på 2,4 kN/m som tilsvarer en reduksjon på 30%, se vedlegg H for endringen i lastene og utregninger. Monteringen av nesene øker også bredden på tverrsnittet med 2,3 meter på hver side, noe som kan ha innvirkning på den vertikale vindlasten.

De dimensjonerende lastene både før og etter montering av nesene er plottet inn i utregningene for opptredende spenning i vedlegg J og K. Disse er henholdsvis sammenlignet med kapasiteten M_{Rd} , og økningen i utnyttelse av kapasitet i tverrsnittet er kalkulert.

6.2 Resultat

Etter å ha plottet i regneark, de dimensjonerende lastene før og etter nesene er montert, har den prosentvise økningen av utnyttelse blitt funnet i vedlegg L. Her kommer det fram at etter nesene er montert økes den prosentvise utnyttelsen av kapasiteten fra 65,5% til 66,7%. Dette tilsvarer en økning på 1,21%. Dette er en relativt liten endring, og reduserer ikke broens evne til å håndtere trafikk slik den er designet til i henhold til LM1.

7 Økonomisk lønnsomhet

For å sikre lønnsomhet for bedriften når man monterer solceller på en bro, er det viktig å nøye vurdere de ekstra kostnadene som følger dette. I dette kapittelet er det utført en estimering av den antatte prisen. Gruppen har deltatt i flere samtaler med solcelleeksperten Thor Thinius Tuv fra selskapet Solenergi FUSen angående utregninger av denne økonomidelen. Den kalkulerte prisen inkluderer kostnadene knyttet til solcellene, men tar ikke hensyn til kostnadene forbundet med montering av den aerodynamiske nesen og rammeverket. Derimot er kostnadene av å dimensjonere om pongtongene inkludert. Regelverket som finnes i dag reduserer også lønnsomheten til dette og lignende prosjekter.

7.1 Kost av solceller

Solcelleteknologien er i stadig utvikling. Når kostnader regnes ut, er det tatt hensyn til en økonomisk levetid på 25 år. Solcellene kan produsere strøm i opp til 70 år, men i følge FUSen er det estimert at effekten til solcellene kan være flere ganger høyere etter 25 år, noe som vil si at det vil være mer lønnsomt å bytte ut disse med nye og bedre solceller etter 25 år.

Det er beregnet de totale kostnadene for å montere solcellene. I denne prisen er det inkludert solcellene, invertere, kabler, og skinner og kostnader som følger montering. Det er ikke inkludert eventuelt vedlikehold som må gjøres før det har gått 25 år, som for eksempel å vaske solcellene for sjøsprøyt og vegstøv. Solcellene kan ha en prissvingning på $\pm 20\%$, hvor den lavesteprisen er rett etter nyttår, og høyeste er rundt midtsommer. Prisen som ble oppgitt fra selskapet i april 2023, var på 0,28 euro/Wp. Panelene FUSen foreslo til dette prosjektet var på 420Wp, dette gir en pris per panel på 1360 NOK. Panelene har et tap over denne tidsperioden på omtrent 15 - 20%, for mer informasjon om panelene, se vedlegg O som ble gitt av Tuv. Monteringsprisen pleier å ligge på rundt 20-30% av materialkostnadene for hus, men for dette prosjektet ble det antatt nærmere 50% på grunn av vanskeligere tilkomst for montasje. Dette gir en installasjonsfaktor på 1,5. Det ble foreslått at om broen blir bygd på land og skal slepes ut på plass, bør panelene monteres på land. Dette er for å unngå eventuelle utgifter om det skulle være nødvendig å benytte båt eller lekter om solcellene må monteres fra havet, og ikke kan monteres fra selve broen.

For å videre regne ut hvor mye strøm solcellene kan produsere og selge, ble det benyttet programmet PVsyst. PVsyst tar hensyn til antatt produksjon for Namsos kommune med de valgte solcellene på 420W, invertere, og energivinkel. Tabell 7.1 under viser hvor mye som blir produsert, og energy-payback-price som beskriver prisen strømmen må selges for slik at det er

lønnsomt å montere solcellene. Denne tiden er satt til 25 år, se vedlegg P for utregninger.

Tabell 7.1: Energy payback price for montering av solceller

Plassering	Produksjon [kWh]	Forskjell fra sør 50°	EPP [kr/kWh]	Prisøkning fra sør 50°
Sør 50°	425441	0,0%	0,36	0,00%
Sør 90°	343111	19,4%	0,44	24,0%
Nord 50°	165780	61,0%	0,91	156,6%
Nord 90°	126971	70,2%	1,19	235,1%

Med denne tabellen er det inkludert energiproduksjonen på den nordlige og sørlige siden av broen. Som tabellen viser, er det svært høye kostnader ved å montere solceller på nordlig side, og det er derfor konkludert med at dette ikke er en gunstig løsning. Produksjonen fra sør 50° kommer fra vedlegg B, sør 90° fra vedlegg C, nord 50° fra vedlegg M og til slutt for nord 90° se vedlegg N.

Etter samtale med Per Norum Larsen fra Multiconsult, ble det gitt at for hver kilo som blir påført på grunn av rammeverket og solcellene, må pongtongene økes med 0,4kg betong, og for hver kilo pongtongene økes med, er det gitt en pris på 60kr/kg. Dette fremmet usikkerhet rundt hvorvidt det er lønnsomt å montere på nesen eller om solcellene burde vært montert vertikalt for å unngå denne ekstra kostnaden. Tabell 7.2 viser resultater fra dette, se vedlegg P for utregninger.

Tabell 7.2: EPP med pongtonger

EPP inkludert pongtongkostnadene					
Plassering	Kostnad solceller	Kostnad pongtong	Sum [NOK]	kWh på 25år	EPP
Sør 50°	3 781 140,00	3 563 520,00	7 344 660,00	10636025	0,69
Sør 90°	3 781 140,00	1 118 880,00	4 900 020,00	8577775	0,57

Kostnaden av solcellene er kun inkludert selve solcellene og kostnader rundt monteringen av disse. For sør 50° er det ikke inkludert prisen av rammeverket eller platene, det vil si at om denne løsningen blir brukt, kommer EPP til å være enda høyere. Inkludert kostnadene av monteringen av nesekonstruksjonen, vises det i tabellen at EPP er ca 69 øre per kWh. Med panelene montert vertikalt er denne bare 57 øre per kWh. Dette vil si at selv om sør 50° har en høyere strømproduksjon, vil det ikke si den er mere lønnsom.

7.2 Lover og regler, og endring

Regelverket som er i dag kan hemme lønnsomheten til dette og lignende prosjekter. Som det er regnet ut, kommer det fram at energi som produseres på broen bidrar med over 425000 kWh i året. I regelverket fra NVE står det at dersom et strømproduserende system overstiger en produksjon på 100kWh per år kan en ikke lenger være "plusskunde". Overgår

energiproduksjonen denne øvre grensen kategoriseres systemet som et kraftverk. Dette innebærer at en må betale et fastledd for innmating på nettet, som for 2023 er 1,36 øre/kWh ekskl. mva. [24]. Når da EPP er på 70 øre/kWh, blir tilbakebetalingen totalt 71,36 øre/kWh. Merk at prisene er i konstant endring, men tallene vi har brukt er fra bedrifter og brukt for å kunne gi en tilnærmet verdi for oppgaven.

Etter å ha vært i samtale med tidligere SV politiker Torgeir Strøm, kom det fram at akkurat dette regelverket er en av hovedgrunnene til at dette konseptet ikke har blitt iverksatt enda. Det kommer også fram at dette er noe som med stor sannsynlighet vil endres i nærmeste framtid, ettersom dette regelverket er en brems for bærekraftig og fornybar energiproduksjon. Allerede i 2021 ble det foreslått av "RME" å etablere en endring i regelverket når det kommer til distribusjon og deling av egenprodusert fornybar strøm. Forslaget gikk ut på å øke grensen som nå er på 100kWh til 500kWh. I akkurat dette tilfelle gjaldt det kun beboere i flermannsboliger, leilighetskomplekser og næringsbygg, altså ikke infrastruktur som denne broen, men det er et tegn på at dette er et regelverk som er i ferd med å endre seg.

8 Utvidelse, utfordringer og fremtidig forskning

Konseptet har potensiale til å være både lønnsomt, og et godt bidrag til energitilførsel og en bærekraftig byggbransje. Etterhvert som teknologien utvikles, blir billigere og mer effektiv, vil dette være et konsept som blir mer lønnsomt med tiden. Det er likevel noen aspekter rundt konseptet som krever mer forskning før man kan gå videre med dette.

8.1 Bærekraft

PowerBridge kan være et nyttig bidrag til å dra samfunnet i en mer bærekraftig retning, og hjelpe bedrifter med å ta bærekraftige valg. Forskning på konsepter som dette blir nedprioritert når en bedrift tar på seg et byggeoppdrag siden det er mye usikkerhetsmomenter rundt for eksempel lønnsomheten i konseptet, og eventuelt mangel på ressurser og kunnskap til å utvikle idéen. Ofte er det heller ikke en del av oppdraget å se på muligheten til å montere slike eller lignende systemer, som skaper en høyere terskel for å vurdere nye bærekraftige løsninger. Oppgaver som denne er derfor et viktig bidrag til forskningen på potensielle bruksområder til fornybare energikilder. Det gir også et innblikk i lønnsomheten til konseptet som ofte er en stor utfordring når man vurderer et nytt konsept.

Bruksområdene til solceller kan bli fler. Broer er bare en av mange tilfeller av infrastruktur med store arealer som ikke utnytter potensialet til å implementere fornybare energikilder. Store konstruksjoner som fabrikker, demninger, stadioner etc. er eksempler på infrastruktur som dekker store arealer og har potensiale til å ta opp solenergi. Andre konstruksjoner vil kanskje være mer egnet til å utnytte andre energikilder.

Det er i denne oppgaven kun sett på muligheten for solenergi. Videre kan man begynne å se på muligheten til å utnytte andre typer fornybar energi som vind, bølger, tidevann og strøm, kanskje til og med termiske og kinetiske krefter. Den økte bevegeligheten til en flytebro kan også være en potensiell kilde til ren energi. Broer er massive konstruksjoner med mye kinetisk energi så snart den er i litt bevegelse. Teknologi som er i stand til å utnytte denne energien vil gjøre potensialet til PowerBridge enda større.

Flytende solceller er også noe som kan være en videre utvidelse av dette konseptet. Utbygging av bro åpner tilgjengeligheten til områder rundt broen. Siden broen begrenser båttrafikk til kun en ende har man da muligheten til å utnytte arealet av vannet rundt broen til flytende solceller. Den økte tilgjengeligheten vil gjøre vedlikehold av disse lettere og mer kosteffektiv sammenlignet med å ha de ute på åpent hav. Etter samtale med Thor Thinius Tuv er det i dag ikke lønnsomt

med flytende solceller. Dette er forhåpentligvis noe som endrer seg i fremtiden, ettersom det allerede er satt i gang store prosjekter som forsker på akkurat dette. Prosjekter som det Equinor og Moss Maritime er involvert i på Frøya er et eksempel på dette, hvor det planlegges å bygge verdens første flytende testanlegg i røffe sjøforhold.[27]

8.2 Usikkerhetsmomenter

Hvordan solcellene og solcellekonstruksjonen påvirkes av eksterne faktorer er usikkert. De aerodynamiske egenskapene til overflaten på nesene med og uten solcellepanelene er ikke sett på i denne oppgaven. Flaten er kun betraktet som en glatt, jevnt flate, og hvordan mellomrommene mellom solcellene påvirker dette er usikkert. Om flaten er tilstrekkelig til å gi nesene de egenskapene vi har regnet med i rapporten er ikke sett nærmere på. Det er her rom for videre forskning. Labttester på vind for ulike typer solceller, samt ulike løsninger for å minke “drag” er også noe man kan se mer på for å finne ut av hvilke solceller og løsninger som er best egnet til å monteres på en flytebro.

Mer forskning på hvordan saltvann, snø, vegstøv og andre miljølaste påvirker effektiviteten og lønnsomheten til solcellene er også nødvendig, ettersom innvirkningen dette har enda er uvisst. Det kan også nevnes at solceller kommer til å få en økt produksjon fra vannets refleksjoner, men det er uvisst hvor mye dette øker strømproduksjon.

Hvordan innfesting og utforming av rammeverket påvirker egenfrekvensen til broen er noe som kan forskes mer på. Ettersom systemet har en egenfrekvens som i tillegg til bølger og vind kan resonere med broen, er det nødvendig å regne på hvordan nesekonstruksjonens egenfrekvens påvirker egenfrekvensen til broen. Dette er en lang prosess som påvirkes av hvordan nesene er innfestet, og utformingen på nesene.

8.3 Fremtidige regelverksendringer

Konseptet kan bli et viktig tilskudd til energiproduksjon som gir strømtilførsel til nettet, men sånn det er i dag belønner ikke regelverket slike prosjekter. Å gjøre det dyrere å mate inn strøm på nettet gjør det mindre lønnsomt for en eventuell bedrift å ta i bruk et lignende system. Inntil videre kunne man tatt konseptet ett steg videre ved å se på ulike måter å håndtere strømmen som produseres. En mulighet kunne vært å integrere batterier på broen slik at strømmen kan brukes til for eksempel belysning på natten når det ikke produseres strøm eller en ladestasjon for elbiler. Batteriene som finnes i dag har en del tap av strøm når de lades, så man må da evaluere hva som er mest lønnsomt av å betale innmatningstariffen eller lagre strømmen. Batterier er også en teknologi som er i stadig utvikling og vil bli en bedre løsning med tiden.

9 Diskusjon

I løpet av arbeidet med denne rapporten har vi møtt på flere utfordringer rundt prosjektet. Et sentralt problem er mulige feilkilder i dimensjoneringen av tverrsnittet. I dette kapittelet vil vi diskutere muligheter som kan gjøre det lettere å gjennomføre prosjektet i en fremtidig oppgave.

9.1 Den dynamiske nesen

Det har vært usikkerheter angående nytten til nesen, med tanke på strømproduksjon, og aerodynamikk i starten av oppgaven. Målet er at vinkelen på nesen skal være optimal for energiproduksjon mtp. solvinkelen til solcellene og samtidig kombinere dette med å gi en aerodynamisk funksjon. Det er usikkert hvor betydelig den reduserte vindlasten er for svingningene i broen og konstruksjonen som helhet. Vindlastens kraftfaktor reduseres med helningsgraden på nesen, men dette forutsetter at panelene monteres på lo side for vinden. I de tilfellene panelene havner på le side, vil den ha liten eller ingen effekt, og tverrsnittet må likevel dimensjoneres til å tåle kreftene denne kan utsettes for. Det vil være nødvendig å enten montere nese på begge sider, eller kompensere på andre måter. Vekten fra nesen skaper et eksentrisk tyngdepunkt som kan være utfordrende for broens dynamikk og stabilitet. Dermed må det uansett settes inn ekstra materialer på motsatt side av panelene for å få likevekt i konstruksjonen. Å sette en nese på begge sidene, krever ekstra vedlikehold. En nese kunne også blitt dimensjonert slik at den tar opp bæring fra broen, innvirkningen og lønnsomheten rundt dette er noe man kan se videre på i fremtidige oppgaver.

9.2 Kostnader rundt vedlikehold og montering

Jo flere deler man fester på en bro jo mer vedlikehold blir det. Vedlikeholdskostnadene av nesen er ikke regnet på i oppgaven, men i et forsøk å redusere disse er det valgt å ha en gangbro inne i nesen som vil gjøre alle delene som følger med systemet, samt bærebjelkene lettere tilgjengelig. Det kan diskuteres at noe av vedlikeholdskostnadene også reduseres ettersom tilgjengeligheten til bærebjelken økes når gangbroen er montert sammenlignet med å ikke ha nesen der i det hele tatt. Det er usikkert hvor mye dette kan spare, og om det kan veie opp for de ekstra vedlikeholdskostnadene som følger med monteringen av nesen, samt kosten av å rekonstruere pongtongene. Kostnadene rundt selve monteringen av nesen er usikkert, men ved å ha en enkel løsning hvor man hekter på nesen i segmenter vil trolig disse kostnadene også holdes til et minimum. Om dette er nok til å gjøre nesen lønnsom er fortsatt usikkert.

9.3 Dimensjonering av tverrsnitt

Det ble gjort en sammenligning av kapasiteten til Multiconsult sitt tverrsnitt og vårt tverrsnitt for å kontrollere utregningene våre. Det ble funnet at deres dimensjonerene laster var mye større enn våre. Her er noen potensielle årsaker til dette:

I vår oppgave har vi brukt en lignende løsning som den Multiconsult har for tverravstivning om y-aksen. Disse er for enkelhetsskyld valgt å ikke ta med i utregningene våre. Dette fører til at knekking eller bøyning om y-aksen kan oppstå, og kan også være en grunn til at kapasiteten regnet ut i Multiconsult sitt tverrsnitt ikke samsvarer med kapasiteten i vårt tverrsnitt.

En annen grunn til at vårt tverrsnitt fikk lave dimensjoner kan være fordi vi ikke har regnet på nedbøyning. Det er store sjanser for at nedbøyningen er for stor, og vi burde hatt både tykkere steg og flens. Nedbøyning ble ikke regnet på siden vi fant lite informasjon om nedbøyningskravene til en flytebro i forhold til andre broer. Grunnen til at vi antar nedbøyningskravet kan være forskjellig er fordi en flytebro er mer bevegelig. Vi satt den dimensjonerende kapasiteten til å være mye lavere enn nødvendig på grunn av utmatting, noe som igjen kanskje bidrar til en enda mindre tverrsnittsutnyttelse enn nødvendig.

Når det er regnet på kapasiteten på Jøa 't Land tverrsnittet er det sett bort ifra helningen på 3%. Det er også estimerte verdier på detaljtegningene der verdiene ikke var oppgitt. Dette inkluderer tall som vinkler på bøyler og avstivere, samt dimensjoner på de indre delene av tverrsnittet fra figur 4.7. De avstivende delene markert "Detalj A" og "Detalj B" ble lagt til som en utvidelse av inner- og ytterplatene, noe som også er en mulig feilkilde som kan ha hatt innvirkning på kapasiteten. I Jøa 't Land er det gitt to forskjellige tverrsnitt, men det ble her valgt å kun regne på det ene. For å minimere sannsynligheten for feil i utregninger kunne det isteden blitt regnet på begge disse.

Helningen på 3% er også sett bort ifra når det regnes på trafikklast for å spare tid. Denne helningen ville i realiteten endret retningen på flere av lastene, noe som ble valgt å ikke ta hensyn til. Ved å ha en helning på broen, vil trolig aksellasten fra kjøretøy fordeles jevnere enn det det gjør ved å ha en flat bro, ettersom broen kurver. Dette er en fordel når det kommer til torsjon som kan oppstå av ujevn fordeling av trafikklast som nevnt i kapittelet om statikk.

I løpet av dette arbeidet har vi fått kunnskap om broer, både hvordan de oppfører seg og hvilke krefter de er utsatt for. Vi var i starten ikke klar over alle lastene som faktisk virket på en bro, noe som gjorde det nødvendig å velge ut noen få laster å regne på, å heller se bort ifra andre. Dette vil si at lastene og kapasitetene vi har regnet ut i oppgaven ikke gir et helt realistisk lastbilde. Vi har

i hovedsak fokusert på de mest vesentlige lastene, vindlast, trafikkast og egenlast. Vindlast har naturligvis også blitt kalkulert før og etter monteringen av nesen. Ettersom det her kun er vind- og egenlast som varierer, mener vi tallene våre er tilstrekkelig til å representere innvirkningen en slik installasjon har på bærekapasitetene til broen.

Vi brukte programvaren SAP2000 i et forsøk på å beregne den dimensjonerende kraften i konstruksjonen. Dette er en programvare for strukturelle systemer som bidrar til analyse og design av konstruksjoner. Dessverre støtte vi på utfordringer med dette programmet og klarte ikke å gjennomføre analysen og dimensjoneringen som planlagt. Etter flere forsøk og veiledning fra veilederen konkluderte vi med at vi måtte ty til manuell mekanikk og utføre beregningene for hånd som gjorde at vi måtte forenkle systemet. Dette kan ha ført til unøyaktige beregninger og har gitt oss mindre oversikt over hvordan kreftene påvirker broen som helhet, og ikke bare i ett og ett spenn. SAP2000 skulle også brukes til å regnet ut egenfrekvensen til nesekonstruksjonen, men dette fikk vi heller ikke til å gjennomføre. Vi måtte derfor anta hvordan vi tror nesen vil påvirket egenfrekvensen til broen. Dette, sammen med alle lastene som er sett bort ifra i denne oppgaven, er også noe som kan ses nærmere på for å få et mer helhetlig bilde på innvirkningen dette systemet faktisk har.

9.4 Dimensjonering av nesen

For konstruksjonen er det kun sett på materialet stål for kassen og rammeverket til nesen, med aluminiumsplater på nesekonstruksjonen, og betong i pongtongene. Rammeverket burde vært dimensjonert i et lettere materiale for å kunne redusere lasten betraktelig. Et forslag kunne vært å brukt plastkompositt eller karbon som er lette materialer. Pongtongene som er av betong bruker, ifølge Larsen fra Multiconsult, 70% av sin egenvekt for å holde seg selv flytende, men for stål er dette kun 30%.

Det har også blitt vurdert om det er nødvendig å installere skrå, avstivende rammer som en del av rammeverket. Ettersom det er montert stålplater på den nedre delen av nesen, og solceller på den øvre delen, som begge har avstivende egenskaper er det vurdert til at dette i seg selv er tilstrekkelig avstivning for lastene nesen utsettes for, men dette er ikke regnet på og kun gjort antagelser.

9.5 Nesekonstruksjonens påvirkning på broen

En flytebro er mer sensitiv til vekt enn mange andre typer infrastruktur. Systemer som da påvirker egenvekten til flytebroen er spesielt viktig å ta hensyn til siden pongtongene må dimensjoneres for den påførte lasten. Dette kan gi opphav til problemer som ellers ikke ville

vært problematisk. Installeringen av solceller og lignende systemer er derfor noe som ikke lar seg gjøre uten at det går utover pongtongene. På grunn av dette er et slikt konsept noe som ikke egner seg for allerede eksisterende flytebroer. Kostnadene som følger av å gjøre endringer i flyteelementene på en allerede eksisterende bro er trolig så store at dette ikke vil vært lønnsomt. Både broer under prosjektering og fastmonterte broer har begge potensiale til å utnyttes til lignende typer energiproduksjon.

Rammeverket sin utforming reduserer vindlasten på broen. Dette i seg selv bidrar positivt på kapasiteten. Ved å forbedre de aerodynamiske egenskapene til broen reduseres vindlastene som virker i den horisontale retningen. Videre kan man regne på om denne reduksjonen i horisontal retning er nok til å kunne dimensjonere ned noen bærende deler av konstruksjonen. Dette ville igjen redusert egenvekten til konstruksjonen, og kompensert for den økte vekten fra rammeverket og solecellene i seg selv. Det ville da gjort det mer lønnsomt å implementere lignende systemer på flytende konstruksjoner.

10 Konklusjon

Hovedfunksjonen til en bro er å frakte kjøretøy trygt over en strekning. Dette vil si at den skal tåle høy konsentrasjon av tunge kjøretøy, samt miljølaste og ulykkeslaste. Når man da vil gjøre endringer på både utforming og egenskaper på broen er det en nødvendighet at man regner på hvorvidt dette påvirker kapasitetene på broen. Solcellene med rammeverket påvirker i hovedsak broen i horisontal x-retning og vertikal z-retning.

Dette er først og fremst en konstruksjonsoppgave som tar for seg de konstruksjonsmessige egenskapene på en flytebro både før og etter et nytt system er montert på. Det er i denne oppgaven brukt mye tid på kun noen av kreftene som påvirker broen. Mer detaljerte beregninger er nødvendig for å få et mer helhetlig og presist bilde på omfanget av et slikt system sin innvirkning på broen, og dens konstruksjonsmessige egenskaper. Hovedfokuset i oppgaven var å se på hvordan utnyttelsen av kapasiteten ble påvirket av ett rammeverk med solceller. Ved å ta med en økonomidel, hvor vi har regnet på lønnsomheten rundt prosjektet, og forslag til hvordan dette kan tas videre, er det også en rapport som tar for seg det økonomiske og bærekraftige aspektet rundt et slikt konsept.

Installasjonen av solceller på Jøa flytebro viser seg å ikke ha stor innvirkning på bærekapasitetene til broen. Solcellene og rammeverket bidrar til en 1,21% økning i utnyttelse av kapasitet, dette vil si den økte egenlasten fra solcellesystemet bidrar til liten økt last, relativt til den totale egenlasten til broen. Bærebjelkens evne til å takle store trafikklaster reduseres ikke. De vektsensitive pongtongene på en flytebro gjør fortsatt at det er nødvendig å dimensjonere disse opp. Å dimensjonere opp pongtongene er en kostbar prosess og gjør akkurat denne type systemer mindre egnet til flytebroer. Det er konkludert med at det i akkurat dette tilfellet ikke er gunstig å montere en så tung konstruksjon på denne flytebroen kun på grunn av denne økte vekten og kostnadene som følger å dimensjonere om pongtongene. Et alternativ kan da være å montere solcellene vertikalt, eller se på et lettere solcelleanlegg. Andre broer og andre typer infrastruktur, vil være mer egnet til implementering av et slikt system ettersom de både er mindre bevegelige, og er mindre sensitive til vekt.

Det er fortsatt stor mangel på forskning rundt slike og lignende prosjekter. For å utvide bruksområdene til konseptet er effektivisering av fornybare energisystemer nødvendig. Ny teknologi som gjør solceller billigere, samt gir de økt strømutbytte vil bidra til at dette kan gjøres mer lønnsomt. Videre forskning, samt et lovverk som belønner prosjekter som dette i stedet for å være en hindring slik situasjonen er i dag, er essensielt for å kunne gå videre med

lignende prosjekter. Dette innebærer å gjøre lovendringer som gjør det gunstig for bedrifter å implementere fornybar energi i infrastruktur. Regelverket er noe som allerede er i ferd med å endre seg i deler av byggebransjen, som man ser ved “REM” sitt forslag om å øke grensen for plusskunder i flermannsboliger.

Det er tydelig at konseptet har potensiale til å være både lønnsomt for utbyggere, samt en kilde til bærekraftig og fornybar energi. Likevel er det fortsatt avhengig av større satsing på forskning på fornybare energisystemer og optimalisering av teknologi. Med tiden vil dette konseptet kunne utvides til andre typer infrastruktur, og andre typer fornybare energikilder, som tidevann, bølger og vind.

Referanser

- [1] Multiconsult ASA. «Jøa t'land 24/7 -Utredning av flytebru med tilførselsveger». I: (mar. 2022), s. 25.
- [2] Hilmar Bungum. I: *snl* (). URL: https://snl.no/jordskjelv_i_Norge.
- [3] History.com Editors. «Tacoma Narrows Bridge collapses». I: (nov. 2009). URL: <https://www.history.com/this-day-in-history/tacoma-narrows-bridge-collapses>.
- [4] Norsk Vassdrag- og Energidirektorat. «Retningslinje for laster og dimensjonering». I: (). URL: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.nve.no/Media/7091/retningslinjer-for-laster-og-dimensjonering-med-tillegg-juli-2018.pdf>.
- [5] «Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster». I: (sep. 2009).
- [6] «Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 2: Trafikklaster på bruer». I: (2010).
- [7] «Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 2: Trafikklaster på bruer». I: (2010).
- [8] Forfatter F. «Sanksjonene mot Russland er en nødvendig reaksjon på den brutale krigføringen». I: (feb. 2023). URL: https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/pm_sanksjoner/id2964218/.
- [9] *Jøa t'land 24/7 - Utredning av flytebru med tilførselsveger*. URL: https://namsos.kommune.no/planportal/_f/p16/i8c523b7a-598c-4cc8-bf6a-49c92494492f/joa-t-land-rapport.pdf (sjekket 07.02.2023).
- [10] Per Kristian Larsen. *Dimensjonering av stålkonstruksjoner*. Fagbokforlaget, 2020.
- [11] Per Kristian Larsen. *konstruksjonsteknikk_laster_og_bæresystem*. Fagbokforlaget, 2008.
- [12] Holstad M. «Rekordhøy strømpris i 2022 – dempet av strømstøtte». I: (feb. 2023). URL: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitetspriser/artikler/rekordhoy-strompris-i-2022--dempet-av-stromstotte>.
- [13] Standard Norge. «NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016». I: *Norsk standard* (jan. 2016), s. 30.
- [14] Standard Norge. «NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016». I: *Norsk standard* (jan. 2016), s. 53.
- [15] Standard Norge. «NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016». I: *Norsk standard* (jan. 2016), s. 58.
- [16] Standard Norge. «NS-EN 1991-2:2003+NA:2010». I: *Norsk standard* (jan. 2010), s. 42.
- [17] Standard Norge. «NS-EN 1991-2:2003+NA:2010». I: *Norsk standard* (jan. 2010), s. 40.

- [18] Standard Norge. «NS-EN 1991-2:2003+NA:2010». I: *Norsk standard* (jan. 2010), s. 42.
- [19] Standard Norge. «NS-EN-1991-1-3:2003». I: *Norsk Standard* (apr. 2003), s. 53.
- [20] Standard Norge. «NS-EN-1991-1-3:2003». I: *Nasjonalt tillegg* (sep. 2005), s. 2–11.
- [21] Standard Norge. «NS-EN-1991-1-3:2003». I: *Norsk Standard* (sep. 2005), s. 73–80.
- [22] Standard Norge. «NS-EN-1991-1-3:2003». I: *Nasjonalt tillegg* (sep. 2005), s. 12–14.
- [23] Standard Norge. «NS-EN-1991-1-3:2003». I: *Nasjonalt tillegg* (sep. 2005), s. 81–89.
- [24] NVE. «Plusskunder». I: (). URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/regulering/nettvirksomhet/nettleie/tariffer-for-produksjon/plusskunder/>.
- [25] SINTEF. «Statikkformler for bjelker». I: (sep. 2019). URL: https://www.byggforsk.no/dokument/183/statikkformler_for_bjelker.
- [26] unknown Tekna. «Aktuell forskning innenfor bygg- og anleggsbransjen». I: (mar. 2022). URL: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/aktuelle-forskning-innenfor-bygg-og-anleggsbransjen/>.
- [27] Hanne Wigum. «Vil teste ut flytende sol utenfor Frøya». I: *Equinor* (). URL: <https://www.equinor.com/no/news/archive/20210114-test-offshore-solar>.
- [28] Rasmus S Øderud Hans Thomas; Nordahl. «Broer i Norge». I: *bro i Store norske leksikon* (). URL: <http://snl.no/bro>.