

# Mulighetsstudie av aluminium i Nysethvegen bru – en materialteknisk og økonomisk sammenligning av aluminium og stål

Feasibility of Aluminium in Nysethvegen  
bridge – a Comparison of Mechanical  
and Economical Performances in  
Aluminium and Steel

**Trondheim Mai 2021**

Rune Nysted  
Markus Myrvoll  
Hans Fredrik Gran Urdahl

Intern veileder:  
Arne Mathias Selberg

Ekstern veiledere:  
Marius Holtermann Andersen, SINTEF  
Nicolas Morin, SINTEF

Prosjektnr:  
2021 -19

Rapporten er ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for konstruksjonsteknikk



## **Problemdefinering, prosjektbeskrivelse og resultatmål**

Gamle Nysethvegen bru i Raufoss er utskiftingsklar, og i den sammenhengen skal det vurderes bruk av aluminium i den nye brukonstruksjonen.

Det skal lages forslag til en fagverksutførelse for både stål og aluminium for valgt krysning. Videre skal det drøftes rundt de økonomiske og praktiske forskjellene ved utførelse i de to materialene. Forslagene skal brukes til å sammenligne fordelene og ulempene til de to materialene. Utregning av kraft/spenningsfordelinger skal utføres i programvare.

Ved avslutning av prosjektet er det satt som mål å ha dimensjonert ei aluminiumsbru til Nysethvegen, og tilegnet seg kunnskap om forskjellene som foreligger mellom aluminium og stål. Sammenligningen av de to prosjekterte bruene skal kunne vise de materialtekniske og økonomiske fordeler og utfordringer som foreligger ved ny aluminiumsbru.

Stikkord fra prosjektet:

Aluminium, Stål, Bru, Konstruksjon, Fagverk, AluBridge, HAZ, programmering, dimensjonering, styrkeberegning, Nysethvegen bru



## Forord

Bacheloroppgaven er skrevet av tre studenter med spesialisering i konstruksjonsteknikk ved Institutt for Bygg- og Miljøteknikk ved Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet (NTNU) i Trondheim, Norge. Bacheloroppgaven er gjennomført våren 2021, og er den avsluttende delen av treårige bachelorgraden på byggingeniør-studiet. Den har et omfang på 20 studiepoeng.

Bacheloroppgaven er en del av et større forskningsprosjekt i regi av SINTEF; AluBridge. Vinklingen på oppgaven er utformet i samarbeid med SINTEF's avdeling for Materialer og Nanoteknologi på Gløshaugen i Trondheim. I oktober 2020 ble den første kontakten med SINTEF etablert. Som studenter er vi svært interessert i dimensjonering og styrkeberegning av konstruksjoner, og ønsket å få til et samarbeid med SINTEF. Vi fikk heldigvis positiv respons og det ble utarbeidet en kontrakt. Det ble tidlig funnet en retning innenfor dimensjonering som ville være interessant for begge parter. Vi har sammen bearbeidet prosjektet til en konkret problemstilling som vi skal løse for SINTEF.

Oppgaven bygger på SINTEF's rolle og innsikt i AluBridge. Det er et dagsaktuelt og konkret prosjekt om dimensjonering av bru i aluminium. For oss som studenter ble vinklingen på oppgaven utfordrende og spennende.

Vi vil spesielt takke våre to eksterne veiledere fra SINTEF, Marius Holtermann Andersen og Nicolas Morin. Vi er veldig takknemlige for muligheten vi fikk til å jobbe med denne oppgaven, all kunnskapen som dere har delt med oss og den gode veiledningen vi har fått underveis. Vi vil også takke vår interne veileder Arne Mathias Selberg, universitetslektor ved Bygg- og miljøteknikk på NTNU, som har kommet med gode innspill og råd på veien.

Trondheim, 20.mai 2021

Rune Nysted

Rune Nysted

Markus Myrvoll

Markus Myrvoll

Fredrik Urdahl

Hans Fredrik Gran Urdahl



## **Sammendrag**

Denne bacheloroppgaven er en mulighetsstudie om bruken av aluminium i ei kort fagverksbru. Aluminium er svært lite brukt i bruer i Norge, og det gjenstår mye forskning for å kunne likestille det med mer tradisjonelle byggematerialer som stål og betong. Formålet med bacheloroppgaven er å prosjektere ei ny bru til Nysethvegen i Raufoss. For vurdering og sammenlikning, vil det både prosjekteres en utførelse i aluminium og en i stål. Dette for å kunne si noe om hvorvidt ei bru i aluminium vil kunne konkurrere mot ei mer tradisjonell stålbru.

Oppgaven utføres ved å gjøre materialtekniske og økonomiske sammenligninger av aluminium og stål. Det vil belyses de problemstillinger som foreligger rundt dimensjonering av aluminiumsbruer. For begge bruene utarbeides det et fagverksdesign som kan erstatte gamle Nysethvegen bru. Videre dimensjoneres bruene ved bruk av FEM-analyseprogram, med håndberegninger som kontroll.

Resultatene i denne oppgaven viser at et aluminiumsalternativ kan være en god konkurrent til en mer tradisjonell stålutførelse for nye Nysethvegen bru. Dette forutsetter de avgrensinger som er gjort. For en mer realistisk gjennomføring vil det måtte foretas flere beregninger, da spesielt med tanke på utmatting og HAZ-reduksjon for aluminiumsbrua. Ei bru i aluminium med dimensjonerende levetid på 100 år vil være kostnadseffektiv og bærekraftig.





## Summary

This bachelor thesis is a feasibility study about the use of Aluminium in a short truss bridge. Aluminium is barely used in Norwegian bridges. Therefore, it remains a lot of research to equate the material with more traditional building materials like steel and concrete. The purpose with this thesis is to project a new bridge for Nysethvegen bridge in Raufoss. Both an aluminium- and a steel bridge will be projected. Comparison and assessment will tell whether an aluminium truss bridge could compete with a more traditional steel truss bridge.

To answer this question, a mechanical and an economical comparison between the two materials will be the foundation. For both materials, a truss design to replace the old Nysethvegen bridge are going to be presented. The challenges of using aluminium in bridges is discussed, along with dimensioning through a FEM-analysis program. Hand calculations will also be included.

The results show that an aluminium alternative can be a good competitor to a more traditional steel alternative for the new Nysethvegen bridge. This presupposes the simplifications that have been made. For a more realistic solution, several calculations need to be made, especially with regards to fatigue and HAZ-reduction for the aluminium bridge. An aluminium bridge with design life of 100 years will be cost-effective and sustainable.



# Innhold

Forord.....	V
Sammendrag.....	VII
Summary .....	IX
Innhold .....	1
1 Innledning.....	5
1.1 Oppgavebeskrivelse.....	5
1.2 Avgrensninger.....	6
1.3 SINTEF – ekstern veiledning .....	7
1.4 Struktur .....	8
2 Prosjekteringsgrunnlag .....	9
2.1 Brukte standarder.....	9
2.2 Programverktøy .....	9
2.3 AluBridge-prosjektet .....	10
2.3.1 Området og tidligere bru .....	10
2.3.2 Nye Nysethvegen bru.....	13
2.4 Krav til utforming av ny bru .....	14
2.4.1 Krav til bredde .....	14
2.4.2 Krav til fri høyde.....	15
2.5 Materialer.....	16
2.5.1 Aluminium - et historisk tilbakeblikk.....	16
2.5.2 Stål – et kort resyme.....	17
3 Laster .....	19
3.1 Klassifisering av laster.....	19
3.2 Permanente påvirkninger .....	19
3.3 Variable påvirkninger .....	19
3.3.1 Trafikklaste.....	20
3.3.2 Vindlast.....	25
3.3.3 Termisk påkjenning.....	26
3.4 Ulykkeslaste .....	27
3.5 Utmattingslast .....	27
3.6 Lastkombinasjoner.....	28
3.6.1 Bruddgrensetilstand (ULS) .....	28
3.6.2 Bruksgrensetilstand.....	30
4 Aluminium som byggemateriale.....	32
4.1 Produksjon av aluminium .....	32
4.2 Legeringer.....	33
4.3 Produksjon av profiler .....	34

4.4	Sveising og HAZ .....	36
4.5	Andre sammenføyningsmetoder .....	38
4.6	Korrosjonsbestandighet og vedlikehold.....	39
4.7	Konstruksjonsprinsipper .....	39
4.8	Utmatting.....	40
4.9	Miljø og gjenvinning .....	41
4.10	Råvarepris .....	43
5	Stål.....	45
6	Sammenligning av tekniske fortrinn mellom aluminium og stål .....	46
6.1	Materialegenskaper.....	46
6.2	Hva er viktigst for en brukonstruksjon?.....	47
7	Oppbygning og dimensjonering av konstruksjonen .....	49
7.1	Forutsetninger .....	49
7.1.1	Antagelser .....	49
7.1.2	Avvik fra standarder.....	50
7.2	Utforming av konstruksjon .....	51
7.2.1	Bredden i konstruksjon .....	51
7.2.2	Fri høyde .....	52
8	Oppbygging og dimensjonering av aluminiumsmodell .....	54
8.1	Oppsett for kontroller .....	54
8.2	Oppstart .....	55
8.2.1	Fagverket.....	56
8.2.2	Rammens oppbygging.....	56
8.3	Påføring av bruddlaster .....	59
8.3.1	Dimensjonerende lasttilfelle.....	59
8.3.2	Manuell kontroll for knekkstaver .....	60
8.3.3	Von Mises .....	61
8.3.4	Øvrige lastgrupper.....	62
8.4	Sveisekapasitet.....	62
8.5	Bruksgrensetilstand.....	63
9	Oppbygging og dimensjonering av stålmodell .....	65
9.1	Konstruksjonsmessige forskjeller fra aluminiumsmodell .....	65
9.1.1	Kontroll ved normalspenninger og nødvendige endringer .....	65
9.1.2	Sammenføyninger .....	66
9.2	Bruddgrense stål .....	66
9.3	Bruksgrense stål.....	66
10	Python-program .....	68
10.1	Beskrivelse av script .....	68
10.2	Oppbygging av script.....	69

11	Kostnadsberegninger.....	72
11.1	Aluminiumsmodell .....	72
11.2	Stålmodell.....	74
11.3	Økonomisk sammenligning av aluminiums- og stålutførelse.....	75
12	Diskusjon .....	77
12.1	Dimensjonering.....	77
12.1.1	Design .....	77
12.1.2	Standarder .....	77
12.1.3	Svekkelser på grunn av HAZ.....	77
12.1.4	Størrelse på aluminiumsprofiler .....	78
12.1.5	Liten underbygning .....	79
12.1.6	Utmatting .....	79
12.2	Miljø .....	80
12.3	Økonomi.....	80
12.4	Feilkilder.....	82
12.4.1	Kunnskap og litteratur.....	82
12.4.2	Dimensjonering og modellering.....	82
12.4.3	Kostnadsestimater .....	82
13	Konklusjon.....	84
14	Veien videre .....	85
	Referanseliste .....	86
	Figurliste .....	89
	Tabelliste.....	90
	Vedlegg.....	91



# 1 Innledning

Denne bacheloroppgaven er skrevet av tre studenter med spesialisering i konstruksjonsteknikk ved byggingeniør-studiet ved Norges tekniske-naturvitenskaplige universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven er en del av et større forskningsprosjekt, AluBridge-prosjektet, som har til hensikt å dimensjonere ei bru i aluminium i Norge. Aluminium er tradisjonelt svært lite brukt i brudimensjonering i Norge og i resten av verden. Det gjenstår mye forskningsarbeid for å vurdere om aluminium kan likestilles med tradisjonelle brubyggematerialer som stål og betong for fremtidig bygging av bruer. Det som gjør aluminium spesielt interessant som byggemateriale for fremtidige brukonstruksjoner, er materialets fortrinn i form av styrke/vektforhold, korrosjonsbestandighet og designmuligheter. De eksterne veilederne fra SINTEF er direkte involvert i prosjektering av den nye brua i AluBridge, som er planlagt å bli installert i Raufoss sentrum i løpet av 2022.

## 1.1 Oppgavebeskrivelse

*Hensikten med denne bacheloroppgaven er å dimensjonere og analysere ei fagverksbru i aluminium, og sammenligne resultatene med en tilsvarende konstruksjon i stål. I oppgaven belyses egenskaper og konstruksjonsprinsipper ved aluminium som nytt byggemateriale for bruer. Resultatet av oppgaven skal gi et resonnement om hvorvidt aluminium har egenskapene som skal til for å brukes som byggemateriale i en gitt brukonstruksjon.*

Brua som skal dimensjoneres er den 29 meter lange «Nysethvegen bru» i Raufoss, Vestre Toten kommune. Brua skal være en fagverksbru i aluminium, med 2-felts kjørebane og gangfelt på begge sider. Det utvikles ett fagverksdesign i aluminium og ett i stål, som begge kan være aktuelle for brua. Konstruksjonen skal dimensjoneres etter Statens Vegvesen (SVV) sine håndbøker og Eurokode. Elastiske styrkeberegninger skal gjøres i et FEM-program, med håndberegninger som kontroll i konstruksjonen. Det skal i tillegg leveres et forenklet Python-program som kan kontrollere stavene i fagverket for kapasitet, knekking og utnyttelsesgrad. For å danne et godt beslutningsgrunnlag om hvorvidt aluminium kan egne seg som fremtidig byggemateriale for brukonstruksjoner, skal materialegenskaper, beregninger og pris sammenlignes med en tilsvarende modell i stål.



*Figur 1-1 Illustrasjon laget i Archicad*

## **1.2 Avgrensninger**

På grunn av oppgavens omfang samt den kompetansen som ligger til grunn er det gjort en del avgrensninger i oppgaven. De største begrensninger og avgrensninger er beskrevet under. Det vil midlertidig kunne forekomme mindre avgrensninger knyttet til oppgaven, som vil være definert i de kapitler det måtte gjelde.

Problematikk knyttet til svekkelse av materialet i heat affected zone [HAZ, forklart i kapittel 4.4], gjør konstruksjonen til en kompleks studie. Med tilgjengelig programvare vil det ikke være mulig å gå dypt inn i spenningsfordelinger i knutepunkter. Med dette som bakgrunn, i kombinasjon med tidsbegrensninger og oppgavens omfang, er det i samråd med eksterne



veiledere bestemt at det ikke skal dimensjoneres med HAZ-reduksjon. Følger av dette kan gi aluminium et ufortjent fortrinn, men denne problematikken vil bli belyst gjennom oppgaven.

Det er i samråd med intern og eksterne veiledere bestemt å avgrense oppgaven slik at svingninger og utmattingsproblematikk ikke tas med i dimensjoneringen av konstruksjonen. Viktigheten rundt disse temaene vil bli diskutert, men de vil utgå fra dimensjoneringen. Knyttet til dette vil også oppgaven avgrenses slik at knutepunkter og spesielt dyptgående analyser av sveiser i stor grad utgår fra beregningene.

Stål er i all hovedsak presentert for å gi dybde i resonnementet og sammenligning for vurderingen om aluminium egner seg i brukonstruksjoner. Dette innebærer at teorien om stål brukes for sammenligning uten nærmere gjennomgang. Stål er fra tidligere et kjent og foretrukket byggemateriale for brukonstruksjoner i Norge, og mye av kunnskapen om stål anses som kjent. Sammenligningen opp mot stål er derfor kun ment for å belyse viktige egenskaper og forskjeller i konstruksjonsprinsipper.

### **1.3 SINTEF – ekstern veiledning**

SINTEF er et norsk forskningsinstitutt som har drevet med verdensledende forskning innenfor industrielle og tekniske fag i mer enn 70 år (1). Den faglige kompetansen som SINTEF har opparbeidet seg i form av dybdekunnskap og erfaring, er viktig for å kunne vurdere aluminium som et bærekraftig og fremtidig byggemateriale for bruer i Norge. Begge de eksterne veilederne er direkte involvert i AluBridge-prosjektet gjennom SINTEF, og har stor interesse innenfor konstruksjonsteknikk. Nicolas Morin og Marius H. Andersen har henholdsvis master og doktorgrad innenfor konstruksjonsteknikk, og jobber med forskning på SINTEF sin avdeling for materialer og nanoteknologi i Trondheim.

Det har ukentlig blitt holdt møter med de eksterne veilederne i SINTEF for å sikre fremdrift i oppgaven.

## 1.4 Struktur

Bacheloroppgaven er bygget opp med en;

- Hoveddel
  - Prosjekteringsgrunnlag og laster
  - Teori om aluminium, og kort presentasjon av stål
  - Tabell for sammenligning av aluminium og stål
  - Oppbygning og dimensjonering av konstruksjon
  - Python-program
  - Økonomi
- Diskusjonsdel – om bruken av aluminium i Nysethvegen bru
- Konklusjon
- Vedleggsdel

Kapittel 2 tar for seg prosjekteringsgrunnlaget til oppgaven. Videre blir last og lastkombinasjoner presentert i kapittel 3. Kapittel 4 er teori om aluminium, før det er et lite kapittel om stål. Kapittel 6 består av en tabell for sammenligning av aluminium og stål. Videre er det i kapittel 7, 8 og 9 vist oppbygning og dimensjonering av brua i aluminium og i stål. I kapittel 10 vises oppbygningen av Python-program for kontroll av fagverksstaver, før det i kapittel 11 presenteres kostnadsberegning av bruene. Til slutt er det en diskusjonsdel og konklusjon om bruken av aluminium til nye Nysethvegen bru i Raufoss.

## **2 Prosjekteringsgrunnlag**

### **2.1 Brukte standarder**

*Statens Vegvesens håndbøker; N100, N101, N400, R412 og R762*

*Norsk Standard; Eurokode: 0, 1 og 9*

### **2.2 Programverktøy**

#### ***Robot Structural Analysis***

Robot Structural Analysis er et FEM-program for beregninger og styrkeanalyse av konstruksjoner. For analyser av fagverk og lignende konstruksjoner bruker Robot bjelkeelement-metoden med to noder. Programmet tar utgangspunkt i teori fra matrisestatikken. Dette vil for flesteparten av elementene som er brukt i denne oppgaven tilsi 12 frihetsgrader i hvert element. En slik analyse vil gi gode data for krefter og spenninger påført i bjelker, men for dype analyser i knutepunkter vil det være behov for annen programvare. I oppgaven er Robot brukt til å analysere konstruksjonen både lokalt og globalt. Gjennom programmet utføres kontroller for opptredende spenninger i brudd- og bruksgrensetilstand, samt knekking. Det er også hentet ut relevante verdier for å utføre kontrollberegninger for hånd.

#### ***MathCad Prime 3.1***

MathCad Prime er et tekstbehandlingsprogram for matematiske beregninger. Det er et kjent program som i denne oppgaven har blitt brukt til å utføre de kontrollerende håndberegningene. Det er en fordel å bruke et program som dette, siden flere tilsvarende beregninger skal gjøres med små endringer av verdier.

#### ***Jupyter Notebook***

Jupyter Notebook er et web-basert program for programmering. Det er laget slik at det er mulighet for å bruke flere programmeringsspråk. En del av oppgaven er å lage en python-kode, som skal kontrollere fagverkstaver. Dette er gjort i Jupyter Notebook.

#### ***Archicad og Lumion***

For å illustrere brua og omgivelsene er det laget en modell av brua i Archicad. Denne programvaren egner seg godt for å visualisere de arkitektoniske aspektene ved brua. For

bildefremvisning brukes Lumion 3D. Dette er et GPU-basert renderingsprogram for realistiske fremvisninger av CAD-filer. I dette prosjektet er Archicad linket via livesync til Lumion for rendering av både bru, terreng og andre visuelle effekter i området.

## **2.3 AluBridge-prosjektet**

AluBridge-prosjektet er et forskningsprosjekt som ble startet opp i begynnelsen av 2020, og har til hensikt å prosjektere ei ny bru i aluminium i Norge. Det er tidligere bare blitt bygd ei bru i aluminium i Norge, Forsmo bru. Den ble bygget i Nordland i 1995 og har et spenn på 39 meter. Det er ei bru over elven Drevja som ligger nord for Mosjøen. Det gjenstår fremdeles mye forskning og teknologisk utvikling for å vurdere om bruken av aluminium i større grad kan erstatte stål i brukonstruksjoner.

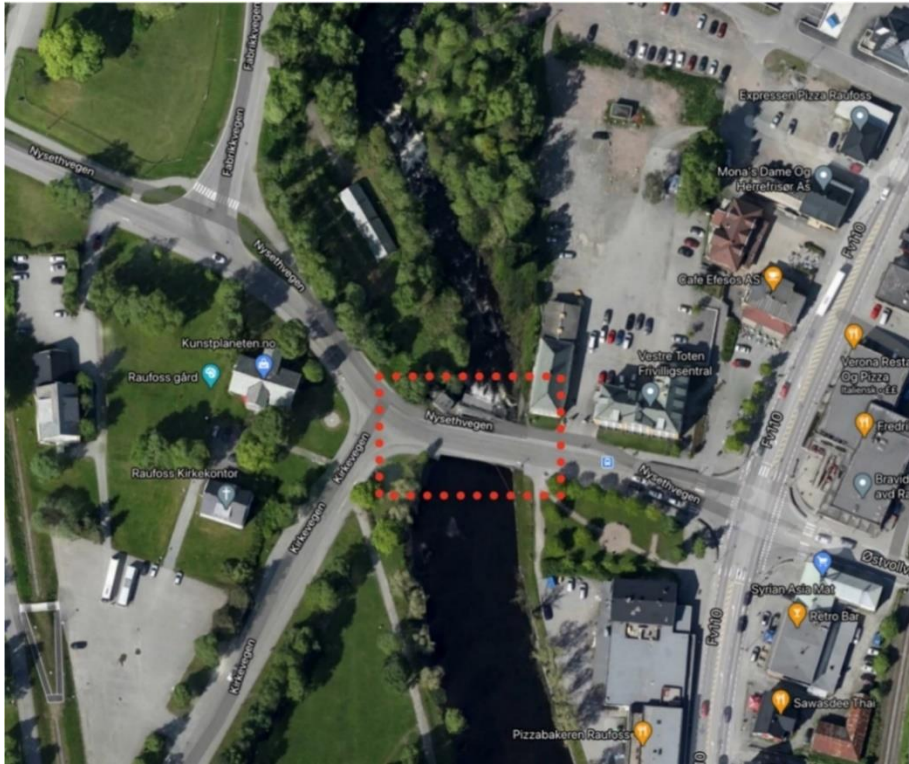
Det er i første omgang planlagt at AluBridge skal vurdere om det kan dimensjoneres ei konkurransedyktig aluminiumsbru i Raufoss sentrum, Vestre Toten kommune. Det tas her sikte på å prosjektere ei ny bru i aluminium innen 2021 som kan installeres i løpet av 2022 (2). Dersom prosjektet blir gjennomført med et kostnadseffektivt resultat kan forskningen og erfaringen som er gjort i forbindelse med prosjektet være aktuell for flere nye og større bruoverganger i Norge.

Det er blant annet utarbeidet en rapport for bruken av aluminium i kasseprofilet til hengebrua over fjordkryssingen Langenuen, Stord - Os på Vestlandet, i fergefrie E39-prosjektet. Det er en tiltenkt 4-felts hengebru på 1720 meter som kan bli en virkelighet senere (3).

Det er mange gode samarbeidspartnere som er involvert i AluBridge for å gi faglig dybde og erfaring, helt fra produksjon av aluminium til ferdigstilling av brua. Samarbeidspartnerne er Statens Vegvesen, Norsk Hydro, Hydal Aluminium Profiler, LEIRVIK, Dr. Techn Olav Olsen, Aas-Jakobsen, SINTEF, NTNU og DNV GL.

### **2.3.1 Området og tidligere bru**

Nysethvegen bru, også kjent som Skolebrua, er ei bru i betong som skal erstattes. I den forbindelse sees det på muligheter for bruk av aluminium som nytt brumateriale. Brua befinner på Nysethvegen i Raufoss, Innlandet fylke. Det er en kommunalvei med fartsgrense 40km/t rett ved damanlegget i Raufoss sentrum, like ved avkjøringen til fylkesvei 2368 (tidligere Fv110). Brua er 28,3 meter lang og strekker seg over Hunnselva.



Figur 2-1 Oversiktsbilde av Nysethvegen bru. Brusted markert i rødt – Nord (N) oppover. (4)

Området rundt Nysethvegen bru består av et relativt flatt terreng. På oversiden av brua er det et damanlegg for kontroll av vannstanden, mens langs med elven er det parker og turveier for innbyggerne. Brua er en viktig bruovergang i Raufoss sentrum, og ikke minst til Raufoss Industripark som er rett i nærheten. Det passerer 32 000 vogntog årlig i området, og brua er skoleveien for flere barn (5). Raufoss Industripark er et av Norges største næringsområder, med aktivitet og industri som skaper mye tungtrafikk (5). Det er anslått at 95 % av all produksjon i industriparken eksporteres (6). Beliggenheten til industriparken er nordvest for Raufoss sentrum, og er avhengig av at vogntog effektivt og sikkert kan frakte varene som produseres sørover til Oslo og Europa.

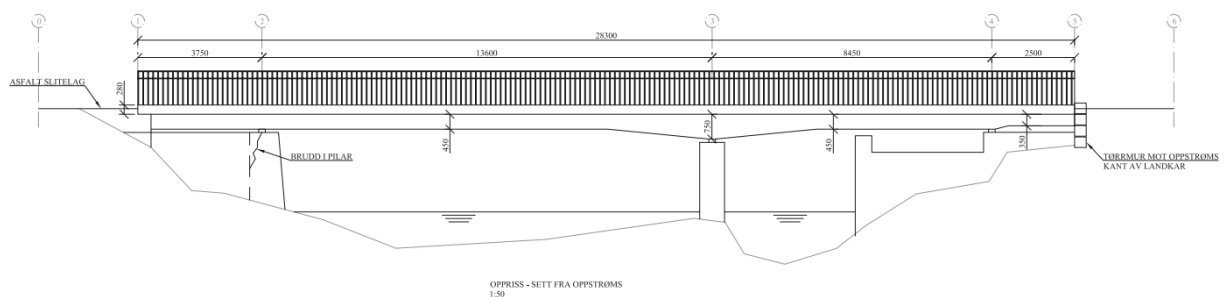


Figur 2-2 Gamle Nysethvegen bru. Sett fra oversiden damanlegg. (7)



Figur 2-3 Gamle Nysethvegen bru på vinterstid. Flatt og rolig sentrum (7)

Den eksisterende brua i betong har en tofelts-kjørebane med gangfelt og rekkverk på begge sider. Brua har fire bruspenn og en total lengde på 28,3 meter. Bruen er opplageret på et betongelement som er plassert i elven, og har lengste spenn på 13,6 meter. På oppdrag fra Vestre Toten kommune har Safe Control Engineering AS gjort inspeksjon den 02.11.2016 for å måle fri høyde ned til Hunnselva. Ved nedtappet dam ble fri høyde målt til å være 2,3 meter. Brukonstruksjonen er i sin helhet blitt bygget av plasstøpt betong. Hovedbæresystemet er betongplater i forskjellige tykkelser og spennlengder på grunn av ulike lengder mellom pilarene. Rekkverket til bruen er i stål, mens slitelaget er av asfalt (2).



Figur 2-4 Skisse av gamle Nysethvegen bru. Fra sakspapirene til Vestre Toten kommune (2)

Fra sakspapirene og tilstandsrapporten til Vestre Toten kommune fra 30.04.2020 fremkommer det at Nysethvegen bru er i svært dårlig stand. Det er ved rutinemessige inspeksjoner avdekket skader på brua med betydning for bæreevne og trafiksikkerhet. Det framkommer at bruas materialkvaliteter og konstruksjon er i så dårlig forfatning at bruas gangbaner ikke vil tåle dagens vedlikeholdsutstyr, beregnet etter Vegvesenets bruklassifiseringshåndbok R412. Bruen har bruddskade ved pilar akse 2 med betydning for bæreevne, og bør utbedres så snart som mulig (2).

### 2.3.2 Nye Nysethvegen bru

Det vil i oppgaven dimensjoneres ei ny aluminiumsbru over Hunnselva i Raufoss sentrum. Det vil være ei fagverksbru med et helhetlig spenn på 29 meter. Det betyr at den nye bruene ikke skal være opplagret på det eksisterende betongelementet som er i elven fra tidligere. Dersom ny bru i aluminium blir vedtatt i kommunestyret, vil betongelementet i elven mest sannsynlig fjernes.

Den nye brua skal ha en tofelts-kjørebane med gangfelt og rekkverk på begge sider. Brua skal dimensjoneres etter gjeldende regelverk for brudimensjonering i Norge, med utgangspunkt i Norsk Standard og Statens Vegvesens håndbøker.

Det er planlagt at Hydal Aluminium Profiler, som holder til i Raufoss Industripark, skal levere aluminiumen som trengs til bygging. Selskapet kjøper aluminium fra Norsk Hydro, og bearbeider det til ønskede profiler på bestilling fra kunder. Fra samtaler med SINTEF viderefremmes det at ordfører, Stian Olafsen, i Vestre Toten kommune er veldig positiv til ei bru i aluminium, og håper på en god løsning med Hydal Aluminium Profiler som lokal produsent i prosjektet. Ei fagverksbru i aluminium med to kjørefelt vil være den første bruene i sitt slag i Norge, og kan på mange måter promotere Raufoss og Hydal Aluminium Profiler positivt.

Fra samtaler med SINTEF er det ikke vedtatt en avgjørelse for ny aluminiumsbru i kommunestyret enda. En mulighetsstudie av aluminium i Nysethvegen bru kan bidra til å danne et beslutningsgrunnlag for en videre avgjørelse. Det er fra veilederne i SINTEF ønskelig med et kostnadseffektiv fagverksdesign.

En av de trolig største utfordringene med å dimensjonere et fagverksdesign til Nysethvegen, er å lage et design for underbygningen som oppfyller kravene til bæreevne. Det er veldig liten frihøyde mellom Hunnselva og kjørebane. Siden sentrumsområde rundt elva er flatt og det kjører mye tungtransport over brua, er det ikke hensiktsmessig å bygge opp landkarene eller å konstruere en krummet brubane.

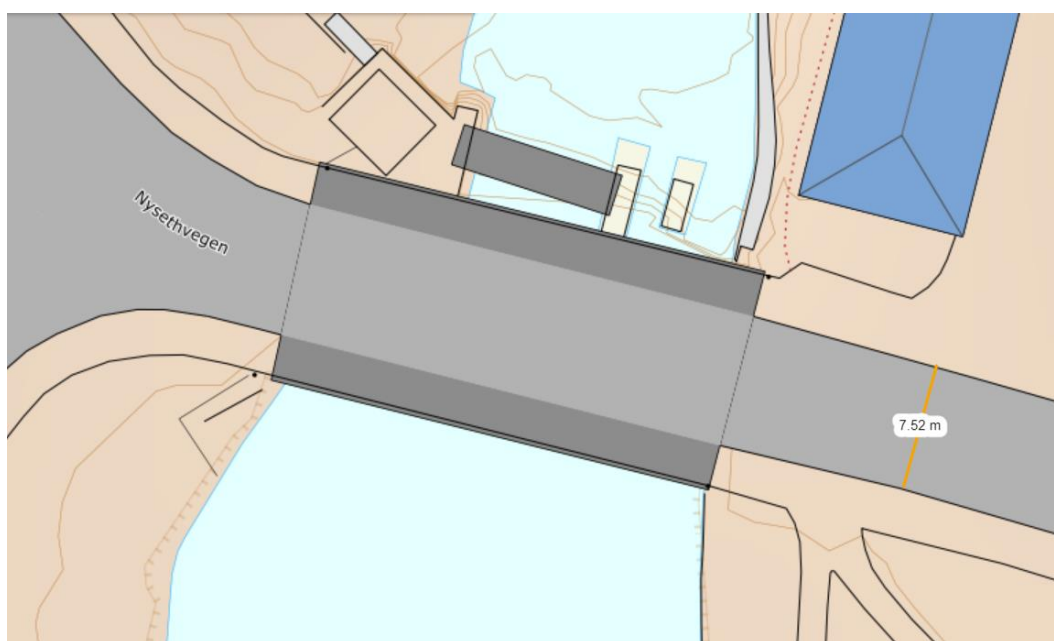
## 2.4 Krav til utforming av ny bru

Statens vegvesen stiller flere krav til utforminger av bruer. Det må tas forbehold både om bredder for kjørebane, gangfelt og avstander mellom bærende konstruksjon. Videre vil krav om fri høyde til overbygg være en viktig faktor. Kravene satt av statens vegvesen foreligger i følgende håndbøker:

- Håndbok N100 Veg- og gateutforming
- Håndbok N101 Rekkverk og vegens sideområder
- Håndbok N400 Bruprosjektering

### 2.4.1 Krav til bredde

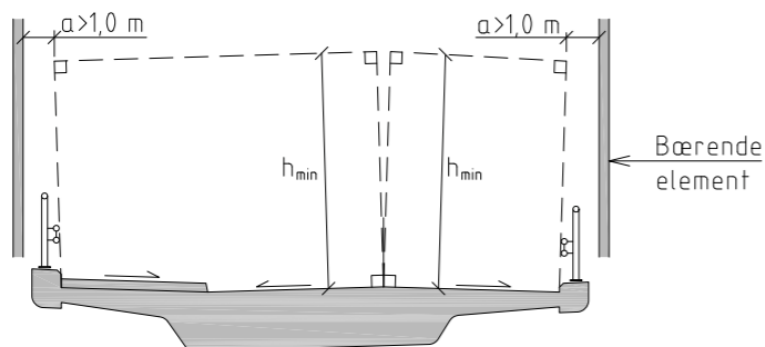
Kravene for bredde av kjørebane og kravene for bredde av gang- og sykkelveg er oppgitt i N100. Det er oppgitt at veg på bru skal ha samme bredde som tilstøtende veg. Samtidig skal bredde på 2 felts veg, uten midtrekkverk, over ei bru være minimum 7.50 m (8 s. 93). Bredden på Nysethvegen inn mot brua er tilnærmet 7.50 m bred. Det er også oppgitt at minimum bredde på fortau er 2.50 m (8 s. 93).



Figur 2-5 Bredden tilstøtende veg (9)



I N400 er følgende definert: vegbruer med overliggende bæresystem skal ha minimum sideavstand  $a = 1,0$  m til trafikkprofilen. I tillegg er det krav om avstand for overliggende bæresystem mot gang og sykkelveg. Denne avstanden skal være lik  $0,20$  m (10 s. 45).

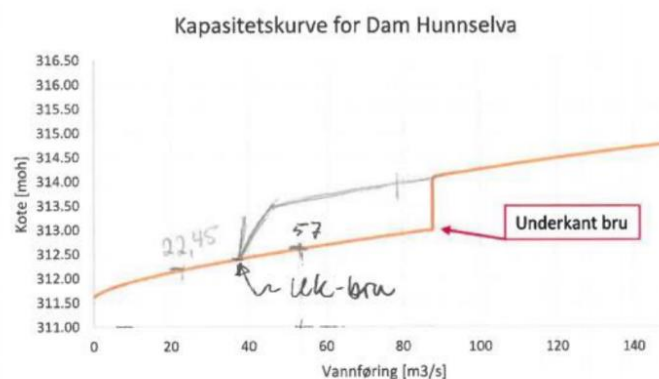


Figur 2-6 Fri bredde  $a < 1,0$  m for bru med overliggende bæring

## 2.4.2 Krav til fri høyde

Kravet om fri høyde skal forhindre at kjøretøy tar opp i overliggende bæresystemer. Hovedregelen er at veger med motorisert trafikk skal bygges for kjøretøy med høyde inntil  $4,50$  meter. Videre i N100 er det beskrevet at for bruer med overliggende bæresystem, skal det i tillegg til kjøretøyets høyde på  $4,5$  m legges til en sikkerhetsmargin på  $0,20$  m. Videre kommer byggtoleranser på  $0,10$  m og toleranse for vedlikehold av slitelag på  $0,10$  m. Ved prosjektering blir dermed kravet til fri høyde  $4,90$  meter. Det skal også tas hensyn til vegens tverrfall (8 s. 100).

Det er i N400 definert at fri høyde over vassdrag prosjekteres slik at det er minimum  $0,50$  m klaring mot overbygningen ved vannstand for 200-års flom (10 s. 47). Det er ikke foretatt egne beregninger av vannføring knyttet til flomvurderinger. Men i samråd med eksterne veiledere og tidligere beregninger er maksimum underbygning satt til  $1,20$  m, noe som vil oppfylle kravet om fri høyde over vassdraget.



Figur 2-7 Kapasitetskurve for dam Hunnselva

## 2.5 Materialer

Miljøfokus og klimamålene for fremtiden har aldri vært større og viktigere enn de er i dag. Det er derfor viktig at det sirkulærøkonomiske samfunnet man ønsker å leve i kan velge gode og bærekraftige byggematerialer for fremtiden. Byggebransjen står for om lag 40% av energiforbruket og klimagassutslippene i verden i dag (11). For å innfri klimamålene for 2030 og 2050 må bransjen gjennom store omstillinger med tanke på bruk av materialer og high-tech løsninger i årene som kommer. Under er en kort presentasjon av aluminium og stål. Kapittel 4 går mer i dybden på aluminium som byggemateriale.

### 2.5.1 Aluminium - et historisk tilbakeblikk

Aluminium er et sølvhvitt metall som har vært svært viktig i menneskehetens utvikling etter industrialiseringen fra 1850-tallet og utover. Grekerne og romerne kjente til aluminiumsalter i oldtiden, men det var først i 1825 at de første kornene av metallisk aluminium ble fremstilt av den danske kjemikeren og fysikeren, Hans Christian Ørsted (12).

Forekomsten av aluminium er stor på verdensbasis. Aluminium utgjør hele 8,2 prosent av jordskorpen og det produseres over hele verden (12). Det var på midten av 1800-tallet at det ble oppfunnet en metode for utvinning av aluminium fra bauksitt. Metoden var svært krevende, men fremstillingen av det nye metallet ble sett på som en sensasjon. Aluminiumsprisene i verden skjøt fart, og på 1850-tallet ble aluminium så eksklusivt at det var dyrere enn gull. Metallet ble vist frem på verdensutstillingen i Paris, og ble et tegn på rikdom blant keisere og kongelige. I takt med teknologiske fremskritt ble det utviklet nye og bedre metoder for utvinning av aluminium (13).

Mot slutten av 1800-tallet fant kjemikere ut at lettmetallet aluminium kunne fremstilles ved elektrolyse. Ved å tilføre elektrisk energi inn i redoksreaksjoner, ble det plutselig mulig å fremstille nøytrale grunnstoffer av ioner (14). Tilgang på rikelige mengder aluminium og produksjon av elektrisk energi fra de norske vannkraftverkene, gjorde at produksjon av aluminium egnet seg svært godt i Norge. Norge hadde en enestående posisjon for å kunne slå seg opp som verdensledende produsent med all tilgjengelig fossekraft. Den energikrevende produksjonen av aluminium skulle vise seg å bli et industrieventyr og en mulighet som gir Norge et konkurransefortrinn i produksjonen av aluminium den dag i dag.

I 1908 startet British Aluminium Company (BACO) opp storskalaproduksjon for fremstilling av aluminium i Sunnfjord (15). Også Norsk Hydro ASA (NHY) startet opp

aluminiumsproduksjonen et par år senere. I dag er Hydro verdensledende innen segmentet lavkarbonaluminium (REDUXA og CIRCAL) (16). Det er et stort fokus på lavt karbonavtrykk og reduksjon av globale utslipp i produksjonslinjene. Dette gjør at aluminiumsproduktene til Norsk Hydro som er produserte med norsk vannkraft, er veldig ettertraktet i både Norge og i verden (16).

I Norge har bruken av aluminium i bruer vært begrenset av en relativ høy investeringskostnad, begrenset kunnskap og lite erfaring. I tillegg har tradisjonelle byggematerialer som betong, stål og tre stått sterkt blant bruingeniører (17). Det er kun utført en veg-bru i Norge hvor selve brua er aluminium, Forsmo bru. Det finnes flere tilfeller hvor blant annet tidligere brudekke har blitt erstattet med aluminium. Forsmo bru er ei kassebru med innvendig fagverk, alt i aluminium. Ifølge en rapport i samarbeid med SVV er det ingen problemer tilknyttet hverken korrosjon eller sveis på den 27 år gamle brua. (6).

For å finne flere gode prosjekter med bruk av aluminium må man utenlands, hvor særlig Tyskland, USA og Canada nevnes i rapporter. En del aluminiumsbruer har blitt bygget bare for å promotere aluminium som konstruksjonsmateriale. Når det er sagt, så har aluminium egenskapene som skal til for å egne seg som byggematerialer i bruer. Metallet har høyt styrke/vekt-forhold og er nærmest vedlikeholdsfritt. I fly- og bilindustrien har aluminium lenge vært det foretrekkende materialet på grunn av lav egenvekt og gode muligheter for design.

### **2.5.2 Stål – et kort resyme**

Intet metall har betydd mer for den moderne sivilisasjonen enn stål. Alt fra jernbaneutbygging på 1800-tallet til store offshore-konstruksjoner har vært helt avhengig av stål. I dag er stål et essensielt byggemateriale over hele verden. Stor styrke og stivhet gjør det til et egnet valg for bærende konstruksjoner. Mulighet for lengre spenn, slankere konstruksjoner og en billigere og mer effektiv produksjon har gjort stål til ett av verdens mest brukte byggematerialer.

Den moderne stålproduksjonen startet først på 1850-tallet ved bruk av Bessemerprosessen (18). Tidligere var utfordringen med produksjonen av stål å oppnå høy nok temperatur i smelteovnene, slik at jernet ble flytende. Før hadde jernmalmen bare delvis smeltet og blitt konsolidert i bunnen som en jernklump. Jernet inneholdt da mye slag og forurensning. Da det ble tatt i bruk koks i smelteovnene kunne temperaturen bli mye høyere. Forskning og utprøving gav raskt muligheter for en mer effektiv og renere produksjon.

Dagens bruk av stål er veldig standardisert på grunn av bygge-bransjens høye forbruk. Normer rundt design og preaksepterte løsninger er godt utarbeidet. For de aller fleste ingeniører er stål et godt kjent materiale.

## 3 Laster

Dette kapitlet tar for seg lastpåvirkningene som er gjeldende for brukonstruksjoner. En last er etter *Håndbok N400: Bruprosjektering* [N400] definert som en kraft eller en påført deformasjon som gir konstruksjonen spenninger og/eller tøyninger (10). Videre skal lastene klassifiseres og lastkombinasjoner presenteres.

### 3.1 Klassifisering av laster

Konstruksjonen vil bli påkjent av forskjellige last-typer som danner grunnlaget for en klassifisering ut fra deres størrelse og påvirkning over tid. Klassifiseringen skiller mellom permanente påvirkninger, variable påvirkninger og ulykkeslaster. Permanente påvirkninger er konstruksjonens egenvekt og eventuelle permanente monteringer på brua. Variable laster er lastpåvirkninger som vil variere gjennom et tidsintervall. Dette vil typisk være variasjonen av trafikklast gjennom et døgn. Ulykkeslaster er laster som konstruksjonen blir utsatt for ved unormale hendelser eller ulykkestilfeller.

### 3.2 Permanente påvirkninger

Laster som konstant påvirker konstruksjonen gjennom levetiden, er å betrakte som permanente laster. Egenlast, permanent utstyr, jordtrykk, vanntrykk og eventuelle andre krefter som virker konstant på konstruksjonen klassifiseres som permanente påvirkninger. Egenlasten tilsvarer konstruksjonens egen tyngde, inkludert belegningslag. Minstekrav til dimensjonerende vekt for belegningslag er gitt til  $3,5\text{kN/m}^2$  i tabell 5.1 i N400. For fortau på vegbru er denne verdien satt til  $1,5\text{kN/m}^2$  (10). Når det gjelder egenvekten til brukonstruksjonen er det i *NS-EN 1991-1-1: 2002+NA:2019: Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-1: Allmenne laster. Tetthet, egenvekt og nyttelaster* [EK-1-1] oppgitt at følgende egenvekter skal benyttes: Aluminium med  $27\text{kN/m}^3$  og stål med  $77\text{kN/m}^3$  (19).

### 3.3 Variable påvirkninger

I følge N400 er variable påvirkninger laster som vil variere over tid. Det kan blant annet være trafikklast, naturlaster som snø og vind og andre laster som er påført konstruksjonen i en midlertidig periode. N400 angir at snø- og trafikklast ikke opptrer samtidig (10 s. 44). Det antas at vegbanen kontinuerlig ryddes for snø og dermed ses det vekk fra eventuell snølast.

### 3.3.1 Trafikkklaster

#### Teoretiske kjørefelt

De karakteristiske verdiene skal i henhold til N400 hentes fra *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del-2: Trafikklast på bru*er [EK-1-2]. For bru er skal det etter EK-1-2 tabell 4.1 bestemmes antall teoretiske kjørebaneer med tilhørende bredder. De teoretiske kjørebaneene bestemmer lokasjon for belastning av de forskjellige trafikklastene. Figur 3-1 viser beregningsgrunnlaget for antall kjørebaneer med tilhørende bredder.

Table 4.1 - Number and width of notional lanes

Carriageway width $w$	Number of notional lanes	Width of a notional lane $w_l$	Width of the remaining area
$w < 5,4$ m	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3$ m
$5,4$ m $\leq w < 6$ m	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6$ m $\leq w$	$n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_1$

NOTE For example, for a carriageway width equal to 11m,  $n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = 3$ , and the width of the remaining area is  $11 - 3 \times 3 = 2$ m.

Figur 3-1 Tabell 4.1 fra EK-1-2 (20 s. 33)

For den betraktede brua vil det være to kjørefelt med teoretisk bredde på 3m med resterende felt tilsvarende 1,5m. Plassering av felt skal etter 4.2.4(2) gjøres på en måte som gir mest ugunstig lastsituasjon med hensyn til brudd. Det vil i dette tilfellet være å plassere feltene helt mot hverandre slik at det resterende felt blir fordelt på sidene med en bredde på 0,75.

#### De fire lastmodellene for vertikale trafikkklaster

For vertikale laster bruker EK-1-2 fire lastmodeller. Modellene angir karakteristiske lastverdier som brukes for kontroll av bruddgrensetilstand [ULS] og bruksgrensetilstand [SLS]. Tabell 3-1 viser de fire lastmodellene og tilhørende egenskaper som er gitt i 4.3.1(2)(a-d).

Lastmodell 1 [LM1]	Konsentrerte og jevnt fordelte laster. Modellen har som intensjon å dekke bevegelige, overbelastede eller situasjoner med stillestående trafikken med en stor prosentandel tungtrafikk.
Lastmodell 2 [LM2]	Enkel aksellast plassert på spesifikke kontaktplasser for avdekking av dynamiske effekter på korte strukturer (lokalt)
Lastmodell 3 [LM3]	Et sett med aksler som representerer spesial-transport.
Lastmodell 4 [LM4]	Folkelast

Tabell 3-1 Lastmodeller og egenskaper

### Karakteristiske lastverdier for LM1

LM1 skal etter EK-1-2 4.3.2 bestå av to delsystem:

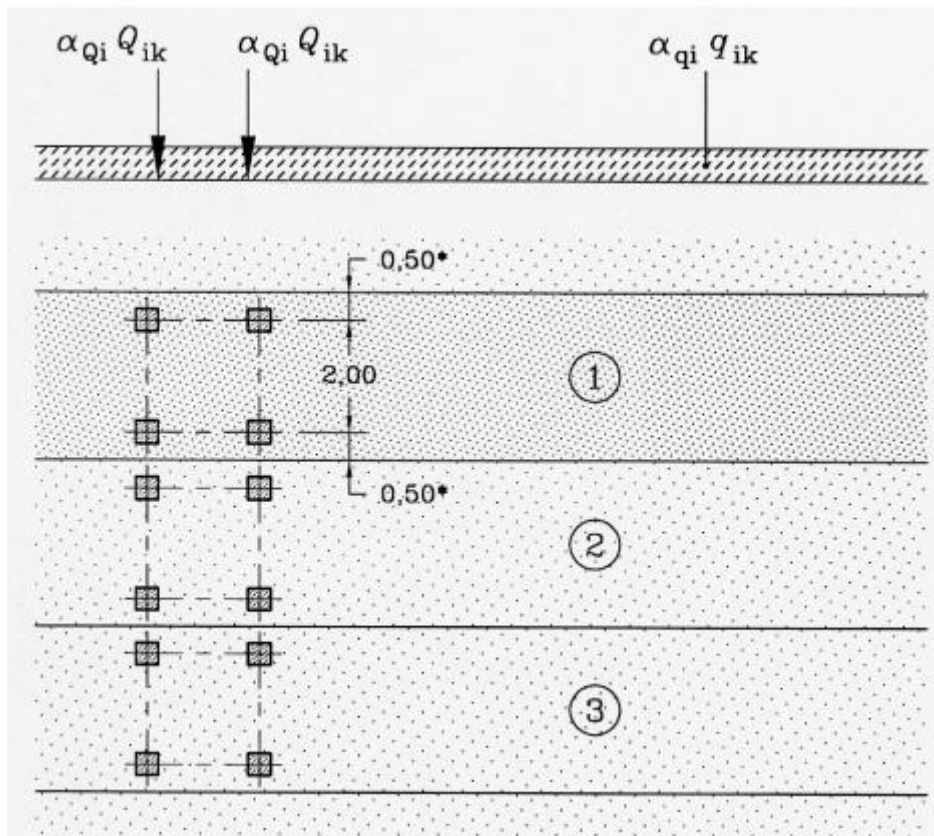
Delsystem a) bestående av en dobbel-aksel med en kraft fra hver akse:  $\alpha_Q Q_k$ . Det skal bare brukes en dobbel-aksel per kjørebane og hver akse burde settes som hjullast med kraften  $0,5\alpha_Q Q_k$ . Videre bør kraften fra hvert hjul settes som et kvadrat med sidekantlengde på 0,4m. Lasten vil for dette prosjektet bli satt som punktlast da oppgaven ikke går i dybden på spenninger påført brudekke.

Delsystem b) bestående av jevnt fordelt last med karakteristisk last:  $\alpha_q q_k$ . Denne lasten skal plasseres over hele kjørebanen.

Det resterende feltet skal dekkes av en jevnt fordelt last  $\alpha_{qr} q_{rk}$ .

Siden bruens spenn er kortere enn 500 meter vil justeringsfaktorene  $\alpha_Q$ ,  $\alpha_q$  og  $\alpha_{qr}$  gitt i det nasjonale tillegget NA.4.3.2 være gjeldene.

Videre er det også krav for avstander mellom «møtende» aksler samt hjulavstander. Dette illustreres i Figur 3-2 og verdier for  $Q_{ik}$  og  $q_{ik}$  blir angitt i Figur 3-3.



Figur 3-2 Figur 4.2a) fra EK-1-2 (20 s. 37)

**Table 4.2 - Load model 1 : characteristic values**

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

Figur 3-3 Tabell 4.2 fra EK-1-2 (20 s. 37)

### Karakteristiske lastverdier for LM2

LM2 skal bestå av en enkel aksellast  $\beta_Q Q_{ak}$  der  $Q_{ak} = 400kN$  og  $\beta_Q$  er satt til 1 i NA.4.3.3.

LM2 skal plasseres for mest ugunstig belastning på konstruksjonen. Kontaktflaten fra hvert hjul burde være 0,35mx0,60m, men vil i denne oppgaven bli satt som punktlast.



### Karakteristiske lastverdier for LM3

Karakteristiske verdier for LM3 skal ifølge NA.4.3.4 fastsettes i det enkelte prosjektet.

Med bakgrunn på oppgavens hovedmål vil ikke LM3 tas med i beregningene. Dette i hovedsak fordi de øvrige lastmodellene vil være mer relevant med tanke på sammenlikning mellom stål og aluminium. Analysen vil også øke omfanget av oppgaven betraktelig, da det må studeres hvilke typer spesialtransporter som eventuelt går over brua.

### Karakteristiske lastverdier for LM4

LM4 representeres med en jevnt fordelt last lik  $5kN/m^2$ . Dette vil være veldig aktuelt for Nysethvegen bru da 17-mai toget går over denne brua hvert år.

### Oppsummering av vertikale trafikklaster

For enklere gjennomføring når laster senere grupperes og kombineres er lastmodellene satt opp i Tabell 3-2 med ferdig korrigerede karakteristiske laster. Verdier og beregninger for de respektive modellene er nærmere beskrevet i vedlegg C.

Lastmodell	Kjørefelt 1	Kjørefelt 2	Resterende felt
LM1	$2\alpha_{Q1}Q_{1k} = 2 * 300kN$	$2\alpha_{Q2}Q_{2k} = 2 * 200kN$	$\alpha_{qr}q_{rk} = 2,5kN/m^2$
	$\alpha_{q1}q_{1k} = 5,4kN/m^2$	$2\alpha_{q2}q_{2k} = 2,5kN/m^2$	
LM2	$\beta_Q Q_{ak} = 400kN$	$\beta_Q Q_{ak} = 400kN$	-
LM3	-	-	-
LM4	$5kN/m^2$	$5kN/m^2$	$5kN/m^2$

Tabell 3-2 Lastmodeller med karakteristiske trafikklaster

### Horisontale laster og tverrkrefter forårsaket av trafikklaster

På grunn av nedbremsing og akselerering vil det forekomme horisontale krefter som virker horisontalt i veibanens kjørelinje og tverrkrefter virkende på tvers av kjørebanelen.

Horisontalkraften som forårsakes av bremsing eller akselerasjon er definert i 4.4.1 til å være:

$$Q_{lk} = 0,6\alpha_{Q1}(2Q_{1k}) + 0,10\alpha_{q1k}w_1L = 407kN$$

$$180\alpha_{Q1} \leq Q_{lk} \leq 900kN$$

Tverrkreftene forårsaket av trafikklaster vil være grunnet skjev nedbremsing og er følgelig definert til:

$$Q_{trk} = 0,25Q_{lk} = 102kN$$

Videre er det definert en sentrifugalkraft  $Q_{tk}$  som varierer etter kjørebanelens radius. Siden Nysethvegen bru er et rett strekke med en radius som går mot uendelig, vil det ikke opptre noen sentrifugale krefter i brua.

**Table 4.3 - Characteristic values of centrifugal forces**

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

Figur 3-4 Tabell 4.3 fra EK-1-2

Både horisontal- og tverrkrefter skal plasseres som punktlaster for mest ugunstig virkning på konstruksjonen.

## Lastgrupper

Fordeling av samtidige trafikklaster skal gjøres etter tabell N.A.4.4a i det nasjonale tillegget. Figur 3-5 viser tabellen for oppsettet og hvordan de forskjellige trafikklaster skal grupperes.

Tabell NA.4.4a – Samtidige grupper av trafikklaster (karakteristiske verdier av påvirkninger fra sammensatte grupper av trafikklasterlast)

		KJØREBANE					GANGBANE OG FORTAU	
Lastmodell		Vertikale krefter			Horisontale krefter		Bare vertikale krefter	
Referanse		4.3.2	4.3.3	4.3.4	4.3.5	4.4.1	4.4.2	5.3.2-(1)
Lastsystem		LM1 (Boggilast og jevnt fordelt last)	LM2 (Enkel aksling)	LM3 (Spesialkjøretøyer)	LM4 (Belastning i form av menneskemengde)	Bremsekrefter og akselerasjonskrefter <sup>a</sup>	Sentrifugalkrefter og tverrkrefter <sup>a</sup>	Jevnt fordelt last
Lastgrupper	gr1a	Karakteristisk verdi						Kombinasjonsverdi <sup>b</sup>
	gr1b		Karakteristisk verdi					
	gr2	Ofte forekommende verdi				Karakteristisk verdi	Karakteristisk verdi	
	gr3 <sup>d</sup>							Karakteristisk verdi <sup>c</sup>
	gr4				Karakteristisk verdi			Karakteristisk verdi
	gr5	Se tillegg A		Karakteristisk verdi				
Påvirkning fra dominerende komponent (betegnet som komponent som tilhører gruppen)								
<sup>a</sup> For gr1a brukes karakteristiske verdier for lastreferanse 4.4.1 (bremsekrefter og akselerasjonskrefter) og lastreferanse 4.4.2 (sentrifugalkrefter og tverrkrefter). Sentrifugalkrefter og bremsekrefter eller akselerasjonskrefter opptre ikke samtidig i gr1a.								
<sup>b</sup> For gr1a brukes kombinasjonsverdi for lastreferanse 5.3.2(1) (jevnt fordelt last på gangbane/fortau), dvs. 2,5 kN/m <sup>2</sup> .								
<sup>c</sup> Se 5.3.2.1(2) Ved tosidig gangbane/fortau regnes det ene belastet der det er ugunstigere enn at begge er belastet samtidig.								
<sup>d</sup> Denne lastgruppen er ikke aktuell der gr4 benyttes.								

Figur 3-5 Tabell NA.4.4a fra EK-1-2

Som vist i figuren ovenfor er gangfeltlast med samtidig trafikk satt til å være  $2,5kN/m^2$ . Siden lastmodell 4 er relevant for denne brua vil ikke gr3 (karakteristisk verdi for gangfeltlast) tas med videre i beregningen. Gr5 vil heller ikke bli brukt siden LM3 er avgrenset ut av oppgaven. Det er i Tabell 3-3 satt opp de lastgruppene som skal brukes videre for lastpåføring i brudd- og bruksgrensetilstand. Beregningsgrunnlaget for denne tabellen finnes i vedlegg C

Gruppe	Kjørebane			Gangfelt
	Vertikale krefter	Horisontale krefter	Tverrkrefter	
Gr1a	LM1	-	-	$2,5kN/m^2$
Gr1b	LM2	-	-	-
Gr2	0,7LM1	$Q_{Ik}$	$Q_{rtk}$	-
Gr3	-	-	-	-
Gr4	LM4	-	-	LM4

Tabell 3-3 Gruppering av lastmodeller

### 3.3.2 Vindlast

Vindlast er en variabel naturlast som avhenger av regionale og lokale vindforhold på brustedet. I denne oppgaven fastsettes vindlasten på brukonstruksjonen etter N400 og *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-4: Allmenne laster, Vindlaster* [EK-1-1-4].

For brukonstruksjoner som befinner seg i værhardt klima, ute ved kysten eller oppi fjellene, kan vindlasten variere stort i ulike perioder gjennom året. Nysethvegen bru befinner seg i et område med innlandsklima som er godt beskyttet for vær og vind. Området antas å være i terrengruehetskategori II, da området sør for brua kun har spredt bebyggelse og trær. Fra tabell NA.4(901.1) i EK-1-1-4 leses referansevindhastighet for de ulike kommunene ut. Referansevindhastighet for Vestre Toten kommune, lest ut av tabellen er gitt til:

$$V_{b0} = 22m/s$$

Videre tas en rekke faktorer inn i likning NA.4.1 for å justere vindhastigheten for vindretning, årstid, nivåforskjell og sannsynlighet for overskridelse. Returperiode på 50år og geografisk plassering gjør at alle disse faktorene er lik 1,0. Det gir en basisvindhastighet også lik 22m/s. Se vedlegg C for utregning. Neste steg er å bestemme stedsvindhastigheten  $V_m$  fra EK-1-1-4, 4.3.1(1) og til slutt vindkasthastighetstrykket  $q_b$  fra EK-1-1-4, 4.5(1).

$$V_m = 20,7m/s$$

$$q_b = 644N/m^2$$

Videre angir N400 og EK-1-1-4 bestemmelser av kraftfaktorer for å fordele vindtrykket som linjelast i x- y- og z-retning. Dette er ikke nødvendig for undersøkelser i *Robot*, da programmet kalkulerer dette selv. For å studere vindlasten på konstruksjonen brukes vindlastsimulasjon i *Robot*. Der plottes vindkasthastighetstrykket inn og programmet beregner lastfordelingen. For å undersøke vindens virkning på ett tenkt kjøretøy, er det i N400 definert at kjøretøyet er formet rektangulært, med en høyde 2 meter over kjørebanelen. Som en forenkling antas det at vindkraften på kjøretøy tas opp som ei linjelast i kjørebanelen. Siden det skal ses på det ugunstigste tilfellet (10), settes linjelasten på  $1,24kN/m$  over hele bruas spenn.

For tilfelle vindlast samtidig med trafikklast er det i EK-1-1-4, 8.1(4) anbefalt å redusere vindhastigheten til en redusert verdi  $V_b^* = 23m/s$ . Siden basisvindhastigheten på 22m/s er lavere, brukes denne for både tilfelle med og uten trafikklast. Dermed er også vindtrykket  $q_b$  likt for de to tilfellene.

For brukonstruksjoner har N400 definert tre vindklasser som enhver bru kan klassifiseres under. Dette gir vurderingsgrunnlag og krav ved dimensjonering for vindlast. Vindklasse I omfatter brukonstruksjoner som har liten eller ubetydelig grad av vindlast. Vindklasse II og III representeres derimot en større dynamisk lastvirkning av vind, som vil gi lastvirkningsverdier som ikke kan neglisjeres ved dimensjonering av brukonstruksjoner (10).

Fra EK-1-1-4, 8.2(1) fremkommer det at vanlige brudekker med et spenn på mindre enn 40meter vanligvis ikke har behov for dynamiske beregninger. På grunn det forholdsvis korte bruspennet på 29 meter havner denne brua i vindklasse I. Også N400 definerer fagverksbruer som vindklasse I. Derfor neglisjeres den dynamiske lastvirkningen fra vindkrefter.

### 3.3.3 Termisk påkjenning

Temperaturforskjeller gir forandringer i materialenes egenskaper. Styrke, stivhet og størrelse er viktige parametere som endrer seg i takt med temperaturforandringer. Termisk lengdeutvidelseskoeffisient angir forholdet mellom relativ utvidelse og temperaturforandring i et legeme. For aluminium er denne koeffisienten  $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (21). For stål er den  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (22). Dette viser at forholdet for lineær temperaturutvidelse er 2:1. Aluminiums styrke og stivhet er også sensitiv for temperaturstigning. Ved temperaturer opp mot  $100^\circ\text{C}$  bør ikke aluminium benyttes i bærende elementer (21).

Påvirkningene fra termiske påkjenninger bør fastsettes ut fra jevnt fordelte temperaturandeler og temperaturdifferanser (NS-EN 1991-1-5:2003+NA:2008) (23). Jevnt fordelt

temperaturandel beskriver potensiell lengdeutvidelse som følge av min.- og maks. - temperaturer. Dette skal sjekkes både vertikalt, horisontalt og mellom konstruksjonsdeler. Temperaturdifferanser tar for seg konsekvensene av temperaturforskjell over f.eks. en vegg i et kassetversnitt. Grunnet oppgavens tidsbegrensninger og omfang vil ikke dimensjonering av termiske utvidelser være inkludert oppgaven.

Et annet viktig perspektiv er at Aluminium har 4 ganger høyere varmeledningsevne enn hva stål har (24). På grunn av den høye varmeledningsevnen og svekking av styrken ved høy temperatur oppstår det utfordringer rundt sveising av aluminium. Dette fører til nedsatt styrke i området rundt sveis. Konsekvensene av sveising og reduksjon av materialets styrke er omtalt i kapittel 4.4.

### **3.4 Ulykkeslaster**

Med bakgrunn til oppgavens tid, omfang og hovedmål vil det ikke sees på ulykkeslast i konstruksjonene

Det er hovedsakelig påkjøringslast som kan ramme denne brua. Konsekvensene av en påkjørsel inn i et overbygd fagverk kan være katastrofale. Selv om det er forholdsvis lav fartssone over brua, kan et vogntog med 40km/t gjøre store skader på bærende konstruksjon.

Dersom det skulle oppstå brann i kjøretøy stående på brua, kan dette føre til store deformasjoner. Det er kjent at stål mister omtrent halvparten av bæreevnen ved temperaturer på 500°C. Aluminium trenger bare varmes opp til 100°C før styrke og stivhet er svekket betraktelig (25). Skulle konstruksjonsdeler av aluminium bli utsatt for brann, tar det ikke lang tid før de har mistet opp mot all bæreevne.

### **3.5 Utmattingslast**

På grunn av forenklinger er det i samråd med veiledere bestemt at dimensjonering for utmatting utgår i denne oppgaven. Dens betydning vil bli diskutert, men ikke regnet på.

Konstruksjoner som er utsatt for gjentagende krefter over tid risikerer å bli svekket som følge av utmatting. Gjentatte belastninger fører til mikroskopiske tøyninger, som over tid kan utvikle seg til sprekker. Hvis sprekken når en kritisk størrelse, vil materialet få utmattingsbrudd.

Ettersom materialet oppfører seg sprøtt i denne fasen, vil selve bruddet skje hurtig. Utmatting foregår selv om spenningene som oppstår er godt under flytespenningen. I en brukonstruksjon

finnes det deler som er spesielt utsatt for utmatting. Spesielt overganger og sveiser som er påkjent store spenninger bør ses nøye på med tanke på dynamiske lastvirkninger.

I hovedsak er det trafikklast og vind som vil sette ei bru i bevegelse. Kontinuerlig trafikklast over brua setter i gang små svingninger hele tiden. Også variasjoner i vindkraften vil sette konstruksjonen i svingninger. Det burde ses på både lokale og globale svingninger ut fra forskjellige lasttilfeller. Disse tilfellene vil det ikke bli sett på i denne oppgaven

For å gå fram vil det i første omgang være lurt å lokalisere kritiske steder i konstruksjonen, hvor geometrien og lastsituasjonen tilsier at utmatting kan bli ett problem. Deretter utformes disse for å takle utmatting på best mulig vis. Videre burde det kjøres dataanalyser for å se på spenningsfordelingene i detalj.

### **3.6 Lastkombinasjoner**

For alle konstruksjoner som prosjekteres skal det gjøres kontroll ved to hoved-tilstander; brudd- og bruksgrensetilstand. Situasjoner som går ut på menneskers- og/eller konstruksjonens sikkerhet skal klassifisere som bruddgrensetilstander. Bruksgrensetilstanden dekker blant annet situasjoner som går på konstruksjonens estetikk, varighet, brukerens følelse av komfort og følelse av trygghet.

Faktorer og kombinasjoner som skal anvendes i bruksgrensetilstand skal etter N400 hentes fra *NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016: Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner* [EK-0] (26). For bruksgrensetilstand setter N400 egne krav med separerte betingelse for trafikklast og egenvekter.

Siden det i denne oppgaven sees bort fra termiske påkjenninger vil ikke denne type last være med i beregninger for brudd og bruksgrensetilstand. Det vil heller ikke kontrolleres for brudd i grunn (GEO) da denne oppgaven har fokus på selve konstruksjon og det har ikke vært prioritert å hente ut data rundt grunnforholdene i området.

#### **3.6.1 Bruddgrensetilstand (ULS)**

For dimensjonerende verdier av laster brukes Tabell NA.A2.4(B) – Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO)(Sett B) fra EK-0. Det skal settes opp kombinasjoner fra ligning 6.10a og 6.10b for fremstilling av dimensjonerende situasjon. Siden kraften som følge av vindlast på det aktuelle området er relativ liten, er det fornuftig å anta at trafikklast som dominerende variable

last vil være dimensjonerende for bruddgrensetilstand. Det er også sett bort fra vindlast alene på brua da de aktuelle konstruksjonene består av smale staver og det dermed er lite areal som tar opp vindlast.

Tabell NA.A2.4(B) – Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (Sett B)

Vedvarende og forbigående dimensjonerende situasjoner	Permanente laster		Forspenning	Dominerende variabel last (*)	Øvrige variable laster (*)
	Ugunstig	Gunstig			
(Ligning 6.10 a)	$\gamma_{G,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_p P$	$\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(Ligning 6.10 b)	$\xi \gamma_{G,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_p P$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

(\*) Variable laster er de som er oppført i tabellene NA.A2.1 til NA.A2.3.

MERKNAD 1 Det skal i bruddgrensetilstanden påvises ved bruk av ligningene 6.10 a og 6.10 b at bruers konstruksjonsoppførsel er i overensstemmelse med antatt beregningsmodell, ut over mindre endringer (f.eks. oppløft fra lager, strekkpeler som det ses bort fra, flyteledd osv.) som kan aksepteres forutsatt at konstruksjonen dimensjoneres i overensstemmelse med de endrede forutsetningene.

MERKNAD 2 Det benyttes følgende sett med  $\gamma$ - og  $\xi$ -verdier ved bruk av uttrykk 6.10a og 6.10b:

$\gamma_{G,sup}$  = 1,35 for permanent last, untatt de som er listet under <sup>1)2)</sup>  
1,00 for irreversible deformasjonslaster <sup>3)</sup>  
1,20 for permanent del av vanntrykk

$\gamma_{G,inf}$  = 1,0 for permanent last <sup>1)2)</sup>  
0 for irreversible deformasjonslaster <sup>3)</sup>  
1,0 for vanntrykk

$\xi$  = 0,89 for egenvekt <sup>1)</sup>

$\gamma_p$  = verdier gitt i de aktuelle Eurokodene <sup>4)</sup>

$\gamma_Q$  = 1,35 for vegtrafikk fra kjøretøyer og fotgjengere, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)

$\gamma_Q$  = 1,5 for jernbanetrafikk, hvis ugunstig (0 hvis gunstig). For lastmodell SW/2 benyttes  $\gamma_Q = 1,2$

$\gamma_Q$  = 1,60 for laster fra vind, bølger og strøm, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)

$\gamma_Q$  = 1,20 for temperaturlast, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)

$\gamma_Q$  = 1,35 for last fra lagerfriksjon og variabel del av vanntrykk, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)

$\gamma_Q$  = 1,50 for øvrige variable laster, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)

<sup>1)</sup> Disse verdiene gjelder for egenvekt av bærende og ikke-bærende konstruksjonsdeler, ballast, jord, flyttbare laster osv.

<sup>2)</sup> De karakteristiske verdiene for laster av samme opprinnelse, for eksempel egenvekt, multipliseres med  $\gamma_{G,sup}$  hvis resultatet i form av den totale lastvirkningen er ugunstig, og med  $\gamma_{G,inf}$  hvis resultatet i form av den totale lastvirkningen er gunstig. Dette gjelder også om forskjellige materialer er brukt.

<sup>3)</sup> Irreversible deformasjonslaster kan være bl.a. differansesetning, kryp og svinn. For  $\gamma$ -verdier for svinn vises til NS-EN 1992-1-1. Se også NS-EN 1991 til NS-EN 1999 for eventuelle øvrige  $\gamma$ -verdier som skal brukes for påførte deformasjoner. Irreversible deformasjonslaster skal alltid tas med dersom de har ugunstig virkning.

<sup>4)</sup> Der dette er aktuelt, gjelder verdiene også for indirekte virkninger av spennkrefter, dvs. som tvangskrefter i statisk ubestemte konstruksjoner.

MERKNAD 3 Jf. fotnote 2 over. Se også A2.3.1 (2).

MERKNAD 4 For spesielle påvisninger kan verdiene for  $\gamma_G$  og  $\gamma_Q$  igjen deles inn i verdiene  $\gamma_S$  og  $\gamma_A$  og modellens usikkerhetsfaktor  $\gamma_{SD}$ . En verdi for  $\gamma_{SD}$  som ligger mellom 1,05 til 1,15, kan normalt benyttes. Mer detaljerte regler for dette kan gis for det enkelte prosjekt.

MERKNAD 5 For laster fra vann som ikke er dekket i denne tabellen eller av NS-EN 1997 (f.eks rennende vann), kan lastkombinasjonene som skal brukes, angis for det enkelte prosjekt.

Figur 3-6 Tabell NA.A2.4(B) fra EK-0 (26 s. 116)

Verdier fra tabellen over angir faktorer som skal pålegges de aktuelle laster og gir verdier for ekstremtilfeller med de forskjellige lastpåføringene. I Tabell 3-4 er det satt opp de kombinasjoner som vil brukes ved bruddgrensekontroll av konstruksjonen. Beskrivelse av forkortelser i Tabell 3-4:

- G – Egenvekt
- TL – Trafikklast
- VTL – Vindlast samtidig med trafikk

STR (Sett B)	Dominerende	G	TR	VTL
Gr1a(6.10a)	TR-	1,35	0,95	1,12
Gr1a(6.10b)	TR-	1,20	1,35	1,12
Gr1b(6.10a)	TR-	1,35	0,95	1,12
Gr1b(6.10b)	TR-	1,2	1,35	1,12
Gr2(6.10a)	TR-	1,35	0,95	1,12
Gr2(6.10b)	TR-	1,2	1,35	1,12
Gr4(6.10a)	TR-	1,35	0,95	-
Gr4(6.10b)	TR-	1,2	1,35	-

Tabell 3-4 Faktorer for bruddgrensekontroll

### 3.6.2 Bruksgrensetilstand

Funksjonskravet til bruer er gitt i N400, kapittel 3.6.1 og sier at brukonstruksjonen ikke skal ha større nedbøyning enn  $L/350$  for noen lastplassering (10). Her er  $L$  lik lengden av det betraktede spenn. Denne formulering ble oppfattet som noe vagt da det betraktede spenn både kan menes med bruas lengde eller bredde. Det ble tolket i samsvar med eksterne veiledere at betraktede spenn vil være bruas lengde. Det er også angitt at denne kontrollen utføres med karakteristisk trafikklast alene. For denne brua vil maksimal nedbøyning være:

$$\frac{29000 \text{ mm}}{350} = 82.9 \text{ mm}.$$

«Nedbøyning av brukonstruksjons kjørebane som følge av permanente laster, inkludert langtidseffekter, skal kompenseres med overhøyde» (10 s. 44). Dette skal gjøres i bruksgrensetilstand med kombinasjon tilnærmet permanent, med  $\psi_2$  for variable laster lik null. EK-0 for tilnærmet permanent kombinasjon:

$$\sum G_{k,j} + P + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

Nedbøyningen i brukonstruksjonen som kommer av permanente laster, inkludert langtidseffekter, gjør at overhøyden må dimensjoneres i henhold til dette. N400 sier at for bruer



med overliggende bæresystem skal krav til fri høyde kontrolleres etter kombinasjon ofte forekommende, bruksgrensetilstand. EK-0 gir ofte forekommende kombinasjon:

$$\sum G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

For den siste bruksgrense kombinasjonen (ofte forekommende) er det satt opp en tabell for de laster det må kontrolleres for:

SLS	Dominerende	G	TR	VTL
Gr1a	TR-	1	0,7	0,5
Gr1b	TR-	1	0,7	0,5
Gr2	TR-	1	0,7	0,5
Gr4	TR-	1	0,7	-

## 4 Aluminium som byggemateriale

Aluminium er et godt kjent byggemateriale i flere industrier. Fly- og bilindustrien har lenge brukt aluminiumskomponenter i produktene sine. De to bransjene er helt avhengig av lettvektmetallet for å kunne lage fly som kan lette og biler som kan kjøre langt. Aluminium er derimot lite brukt i bygg og brukonstruksjoner i Norge. Dette begrunnes ofte med at aluminium er et relativt nytt materiale, og det er relativt dyre investeringskostnader og manglende erfaringer. Fokusområdet for denne bacheloroppgaven er derfor å se om aluminium kan være konkurransedyktig mot en liknende konstruksjon i stål.

Det vil i dette kapitlet gjennomgå viktige tema for å kunne diskutere om aluminium kan egne seg som materiale i brukonstruksjoner. I flere av underkategoriene vil aluminium bli direkte sammenlignet med stål for å kunne gi forholdstall og for å kunne vurdere deres egenskaper opp mot hverandre.

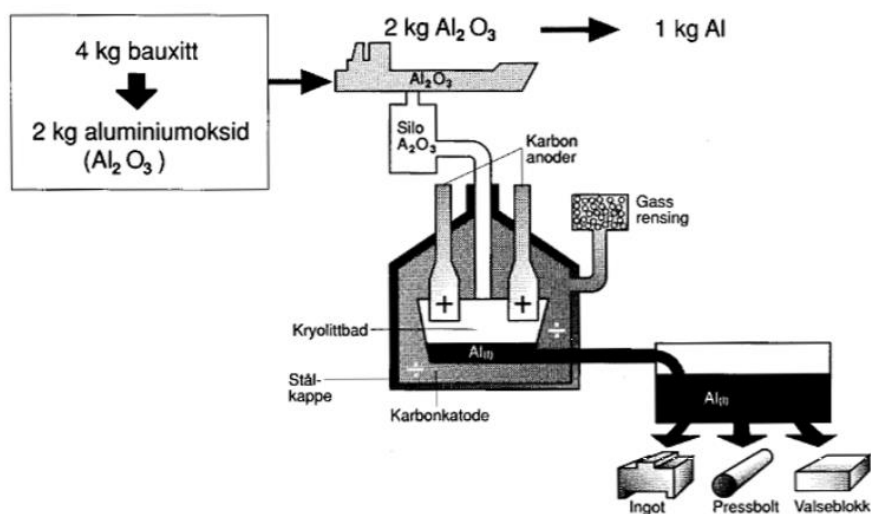
### 4.1 Produksjon av aluminium

Norsk Hydro er Norges fremste aluminiumsprodusent. Produsentene, i samarbeid med blant annet SINTEF og NTNU, utfører forskningsarbeid hver dag. Utvikling av teknologi og forbedring av framstillingsprosessene er en stor del av aluminiumsindustrien i dag.

Aluminiumsproduksjonen begynner med utvinning av råmaterialet bauxitt. For Hydros del skjer dette i store grad på deres egne områder i Brasil. Bauxitten befinner seg hovedsakelig i ett belte rundt ekvator og er lett tilgjengelig bare noen meter under overflaten. Når bauxitten er samlet, sendes den til vasking og knusing. Deretter utvinnes alumina gjennom en raffineringssprosess. 4kg bauxitt gir 2kg alumina, som igjen gir 1kg rent aluminium (27). Alumina blir til slutt tørket til et hvitt pulver, før det skal omgjøres til råmetallet aluminium.

På metallverket blir det brukt enorme mengder elektrisitet for å skille ut rent aluminium. I aluminaen er aluminiumsatomet bundet til oksygen. For å bryte denne bindingen brukes elektrolyse og det er nettopp her de store mengdene energi brukes. Resultatet er rent, flytende aluminium som videre legeres og støpes til blant annet pressbolter (27).

## Oksidproduksjon    Elektrolyse    Legering og støping



Figur 4-1 Aluminiumsframstilling 1kg (28)

## 4.2 Legeringer

Rent aluminium er for mykt og svakt til bruk i bærende konstruksjoner. Ved å legerer det med andre stoffer vil egenskapene endres. Magnesium (Mg), silisium (Si), mangan (Mn), kobber (Cu) og sink (Zn) er de viktigste og mest brukte legeringselementene (29). Det finnes et uendelig spekter av anvendelser og forbedringspotensial med tanke på valg av ekstruderingsprosess, legering og herding. Med tanke på at aluminiumets egenskaper kan forbedres betraktelig gjennom legeringer, er det spesielt viktig å velge passende legering.

For å beskrive hoved-legeringselement brukes første siffer i betegnelsen til å klassifisere dette. De er som følger:

Hoved-legeringselement
1xxx - Ren aluminium(ulegert)
2xxx - Kobber(Cu)
3xxx - Mangan(Mn)
4xxx - Silisium(Si)
5xxx - Magnesium(Mg)
6xxx - Magnesium(Mg) + Silisium(Si)
7xxx - Sink(Zn)
8xxx - Andre

Figur 4-2 Legeringselementer (30)

For denne oppgaven er det 6000-serien og spesifikt legeringen 6082-T6 som er aktuell for bruk. Denne kombinasjonen av magnesium og silisium gir gode styrkeegenskaper, samtidig som det

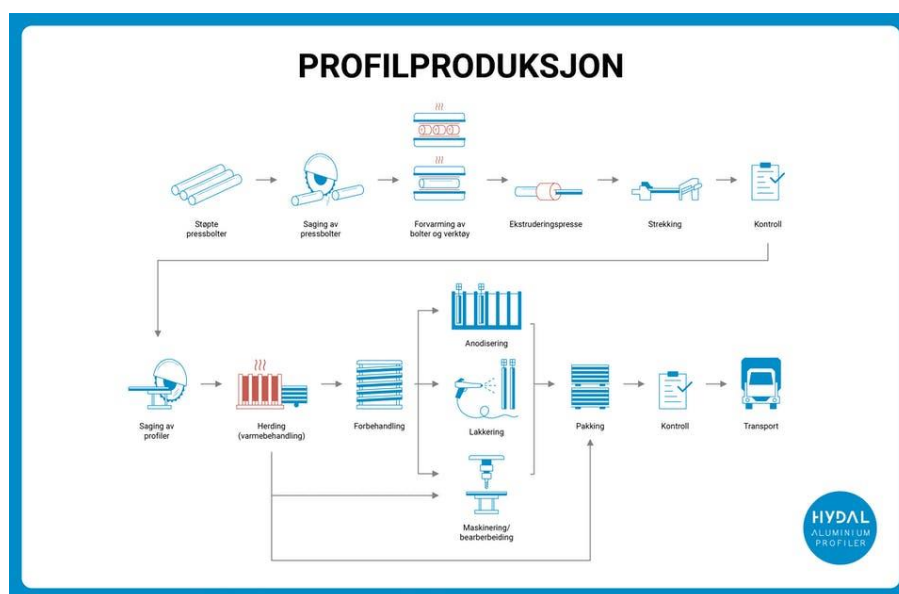
egner seg til sveising og har god korrosjonsmotstand. Legering 6082-T6 krever litt i ekstruderingsprosessen, på grunn av den høye fastheten. Men derfor er den også ett godt valg for komponenter med stor belastning (31). Det ble i oppstarten sett på flere typer legeringer, med tanke på å minske kostnadene så mye som mulig. Men etter kort tid ble det bestemt å sikte seg inn på kun en legering for enkelhetens skyld.

### 4.3 Produksjon av profiler

Friheten rundt design av aluminium er stor. Profiler i nesten alle slags former kan ekstruderes. Det kan lages spesialdesign av profiler med ønskede egenskaper, som f.eks. økt torsjonsstivhet og innhakk for andre konstruksjonsdeler. I motsetning, så er stålprofiler så standardisert at man må sveise for å lage spesielle tverrsnitt. Dette gir stor kunstnerisk frihet når man velger aluminium som materiale.

De tre viktigste metodene for framstilling av aluminiumselementer er valsing, ekstrudering og støping. Produksjon av profiler som er aktuelle for denne oppgaven skjer ved ekstrudering. Det innebærer at ferdigstøpte aluminiumbolter i en stor sylinder varmes opp til ca. 450-500°C, og presses gjennom et profilverktøy kalt en matrise. Formen på matrisen bestemmer tverrsnittsprofilen på elementet som presses ut (32).

Ved utgangen av matrisen går profilet ut på et stort bord, hvor det avkjøles ved hjelp av vann eller luft. Tykkelse, form, legering og ønskede egenskaper bestemmer avkjølingsprosessen. Videre strekkes profilene ut, for å fjerne eventuelle egespenninger og for å få rette profiler. Profilene kappes og sendes så videre til herding (33).

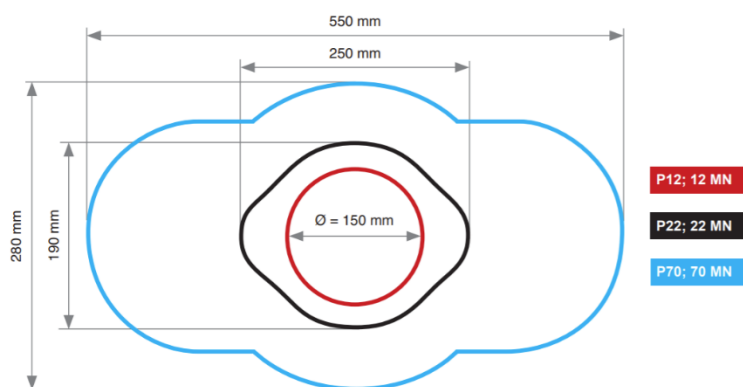


Figur 4-3 Profilproduksjon (33)

Legeringene kan herdes på forskjellige måter, som igjen påvirker egenskapene. Kaldbearbeiding fører til noe økt hardhet og styrke, ved f.eks. kaldvalsing. Denne herdemetoden brukes som regel på rent aluminium og legeringer som ikke kan herdes ved varmebehandling. En annen måte å herde aluminiumslegeringene er ved varmebehandling. Denne metoden gir den største styrken og brukes på 6000- og 7000-serien. Herdeprosessen går ut på innherding, etterfulgt av utharding. Dette kan også gjøres på forskjellige måter, men den som er aktuell for legeringen 6082 er herding T6. Legeringen varmes opp, gjerne i forbindelse med ekstruderingen. For nevnt legering er dette omkring 500°C. Deretter kjøles den ned igjen, før den igjen varmebehandles på nokså svak varme (170-200°C) over flere timer (30). Denne temperaturhistorien er optimal for ønskede egenskaper. Etter herdeprosessen er profilet klart for eventuelle behandlinger og maskinering.

Hastighet og pris på produksjonen av profiler avhenger av tverrsnittprofilet og legering. Det kreves naturligvis mer kraft å presse høystyrke legeringer gjennom matrisen. Derfor er også kostnadene for dette større. Det er gjennom Hydal Aluminium Profiler innhentet priser på de aktuelle profilene i oppgaven. Der framkommer det at ved større kvantum slipper man unna innstillingskostnader (MIK). Et annet interessant punkt er verktøykostnadene, som er nesten 50% høyere for ett 200x200x10 profil, sammenlignet med 100x100x10.

Det er begrenset størrelse på ekstruderte profiler. Størrelsen på pressen avgjør maks bredde, høyde, tykkelse og lengde på profilet. Figur 4-4 viser begrensningene for pressen til Hydal. Tykkelse begrenses også av at for store veggtykkelser fører til for ujevn avkjøling. Kjernen i tykke vegger avkjøles da saktere og styrkeegenskapene blir ikke som først tenkt. Størrelsesbegrensningene er en utfordring, da det kreves nokså store tverrsnitt i brua. I kontakt med Hydal har det kommet fram at de har mulighet til å produsere så store som 200x200x10 kvadratiske hulprofiler, med lengde 9m.



Figur 4-4 Ekstruderingspresse Hydal (25)

#### 4.4 Sveising og HAZ

Sveising er en effektiv sammenføyningsmetode som raskt kan sammensmelte to komponenter. Aluminium kan fint sveises, men det er noen spesielle hensyn man må ta for å oppnå et godt sveiseresultat. Stor varmekapasitet, god varmeledningsevne, oksidasjonslag og poredannelse er nøkkelord for sveising med aluminium. Type legering har også mye å si for sveiseegenskapene. Legeringen 6082-T6 har greie sveiseegenskaper.

Den største utfordringen knyttet til sveising av aluminium er at sonen rundt sveisen vil få svekkede mekaniske egenskaper. Denne sonen refereres til som HAZ, «Heat-affected zone». I dette tilfellet vil en varmebehandlet legering på nytt varmes kraftig opp, før den kjøles ned, denne gangen uten utharding på svak varme over lang tid. Legeringen som allerede hadde vært gjennom en optimal varmebehandling, har nå gjennomgått en annen. Konsekvensen av dette er tap av styrkeegenskaper rundt sveisen. For 6082-T6 reduseres flytespenningen fra 260MPa til 125MPa på grunn av HAZ-reduksjon (21).

Det er vanlig å dimensjonere hele konstruksjonen etter HAZ-verdier, både for enkelhetens skyld, men også med tanke på eventuelle reparasjoner. Reduserte verdier som følge av HAZ er oppgitt i Eurokode 9. Utstrekningen av sonen som blir påvirket er også beskrevet i Eurokode 9. For sveisetykkelse på 10 mm, vil HAZ strekke seg 30 mm. Det er altså bare de nærmeste 30 mm fra sveisen som vil få reduserte HAZ-verdier (21 s. 61). I samtale med eksterne veiledere, er det i denne oppgaven bestemt å ikke ta med HAZ-reduksjonen i beregningene. Dette for å gi aluminium et mer rettferdig konkurransegrunnlag mot stål da HAZ-reduksjon for hele konstruksjonen kan ansees som konservativt.

Smeltetemperatur for aluminiumslegeringer er omtrent 650°C, mot stål sine 1500°C (34). Selv om det kreves lavere temperatur for å smelte aluminium, er det flere andre termiske egenskaper som påvirker denne prosessen. Varmeledningsevne er 4 ganger høyere for aluminium enn for stål. Varmen ledes raskt bort, så det må dermed tilføres varme raskere, selv om smeltepunktet er lavt (35). Den intense varmen påført av sveisen, sprer seg enkelt til aluminiumet i området rundt på grunn av den høye varmeledningsevnen.

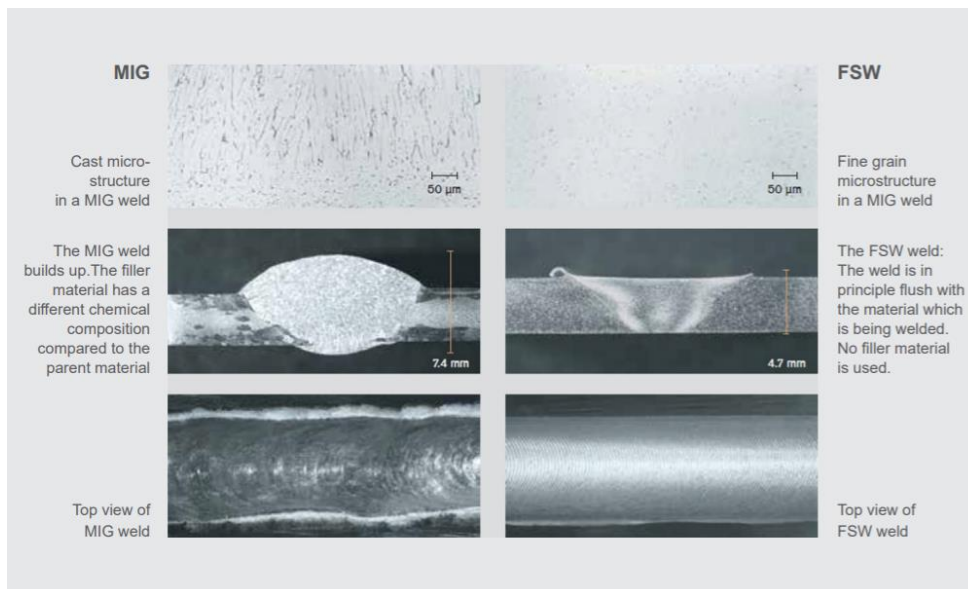
Varmekapasiteten er også større for aluminium. Energien som skal til for å øke temperaturen med 1°C på 1kg aluminium er dobbel så stor som den er for stål (36). Det vil si at den lave smeltetemperaturen ikke nødvendigvis gir mindre energiforbruk. I tillegg har aluminium 3 ganger så stor smeltevarme som stål (37). Dette er energien som kreves for å omforme en gitt mengde metall fra fast til flytende form. Aluminium har lav smeltetemperatur, men har likevel et høyt energibehov under sveis.

En annen utfordring er dannelsen av oksidasjonssjikt. Dette sjiktet legger seg på aluminiumet i kontakt med oksygen og beskytter mot videre korrosjon. Problemet med dette er at oksidasjonslaget har en smeltetemperatur på hele 2050°C , mye høyere enn selve aluminiumet. Derfor smelter ikke oksidasjonssjiktet ved sveising, samtidig som varmen framskynder oksidasjonsprosessen. Ved sveising er det viktig å fjerne dette sjiktet, enten før eller under sveiseprosessen (34).

Det stilles strenge krav til renslighet ved sveising av aluminium. Problemer med porer i sveisen kan oppstå hvis for mye hydrogen slipper til. Under sveisingen vil varm aluminium løse opp hydrogen og blande seg med den. Når sveisen kjøles ned og størkner rekker ikke alt hydrogenet å slippe ut. Det kan medføre porer i sveisen. Desto mer hydrogen som ikke slipper ut, desto større problem med porer (34).

### **Friction stir welding**

En nyere teknologi, som absolutt er aktuell når aluminium skal sveises, er «friction stir welding». Friksjonssveising går ut på at et roterende verktøy presses ned i materialet og føres langs sveisesømmen. Aluminiumet varmes opp av friksjonen og blandes sammen. Det kreves ikke fyllmateriale og temperaturen dette foregår på (480°C) er lavere enn smeltepunktet (650°C). Dermed svekkes ikke materialet rundt sveisen like mye som ved vanlig sveising. Strekkfastheten er ifølge Norsk Hydro overlegen i en friksjonssveis. Den er hele 83% større enn for en vanlig smeltet sveis. I tillegg sier de at utmattingsegenskapene mye bedre for friksjonssveisen (38). Utseendemessig gir friksjonssveising en utrolig glatt og fin finish. Figur 4-5 viser vanlig MIG-sveising sammenlignet med friksjonssveising (FSW). Metoden egner seg derimot ikke til bruk for sammenføyning av profiler i en brukonstruksjon.



Figur 4-5 Friction Stir Welding (38)

## 4.5 Andre sammenføyningsmetoder

Bruk av skruer og bolter i aluminium er nyttig hvis noe skal kunne demonteres raskt og enkelt. Da brukes i stor grad forsinkede skruer eller skruer av rustfritt stål. Problemet er at kontakt mellom stål og aluminium i samme vannløsning kan føre til galvanisk korrosjon. Siden stål er det edleste metallet av de to, vil stål oppføre seg som katode og aluminium som anode. Det betyr at korrosjonen vil øke på aluminiumet og avta på stålet (25). Galvanisk korrosjon kan være et alvorlig problem for deler i aluminium. Sammenlignet med andre konstruksjonsmaterialer, er aluminium langt nede på den galvaniske spenningsrekka. Derfor er risikoen for slik korrosjon ofte høy når aluminium er i kontakt med andre materialer. Det er flere hensyn som kan tas for å unngå galvanisk korrosjon.

Det beste tiltaket er å unngå bruk av materialer som er mye edlere enn aluminium. Da skruer og bolter som regel er av stål og rustfritt stål, er det andre metoder som kan brukes. De to materialene, stål og aluminium burde isoleres elektrisk fra hverandre. Nylon og neopren er materialer som kan benyttes til dette. Ett annet alternativ er å bruke en offeranode. For at aluminiumet ikke skal oppføre seg som anode, kan stålskruen overflatebehandles med et enda mer uedelt metall. Sink (Zn) vil eksempelvis fungere godt til dette. Det er da viktig å påpeke at det er det edleste metallet som i hovedsak skal overflatebehandles (25). Dersom kun det uedle metallet får et sinklag på seg, vil en skade i dette føre til svært ugunstige korrosjonsforhold. En stor katode og en liten anode gir økt korrosjon.



Liming gir derimot ingen problemer med galvanisk korrosjon. Aluminium er det mest limte metallet, og lim kan også kombineres med andre sammenføyningsmetoder (25). Det gir en rekke gode muligheter for sammenføyninger, men egner seg lite til bruk i ei bru.

Det finnes flere eksempler på vellykket nagling av aluminium. I flyindustrien har dette vært sammenføyningsmetoden i mange år, og det holder mål. Eldre brukonstruksjoner er også ofte naglet. Det er muligheter for å nagle en fagverkskonstruksjon, men nagling blir i liten grad praktisert nå til dags.

#### **4.6 Korrosjonsbestandighet og vedlikehold**

En veldig god grunn til å velge aluminium som materiale i en brukonstruksjon er den gode korrosjonsmotstanden. I kontakt med oksygen dannes en beskyttende film på utsiden av aluminiumet. Dette tynne oksidasjonssjiktet vil beskytte materialet mot videre korrosjon. Skulle sjiktet skades, dannes det umiddelbart et nytt lag. I normale atmosfæriske forhold, slik som på brua, vil aluminium aldri være utsatt for korrosjon. Dersom aluminium skal få korrosjonsproblemer må det befinne seg i ekstreme miljøer, med veldig høy eller veldig lav pH-verdi (25). Sjansen for korrosjonsproblemer øker også hvis aluminiumet er i direkte kontakt med andre metaller, men også her beskytter oksidasjonslaget godt.

Ei bru med lang levetid krever som regel mye vedlikehold. I NAPIC-rapporten «Tilstandsrapport for bruk av aluminium i bruer», utført i samarbeid med Statens vegvesen kommer det fram at den største vedlikeholdsutgiften for disse bruene er stålarbeid. Omtrent 70% av vedlikeholdsutgiftene til disse bruene er overflatebehandling og vedlikehold av stål (6). Det betyr at korrosjon av stål utgjør store kostnader, som kan kuttes drastisk ved å benytte et korrosjonsfritt materiale. Det framkommer også fra rapporten at Forsmo bru, Norges eneste rene aluminiumsbru, har stått tilnærmet vedlikeholdsfritt i 25 år. Ingenting av vedlikeholdet som er gjort der har noe med korrosjon å gjøre (6).

#### **4.7 Konstruksjonsprinsipper**

Med aluminium som valgt konstruksjonsmateriale, finnes det nesten ubegrensede muligheter når det gjelder design. Men for et optimalt sluttresultat, kan det være lurt å følge noen generelle prinsipper angående konstruksjonen. Funksjon, styrke og stabilitet kan forbedres, samtidig som bedre pressbarhet fører til lavere produksjonskostnader og dermed bedre totaløkonomi (25).

Tverrsnittet til profilet har en del å si for produksjonskostnader. Som hovedregel er enkle standardiserte tverrsnittprofiler det billigste. Ekstruderingen går enklest og billigst med jevn godstykkelse, symmetri og avrundede hjørner. Selv om åpne, enkle profiler er det aller billigste, kommer hulprofilene som blir brukt her godt ut økonomisk. Det er også begrensninger på størrelse, tykkelse og lengde som nevnt i kapittel 4.3.

Forholdet mellom styrke og vekt gjør det mulig med relativt lette aluminiumskonstruksjoner. Sammenlignet med stål er aluminium cirka 3 ganger lettere. Dette gir mulighet for lette konstruksjoner med høy bæreevne.

Det er en rekke regler og prinsipper som må følges når det gjelder HAZ. Materialet svekkes i varmpåvirket sone rundt sveis, og dette må tas hensyn til ved dimensjonering. NS-EN 1999 tar for seg HAZ og effekten det har på egenskapene til aluminiumet.

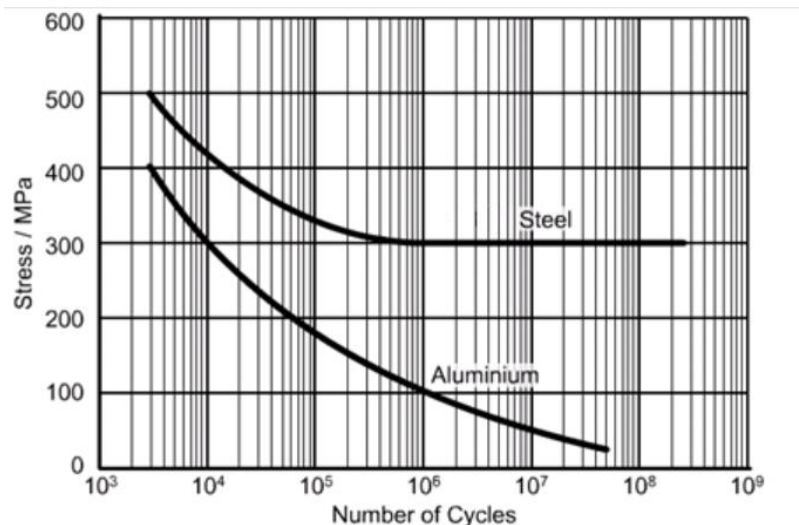
Produsentene av aluminium reklamerer veldig for design og store friheter med tanke på utforming. Sammenlignet med andre materialer gir aluminiumets egenskaper større muligheter når det kommer til estetikk. Etter mange år vil som regel ei stålbru tape seg og kreve vedlikehold. Også ei bru av betong vil ofte oppfattes som kjedelig og grå. Men med aluminium vil brua kunne stå nesten like stilren og glatt etter 30 år. Den sølvhvite fargen på aluminiumet kan gi en følelse av renhet og innovasjon.

## 4.8 Utmatting

Svingninger og utmatting er ekstra viktig å kontrollere når aluminium brukes i konstruksjoner. Elastisitetsmodulen til aluminium er 70 000 MPa, sammenlignet med stål som har 210 000 MPa. Den lave elastisitetsmodulen til aluminium gir en mindre stiv konstruksjon, som vil være utsatt for svingninger. Mykere metall havner lettere i bevegelse. For mye bevegelse i aluminiumsprofilene kan få store konsekvenser, spesielt i skjøter. Spenningsene som oppstår i konstruksjonen med lavest elastisitetsmodul, gir større utslag i form av deformasjoner. Gjentatte bevegelser fører til utmatting, og som gjør at den er enda mer utsatt for svingninger. Svingning- og utmattingsproblematikk må derfor kontrolleres ekstra for aluminium benyttes.

Figur 4-6 viser styrke i forhold til antall sykluser for stål og aluminium. Stål når en utmattingsgrense hvor flytespenningen ikke svekkes mer. Så med mindre belastningene overstiger maksspenning, kan stålkonstruksjoner i teorien holde ut nærmest for alltid. Aluminium derimot, har ingen klar grense hvor styrken flater ut. Derfor kan man sette levetiden til ett viss antall sykluser. Dette gjøres for flyskrog, og nylig har en rekke Widerøe-fly fått

utvidet levetiden etter kontroll av skroget (39). En ide kan være å ta slike kontroller av utsatte snitt i brua, for eventuell utvidet levetid.



Figur 4-6 S-N kurve (40)

Gjennom historien har utmattingsbrudd ført til flere katastrofale ulykker. I 1954 styrtet to fly av den britiske flytypen de Havilland Comet med bare noen få måneder mellomrom. På denne tiden var aluminium nytt og ingeniørene presset grensene. For å spare drivstoff begynte de å fly høyere og høyere. Kabinen var sylindrerformet for å tåle trykkforskjellen, men vinduene og paneler forble firkantet. Denne designfeilen ble fatal. Det ble slått fast at metalltretthet i de brå overgangene rundt et vindu førte til at flyene gikk i oppløsning (41).

Denne lærepengen har ført til at dagens flyvinduer alltid er runde. I jevne materialer fordeler spenningen seg jevnt. Men et hinder, slik som et firkantet vindu med brå vinkler, vil føre til spenningskonsentrasjoner. Etter mange sykluser fikk et slikt område utmattingsbrudd og trykkforskjellen i kabinen førte til full oppløsning i resten av konstruksjonen. Runde vinduer gjør nå at spenningene fordeler seg jevnere i metallet rundt. Dette kan videreføres til landkonstruksjoner. Skarpe, brå overganger gir spenningstopper som er sensitive for utmatting. Dette er noe å tenke på når utsatte detaljer skal utformes.

## 4.9 Miljø og gjenvinning

Det krever mye energi for å produsere ny ren aluminium. Det største energiforbruket er elektrisiteten som går med til elektrolyse av alumina. Miljøavtrykket etter kraftproduksjon varierer veldig. Noen bruker fossilt brennstoff, der andre bruker ren vannkraft. I Norge kommer hele 98% av all produsert strøm fra fornybare kilder, hvor mesteparten er fra vannkraft (42).

Den rikelige tilgangen på vannkraft i Norge gir en enestående posisjon til miljøvennlig fremstilling av aluminium. CO<sub>2</sub>-fotavtrykket for aluminiumsproduksjon er hele 5 ganger mindre hvis elektrisiteten kommer fra vannkraft, i stedet for kullforbrenning (43).

Selv om aluminiumsproduksjonen i Norge er bærekraftig sammenlignet med andre land, så starter produksjonen i utlandet. Norsk Hydro henter ut store mengder bauxitt fra gruver i Brasil. Det er enorme mengder regnskog som må vekk for å finne fram til den dyrebare bauxitten. I Brasil eier Hydro hele 200 kvadratkilometer hvor de henter ut råmaterialet (44). For å drifte aluminiumraffineriet i Brasil bruker selskapet 50 milliarder liter vann i året. Det har i tillegg oppstått konflikt med urbefolkningen i området, som har beskyldt dem for store giftutslipp. CO<sub>2</sub>-avtrykket som Hydro etterlater seg i Brasil tilsvarer hele 1/3 av all industri i hele Norge (45). Selskapet har et stort fokus på å plante på nytt etter masseuthenting, men det vil minimum ta hundre år før økosystemet når normalen.

Selv om produksjon av nytt aluminium krever mye energi, er dette en langsiktig investering. Gjenvinning av aluminium er nemlig særdeles klimavennlig. Resirkulering av materialet krever bare 5% av energien som trengs for å produsere nytt aluminium (27). Med stadig større fokus på miljø og bærekraft, er gjenbruk av aluminium viktig for fremtiden.

Omtrent 75% av all aluminium som noensinne er produsert, er fortsatt i bruk (27). Det gir et godt bilde på at aluminium varer lenge og egner seg meget godt til gjenvinning. En del av materialet har lenge blitt brukt i de samme produktene, som f.eks. fly, båter og sykler. Andre deler av aluminiumen som fortsatt er i bruk har gjennomgått utallige livssykluser. Materialet svekkes ikke ved gjenvinning og kan derfor brukes i lang tid framover (27). Med utgående generasjoner aluminiumsprodukter, har flere bedrifter begynt satsingen på resirkulert aluminium.

De siste årene har Hydro økt fokuset på bærekraft og miljø. For å hjelpe bedrifter med å nå deres bærekraftsmål, har Hydro lansert en ny og miljøvennlig produktserie. Hydro CIRCAL 75R inneholder minst 75% brukt skrapmetall (46). Desto mer gjenbruk, desto lavere miljøavtrykk. Det brukes avansert sorteringsteknikk for å skille legeringer og andre stoffer. Med stadig ny teknologi vil nok fremtiden by på enda større muligheter når det kommer til resirkulert aluminium.

Miljøregnskapet fra Langenuen-rapporten viser at utførelse i gjennomsnittlig europeisk aluminium har større utslipp, enn hva stål har. Hvis man derimot ser på de mer miljøvennlige alternativene, kan man gjennom resirkulert materialbruk senke utslippene drastisk (47). Ser

man på hele levetiden til ny aluminiumsbru på Nysethvegen, kommer aluminium enda sterkere ut. Ingen overflatebehandling og gode muligheter for resirkulering ved endt levetid.

Det er en lang reise fra bauxitt til ferdig montert aluminiumsprofiler på byggeplass. Store utslipp gjennom transport, er felles for både stål og aluminium. Aluminium vil ha noe reduserte transportutslipp enn stål på grunn av lettere egenvekt. For Nysethvegen bru vil transporten av ferdige aluminiumsprofiler fra Hydal Aluminium Profiler, som holder til i Raufoss Industripark, være veldig kort. Brua kan være en god promotering for kortreist aluminium.

EU har kompensasjonsordninger for lavkarbonaluminium. Materialet er på listen over råvarer som skal bidra til «Green deal» (48). Det gjøres mye forskning på miljøvennlig aluminium internasjonalt for å kunne ta i bruk materialet i større grad, og ikke minst til nye formål. Etterspørselen er lavkarbonaluminium er stor allerede, og vil mest sannsynlig fortsette å øke i takt med det grønne skiftet. Det er gode nyheter for norskprodusert aluminium, og er enda grunn til å ta i bruk materialet i større grad.

#### 4.10 Råvarepris

I et byggeprosjekt vil en stor prosentandel av totale byggekostnader være innkjøp av materialer. Prisingen av råvaren aluminium er en del av et stort globalt marked som bestemmes av tilbud og etterspørsel. Industriene som utvinner råmaterialet er preget av stor konkurranse på pris og miljøvennlighet, og er nødt til å ha kontinuerlig innovasjon (49). Det siste året har mange råvarematerialer, som for eksempel aluminium og stål, fått et skikkelig prisløft. Figur 4-7 viser prisutvikling på aluminium (råvare).



Figur 4-7 Prisutvikling til aluminium (råvare) de siste 5 årene. Årstall på x-aksen. Dollar/tonn på y-aksen (50)

Per 29.04.2021 står prisen til aluminium i 2400 dollar/tonn, som er den høyeste råvareprisen for aluminium de siste 3 årene. Trenden har vært stigende, fallende og nå stigende etter koronanedstengningen i mars 2020. På det laveste var prisen 1476 dollar/tonn på bunn korona. Sentralbanker verden over bevilget store tiltakspakker til næringslivet for å sette fart på økonomien og støtte oppunder produksjon i industrien. Det har gitt en kjempeetterspørsel etter råvarer, og prisene har skutt i været.

Prisutviklingen for stål har hatt tilsvarende prosentvis utvikling som aluminium, og er betydelig dyrere i år en samme tid i fjor. (51)

## 5 Stål

Med bakgrunn i at stål er et godt kjent byggemateriale, følger kun en kort gjennomgang av stål som materiale. Mange vil si at stål er det viktigste konstruksjonsmaterialet i dag. Det er på grunn av sin styrke og relativt lave pris.

Produksjon av nytt stål starter i en masovn, hvor jernmalmen smeltes om til råjern under høye temperaturer. Råjernet inneholder nå mer karbon enn hva som er ønskelig, derfor minskes innholdet karbon samtidig som andre forurensninger fjernes. Ønskelige stoffer legges så til for å legere jernet til ønsket ståltype. Siste steg i prosessen er å støpe stålet ut, og videre lage ønskede profiler.

Sammenføyning er et vesentlig mindre problem for stål, sammenlignet med aluminium. Både sveising og bolting er godt utprøvd og fungerer bra.

Stål er utsatt for korrosjon. Dette er kanskje den svakeste siden til materialet, som også fører til store kostnader etter installasjon. Ståldeler overflatebehandles for store summer hvert år, i tillegg til at alvorlig korrosjon fører til større renoveringsprosjekter. Ett eksempel er den nye Svinesundbrua, som etter bare 13 år måtte renoveres for 50 millioner på grunn av betydelige rustproblemer (52).

Som direkte sammenligning med utmattingsproblematikken til aluminium, har også stål hatt dårlig historikk med tanke på utmatting og ulykker. På starten av 1900-tallet manglet viktig kunnskap rundt utmatting og sveising av stål. Utmattingsbrudd i jernbane førte til flere ulykker. Videre på midten av 1900-tallet ble store sprekker oppdaget på flere bruer og skip. Det ble konkludert med at disse skyldtes herdesoner rundt sveis og generelt dårlig sveiseutførelse (53). Løsninger på utmattingsproblematikk har siden den tid blitt betydelig forsket på og utbedret.

Stål kan gjenvinnes i stor grad, slik som aluminium (54). Det foregår ved at skrapmetall gjenvinnes i lysbueovner. Det nye stålet som støpes ut kan framstå som nytt og brukes til andre formål. I større og større grad benytter stålverk skrapmetall for å lage stål. Produksjonen av stål er veldig energikrevende. I dag står stålindustrien for hele 7% av verdens CO<sub>2</sub>-utslipp (54). I likhet med aluminiumsproduksjon er det resirkulerte stålet vesentlig bedre enn råproduksjon. 70% mindre CO<sub>2</sub>-utslipp ved bruk av skrapmetall, i stedet for jernmalm. For å nå de globale målene er det fortsatt en vei å gå (54).

## 6 Sammenligning av tekniske fortrinn mellom aluminium og stål

### 6.1 Materialeegenskaper

Det er i kapittel 4 presentert aluminium, helt fra utvinning av bauksitt til produksjon av ferdige aluminiumsprofiler. Kapittel 5 ble det presentert kort teori om stål for å kunne sette opp en sammenligning av tekniske materialeegenskaper mellom aluminium og stål. Det er i Tabell 6-1 gjort en sammenligning av kjente fysikalske egenskaper av aluminium og stål. Det er på høyresiden angitt omtrentlige forholdstall for å visualisere de fysikalske forskjellene.

Fysikalske egenskaper	Aluminium	Stål	Forholdstall Aluminium : Stål
Vekt (tetthet)	2700 kg/m <sup>3</sup>	7700 kg/m <sup>3</sup>	1 : 3
Smeltetemperatur	660°C	1400-1500°C	1 : 2
Elektrisk ledningsevne	37,7 · 10 <sup>6</sup> S/m	9,93 · 10 <sup>6</sup> S/m	4 : 1
Varmeledningsevne	230 W/(K*m)	50 W/(K*m)	4 : 1
Varmekapasitet	900 J/ (kg · K)	452 J/ (kg · K)	2 : 1
Utvidelseskoeffisient	2,3*10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>	1,2*10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>	2:1
Elastisitetsmodul	70 000 MPa	210 000 MPa	1:3

Tabell 6-1 Sammenligning av fysikalske egenskaper, Aluminium og Stål

I Tabell 6-1 er styrkeegenskaper utelatt fra sammenligningen. Flytegrensen til aluminium og stål har såpass store individuelle forskjeller ut ifra hvilke legeringer man velger, at det ikke er hensiktsmessig å sette verdier og forholdstall for sammenligning. Stål er det sterkeste materialet, men det finnes aluminiumslegeringer som kan nærme seg stålverdiene. Til bruk i denne oppgaven er det henholdsvis stål S355 og aluminium 6082-T6. Disse legeringene har til sammenligning flytespenning på 355 MPa, mot 260 MPa.

De viktigste forskjellene fra tabellen er vekt, utvidelseskoeffisient og elastisitetsmodul.

Aluminium veier bare 1/3 av stål, og lav vekt er svært ønsket i brukonstruksjoner.

Utvidelseskoeffisienten sier at aluminiumet vil utvide seg dobbel så mye som samme element i stål. Til slutt er stål vesentlig stivere enn aluminium. Dette er fordelaktig med tanke på svingninger og utmatting.



## 6.2 Hva er viktigst for en brukonstruksjon?

*Dette underkapittelet er tatt med for å belyse viktigheten av forskning, risiko og trygghet.*



*Figur 6-1 Illustrasjon nr.2 laget i Archicad*

Sikkerhet og trygghet for at en brukonstruksjon står den levetiden som er satt, er absolutt førsteprioritet. Videre kan spørsmålet besvares ut fra ett politisk ståsted, hvor det viktigste er å skape trygghet og trafiksikkerhet for alle brukere, herunder myke trafikanter og alle slags kjøretøy. I mange prosjekter er det prøving og feiling som gir gode resultater, samt rikelig erfaring og kompetanse til forskningsteamet. Forskning på bruken av kjente materialer til nye formål kan åpne for muligheter og løsninger som tidligere ikke har vært mulig.

Det er i vedlegg D laget en tabell for sammenligning av aluminium og stål. Tabell 6-2 er en oppsummering av ulike kategorier som belyser egenskaper og aspekter rundt vurderingen av hva som kan regnes som mer viktig i ei bru. Tabellen har en vektet karakterskala i hver kategori, og høye karakter angir det beste utfallet for brua. I vedlegg D er karakterer som er satt etter en kvantitativ forskningsbasert vurdering eller en matematisk formel merket \*. Karakterene som er satt etter en kvalitativ vurdering basert på tilgjengelig litteratur og egen kunnskap er merket med \*\*. Sammenligningen og karaktergivingen i de forskjellige kategoriene er forsøkt satt med nøytrale øyne.

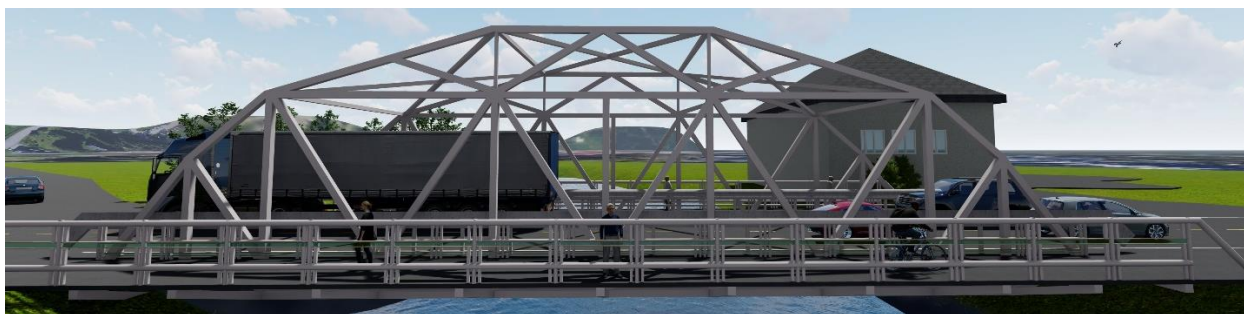
## Kort oppsummeringstabell av fra vedlegg D

Oppsummering av kategorier	Vekting for viktigheten i brua	Poengene til aluminium	Poengene til stål
Forskning, standarder og erfaring	24	13	24
Vurdering av materialeegenskaper	32	24	25
Pris på råvare	10	6	8
Prosjektgjennomføring og kostnad	24	20	15
Miljø og bærekraft	10	10	7
<b>Oppsummering</b>	<b>100</b>	<b>73</b>	<b>79</b>

Tabell 6-2 Oppsummeringstabell fra vedlegg, sammenligning av aspekter og egenskaper, Aluminium og Stål

De forskjellige kategoriene har fått en vektet karakter for viktighet i brua. Se vedlegg D for bakgrunnen til karaktergiving i hver kategori i sammenligningen. Stål scorer til slutt den høyeste poengsummen, og spesielt mange poeng i kategorien for standarder, forskning og erfaring. Det er et godt kjent byggemateriale for bruer, der hvor aluminium regnes som et relativt nytt byggemateriale for bruer. I de neste kapitlene er utførelsen i de to materialene presentert.

## 7 Oppbygning og dimensjonering av konstruksjonen



Figur 7-1 Illustrasjon nr.3 laget i Archicad

### 7.1 Forutsetninger

På grunn av omfanget av oppgaven og begrenset tid er det satt noen forutsetninger for at hovedessensen av oppgaven skal fremkomme på best mulig måte. Disse forutsetningene er beskrevet under.

#### 7.1.1 Antagelser

Siden denne oppgaven går mer i dybden på selve bærekonstruksjon gjøres det en antagelse på at brua kan prosjekteres med SAPA-100 profil som brudekke. Dette anses som en fornuftig tilnærming da disse profilene allerede er brukt på flere liknende bruer i Norge. SAPA-profilene er blitt brukt på blant annet Sandstad bru (6 s. 10) og Sander bru (6 s. 11). Begge bruene er dimensjonert for BK10/50, men med tanke på sine relative lange spenn på henholdsvis 70m og 80m. Det vil være rimelig å anta at dette profilet vil være holdbart for dimensjonering til et bruspenn på 29m etter N400/EK-1-2.

For stålutførelsen antas det et homogent dekke med samme høyde som SAPA-profilet. Dette for enklere gjennomføring av stålmodell med like egenskaper som aluminiumsmodellen.

Når det kommer til bindelaget og slitelaget på kjørebanelen gjøres det antagelser på et tynt epoxy-lag, etterfulgt av asfalt-slitelag som har sammenlagt høyde på 50mm. Avvik på tykkelse vil derimot kunne dekkes av kravene for ekstra overhøyde som er beskrevet i kapittel 2.4.2.

Egenlaster som følge av brudekke og slitelag er definert i kapittel 3.2 og vil med ovenfornevnte antagelser være en konservativ tilnærming.

Når det kommer til knutepunkter i stålutførelsen er det på grunn av begrenset tid gjort antagelser rundt beregning av sveisekapasiteter. Dette vil midlertidig ikke ha noe å si for prissammenlikning av de to materialene, siden sveiseprisene vi har fått estimert er oppgitt som

konstruksjon ferdig sveiset og ikke per meter sveis. Priser rundt stålsveiser er dypere forklart i kapittel 11.2.

Det vil som beskrevet i kapittel 1.2 sees bort fra HAZ i aluminiumsutførelsen. Dette vil som tidligere beskrevet være den antagelsen som vil ha størst utfall for hvor realistisk sammenlikningene av materialene vil være.

### **7.1.2 Avvik fra standarder**

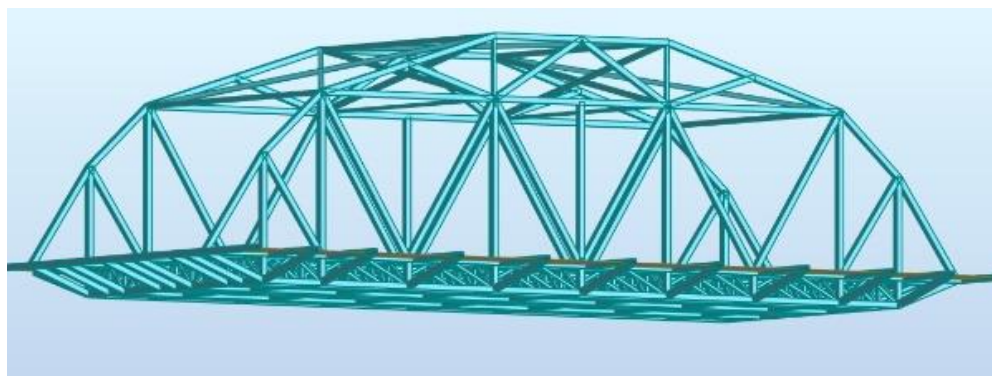
For enklere og raskere gjennomføring av brukonstruksjonen er det gjort små avvik når det gjelder Statens Vegvesens krav til utforming. Disse avvikene vil ha liten til ingen innvirkning på selve dimensjoneringsgrunnlaget. Under ligger avvikene og deres beskrivelser.

- Tverrfall
  - Det sees bort fra tverrfall i kjørebane og gangfelt. Med 3% tverrfall vil innvirkningen på kraftfordelingen i konstruksjonen være svært liten. Konsekvensen av dette er at det er prosjektert noe smalere enn hva som ville vært gjeldende om tverrfall hadde vært med.
- Bredder på gangfelt
  - Grunnet eksisterende gangfelt er det besluttet å bruke minstekravet til gangfeltbredde (2,5m) gitt av Statens Vegvesen. Dette gjøres for å holde bruene så små som mulig slik at det beholdes en tilnærmet ok gateutforming rundt bruene ved eventuell bygging.

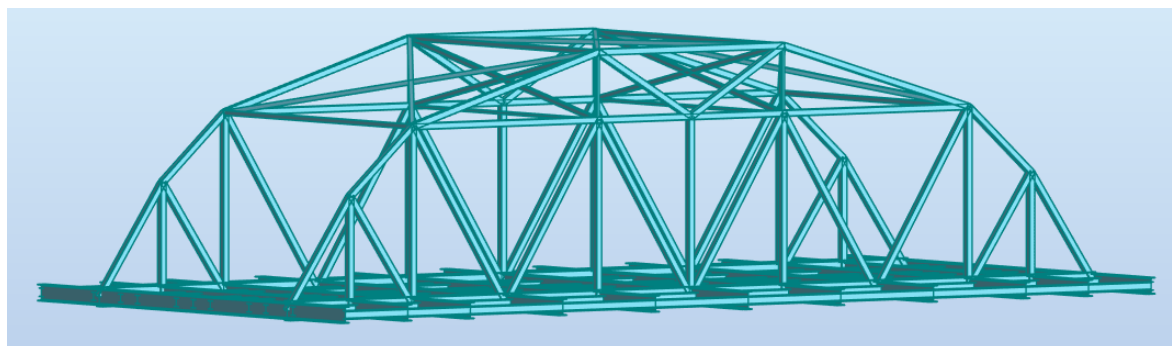
## 7.2 Utforming av konstruksjon

For utforming av konstruksjon er det tenkt en nokså lik utforming for både modell i aluminium og stål. Dette for å opprettholde et relativt rettferdig sammenlikningsgrunnlag. Den største forskjellen i utforming mellom de to materialene vil forekomme i underbyggingen på konstruksjonene.

Figur 7-2 og Figur 7-3 viser sluttresultat av utforming for de to konstruksjonene, og valg av løsningen blir nærmere forklart i kapittel 8 og 9.



Figur 7-2 Aluminiumsmodell

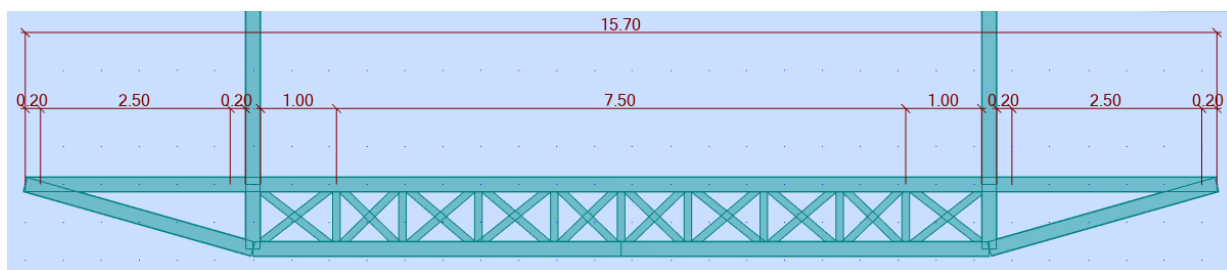


Figur 7-3 Stålmodell

### 7.2.1 Bredder i konstruksjon

Med utgangspunkt i de data som er gitt i kapittel 2.4.1 vil brua prosjekteres med veibredde på 7,5 m. Det vil i tillegg legges inn en sikkerhetsbredde på 1m fra ytterkant kjørefelt til bærende konstruksjon. Gangfeltet vil ha en fri bredde på 2,5 m med 0,2 m klarering til fagverket og 0,2 m klarering mot ytterkantene for montering av rekkverk. Dette vil gi brua en totalbredde på 15,7 m. Dette er 2,2 m bredere enn eksisterende bru, men vil være nødvendig dersom en ønsker å holde seg innenfor de krav som er beskrevet i Statens Vegvesen sine håndbøker. I Figur 7-4

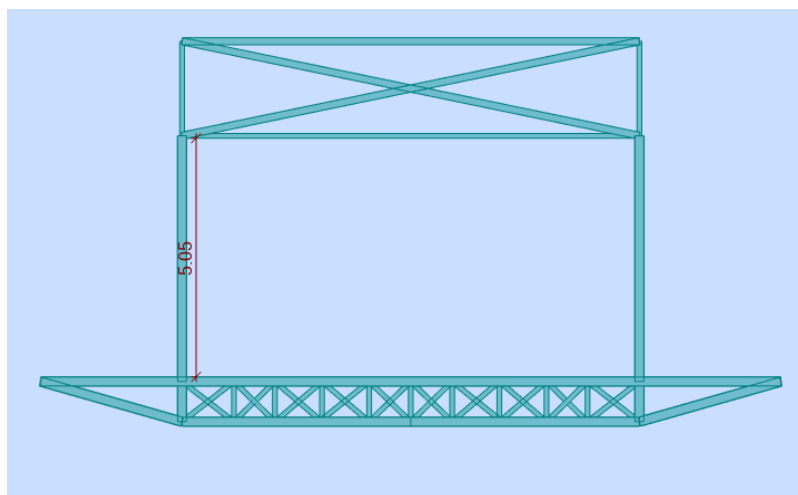
er det illustrert de prosjekterte breddene som brua vil ha. Bredden som er i figuren under vil være gjeldende både for stål- og aluminiums-konstruksjonen da begge bruene er likt prosjektert med hensyn til bredde.



Figur 7-4 Prosjektete bredder

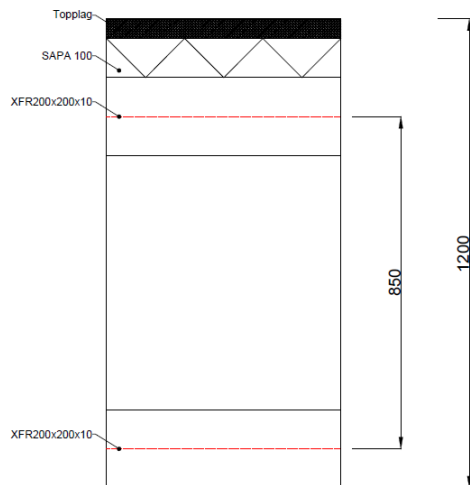
### 7.2.2 Fri høyde

For overhøyden i aluminiumsutførelsen er det prosjektert med en avstand på 5,05 m fra bærende element kjørebane til overliggende bæresystem. Over bæresystem i kjørebane kommer dekket i form av SAPA 100-profil og slitelag. Dette tilsvarer 0,10 m pluss 0,05 m. Dermed er fri høyde fra kjørebane til overliggende bæresystem lik 4,90 m, som tilsvarer kravet om fri høyde.



Figur 7-5 Fri høyde mellom bærene konstruksjoner

For underbyggingen av aluminiumskonstruksjonen vil det forekomme begrensninger i hvor høyt det kan bygges. Maks underhøyde fra kjørebane er som beskrevet i kapittel 2.4.2 satt til 1,2 m. Med denne begrensningen er det under i Figur 7-6 illustrert den største høyden som kan brukes i modelleringen av aluminiumsutførelsen.



Figur 7-6 Snitt av underbygning

## Ståutførelsen

For stålmodell vil samme krav til overhøyde innfris. Når det kommer til underhøyde vil det prosjekteres med høy tverrgående bjelker som vil ligge godt innfor kravet om maks 1,2 m underhøyde fra kjørebane.

## 8 Oppbygging og dimensjonering av aluminiumsmodell

Dimensjoneringen av aluminiumsutførelsen er gjort i flere trinn. Grovt sett er det først utført nedbøyningskontroll med karakteristisk trafikklast alene. Dette med bakgrunn fra tidligere erfaringer som har vist at det er mindre jobb å først tilfredsstille krav til bruksgrensetilstand, for så å justere konstruksjon slik at den også holder mål for bruddgrensetilstand.

### 8.1 Oppsett for kontroller

Det vil først bli sett på normalspenninger i konstruksjonen når det kommer til dimensjonering etter bruddgrensetilstand. Disse normalspenningene kan ikke ligge over dimensjonerende flytegrense for aluminium. For aluminiumslegering T6-6082 vil flytespenningen for hule tverrsnitt være på 260 MPa i henhold til tabell 3.2b i EK-9. Materialfaktor for aluminium er på 1,1 som igjen vil gi dimensjonerende flytegrense,  $f_{o,d} = 236 \text{ MPa}$ .

Robot Structural Analysis har en avansert struktur-kontroll som gjør det mulig å kjøre kontroll for Von Mises-spenninger på hele konstruksjonen. Programmet gjør kontrollen i generell spenningstilstand og vil da kontrollere for spenninger i både x, y og z-retning. Samme som for normalspenninger kan heller ikke Mises-spenningene overstige dimensjonerende flytespenning.

For kontroll av knekking vil det både gjøres manuelle kontroller, samt kontroll ved hjelp av Robots knekkdiagnose. Robots knekkekontroll kjører ønsket antall iterasjoner for et gitt antall knekkformer. Robot kjører ut kritiske knekkfaktorer tilhørende hver knekkform. Denne knekkfaktoren beskriver hvor mye lasten må økes før det oppnås knekking. Dette vil si at for kontroller må kritisk knekkfaktor,  $P_{cr} > 1$ . Nøyaktigheten av knekkfaktoren utgjøres av hvor mange iterasjoner som blir brukt. Iterasjonene angir hvor mange deler programmet skal dele hvert element (stav/bjelke) i. Med andre ord vil flere iterasjoner gi en mer nøyaktig kritisk knekkfaktor. Knekkanalyser i denne oppgaven vil bestå av 40 knekkformer med 100 iterasjoner. Dette vil gi største unøyaktighet på tredje desimal i  $P_{cr}$ .

For manuelle kontroller i konstruksjonen brukes følgende likninger:

- Likning (6.48) - 6.3.1.1 Krav om kapasitet mot knekking, ren trykkstav.
- Likning (6.62) - 6.3.3.1 Krav om kapasitet mot knekking, bøyning og trykk.
- Likning (6.28) - 6.2.6 Skjærkapasitet.

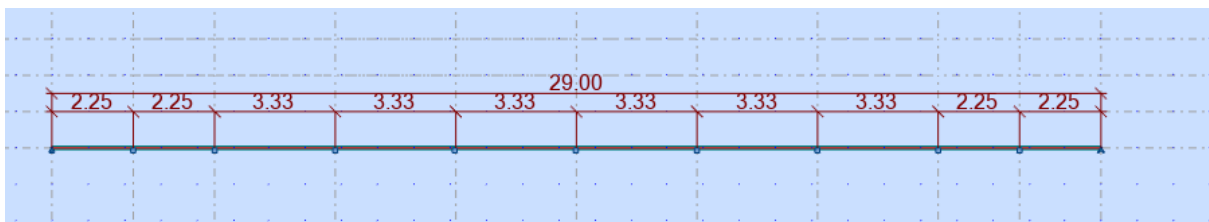


- Likning (6.23) - 6.2.5.1 Momentkapasitet
- Likning (6.20) - 6.1.4 Trykkapasitet
- Likning (6.43) - 6.2.9 Bøyning og aksialkraft
- Likning (6.32) - 6.2.7 Torsjon
- Likning (6.34) – 6.2.7.3 Kombinert skjærkraft og torsjon
- Likning (8.29), (8.30), (8.31) – 8.6.3.2.3 Kapasitet buttsveis

Videre beregninger finnes i vedleggene.

## 8.2 Oppstart

For å begynne oppbyggingen av konstruksjonen, ble det tatt utgangspunkt i de tverrliggende SAPA-profilene som dekke på brua. Dermed kan ikke knutepunktene i undergurten ha for lange avstander, da kjørebanelen skal ligge på et langsgående bæresystem. Fagverket blir også utført helt symmetrisk, slik at begge sider av brua tar opp likeverdige krefter. Det velges etter skissering og testing av generelle fagverk en undergurt med lengder som vist på Figur 8-1 under.



Figur 8-1 Oppsett av knutepunkt for fagverket

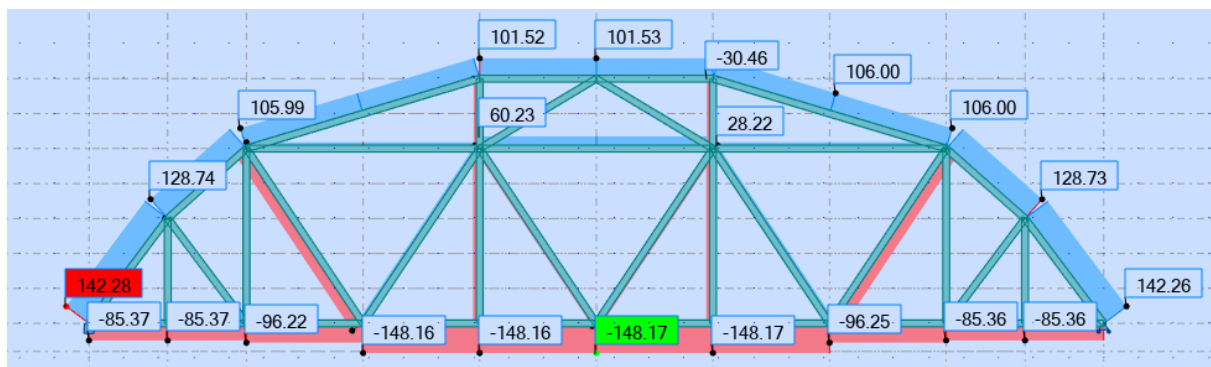
For å få en best mulig oversikt over kreftene som fagverket skal ta opp, er det satt opplagere på de respektive plassene for knutepunkt i fagverket. Dette gir en forenklet bjelkemodell. Det er så satt opp en linjelast bestående av vogntoglast (med tilhørende aksellast plassert i midten), egenlast fra kjørebane og gangfelt, samt en trafikklast foran og bak vogntoglast. De påførte lastene er for enkelhetens skyld hentet fra Statens Vegvesens håndbok R412: Bruklassifisering [R412] og vil i senere tid korrigeres med korrekte lastmodeller for dimensjonering av nye bruer i henhold til EK-1-2.

Punkt	Kraft Fz (kN)
1	105
2	115
3	235
4	255
5 (midt på)	310
6	255
7	235
8	115
9	105

Tabell 8-1 Knutepunktskrefter i fagverket som følge av laster fra figur 3.2-1 i R412 (55 s. 15)

### 8.2.1 Fagverket

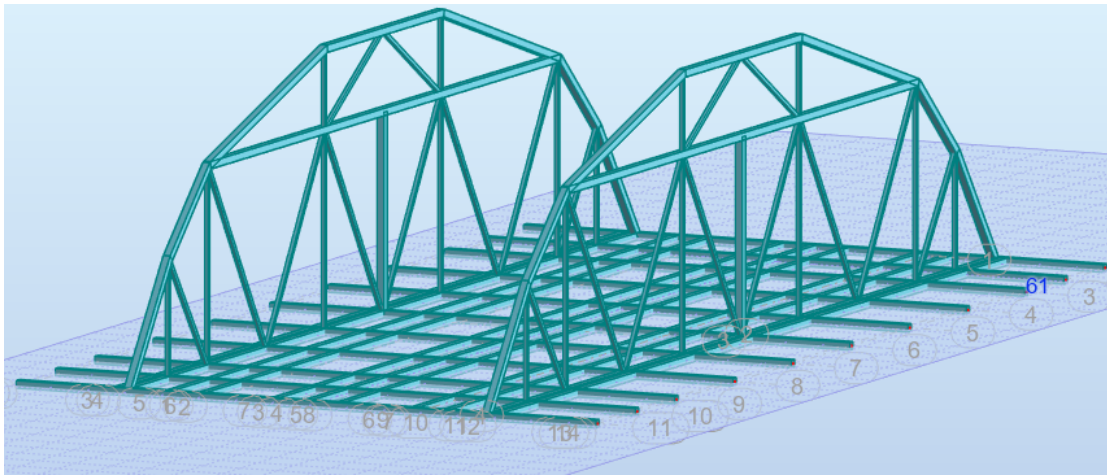
Opplagerkreftene som ble hentet fra den forenklede bjelkemodellen vil fungere som grunnlaget for punktlaster som fagverket må ta opp. Det skisseres et fagverk bestående av XFR200x200x10- og XFR100x100x10-profiler. Under i Figur 8-2 vises det midlertidige fagverket som har som mål å kunne takle de spenningene som oppstår på grunn av punktlaster i nedre knutepunkter.



Figur 8-2 Midlertidig fagverk

### 8.2.2 Rammens oppbygging

For den 3-dimensjonale modellen settes det tverrbærere inn i hvert knutepunkt i undergurt. For å holde spennet mellom de to fagverkene minst mulig, vil gangfeltene plasseres som utkragere på hver side av de to bærende konstruksjonene. Det plasseres videre langsgående bærere under tenkt hjullinje, og under endepunktene til SAPA-profilene.



Figur 8-3 Skisse av rammekonstruksjon

Med hensyn til opptredende laster på kjørebane og gangfelt er det brukt det største tilgjengelig tverrsnittet (200x200x10) for både tværr- og langsgående bærere.

### **Nedbøyning**

For videre prosjektering av konstruksjon vil det legges fokus på Statens Vegvesens krav til nedbøyning. Kravet som stilles er spesifisert i kapittel 3.6.2, hvor maks nedbøyning for denne brua er 82,9 mm. Lastmodell som brukes for kontroll mot nedbøyning er også forklart i kapittel 3.6.2.

For å redusere nedbøyning må konstruksjonen gjøres stivere. Første steg blir avstivere i toppen av konstruksjon. Disse vil også få en viktig rolle når vindlast og andre horisontallaster innføres. Neste steg vil være å forsterke underbygningen i konstruksjonen.

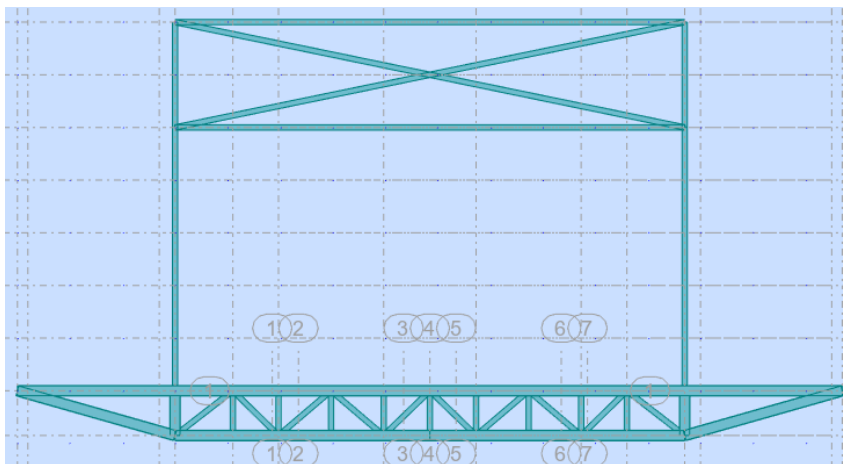
### **Avstivere i toppen**

De lengste diagonalstavene i toppen vil være hele 11.94 m lange. På grunn av maks lengde 9.0 m på XFR200x200x10- profilene, settes det inn XFR100x100x10 som avstivere i toppen. Disse anses som veldig slanke og vil bli kontrollert for knekking senere.

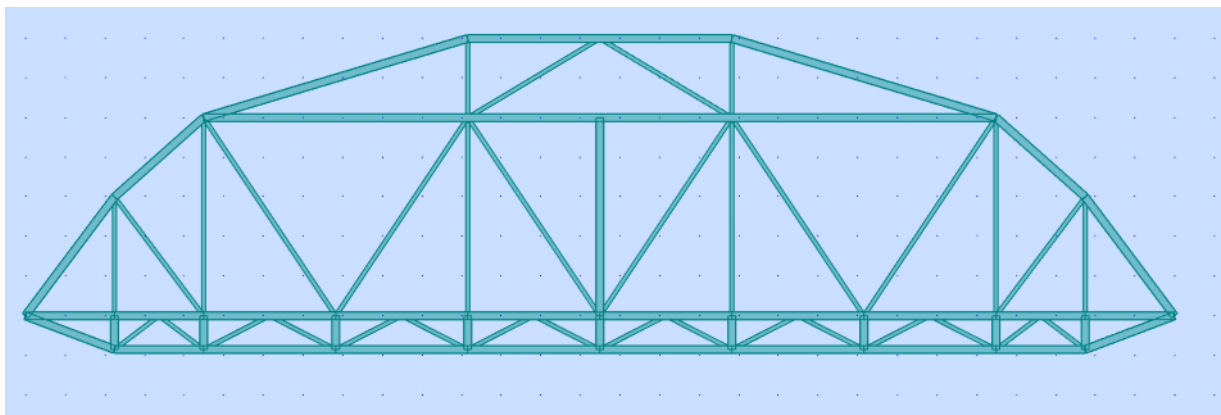
### **Underbygning**

Når det gjelder underbygningen, vil det på grunn av de begrensninger beskrevet i kapittel 7.2.2 prosjekteres med de høyder som er gitt i Figur 8-4. Kort oppsummert vil dette gi en høyde, senter-senter fra over- til underliggende profil på 850mm.

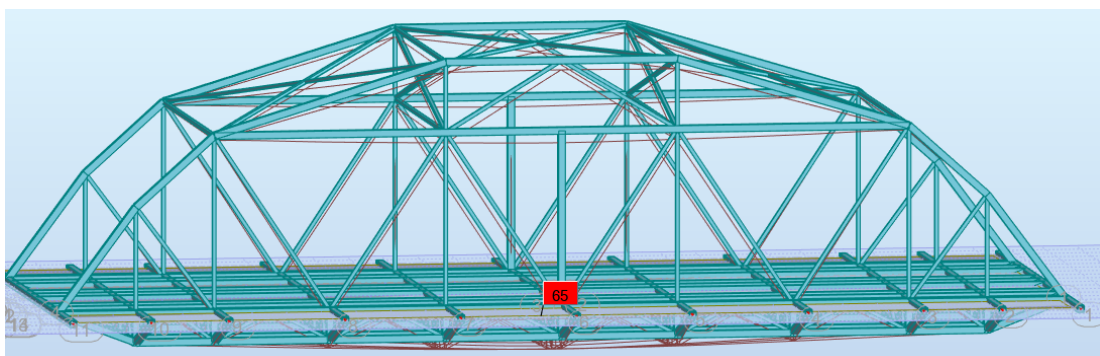
Underbygningen vil utføres som fagverksbjelker tilknyttet eksisterende knutepunkt i overkonstruksjon. Illustrasjon av dette vises under i Figur 8-4 og Figur 8-5. Nedbøyning av konstruksjon tilført karakteristisk trafikklast vises i Figur 8-6.



Figur 8-4 Underbygning i tverretning før endring



Figur 8-5 Underbygning i horisontalretning



Figur 8-6 Nedbøyning som følge av karakteristisk trafikklast alene

Med en maksimal nedbøyning på 65 mm på midten, består konstruksjonen kravet om nedbøyning i henhold til N400. Videre utføres kontroller for de ulike lastkombinasjonene i bruddgrensetilstand.

### 8.3 Påføring av bruddlaster

For dimensjonering etter bruddlaster er det tatt utgangspunkt i de lastkombinasjoner som gir størst belastning på konstruksjon. Det dimensjoneres først etter normalspenninger med de forutsetninger som er gitt i starten av dette kapittelet.

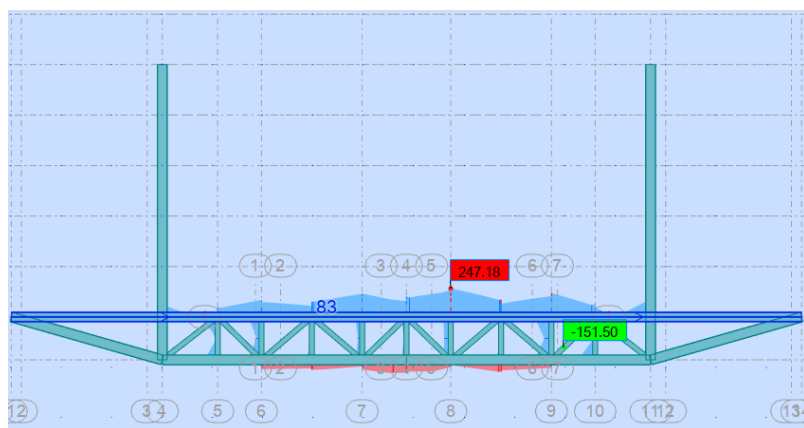
#### 8.3.1 Dimensjonerende lasttilfelle

##### Gruppe 1a) lastmodell 1 med boggisystem plassert på midten av konstruksjon

Dimensjonerende situasjon for denne lastmodellen er gitt etter ligning 6.10b. Se kapittel 3.6.1 for lastkombinasjoner. Figur 8-7 viser lastkombinasjonen satt i Robot og påfølgende Figur 8-8 vises det meste påkjente snittet når det gjelder normalspenninger.

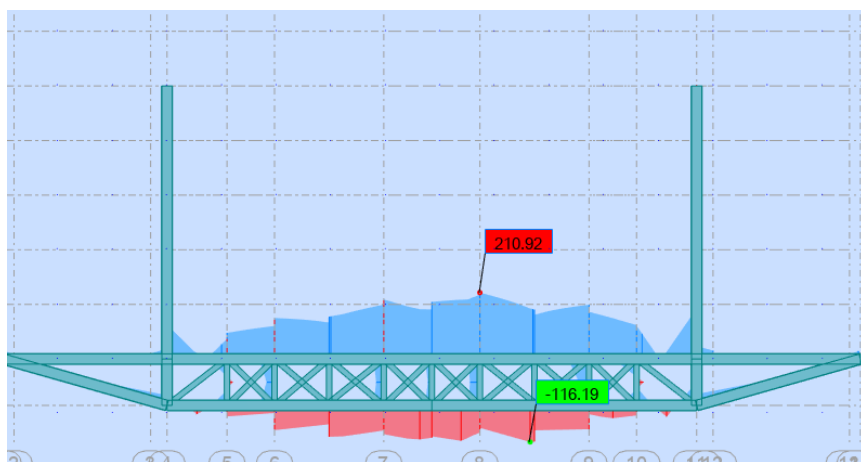
List of cases in combination:		
Factor	No.	Case name
1.20	1	DL 1
1.20	2	G_gangfeltogvei
1.20	3	G_rekkverk
1.35	10	Gangfeltlastsamti...
1.12	20	VINDLASTPÅKJØ...
1.12	21	Wind Y+ 32 m/s (...)
1.35	608	LM1_MIDTEN

Figur 8-7 Gr1a(6.10b)



Figur 8-8 Normalspenninger i bjelke 83 før tiltak

247 MPa er i overkant mye av hva materialet tåler. Den høye normalspenningen i bjelke 83 forårsakes av store trykkrefter. Her ligger boggisystemet rett over bjelke 83, som betyr at denne spenningen vil være gjeldende for hver bjelke boggisystemet passerer. Derfor utformes fagverksbjelkene i tverretning slik at det er et krysslag mellom over- og underbjelke. Det vil føre til bedre kraftfordeling, og dermed vil fagverksbjelkene bestå kontrollen for bruddgrense. Figur 8-9 illustrerer maks normalspenninger og det nye designet av fagverksbjelkene i tverretning.



Figur 8-9 Maks normalspenninger etter "krysslag" i tverrliggende fagverksbjelkenene

Normalspenningene er nå redusert, og konstruksjonen har god nok kapasitet. Dimensjonerende flytespenning ligger på 236.4 MPa. Konsekvensen av å utforme fagverksbjelkene slik, er betydelig mer materiale. Ettersom dette er lokale spenninger som ikke har særlig innvirkning på selve fagverket, i tillegg til at underhøyden er maksimal, er dette per nå beste løsning.

### 8.3.2 Manuell kontroll for knekkstaver

Det vil først gjøres en manuell kontroll for staver som kan være utsatt for knekking. Her kontrolleres de mest kritiske trykkstavene. Det tas utgangspunkt i slanke staver og staver med

høy trykkpåkjenning. Også samtidighet av moment og trykk sjekkes. Se vedlegg E for kontroll av knekking. For knekk lengder er tabell 6.8 i EK-9 brukt (21).

Endringer som gjøres etter kontroll av knekking er som følger:

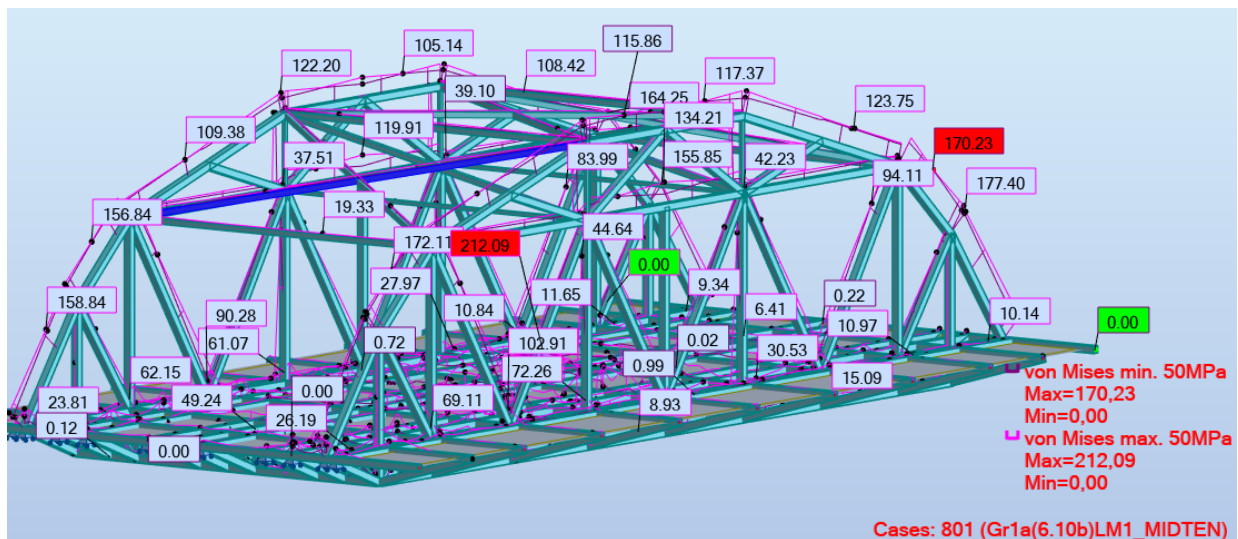
- Tilføres noen avstivningsstaver for å minske knekk lengden til utsatte trykkstaver.
- Viser seg at flere av stavene i fagverket er utsatt for knekking. Derfor byttes alle stavene i fagverket fra XFR100x100x10 til XFR200x200x10 på grunn av symmetri.
- De slanke stavene i toppen er også utsatt for knekking. Det forsøkes å bytte disse ut med XFR200x200x10. Da viser det seg at de har veldig liten utnyttelsesgrad. Derfor blir det bestemt å bruke XFR150x150x8 i toppen. Disse vil ikke være utsatt for knekking, samtidig som de har høy utnyttelsesgrad.

### **Etter endringene**

På grunn av endringene gjort etter kontroll av knekking, vil konstruksjonens stivhet være endret. Dermed vil normalspenningene fordele seg annerledes. For å gjøre en enkel kontroll av dette, skrives det fra Robot ut tabeller som viser spenningene i hver stav/bjelke-element. Konstruksjonen kontrolleres også for knekking gjennom Robots knekkanalysefunksjon. Konstruksjonen består alle kontroller for normalspenninger og knekk-kapasiteter. Dokumentasjon for dette finnes i vedlegg E.

### **8.3.3 Von Mises**

For komplett kontroll av konstruksjon gjøres det kontroll av Mises-spenninger. Kontrollen gjøres som nevnt lengre opp med Robot sin Mises-funksjon. Figur 8-10 viser resultatet av kontrollen, og med største Mises-spenning på 212 MPa anses konstruksjon godkjent i bruddgrensetilstand for lastegruppe 1a(6.10b) med boggisystem plassert på midten.



Figur 8-10 Von Mises-spenninger som følge av lastgruppe 1a(6.10b) med boggisystem plassert på midten

### 8.3.4 Øvrige lastgrupper

For øvrige lastgrupper, forklart i kapittel 3.6.1, er det skrevet ut tabeller fra Robot. Vedlegg E viser de mest utsatte snitt i konstruksjonen, i form av spenningsfordeling. Også knekkanalysefunksjonen blir brukt. Etter endringer gjort på konstruksjonen fra kontroll mot lastgruppen skrevet i delkapittelet ovenfor, viser det seg at de andre lastmodellene ikke blir dimensjonerende.

Videre er det gjort håndberegninger opp mot EK-9, for å kontrollere verdiene Robot har gitt. Det er i vedlegg E satt opp fem forskjellige caser, som hver representerer utsatte kraftfordelinger. Alle kontrollene er godkjente.

## 8.4 Sveisekapasitet

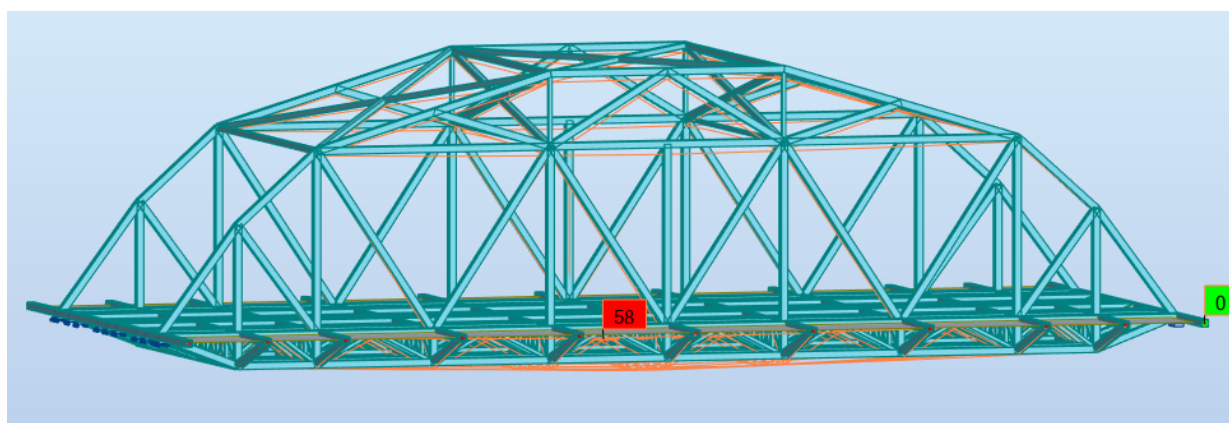
Det er tatt utgangspunkt i de mest belastede knutepunktene når kapasitetene til sveis kontrolleres. Det er i vedlegg E foretatt kontroll mot EK-9 for buttsveiser. Det er også foretatt en forenklet kontroll for de mest utsatte kilsveiser. Beregning av sveisene er i hovedsak gjort for å danne ett grunnlag til kostnadsberegningen av sveis.



## 8.5 Bruksgrensetilstand

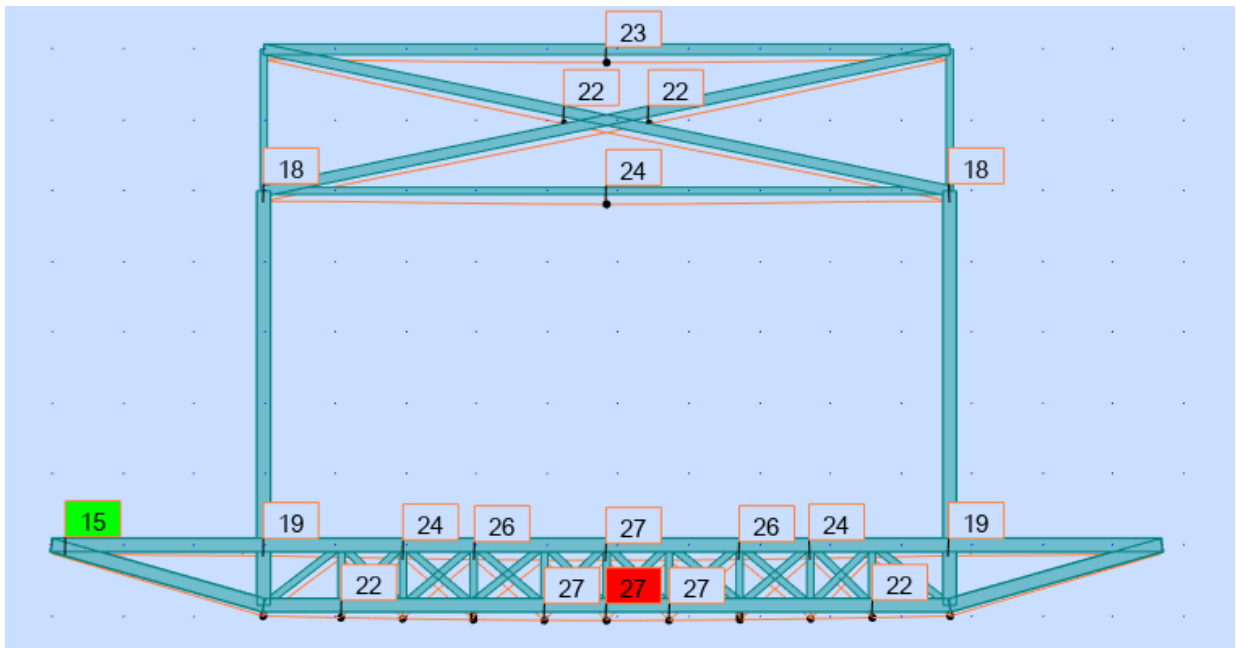
Som beskrevet i kapittel 3.6.2 skal det foretas tre kontroller for bruksgrensetilstand. Modellen ble i starten modellert etter kravet til den første kontrollen, men vil som følge av endringer i konstruksjon for tilfredstillende av bruddgrensetilstand også ha endret egenskaper med hensyn til nedbøyning. Det er etter nye analyser i Robot kommet frem til at Gr1a med boggisystem plassert på midten vil være den dimensjonerende lasten for bruksgrensetilstand i begge kombinasjonslaste (ofte forekommende og tilnærmet permanent). For kontroll av nedbøyning med karakteristisk trafikklaster alene, vil lastmodell 1 med boggisystem på midten være den lasten som gir høyest nedbøyning av konstruksjonen.

Den første bruksgrensekontrollen har et maksimumskrav på 82,9 mm nedbøyning. Dette gjelder som tidligere nevnt med karakteristisk trafikklaster alene. Ved kontroll av denne vises det i Figur 8-11 til største forekommende nedbøyning på 58 mm, noe som er innafor kravet gitt i N400



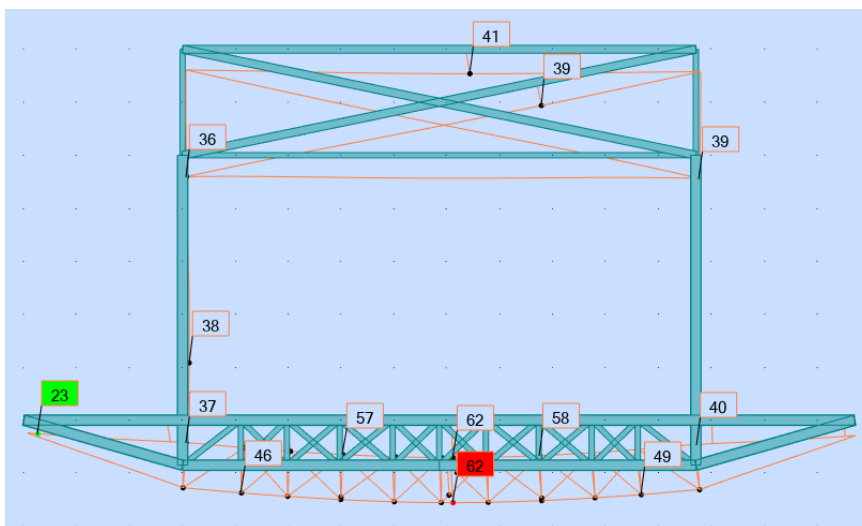
Figur 8-11 Nedbøyning som følge av karakteristisk trafikklaster alene

Bruksgrensekontroll nummer to skal gjøres med tilnærmet permanent kombinasjon og kombinasjonsfaktor = 0 for variable laste. Her skal høyden på brubane og overbygging korrigeres for den deformasjon egenlastene gir. De deformasjonene som oppstår, er gitt i Figur 8-12. For å få ei rett bru må det for eksempel bygges med en liten vinkel motsatt rettet av vinkelen dannet av deformasjonene på grunn av egenlast.



Figur 8-12 Nedbøyning ved tilnærmet permanent kombinasjon (kun egenlaster)

Den siste bruksgrensekontrollen brukes for eventuelle korrigeringer av overhøyde og skal gjøres i brukskombinasjon ofte forekommende. Som illustrert i Figur 8-13 er dimensjonerende nedbøyning for denne kontrollen på 62 mm nede på konstruksjon, og 41 mm i midten på overbyggingen. Siden det er størst nedbøyning nede vil det ikke være behov for korrigering av overhøyde i dette tilfelle.



Figur 8-13 Nedbøyning av laster i lastgruppe 1a, ofte forekommende kombinasjon

## 9 Oppbygging og dimensjonering av stålmodell

Ved oppbygging av stålmodellen er det tatt utgangspunkt i aluminiumsmodellen for best mulig prissammenlikning. Videre vil stålkonseptet også dimensjoneres etter elastisk teori. For stålbrua vil det i hovedsak brukes Robot for kontroll av spenninger. Dette fordi våre tidligere manuelle kontroller i stor grad er i samsvar med Robot sine beregninger. Det vil videre i dette kapittelet kun kort oppsummeres hva som er gjort. For nøyere gjennomgang refereres det til vedlegg E. Dette fordi fremgangsmåte og analyser er tilnærmet likt det som er gjort i kapittel 8, og vil kunne være repetitivt.

### 9.1 Konstruksjonsmessige forskjeller fra aluminiumsmodell

Nedenfor ligger det en stegvis liste for endringer inn mot stålmodellen.

1. Underbygningen i brua byttes ut med høye HE-B bjelker i stedet for kryssformede fagverksbjelker.
2. Alt av material endres til stål. Foreløpig med samme tverrsnitt.
3. Økt egenlast fra veibane og gangfelt.
4. Fagverket løftes 0,3m på grunn av økt høyde tverrgående bjelker

#### 9.1.1 Kontroll ved normalspenninger og nødvendige endringer

Fra analysen i Robot observeres det for høye normalspenninger i fagverket. Dette er på grunn av annerledes underbygning, som gjør at fagverk må ta større strekk- og trykkrefter. På bakgrunn av dette endres tverrsnittets tykkelse i fagverket fra 10 til 12,5 mm.

Stålmodellen er prosjektert med følgende elementer:

- Fagverk: HFRHS200x200x12,5
- Tverrbærere: HE 500B, foruten om tverrbærer på midten; Her brukes HE 550B da normalspenningene blir for høye med HE 500B. Dette er kun gjeldende for lastkombinasjon med boggisystem på midten, og derfor er det bare behov for den type dimensjon under midten.
- Langsgående avstivere i underbygning: HE 260B
- Vindavstivere på toppen av konstruksjon: HFRHS150x150x8
- Undergurt fagverk: HE 450B

### 9.1.2 Sammenføyninger

For stålmodellen vil det være mest hensiktsmessig å bruke en kombinasjon av sveising og bolting. Det er tenkt at det i stor grad vil sveises plater til profilene, som deretter boltes sammen. Noen steder vil profiler sveises direkte sammen.

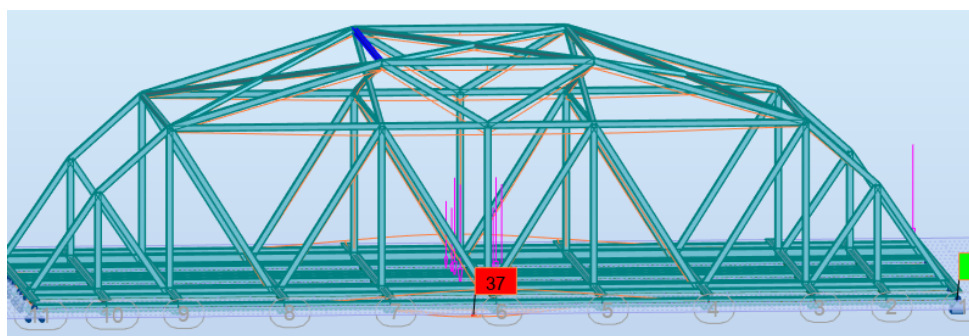
Prisberegningen for stålutførelsen er gjort slik at sveisekostnader er innbakt. Derfor er det valgt å ikke beregne sveisekapasiteter og derav a-mål for stålmodellen.

## 9.2 Bruddgrense stål

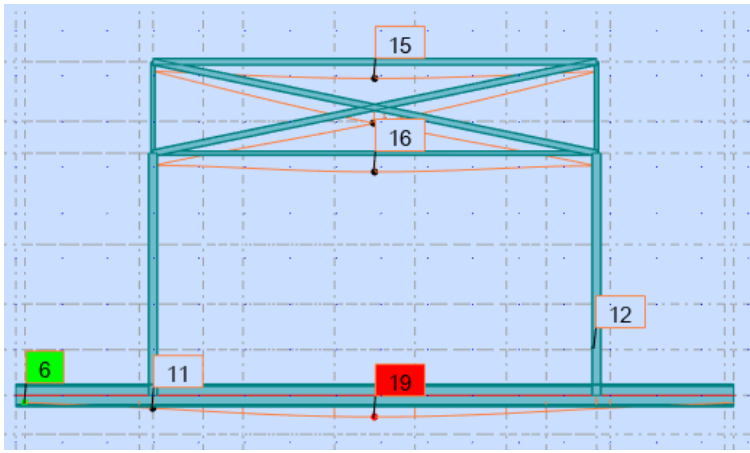
Det utføres kontroller opp mot spenningsfordelingene i Robot, også Von Mises-kontroll. Det viser seg at Mises-spenningene er for store, og det settes derfor inn HE 600B som undergurter i fagverket. Vedlegg E viser tabeller med spenningsfordelinger før og etter endring av undergurt. Tabeller fra knekkanalysen i programmet og figurer som viser resultater fra Mises-kontroller ligger også vedlagt. De ulike lastkombinasjonene kjøres i Robot. Konstruksjonen består alle kontrollene.

## 9.3 Bruksgrense stål

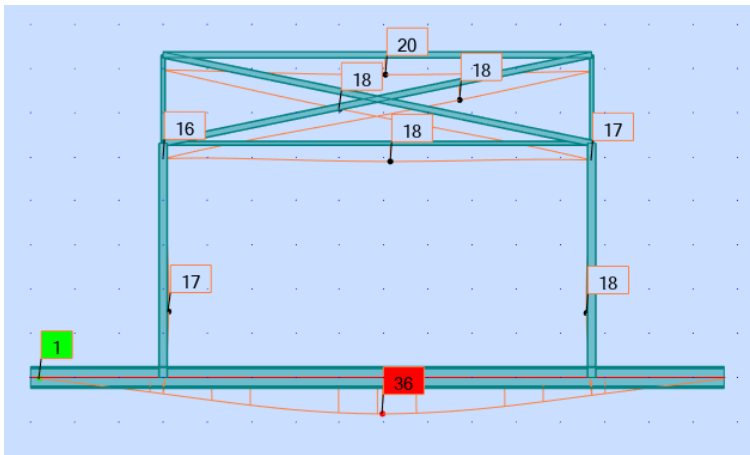
Som for aluminiumsmodellen, vil det være lastgruppe 1a med boggisystem på midten og lastmodell 1 med boggisystem på midten som vil gi størst nedbøying. I Figur 9-1 vises det nedbøyinger forårsaket av karakteristisk trafikklast alene. Figur 9-2 og Figur 9-3 viser henholdsvis tilnærmet permanent og ofte forekommende kombinasjon. Kravet til maksimal nedbøying er som vist tilfredsstilt. Krav for tilnærmet permanent og ofte forekommende kombinasjon kan også tilfredsstilles på samme måte som for aluminiumsmodellen. Se kapittel 8.5.



Figur 9-1 Nedbøying stålmodell



Figur 9-2 Nedbøyning stålmodell på grunn av tilnærmet permanent kombinasjon



Figur 9-3 Bruksgrense med ofte forekommende kombinasjon

## 10 Python-program

I samtale med de eksterne veilederne fra SINTEF har det vært ønskelig å inkludere en programmeringsdel i bacheloroppgaven, for å gjøre oss kjent med problemløsning i form av koding. Ved brudimensjonering er programmering svært nyttig og mye brukt. I Python kan man lage automatiserte script for beregninger og optimalisering av konstruksjoner. Det kan for eksempel være optimalisering av vinkler og tverrsnittareal for at materialkostnader i konstruksjonen kan reduseres. Denne delen av oppgaven er derfor veldig aktuell for ingeniører.

### 10.1 Beskrivelse av script

Python-scriptet som er laget i oppgaven er for kontroll av aksialkapasitet, forenklet knekking og utnyttelsesgrad av de opptredende stavkreftene i fagverket. Alle trykkstavene i fagverket skal sjekkes for tilhørende trykkkapasiteter, forenklet knekking og utnyttelsesgrad av tverrsnittarealet. Strekkstavene kontrolleres for strekkkapasitet og utnyttelsesgrad av tverrsnittarealet.

Fra styrkeanalysen i Robot hentes det ut en liste for alle opptredende stavkrefter (trykk- og strekkstaver), lengder og tilhørende profil til hver av stavene i fagverket. Dette er dataen som tas i bruk for å gjøre kontrollene i scriptet som er laget.

For at en kontroll av en stav skal godkjennes må følgende kriterier være oppfylt:

- Opptredende stavkraft  $[x] < \text{Aksialkapasiteten til profilet}$
- Opptredende stavkraft  $[x] < \text{Kritisk last } N_{Cr}$  (Gjelder bare trykkstavene)
- Utnyttelsesgrad  $> 50$  prosent
  - (Kontrollen er også ok hvis staven har mindre utnyttelsesgrad enn 50%, men ønskelig å redusere tverrsnittarealet. Får output: Tverrsnittarealet kan reduseres.)

I outputen vil stavene være nummerert i rekkefølge for at man lettere skal se hvilke av stavkreftene som ikke består kontrollene. Hver stav i outputen vil få fargen grønn, gul eller rød, og en beskrivelse av kontrollen. Grønn farge betyr at alle kontrollene i staven  $[x]$  er godkjent. Gul farge betyr det at kontrollen er godkjent, men at utnyttelsesgraden til staven er mindre enn 50 prosent. Dersom det er rød farge på outputen betyr det at aksialkapasiteten er mindre enn opptredende kraft, eller at det for en trykkstav vil oppstå knekking.

Python-scriptet finnes i vedlegg F

## 10.2 Oppbygging av script

I første del av Python-scriptet importeres alle bibliotekene som trengs. Her; numpy, math og colorama. Numpy hentes inn for å kjøre generelle matematiske avrundinger og lage tabeller. Math hentes inn for å kunne få eksakt verdi på pi ( $\pi$ ), og colorama for å kunne gi outputen forskjellige farger for godkjente og ikke godkjente kontroller. Videre defineres elastisitetsmodul, materialfaktor og flytegrense for aluminium. For profilene i fagverket, 100x100x10 og 200x200x10, hentes tverrsnittarealer og arealtreghetsmomenter (om sterk akse y) fra *Stålkonstruksjoner, Profiler og Formler*.

```
#Importerer bibliotekene numpy, math og colorama
import numpy as np
import math
import colorama
from colorama import Fore, Style

#Elastisitetsmodul, materialfaktor, flytegrense, dim.flytegrense
E = 70000          #For aluminium
M_0 = 1.10        #Fra Alu-standarden
fy = 260          #For 6082 T-6
fd = fy / M_0

#Tverrsnittsarealene til profilene 100*100*10 og 200*200*10
A_100 = 3550
A_200 = 7450

#Arealtreghetsmoment om sterk akse y til profilene 100*100*10 og 200*200*10
Iy_100 = 4.74*10**6
Iy_200 = 44.2*10**6
```

Figur 10-1 Utklipp fra Python-script, Biblioteker og definisjoner

En liste med opptredende stavkrefter [ $\text{N/mm}^2$ ], med tilhørende lengder [mm] og profil [100- eller 200-profil], kopieres inn i hver sin rad i scriptet. Disse er koblet ved horisontal nummering [0, 1, 2, 3...] i Python.

```
#Data som hentes fra Robot.
kraft = [31000,150000,0,230000]          #[N]
lengde = [10000,12000,11000,10000]      #[mm]
tsnitt = [100,200,100,100]              #Tilhørende profil
```

Figur 10-2 Utklipp fra Python-script, Data i fra Robot

Siden det er 100- eller 200-profil til hver stav som legges inn fra Robot, er det en løkke som oppdaterer verdiene til profilenes tverrsnittareal og arealtreghetsmoment.

```
tsnittareal = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]
I_y = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]

#Løkken under oppdaterer verdiene til tsnittareal og I_y over
for x in range(11):
    if tsnitt[x] == 100:
        tsnittareal[x] = A_100
        I_y[x] = Iy_100

    else:
        tsnittareal[x] = A_200
        I_y[x] = Iy_200
```

Figur 10-3 Utklipp fra Python-script, Løkke

Videre blir formlene for aksialkapasitet, kritisk last  $N_{Cr}$  og utnyttelsesgrad av stavene definert. I Robot har trykkstaver positivt fortegn, mens strekkstavene har negativt fortegn. Kontrollene er bygget opp med *if*- og *else*-setninger. Siden kontrollen er relativt lang, finner man det i vedlegg F.

```
for x in range(11):

    Iy = I_y[x]
    length = lengde[x]

    aksialkapasitet = tsnittareal[x] * fd
    N_CR = ((math.pi**2) * E * Iy) / (length**2)
    utnyttelsesgrad = kraft[x] / aksialkapasitet

    #Kontroll av trykkstaver i fagverket

    if kraft[x] > 0:
```

Figur 10-4 Utklipp fra Python-script, Aksialkapasitet, kritisk last  $N_{Cr}$  og utnyttelsesgrad

Det første som sjekkes i scriptet, er om noen av stavkreftene fra listen er større enn null. For en stavkraft som er større enn null, betyr det at staven skal sjekkes som en trykkstav. Hver stavkraft [x] sjekkes da for trykkapasitet, forenklet knekking og utnyttelsesgrad. Outputen fra kontrollen vil definere hvilke av stavene som er godkjent, og eventuelt hvilken kontroll som ikke er ok.

Dersom stavkraft [x] er lik null vil scriptet fortsette å kjøre. Det er brukt en *continue*-funksjon for at nullstaver fra fagverket ikke skal bli printet ut. Hvis man ønsker å få nullstavene i



fagverket til å bli printet ved kjøring av scriptet, kan *continue*-funksjonen erstattes med *print*(«*Dette er en nullstav*») i scriptet.

```
#Nullstaver i fagverket  
  
elif kraft[x] == 0:  
    continue
```

Figur 10-5 Utklipp fra Python-script, Nullstaver

Kontroll av strekkstavene sjekkes på samme vis som for trykkstavene, bare uten kontroll for knekking. Siden strekkstaver har negativt fortegn på kraften i Robot, ganges det med (-1) for å få positive verdier for kontroll mot strekkapasiteter og utnyttelsesgrad.

Det er i figur 10-6 vist hvordan outputen på kontrollen av stavene i fagverket ser ut. Merk at det ikke printes en stav nr. 3. Dette siden stav nr. 3 er en nullstav.

```
Stav: 1 ok, men lav utnyttelsesgrad: 35.75 % Tverrsnittet kan potensielt reduseres.  
Stav: 2 ok, utnyttelsesgrad: 51.11 %  
Stav: 4 ok, utnyttelsesgrad: 69.12 %  
Stav: 5 ok, men lav utnyttelsesgrad: 13.06 % Tverrsnittet kan potensielt reduseres.  
Stav: 6 ok, men lav utnyttelsesgrad: 42.88 % Tverrsnittet kan potensielt reduseres.  
Stav: 7 ok, utnyttelsesgrad: 87.0 %  
Stav: 8 ikke ok, knekking oppstår.  
Stav: 9 ikke ok, knekking oppstår.
```

Figur 10-6 Utklipp fra Python-script, Output fra kontroll

## 11 Kostnadsberegninger

Under er kostnadsberegningene for de to modellene presentert. Det er tatt utgangspunkt i en enkel beregning for å gi et prisestimat. Prisene på aluminiumsprofiler er et tilbud fra Hydal Aluminium Profiler, som skal være leverandøren av profiler til Nysethvegen bru.

Sveisekostnadene for aluminium er hentet fra rapporten om Langenuen bru. Stålkostnadene er et estimat gjort i samarbeid med Pro Con AS. For begge modellene er kostnadene delt inn i 2 kategorier: Profiler og sveis. På grunn av begrenset tid er ikke monteringskostnader tatt med i beregning. Eventuelle prisforskjeller som foreligger på grunn av ulike montering og sveisemetoder vil bli tatt i betraktning ved drøfting av de totale kostnader for bruene.

Kostnadsberegningen er gjort med utgangspunkt i de avgrensninger som ligger til grunn for oppgaven. Spesielt reduksjoner i styrke grunnet HAZ, ville ført til større volum og derav høyere kostnader for aluminiumsmodellen. Derfor er det til slutt også tatt med et kostnadsestimat for en antatt modell i aluminium som kunne tatt opp lastene selv med HAZ-reduksjon.

### 11.1 Aluminiumsmodell

#### Profiler

Tilbud på profilene 100x100x10 og 200x200x10 ble den 15. April 2021 oversendt fra Hydal Aluminium Profiler. I tilbudet inngår det også verktøykostnader og eventuelle innstillingskostnader. Ved bestilling av mindre volum, som for 150x150x8 profilet, tilkommer denne innstillingskostnaden. For å finne pris på 150x150x8 profilet ble det interpolert ut fra meterspris og vekt på 100x100x10- og 200x200x10-profilet. Det er også lagt til 20% som tillegg for innkjøp, kapp og eventuelle lagerkostnader for alle profiler.

Profiler	Vekt per m.	Total lengde	Pris per m.	Verktøykost.	Innstillingskost.
200x200x10	20.5 kg	1200.8 m	890.88 kr	61 500 kr	
150x150x8	12.51 kg	149.7 m	535.93 kr	39 500 kr	10 000 kr
100x100x10	9.72 kg	555.6 m	410.38 kr	39 500 kr	

Tabell 11-1 Mengde profiler aluminium

Profiler	Samlet vekt	Samlet pris profiler
200x200x10	24 615.6 kg	1 069 733 kr
150x150x8	1 872.8 kg	80 229 kr
100x100x10	5 400.5 kg	228 011 kr
Total vekt		31 889 kg
Totalpris		1 528 473 kr
Totalpris profiler 20% tillegg		1 834 168 kr
Per kg med 20% tillegg		57.5 kr per kg

Tabell 11-2 Kostnadsestimater profiler aluminium

## Sveis

Kostnadene for aktuelle sveiser er hentet fra Langenuen-rapporten. Sveisene er angitt med en tenkt lav-, middels- og høy kostnad. Prisene under høy kostnad tilsvarer dagens sveiseteknologi, med 100% manuelt arbeid. De to andre kostnadsnivåene er tiltenkt reduksjon i kostnader på grunn av repetisjon og automatisering av flere like sveisesnitt (47).

Type sveis	Prisnivå lavt per meter	Prisnivå middels per meter	Prisnivå høyt per meter
Kilsveis 8mm	218.5 kr	356.5 kr	467.5 kr
Kilsveis 10mm	291.3 kr	475.4 kr	623.3 kr
Buttsveis ensidig 10mm	291.3 kr	475.4 kr	623.3 kr

Tabell 11-3 Prisnivå sveis aluminium

Det er tiltenkt kilsveis i de aller fleste sveisesnittene i brua. Buttsveisene er kun brukt til forlengelse av hulprofilene. Delene som kan sveises sammen på verksted og som gjøres delvis automatisert settes til prisnivå middels. Det som sveises på byggeplass settes til høyt prisnivå. Se vedlegg G for kostnadsberegninger tilknyttet sveising.

	Lengde sveis	Samlet pris
Kilsveis 8mm	615.6 m	287 793 kr
Kilsveis 10mm	338.9 m	171 291 kr
Buttsveis 10mm	51.2 m	31 913 kr
Totalpris sveis		490 997 kr

Tabell 11-4 Kostnad sveis aluminium

## 11.2 Stålmodell

Kostnadsestimatet for stål er bygd opp noe forskjellig fra estimatet for aluminium. Her er det innhentet et estimat på pris for ferdigsveiste profiler. Det er tenkt at sveisen mellom plate og profil i stor grad blir gjennomført på verksted. Pro Con AS har gitt et estimat på sveisekostnader ut fra de aktuelle mengdene profiler og sveis. Dette er antagelser, men kan gi et godt estimat i forhold til pris.

Gjennomsnittsprisen på S355 ved store innkjøp av galvaniserte profiler, inkludert sveising og ett tillegg på 20% gir en estimert pris per kg. Det er kommet fram til at denne prisen er 26kr per kg. For å sammenligne sveisekostnadene ble det sammen med stålentreprenør Pro Con AS antatt at sveising utgjør cirka 1.5 kr per kg av disse kostnadene.

Tabell 11-5 og Tabell 11-6 nedenfor viser derfor pris på galvaniserte stålprofiler, inkludert sveising. Medregnet ett pristillegg på 20% tilknyttet innkjøp, kapp og eventuelle lagerkostnader.

	Lengde sveis
Kilsveis til plate 8mm	306.9 m
Kilsveis til plate 10mm	34.9 m
Buttsveis 10mm	5.6 m
<b>Totalpris sveis</b>	<b>146 837 kr</b>

Tabell 11-5 Kostnad sveis, stål

Alle profiler: S355				
Profiler	Vekt per m.	Total lengde	Samlet vekt	Samlet pris med 20%
HE 260 B	93.0 kg	319.6 m	29 711 kg	772 486 kr
HE 500 B	187.4 kg	157.9 m	29 417 kg	764 842 kr
HE 550 B	199.5 kg	15.7 m	3 133 kg	81 458 kr
HE 600 B	212.0 kg	58.1 m	12 319 kg	320 294 kr
100x100x10	27.4 kg	19.4 m	532 kg	13 832 kr
150x150x8	35.2 kg	149.7 m	5 268 kg	136 968 kr
200x200x10	58.8 kg	214.0 m	12 591 kg	327 366 kr
200x200x12.5	72.3 kg	68.0 m	4 921 kg	127 946 kr
Totalvekt			97 891 kg	
Totalpris inkludert sveis, med 20% tillegg			2 545 192 kr	
Per kg med 20% tillegg			26 kr per kg	

Tabell 11-6 Kostnadsestimat profiler og sveis stål

### 11.3 Økonomisk sammenligning av aluminiums- og stålutførelse

Nedenfor ligger tabeller for sammenligning av kostnadene til de to modellene.

Aluminiumsprofilene koster minst i denne sammenligningen, men medregnet svekkelser grunnet HAZ blir kostnadene annerledes. Når det gjelder sveisekostnadene, har det blitt brukt to forskjellige metoder for å estimere kostnadene. Ut fra beregningene er aluminiumsveisingen litt dyrere enn for stål. Den store prisforskjellen er på grunn av at det er større mengder sveis på aluminiumsmodellen.

Det er viktig å påpeke at aluminiumsmodellen er dimensjonert etter flytegrensen til materialet, uten å ta hensyn til svekkelsene på grunn av HAZ. Det betyr at det i realiteten måtte blitt brukt et større volum aluminium, som igjen ville ført til økte kostnader. For å klare kravene til bæreevne med lavere flytegrense grunnet HAZ, er det nødvendig med større profiltverrsnitt og mulighet for større underbygning. På grunn av økning av materiale er det gjort antagelser som tilsier at konstruksjonen ville blitt 50% tyngre. For å beregne kostnaden for dette tilfellet er kiloprisen for ferdige aluminiumsprofiler multiplisert med den antatte økte totalvekten.

Sveisekostnadene er antatt 20% høyere

Kostnadene ekskludert monteringskostnader er vist nedenfor.

#### Aluminium

Vekt	31 889 kg
Profiler	1 834 168 kr
Sveis	490 997 kr
<b>Totalt aluminium</b>	<b>2 325 265 kr</b>
Per kg bru	72.9 kr per kg

Tabell 11-7 Totale kostnader for de to modellene

#### Stål

Vekt	97 891 kg
Profiler	2 398 356kr
Sveis	146 837 kr
<b>Totalt stål</b>	<b>2 545 192 kr</b>
Per kg bru	26 kr per kg

#### Antatt 50% vektøkning aluminium

Vekt 50% økning	47 834 kg
Profiler	2 750 455 kr
Sveis	589 196 kr
<b>Totalt aluminium</b>	<b>3 339 651 kr</b>
Per kg bru	69.8 kr per kg

Tabell 11-8 Totale kostnader 50% vektøkning aluminium

Kostnader tilknyttet levetiden, i form av overflatebehandling og større renoveringsprosjekter bør også tas med i betraktningen når disse modellene skal sammenlignes. Stålmodellen vil få løpende kostnader tilknyttet vedlikehold, hvor aluminiumsmodellen vil kunne stå tilnærmet vedlikeholdsfritt. Vedlikeholdskostnader er ikke beregnet her. En hypotetisk livsløpskostnad for en bru i aluminium og i stål er diskutert i kapittel 12.3.

Frakt og kostnader tilknyttet dette er også noe som kan diskuteres, da aluminiummodellen veier vesentlig mindre enn stålmodellen. Det krever mindre å frakte materialet for aluminiumsmodellen, og derav vil det også koste mindre. I tillegg er det tenkt at aluminiumsprofilene kommer rett ut fra Hydals produksjon på Raufoss. Det er dermed veldig kortreist og kan spare både økonomien og miljøet.

## 12 Diskusjon

### 12.1 Dimensjonering

#### 12.1.1 Design

Det ble valgt tilnærmet likt design for både aluminium- og stålmodellen. Stålmodellen ble primært designet med bakgrunn fra aluminiumsbrua. Under de forutsetninger som er gitt, kan det tenkes at en annen tilnærming til design for stålbrua vil være mer fordelaktig med tanke på optimalisering. Det er derimot ikke sagt at aluminiumsutførelsen er 100% optimalisert. Mer tid og ressurser til designet kunne gitt et bedre konstruert fagverk.

#### 12.1.2 Standarder

Tilgang på standarder og støttelitteratur er essensielt for dimensjoneringsarbeidet. Det er ikke til å legge skjul på at det finnes vesentlig mer av dette for stål. Spesielt i Norge er det mangel på kjent støttelitteratur angående bruer i aluminium. Dette skyldes selvfølgelig at utførelser i aluminium nesten ikke har blitt praktisert i landet.

Statens Vegvesens håndbok *N400 – Bruprosjektering* inneholder egne kapitler for stålbruer, men ikke for aluminiumsbruer. Dermed er det bare Eurokode sine standarder som ligger til grunn for dimensjonering. Disse standardene er også grunnlaget for dimensjoneringen i stål, men for stål finnes det i tillegg annen støttelitteratur rettet direkte mot brubygging i Norge. For bruingeniører gjør slik støttelitteratur jobben mye enklere. For å komme dit kreves mer forskning og praksis. Prosjektet AluBridge jobber med akkurat dette.

Eurokode 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner inneholder blant annet ikke reduksjonsfaktorer for friksjonssveising. Dersom denne sveisemetoden skulle være aktuell, finnes det ikke standardiserte verdier på reduksjon i flytespenning. Selv om denne metoden ikke er aktuell for gjeldende konstruksjon, gir det en pekepinn på manglende litteratur.

#### 12.1.3 Svekkelser på grunn av HAZ

Hele modellen i aluminium er dimensjonert etter flytespenningen 260 MPa. Dersom svekkelsene påført av sveisesnitt i HAZ hadde blitt tatt med, ville flytespenningen vært bare 125 MPa. Dette er den største avgrensningen som er gjort, og har mye å si for sluttresultatet.

Det er noe konservativt, men det er vanlig å prosjektere hele konstruksjoner i aluminium med redusert flytespenning grunnet HAZ. Dette er for enkelhetens skyld, og fordi det skal være mulighet for eventuelle reparasjonssveiser. Grunnen til at dette anses som konservativt, er at det kun er 30 mm utstrekning på sonen rundt sveisen som får svekkede egenskaper. Modellen som er presentert, er prosjektert uten å ta hensyn til svekkelsene på grunn av HAZ. Det vil si at bæreevnen i realiteten er mindre.

Programvaren som er brukt benytter seg av bjelke-element metoden. Også dette gjør at dimensjonering med tanke på HAZ utgår. Denne metoden tar ikke hensyn til såpass lokale fenomener. For å undersøke disse sonene kreves andre beregningsverktøy, hvor mer detaljerte analyser i gitte snitt kan undersøkes.

Kapittel 8 viser at aluminiumsmodellen har kapasitet til gjeldende lastkombinasjoner, men dette er altså med flytespenningen til materialet før det er påført sveis. Skulle brua blitt dimensjonert med redusert flytespenning, måtte det nok vært tilgang på kraftigere profiler, eventuelt vært mulighet for et større underbygd fagverk.

Denne forenklingen gir dermed aluminiumsutførelsen en stor fordel i kostnadsberegningen når den skal sammenlignes med ståluftførelsen. Det vil i realiteten kreves et større volum aluminium i en slik konstruksjon.

#### **12.1.4 Størrelse på aluminiumsprofiler**

I kontakt med Hydal Aluminium Profiler ble det kjent at det største tilgjengelige aluminiumsprofilet er XFR200x200x10. Det skulle vise seg å være en stor utfordring for prosjektering av brua. Begrensninger på kapasiteten i profilet ledet til designet av brua. Løsningen ble fagverksbjelker i underbygningen for å fordele kreftene best mulig.

Hvis det hadde vært samme utvalg av profiler for aluminium, som det er for stål, ville nok dimensjoneringen gått mye enklere. Økte tverrsnitt ville gitt større bæreevne, og dermed kunne muligens brua blitt dimensjonert med svekkelsene i HAZ. Også design og utforming kunne blitt betraktelig enklere. Det er mulig å få tak i større profiler i Tyskland, men for denne oppgaven var det ønskelig å benytte profilene til Hydal.

En løsning på problemet, kan være å sveise sammen større profiler. Dette kunne i teorien blitt gjort, men ville gitt store kostnader. I tillegg ville det sammensveiste profilet fått svake punkter på grunn av uheldige sveisesnitt. Da kan det videre diskuteres om disse sveisesnittene i profilet vil ha noe å si dersom hele konstruksjonen dimensjoneres etter reduserte HAZ-verdier. Det er



en vanskelig vurdering, men det vil helt klart ikke være fordelaktig å ha sveisesnitt i profilene med tanke på utmatting og sprøbrudd.

### **12.1.5 Liten underbygning**

Nysethvegen bru dimensjoneres for å kunne håndtere 200 års flom. Det gir store begrensninger på brua sin underhøyde. I samråd med veiledere er det bestemt at det maksimalt kan være 1,2 m fra overflate kjørebane til underside bru.

Med de profilene som er gjeldende for aluminium ble det nødt å lages et underbygd fagverk for å takle de spenningene brua blir utsatt for. Det kan tenkes at med dypere analyser av vannstand ved flom, vil det kunne prosjekteres med større underhøyde, men dette kan også slå tilbake i form av enda strengere krav for underhøyden.

For ei stålbru vil det være flere muligheter for underbygningen. Her finnes det store profiler som kan brukes som underbygning. Det kan diskuteres om det ville vært mer hensiktsmessig å prosjektere ei bjelkebru i stål som et alternativ til aluminiumsbrua. Det ville kanskje vært enklere og mer økonomisk. For best mulig sammenligning, mellom aluminium og stål som materiale i bruer, ble det bestemt å prosjektere en fagverksutførelse i begge materialene.

### **12.1.6 Utmatting**

Utmatting i aluminiumskonstruksjoner burde undersøkes, da materialet er relativt mykt og spesielt utsatt for utmatting. Særlig knutepunkter og brå overganger er utsatt for eventuelle utmattingsbrudd. Dette er et viktig fenomen, som ikke er tatt med i beregningene i denne oppgaven. Knutepunktsproblematikk er et komplisert, men veldig viktig tema når det gjelder bruprojektering. Avanserte analyser skal til for å få undersøkt utsatte snitt.

Det kan tenkes at det er for lite retningslinjer for ingeniører knyttet til utmattingsproblematikken i aluminium. Det er kjent at det er et problem, men normer og retningslinjer for gode løsninger er ikke til stede på samme måte som for stål. Disse løsningene er absolutt på vei opp og fram, men enn så lenge har stål kommet lengre på veien.

## 12.2 Miljø

Tilgang på fornybar energi gjør at aluminium- og stålproduksjon i Norge har et lavere karbonavtrykk enn ellers i verden. Vannkraften fra den norske fjellheimen gir produksjonen av aluminium et veldig attraktivt miljøregnskap. Teknologi og avanserte metoder gir resirkulert aluminium enda bedre miljøregnskap. På verdensbasis er store deler av produksjonslinjene til begge metallene drevet på kull. Dette gir høye CO<sub>2</sub>-utslipp. Dermed vil CO<sub>2</sub>-fotavtrykket variere veldig ut fra hvilken produksjon materialet er hentet fra.

Om en utførelse i stål eller en utførelse i aluminium er best for miljøet, er vanskelig å si. Det varierer ut fra produsent og geografisk område. Det finnes aluminiums-serier som er vesentlig mer miljøvennlig enn gjennomsnittlig aluminium. Viser til Hydro CIRCAL 75R, som inneholder minst 75% skrapmetall. En utførelse i slikt aluminium ville gitt bedre miljøregnskap, enn gjennomsnittlig stål. Men også stålet kan produseres fra skrapmetall, som vil gi bedre miljøregnskap, enn for gjennomsnittlig aluminium.

Både aluminium og stål er metaller som i høyeste grad kan gjenvinnes. Som skrevet i kapittel 4.9 kreves det veldig lite energi for å resirkulere aluminium, mye på grunn av det lave smeltepunktet. For stål er smeltepunktet en god del høyere, og krever mer energi. Høy grad av gjenbruk av skrapmetallene vil gi mindre behov for uthenting av råvare til produksjon av nytt metall. Det er utelukkende positivt med gjenbruk, uavhengig om det er aluminium eller stål. Det har i mange år blitt resirkulert skrapmetall, og det vil i årene fremover bli enda viktigere for å oppnå det grønne skiftet.

Vedlikehold på ei stålbru vil også slå ut på miljøregnskapet. Arbeidet og overflatebehandlingen som brukes på ei stålbru i løpet av 100 år vil utgjøre store miljøutslipp, sammenlignet med ei bru utført i aluminium. Transporten av de to materialene kan også diskuteres, da stål er tyngre. I stor skala vil reduksjon i vekt på transport slå ut på miljøregnskapet.

Hydal Aluminium Profiler holder til i Raufoss Industripark og kan ekstrudere lokale aluminiumsprofiler. Brua kan være god promotering for norskprodusert, kortreist og bærekraftig aluminium.

## 12.3 Økonomi

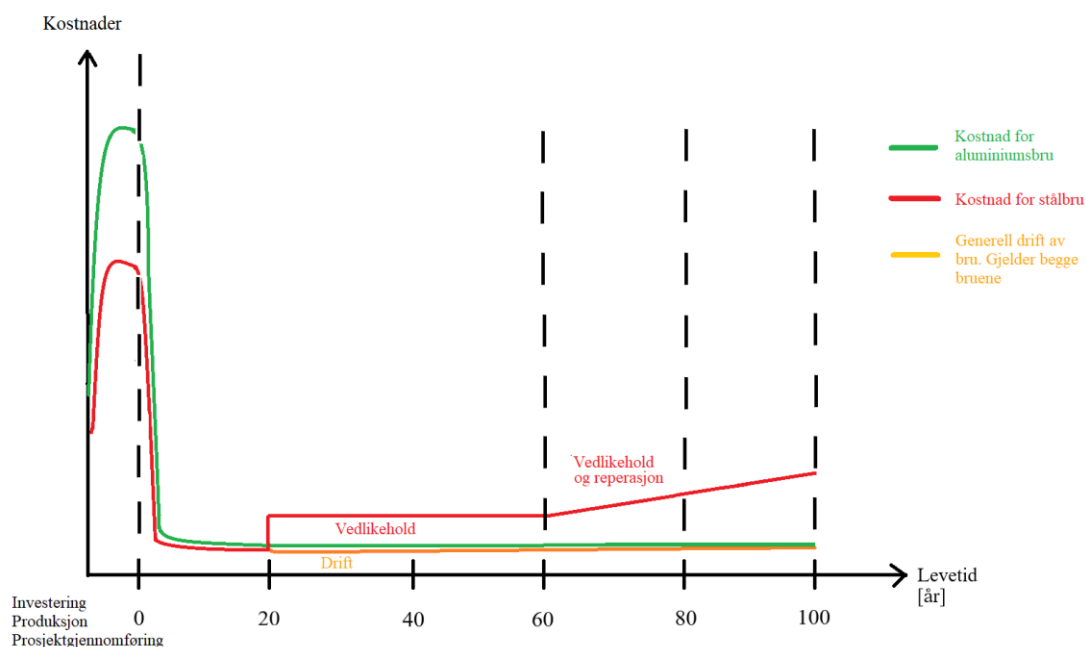
Som vist i kapittel 11.3 vil stålbrua være noe dyrere for selve materialet og sveis. Dette er en pris som er funnet uten monteringskostnader og uten dimensjonering etter HAZ-reduksjon i aluminiumskonstruksjonen. Det er i denne oppgaven tenkt at nesten all sveising på

aluminiumskonstruksjonen skjer på byggeplass, mens for stålbrua, vil mesteparten av sveiseoperasjoner skje på fabrikk. Det kan derfor tenkes at det vil forekomme store prisforskjeller på monteringsarbeidene i favør stålmodellen. Dersom man kombinerer dette med ei aluminiumsbru dimensjonert med HAZ-reduksjon vil aluminiumskonstruksjon være dyrest å etablere.

Selv om en aluminiumsutførelse vil være en dyrere førstegangsinvestering, krever den veldig lite kostnader under levetiden sin i form av vedlikehold. Stålbruer er derimot kjent for å ha vedlikeholdskostnader knyttet til dem. Med tanke på at brua skal holde i 100 år og med vedlikeholdsbehov på intervaller mellom 20- og 50 år for stålbruer, vil nok den totale summen havne høyere for en stålbru enn for ei aluminiumsbru.

Råvareprisene på aluminium og stål har fått et skikkelig prisløft det siste året. Begge bruene hadde vært betydelig billigere å realisere i starten av 2020 enn i 2021. Fra bunn korona til mai 2021 har metallprisene for aluminium og stål steget med 50 prosent.

Det er i Figur 12-1 laget en hypotetisk modell for livsløpskostnader knyttet til de to bruene ved dimensjonert levetid på 100 år. Investeringskostnadene forbundet med prosjektgjennomføring kan variere noe, men generelt sett vil modellen reflektere det som er diskutert lengre opp i dette kapittelet.



Figur 12-1 Hypotese om livsløpskostnader for en bru i aluminium og stål (Egenprodusert)

Denne hypotesen er med de forutsetninger at det er tilnærmet likt design. Det kan som nevnt under diskusjon om design tenkes at det vil være mer realistisk med to forskjellige design. To forskjellige design på utførelsene ville trukket frem styrkene til det materialet som brukes. For å få en så rettferdig sammenlikning som mulig, er det valgt å holde de to designene ganske like.

## **12.4 Feilkilder**

### **12.4.1 Kunnskap og litteratur**

Fra håndboken *N400 – Bruprosjektering* står det ingenting som er direkte knyttet til dimensjonering i aluminium. Det som står i *Eurokode 9* om dimensjonering i aluminium anses som helt korrekt. Det kan være feil eller mangler som er gjeldende for bruprosjektering i Norge. Antagelser og feiltolkninger som er gjort fra standarder og håndbøker, kan også være en feilkilde i oppgaven.

### **12.4.2 Dimensjonering og modellering**

Dimensjoneringen har i stor grad foregått i programmet Robot Structural Analysis. Resultatene fra programmet har blitt ansett som korrekte, da det har blitt kontrollert for enklere lastmodeller. Her ligger det potensielt en stor feilkilde. Noen snitt har blitt kontrollert med håndberegninger, som har vist seg å stemme overens med programmet. Det betyr dermed ikke at alt som er tatt ut av Robot er korrekt. Viktigheten av å være kritisk til verdiene som plottes inn kontra verdiene som kommer ut, kommer til syne her. Feil i modellen kan føre til store misvisninger når det kommer til resultatet.

Når det gjelder kapasitet for kilsveis, er det brukt en forenklet beregningsmetode for sveisegrupper. Denne metoden er ansett som konservativ og vil gi mindre kapasitet enn hva detaljert spenningsberegning ville gitt. Ut fra dette kan det tenkes at kilsveisene i realiteten kunne hatt mindre a-mål. Men igjen, svekkelsene fra HAZ er ikke tatt med i dimensjoneringen. Hvilket betyr at sveisene i realiteten vill hatt betydelig lavere kapasitet.

### **12.4.3 Kostnadsestimater**

Ved kostnadsberegninger av brua kan det foreligge flere store og små feilkilder. Det kan være seg både ved selve dimensjoneringen og ved innhenting av pris. Under er det skrevet om de største feilkildene som påvirker prisberegningen.

Priser for både stål- og aluminiumsprofiler er hentet inn rundt samme tid, men begge materialer er preget av et marked med store prissvingninger. Dette kan føre til at kostnadsberegningene i denne oppgaven vil kunne avvike fra virkeligheten om kun kort tid.

For innhenting av priser for aluminiumsprofiler er det kun brukt kun en leverandør. Det kan tenkes at prisen som er gitt av leverandøren er for god, og at brua ikke vil være realiserbar til den prisen som kommer frem i oppgaven.

Stålprofilprisene som foreligger i rapporten, er inkludert sveising på verksted. Disse prisene er spesifisert som et estimat for bestilling av et større kvantum stål. Her vil det i likhet med aluminiumsprisene kunne foreligge avvik fra denne rapporten i forhold til virkeligheten.

Sveiseprisene for aluminium ble som nevnt i kapittel 11.1 hentet fra rapporten til Langenuen. De priser som er oppgitt anses som meget realistisk. Det er derimot gjort antagelser på hvilke prisgrupper som kan brukes for aluminiumskonstruksjonen, noe som vil føre til merkbar prisforskjell på aluminiumsbrua dersom disse antagelsene ikke er korrekte.

## 13 Konklusjon

Ut fra de funn og beregninger gjort i denne oppgaven konkluderes det med at et aluminiumsalternativ vil være en god konkurrent mot en mer tradisjonell stålutførelse for nye Nysethvegen bru. Det lette metallet gir mulighet for en konstruksjon med lav egenvekt. En aluminiumsutførelse vil også kunne stå tilnærmet vedlikeholdsfritt, i motsetning til en utførelse i stål. Kostnadmessig kommer også aluminium godt ut. Dette er gitt de avgrensningene som er satt.

For en mer realistisk gjennomføring vil det måtte foretas flere beregninger, da spesielt med tanke på utmatting og HAZ-reduksjon på grunn av sveis i aluminiumsbrua. Når det gjelder Nysethvegen bru gir kombinasjonen av begrenset størrelse på aluminiumsprofiler og begrenset høyde på underbygning store utfordringer. Tilgang på større profiler ville gjort fagverksbrua i aluminium mer realistisk gjennomførbar.

Slik oppgaven er gjennomført vil aluminiumsbrua være billigere enn stålbrua. En antatt aluminiumsutførelse, medregnet HAZ-svekkelser, vil derimot være dyrere å etablere enn stålutførelsen. Dersom man ser på hele livsløpet til begge bruene, vil aluminiumsbrua være et bærekraftig og kostnadseffektivt alternativ til en mer tradisjonell stålutførelse.

## 14 Veien videre

Læringsprosessen har vært både utfordrende og spennende. Som nevnt i tidligere kapitler er det gjort en rekke forenklinger og avgrensninger, tilpasset oppgavens formål og omfang. Det har blitt lagt vekt på forskning og utvikling for å komme fram til et så godt resultat som mulig. Videre gjenstår det mye arbeid for å kunne avgjøre sikkert hvorvidt aluminium egner seg til bruk i tilsvarende korte bruer.

Det forskes på flere temaer som kan være med å løse problemene knyttet til aluminium i bruer. Blant annet pågår det stadig utvikling av forbedrede legeringer, da spesielt for å takle sveising bedre. Ett annet spennende område er 3D-printing. Hvis det gjøres mulig å printe utsatte knutepunkter, kan det være med på å løse mange problemer. Også produksjon av større profiler vil være svært hjelpelig for bruprosjektering. I samtale med eksterne veiledere har det kommet fram at man får tak i større profiler i blant annet Tyskland.

Denne oppgaven kan være inspirasjon til videre arbeid knyttet opp mot de utfordringer som er nevnt tidligere. Det kreves mer forskning på bruken av aluminium i bruer for å kunne ta i bruk materialet i større skala.

## Referanseliste

1. **SINTEF**. sintef.no. *Om SINTEF*. [Internett] 01 01 2020. [Sisert: 20 02 2021.] <https://www.sintef.no/om-sintef/>.
2. **Olafsen, Stian**. Sakspapirer og tilstandsrapport - Skolebrua, Vestre Toten kommunestyre. *Vestre Toten Kommune*. [Internett] 30 04 2020. [Sisert: 15 03 2021.] <https://www.vestre-toten.kommune.no/globalassets/tjenesteomrader/politikk-og-innsyn/backup-sakspapirer-2---kommunestyre/2020-04-30-sakspapirer-kommunestyret-.pdf>.
3. **Olsen, O**. Statens Vegvesen. *The E39 Coastal Highway Route*. [Internett] Statens Vegvesen, 28 10 2019. [Sisert: 01 02 2021.] <https://www.vegvesen.no/en/roads/Roads+and+bridges/Road+projects/e39coastalhighwayroute>.
4. **Google maps**. Nysethvegen bru. [Internett] [Sisert: 22 04 2021.] <https://www.google.no/maps/search/brunch+n%C3%A6r+Nysethvegen,+Raufoss/@60.7488881,10.4037248,11z/data=!3m1!4b1>.
5. **Kommune, Vestre Toten**. OmrådereguleringRaufoss Industripark. *Vestre Toten kommune*. [Internett] Raufoss Industripark AS, Sweco AS, 13 12 2019. [Sisert: 10 02 2021.] [https://www.vestre-toten.kommune.no/globalassets/kunngjoringer-og-nyheter/2020/omraderegulering-for-raufoss-industripark/0\\_0-planbeskrivelse\\_raufoss-industripark\\_sweco-des2019.pdf](https://www.vestre-toten.kommune.no/globalassets/kunngjoringer-og-nyheter/2020/omraderegulering-for-raufoss-industripark/0_0-planbeskrivelse_raufoss-industripark_sweco-des2019.pdf).
6. **Karlsen, Iven Erga og Ole Steen**. *Tilstandsrapport for bruk av aluminium i bruer*. 2017.
7. **Hydal Aluminiumsprofiler, PowerPoint**. [Internett] 20 01 2021. [Sisert: 05 02 2021.]
8. **Statens vegvesen**. *Håndbok N100 - Veg- og gateutforming*. s.l. : Statens vegvesen, Vegdirektoratet, 2019. ISBN: 978-82-7207-744-9 .
9. **Kartverket**. Norgeskart. [Internett] [Sisert: 03 05 2021.]
10. **Statens Vegvesen**. *Håndbok N400 bruprosjektering: Prosjektering av bruer, ferjekaier og andre bærendekonstruksjoner*. Oslo : Statens Vegvesen, Vegdirektoratet, 2015. ISBN: 978-82-7207-680-0.
11. **ÅSE DRAGLAND, SINTEF**. TU.no. [Internett] Teknisk Ukeblad, 04 06 2015. [Sisert: 28 01 2021.] <https://www.tu.no/artikler/bygg-star-for-40-av-verdens-utslipp-slik-skal-det-reduseres/223922>.
12. **Bjørn Pedersen, UiO**. snl.no. *Aluminium - Historikk*. [Internett] 08 04 2018. [Sisert: 10 02 2021.] <https://snl.no/aluminium#-Historikk>.
13. **Nickelsen, Trine**. apollon.uio.no. *Aluminium - en kulturhistorie*. [Internett] Apollon Forskningsmagasin, 01 02 2012. [Sisert: 10 02 2021.] <https://www.apollon.uio.no/artikler/2010/aluminium.html>.
14. **Pedersen, Bjørn**. snl.no. *Elektrolyse*. [Internett] 01 09 2019. [Sisert: 10 02 2021.] <https://snl.no/elektrolyse>.
15. **Gram, Trond**. snl.no. *Stangfjorden Elektrokemiske Fabriker*. [Internett] 27 11 2012. [Sisert: 10 02 2021.] [https://snl.no/Stangfjorden\\_Elektrokemiske\\_Fabriker](https://snl.no/Stangfjorden_Elektrokemiske_Fabriker).
16. **Hydro, Norsk**. hydro.com. *Reduxa - Lavkarbonaluminium*. [Internett] 01 01 2021. [Sisert: 07 03 2021.] <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/produkter/lavkarbonaluminium/reduxa/>.
17. **Ole Øystein Knudsen, Dirk Nolte, Rune Gaarder, Tor Arne Hammer**. svv.no. *Nye materialer for bruk i tunnel og bru*. [Internett] Statens Vegvesen, 01 11 2016. [Sisert: 12 02 2021.] <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2624800/SVV%20rapport%20557%20Nye%20materialer%20for%20bruk%20i%20tunnel%20og%20bru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
18. **Kolbeinsen, Leiv**. Store Norske leksikon. [Internett] 31 08 2020. [Sisert: 26 04 2021.] <https://snl.no/bessemersprosessen>.



19. **European committee for standardization.** *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del-1-1: Almenne laster. Tetthet, egenvekt og nyttelast i bygninger.* s.l. : Standard Norge, 2002. NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2019.
20. —. *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. Del 2: Trafikklast på bruer.* s.l. : Standard Norge, 2003. NS-EN 1991-2:2003+NA:2010.
21. **European committee of standardization.** *Eurokode 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner Del 1-1: Almenne regler.* s.l. : Standard Norge, 2007. NS-EN 1999-1-1:2007+A1:2009+NA:2009.
22. **Per Kr. Larsen, Arild H. Clausen, Arne Aalberg.** *Stålkonstruksjoner, Profiler og formler.* [bokforf.] NTNU Institutt for konstruksjonsteknikk. s.l. : Fagbokforlaget.
23. **European committee of standardization.** *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. Del 1-5: Allmenne laster. Termiske påvirkninger.* s.l. : Standard Norge. NS-EN 1991-1-5:2003+NA:2008.
24. **Pedersen, Helmut Ormestad og Bjørn.** snl.no. *Varmeledningsevne.* [Internett] 27 10 2020. [Sisert: 09 02 2021.] <https://snl.no/varmeledning>.
25. **Hydal.** Profilhåndbok. *Hydal.* [Internett] [Sisert: 18 03 2021.] [https://hap.hydal.com/download-file.php?file\\_id=1661&temp\\_id=71880976](https://hap.hydal.com/download-file.php?file_id=1661&temp_id=71880976).
26. **European committee of standardization.** *Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner.* s.l. : Standard Norge, 2002. NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016.
27. **Hydro.** Livssyklusen til aluminium. [Internett] 2019. [Sisert: 17 03 2021.] <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/om-aluminium/livssyklusen-til-aluminium/>.
28. **Skanaluminium.** Produktutvikling med aluminium. s.l. : ISBN 82-992805-0-8, 1992.
29. **Hydro.** Aluminiumslegeringer. [Internett] [Sisert: 05 03 2021.] (<https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/om-aluminium/legeringer/>).
30. **Johansen, Henning.** *Materiallære ingeniør.* [Internett] 2009. [Sisert: 05 03 2021.] <https://folk.ntnu.no/hennj/materialteknologi/materialteknologi/Styrkeberegning/arbeidsplan/Kompendier/Materiallaere-aluminium-kompendium-08.06.2012.pdf> .
31. **Hydro.** 6082 Aluminium. [Internett] [Sisert: 05 03 2021.] <https://www.hydro.com/en-us/profiles/6082-aluminum/> .
32. **Hydal.** Prosessen fra ide til ferdig leveranse. [Internett] [Sisert: 18 03 2021.] <https://hap.hydal.com/179/hva-gjor-vi-2/ekstrudering/prosessen-fra-ide-til-ferdig-leveranse>.
33. —. Produksjon av profiler. [Internett] [Sisert: 18 03 2021.] <https://hap.hydal.com/227/hva-gjor-vi-2/ekstrudering/produksjon-av-profiler>.
34. **Alumeco.** Sveising . [Internett] Alumeco. [Sisert: 16 03 2021.] <https://www.alumeco.no/kunnskap-og-teknikk/maskinbearbeiding/sveising?s=0> .
35. **Pedersen, Bjørn.** Store Norske leksikon. [Internett] Oslo, 2020. [Sisert: 16 03 2021.] <https://snl.no/varmeledning>.
36. **Wikipedia.** Aluminium, fysikalske egenskaper. [Internett] 2020. [Sisert: 17 03 2021.] <https://nn.wikipedia.org/wiki/Aluminium>.
37. **Pedersen, Bjørn.** Store Norske leksikon. [Internett] Oslo, 2019. [Sisert: 16 03 2021.] <https://snl.no/varmekapasitet>.
38. **Norsk Hydro.** Hydro Friction Stir Welding. *Norsk Hydro ASA.* [Internett] 2021. [Sisert: 17 03 2021.] <file:///C:/Users/marku/Downloads/Hydro%20Friction%20Stir%20Welding.pdf>.
39. **Gold, Ian.** AINonline. [Internett] 2013. [Sisert: 23 03 2021.] <https://www.ainonline.com/aviation-news/aviation-international-news/2013-07-02/wideroe-extends-dash-8-100-service-life>.

40. **Marine Welding Company.** Welding stainless steel vs aluminium. [Internett] [Sisert: 23 03 2021.] <https://mewelding.com/stainless-steel-vs-aluminum/>.
41. **Withey, P.A.** Fatigue failure of the de Havilland comet I. [Internett] 1996. [Sisert: 23 03 2021.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630797000058>.
42. **Regjeringen.** Fornybar energiproduksjon i Norge. [Internett] 2014. [Sisert: 22 02 2021.] <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/fornybar-energi/fornybar-energiproduksjon-i-norge/id2343462/>.
43. **Hydro.** Renewable power and aluminium. [Internett] [Sisert: 17 03 2021.] <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/om-aluminium/renewable-power-and-aluminium/>.
44. **Bryhn, Rolf.** snl.no. *Norsk Hydro*. [Internett] 05 03 2021. [Sisert: 10 03 2021.]
45. **Nickelsen, Trine.** *Hydro i regnskogen*. s.l. : UiO, 2019. Vol. Hentet: 20.03.2021.
46. **Hydro.** Hydro CIRCAL. [Internett] [Sisert: 19 03 2021.] <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/produkter/lavkarbonaluminium/circal/>.
47. **Olsen, Dr. Techn O.** *Langenuen suspension bridge aluminium bridge girder alternative*. s.l. : 26.06.2020, Statens vegvesen. 12795-OO-R-001.
48. **Hydro.** EU- ordning kan fremme norske lavkarbonprodukter. 2020, <https://www.hydro.com/no-NO/media/news/2020/eu-ordning-kan-fremme-norske-lavkarbonprodukter/>.
49. **Norsk Industri.** *Aluminiumsbransjen*. [Internett] [Sisert: 29 04 2021.] <https://www.norskindustri.no/bransjer/aluminium/om-aluminiumsbransjen/>.
50. **Nordnet.** nordnet.no. *Aluminiumspris, Nordnet*. [Internett] 29 04 2021. [Sisert: 29 04 2021.] <https://www.nordnet.no/market/indicator/aluminium>.
51. **Packard, John.** The Fabricator. *Metamaterials, steel prices*. [Internett] 18 01 2021. [Sisert: 29 04 2021.] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/blog/metalsmaterials/steel-prices-reach-levels-not-seen-since-2008>.
52. **Pedersen, Lars Håkon.** NRK. [Internett] 02 06 2018. [Sisert: 27 04 2021.] <https://www.nrk.no/osloogviken/den-nye-svinesundbrua-er-full-av-rust-1.14053226>.
53. **Christensen, Nils.** Store Norsk leksikon. [Internett] 2019 04 11. [Sisert: 27 04 2021.] <https://snl.no/st%C3%A5l>.
54. **Norsk Stål.** Norsk Stål. [Internett] [Sisert: 27 04 2021.] <https://www.norskstaal.no/om-oss/miljoe-og-baerekraft/groennere-staalproduksjon-i-dag>.
55. **Statens Vegvesen.** *Håndbok 412 Bruklassifisering*. s.l. : Vegdirektoratet , 2014. ISBN: 82-7207-537-7.

## Figurliste

Figur 1-1 Illustrasjon laget i Archicad.....	6
Figur 2-1 Oversiktsbilde av Nysethvegen bru. Brusted markert i rødt – Nord (N) oppover. (4) .....	11
Figur 2-2 Gamle Nysethvegen bru. Sett fra oversiden damanlegg. (7) .....	11
Figur 2-3 Gamle Nysethvegen bru på vinterstid. Flatt og rolig sentrum (7) .....	12
Figur 2-4 Skisse av gamle Nysethvegen bru. Fra sakspapirene til Vestre Toten kommune (2) .....	12
Figur 2-5 Bredde tilstøtende veg (9) .....	14
Figur 2-6 Fri bredde $a < 1.0$ m for bru med overliggende bæring .....	15
Figur 2-7 Kapasitetskurve for dam Hunnselva.....	15
Figur 3-1 Tabell 4.1 fra EK-1-2 (20 s. 33) .....	20
Figur 3-2 Figur 4.2a) fra EK-1-2 (20 s. 37).....	22
Figur 3-3 Tabell 4.2 fra EK-1-2 (20 s. 37) .....	22
Figur 3-4 Tabell 4.3 fra EK-1-2 .....	24
Figur 3-5 Tabell NA.4.4a fra EK-1-2.....	24
Figur 3-6 Tabell NA.A2.4(B) fra EK-0 (26 s. 116).....	29
Figur 4-1 Aluminiumsframstilling 1kg (28).....	33
Figur 4-2 Legeringselementer (30).....	33
Figur 4-3 Profilproduksjon (33) .....	34
Figur 4-4 Ekstruderingspresse Hydal (25) .....	35
Figur 4-5 Friction Stir Welding (38) .....	38
Figur 4-6 S-N kurve (40).....	41
Figur 4-7 Prisutvikling til aluminium (råvare) de siste 5 årene. Årstall på x-aksen. Dollar/tonn på y-aksen (49) ...	43
Figur 6-1 Illustrasjon nr.2 laget i Archicad .....	47
Figur 7-1 Illustrasjon nr.3 laget i Archicad .....	49
Figur 7-2 Aluminiumsmodell.....	51
Figur 7-3 Stålmodell.....	51
Figur 7-4 Prosjekterte bredder.....	52
Figur 7-5 Fri høyde mellom bærene konstruksjoner .....	52
Figur 7-6 Snitt av underbygning .....	53
Figur 8-1 Oppsett av knutepunkt for fagverket .....	55
Figur 8-2 Midlertidig fagverk.....	56
Figur 8-3 Skisse av rammekonstruksjon .....	57
Figur 8-4 Underbygning i tverretning før endring.....	58
Figur 8-5 Underbygning i horisontalretning.....	58
Figur 8-6 Nedbøyning som følge av karakteristisk trafikklast alene.....	58
Figur 8-7 Gr1a(6.10b) .....	59
Figur 8-8 Normalspenninger i bjelke 83 før tiltak.....	59
Figur 8-9 Maks normalspenninger etter "krysslag" i tverrliggende fagverksbjelkenene.....	60
Figur 8-10 Von Mises-spenninger som følge av lastgruppe 1a(6.10b) med boggisystem plassert på midten.....	62
Figur 8-11 Nedbøyning som følge av karakteristisk trafikklast alene.....	63
Figur 8-12 Nedbøyning ved tilnærmet permanent kombinasjon (kun egenlast) .....	64
Figur 8-13 Nedbøyning av laster i lastgruppe 1a, ofte forekommende kombinasjon.....	64
Figur 9-1 Nedbøyning stålmodell.....	66
Figur 9-2 Nedbøyning stålmodell på grunn av tilnærmet permanent kombinasjon .....	67
Figur 9-3 Bruksgrense med ofte forekommende kombinasjon .....	67
Figur 10-1 Utklipp fra Python-script, Biblioteker og definisjoner .....	69
Figur 10-2 Utklipp fra Python-script, Data i fra Robot .....	69
Figur 10-3 Utklipp fra Python-script, Løkke.....	70
Figur 10-4 Utklipp fra Python-script, Aksialkapasitet, kritisk last $N_{Cr}$ og utnyttelsesgrad .....	70
Figur 10-5 Utklipp fra Python-script, Nullstaver .....	71
Figur 10-6 Utklipp fra Python-script, Output fra kontroll.....	71
Figur 12-1 Hypotese om livsløpskostnader for en bru i aluminium og stål.....	81

## Tabelliste

Tabell 3-1 Lastmodeller og egenskaper .....	21
Tabell 3-2 Lastmodeller med karakteristiske trafikklaster .....	23
Tabell 3-3 Gruppering av lastmodeller.....	25
Tabell 3-4 Faktorer for bruddgrensekontroll.....	30
Tabell 6-1 Sammenligning av fysikalske egenskaper, Aluminium og Stål .....	46
Tabell 6-2 Oppsummeringstabell fra vedlegg, sammenligning av aspekter og egenskaper, Aluminium og Stål.....	48
Tabell 8-1 Knutepunktskrefter i fagverket som følge av laster fra figur 3.2-1 i R412 (54 s. 15).....	56
Tabell 11-1 Mengde profiler aluminium .....	72
Tabell 11-2 Kostnadsestimat profiler aluminium.....	73
Tabell 11-3 Prisnivå sveis aluminium .....	73
Tabell 11-4 Kostnad sveis aluminium.....	73
Tabell 11-5 Kostnad sveis, stål.....	74
Tabell 11-6 Kostnadsestimat profiler og sveis stål.....	74
Tabell 11-7 Totale kostnader for de to modellene.....	75
Tabell 11-8 Totale kostnader 50% vektøkning aluminium .....	75

# Vedlegg

Vedlegg A: Artikkel

Vedlegg B: Plakat

Vedlegg C: Beregninger laster

Vedlegg D: Tabell for sammenligning

Vedlegg E: Dimensjonering og modellering

Vedlegg F: Python script

Vedlegg G: Kostnadsberegninger