

# **Hangarbrua - En studie av aluminium som alternativt materiale i brukonstruksjoner**

Hangarbrua - A study of aluminium as an alternative material in bridge structures

**Trondheim Mai 2024**

Henrik Lindland  
Marius Karlsen

Intern veileder:  
Arne Mathias Selberg,  
NTNU

Ekstern veileder:  
Martin Næsgaard Myhre,  
Statens vegvesen

Prosjektnummer:  
2024 - 06

Rapporten er ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for konstruksjonsteknikk

Rapporten er ÅPEN

## **Problemdefinering/prosjektbeskrivelse og resultatmål**

Selv om aluminium tilbyr betydelige fordeler som høy styrke-til-vekt-forhold og korrosjonsresistens, er det mindre vanlig som hovedmateriale i brukonstruksjoner sammenlignet med tradisjonelle materialer som stål og betong. Dette kan skyldes utfordringer knyttet til aluminiums lavere E-modul og utmattingsmotstand, samt mangel på omfattende studier som demonstrerer dens effektivitet og pålitelighet i virkelige prosjekter.

Gjennom denne studien vil vi utføre en evaluering av aluminiums egnethet som konstruksjonsmateriale i en gang- og sykkelbru, ved å kontrollere kapasiteten, analysere mekaniske egenskaper og undersøke miljømessige og økonomiske aspekter, med Statens vegvesen sitt pilotprosjekt «Hangarbrua» som utgangspunkt. Oppgaven vil bidra til å gi kunnskap om aluminium kan møte de strenge kravene til styrke, holdbarhet og økonomisk levedyktighet i brubygging.

Resultatmålene for denne bacheloroppgaven er:

1. Tilegne en solid forståelse av aluminiums mekaniske og strukturelle egenskaper, spesielt i rollen som bærende konstruksjon.
2. Utvikle kompetanse med bruk av dimensjoneringsveiledere og standarder for dimensjonering av aluminiumskonstruksjoner.
3. Vurdere miljømessige og økonomiske aspekter rundt bruk av aluminium i brukonstruksjoner.
4. Forstå forskjellene mellom aluminium og stål i brukonstruksjoner, og inneha kunnskap om fordeler og ulemper.

Stikkord fra oppgaven:

Brukonstruksjon, aluminium, HAZ, stål, dimensjonering, nettverksbuebru, Hangarbrua

## Forord

Bacheloroppgaven er utarbeidet av to studenter tilknyttet institutt for konstruksjonsteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Bacheloroppgaven er gjennomført våren 2024, består av 20 studiepoeng, og er den avsluttende delen av en bachelorgrad innen bygg.

Bacheloroppgaven skal bidra med å belyse aluminium som byggemateriale og aluminiumsdimensjonering. Ved utarbeidingen av denne oppgaven erfarte vi at tilgjengelig og relevant informasjon var noe begrenset. Derfor håper vi at denne oppgaven kan være til hjelp for andre studenter som ønsker å lære om dette emnet. Som studenter er vi interesserte i nytenkende metoder og løsninger som kan utvikle bygg- og anleggsbransjen i en positiv retning. Vi ser på Hangarbrua som et ideelt utgangspunkt for å utforske disse interessene videre.

Vi ønsker å takke vår eksterne veileder, Martin Næsgaard Myhre. Vi er svært takknemlige for samarbeidet vi har hatt med deg og din arbeidsgiver, Statens vegvesen, samt all den hjelpen og kunnskapen du har delt med oss. Vi vil også takke vår interne veileder, Arne Mathias Selberg, universitetslektor ved institutt for konstruksjonsteknikk på NTNU, som har både bidratt med gode innspill og råd, samt vist stor interesse for oppgaven vår gjennom hele prosessen. Til slutt vil vi også takke for hjelpen vi har fått fra COWI AS og Leirvik AS.

Trondheim, 20. mai 2024



Henrik Lindland



Marius Karlsen

## Sammendrag

Denne bacheloroppgaven har som formål å undersøke bruken av aluminium som konstruksjonsmateriale i brukonstruksjoner. Studien tar utgangspunkt i Hangarbrua, en gang- og sykkelbru, som skal oppføres på Leangen i Trondheim. Gjennom en omfattende analyse av aluminium sine egenskaper, både positive og negative, og utviklingen fra et ukjent til kommersielt brukt materiale, søker oppgaven å belyse potensialet og utfordringer ved bruken av aluminium.

Arbeidet inkluderer opprettelsen av en digital modell av Hangarbrua ved hjelp av modelleringsverktøyet Revit, og analyse av samme modell i analyseprogrammet Robot Structural Analysis. Gjennomføringen av den globale analysen i Robot Structural Analysis inkluderer blant annet sjekk av spenninger, nedbøyning og utnyttelsesgrad for de ulike elementene i bruene. Det er i tillegg utført kontrollberegninger for bruas strekkbånd for å kontrollere modellens resultater, samt å demonstrere dimensjonering etter regelverket i Eurokode 9.

Funnene i oppgaven kan avsløre at Robot Structural Analysis ikke kan utføre beregninger etter formelverket til Eurokode 9, og tar blant annet ikke hensyn til varmpåvirket sone fra sveis. Dette gjør at sammenligningen mellom dataanalyse og kontrollberegningene blir ugyldig. Resultatene fra kontrollberegningene viser imidlertid at beregning etter Eurokode 9 er fullt gjennomførbart. Selv om det er noen likheter med dimensjonering av stål, må man sørge for at den effektive tykkelsen til tverrsnittet reduseres riktig med tanke på varmpåvirket sone og lokal knekking.

Opgaven konkluderer samlet sett med at strekkbåndet tilfredsstiller de nødvendige kapasitetskravene. Den understreker også potensialet for fremtidig bruk av aluminium, spesielt i prosjekter der vektbegrensninger og miljøhensyn er fremtredende. Imidlertid vil ytterligere forskning og utvikling, sammen med en utvidelse av case-studier basert på faktiske prosjekter, være avgjørende for fullstendig å utnytte aluminiums potensiale som et konstruksjonsmateriale.

## Summary

This bachelor's thesis aims to investigate the use of aluminium as a construction material in bridge structures. The study focuses on *Hangarbrua*, a pedestrian and bicycle bridge to be erected at Leangen in Trondheim. Through a comprehensive analysis of the properties of aluminium, both positive and negative, and its development from an obscure to a commercially viable material, the thesis seeks to illuminate the potential and challenges associated with the use of aluminium.

The work includes the creation of a digital model of *Hangarbrua* using the modelling tool Revit, and analysis of the same model in the program Robot Structural Analysis. The execution of the global analysis in Robot Structural Analysis encompasses checks of stresses, deflections, and utilization rates for the various elements of the bridge. Additionally, control calculations for the tension band have been carried out to verify the model's results and demonstrate compliance with the regulations in Eurocode 9.

The findings of the thesis reveal that Robot Structural Analysis is unable to perform calculations according to the formulas in Eurocode 9 and does not consider the heat-affected zone from welding. This makes the comparison between data analysis and control calculations invalid. However, the results from the control calculations show that calculation according to Eurocode 9 is fully feasible. Although there are some similarities with steel design, it is necessary to ensure that the effective thickness of the cross-section is appropriately reduced considering the heat affected zone and local buckling.

Overall, the thesis concludes that the tension band meets the necessary capacity requirements. It also emphasizes the potential for future use of aluminium, especially in projects where weight constraints and environmental considerations are prominent. However, further research and development, along with an expansion of case studies based on actual projects, will be crucial to fully exploit the potential of aluminium as a construction material.

## Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av Hangarbrua .....	1
Figur 2: Oversikt over hovedsykkelruten mellom Gildheim og Pirbrua .....	8
Figur 3: Oversiktstegning over kranløft.....	9
Figur 4: Oversikt over total aluminiumsproduksjon fra 1994 til 2022 (19) .....	12
Figur 5: Oversikt over aluminiumsproduksjonen i Norge fra 1994 til 2022 (19).....	12
Figur 6: Hall-Héroult prosessen (23) .....	13
Figur 7: Visuell fremstilling på aluminiumsproduksjon (18) .....	13
Figur 8: Ekstrudering av aluminiumsprofil (25).....	18
Figur 9: Visualisering av valseprosess (18) .....	18
Figur 10: S-N-kurve over 1045-stål og 2014-T6-aluminium (29).....	21
Figur 11: Ulike legeringers flytegrense ved økende temperatur (32).....	23
Figur 12: Lastplassering for tjenestekjøretøy (39).....	34
Figur 13: Automatisk kombinerings av laster i RSA .....	41
Figur 14: Egenprodusert modell i RSA .....	44
Figur 15: Lengdesnitt av Hangarbrua benyttet som utgangspunkt ved modellering.....	45
Figur 16: Globalt aksesystem.....	46
Figur 17: Dekkeprofil .....	47
Figur 18: Randbetingelser.....	48
Figur 19: Nedbøying i strekkbånd med karakteristisk trafikklast.....	54
Figur 20: Nedbøying i strekkbånd med permanente laster .....	54
Figur 21: Von Mises-spenninger i ULS.....	55
Figur 22: Skala for utnyttelsesgrad .....	55
Figur 23: Utnyttelsesgrad sett forfra .....	55
Figur 24: Utnyttelsesgrad sett bakfra .....	56
Figur 25: Utnyttelsesgrad sett ovenfra.....	56
Figur 26: Utnyttelsesgrad sett fra undersiden .....	56
Figur 27: Effektiv tykkelse for klasse 4 tverrsnitt med sveis.....	60
Figur 28: CO <sub>2</sub> -utslipp for aluminiumsproduksjon med tre forskjellige primærenergikilder (46)...	64
Figur 29: Andelen av aluminiumsproduksjon produsert med ulike energikilder (46).....	65
Figur 30: Oversikt over aluminiumsprisen i dollar per tonn fra 1990 til 2024 (51).....	68
Figur 31: Valg av designkode i RSA .....	72

## Tabelliste

Tabell 1: Oversikt over forkortelser.....	XI
Tabell 2: Oversikt over eurokoder .....	5
Tabell 3: Egenskaper/informasjon om aluminium (4, 15-17).....	10
Tabell 4: Hovedlegeringselementene med tilhørende AA-nummer og egenskaper (4) .....	14
Tabell 5: Oversikt over deformasjonshending med tilhørende symbol (4).....	15
Tabell 6: Oversikt over hardhetsgradene med tilhørende betegnelse og tykkelsesreduksjon (4)....	15
Tabell 7: Oversikt over ulike konstruksjonsdeler i Hangarbrua med tilhørende legering .....	17
Tabell 8: Egenskaper/informasjon om stål (17, 37, 38).....	24
Tabell 9: Oppsummering av håndberegninger – stål .....	30
Tabell 10: Oppsummering av håndberegninger – aluminium .....	31
Tabell 11: Oversikt over utnyttelsesgrad .....	31
Tabell 12: Terrengkategori og terrengparameter (40) .....	36
Tabell 13: Oppsummering av turbulensintensitet, middelvindhastighet og vindhastighetstrykk....	37
Tabell 14: Bruddgrensetilstander.....	40
Tabell 15: Verdier av $\psi$ -faktorer for gangbruer.....	40
Tabell 16: Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (44) .....	41
Tabell 17: Partielle- og kombinasjonsfaktorer i RSA.....	42
Tabell 18: Dimensjonerende verdier for laster til bruk i lastkombinasjoner .....	43
Tabell 19: Komponenter og tilhørende lengde for modulert bru.....	45
Tabell 20: Konstruksjonsdeler med tilhørende tverrsnittsdimensjoner .....	47
Tabell 21: Påførte laster på den digitale modellen.....	47
Tabell 22: Aksialkrefter i ULS .....	49
Tabell 23: Momenter om sterk akse i ULS .....	49
Tabell 24: Momenter om svak akse i ULS .....	50
Tabell 25: Skjærkrefter i ULS.....	50
Tabell 26: Torsjonsmomenter i ULS .....	51
Tabell 27: Aksialkrefter i SLS .....	51
Tabell 28: Momenter om svak akse i SLS .....	52
Tabell 29: Momenter om svak akse i SLS .....	52
Tabell 30: Skjærkrefter i SLS .....	53
Tabell 31: Torsjonsmomenter i SLS .....	53
Tabell 32: Opptredende krefter og kapasiteter.....	59
Tabell 33: Oppsummering av aluminiumspris i dollar og norske kroner (51) .....	67

# Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag .....	II
Summary .....	III
Figurliste .....	IV
Tabelliste.....	V
Forkortelser .....	XI
1. Introduksjon .....	1
1.1 Oppgavebeskrivelse .....	1
1.2 Avgrensning.....	2
1.2.1 Laster.....	2
1.2.2 Digital modell .....	2
1.2.3 Stål .....	2
1.2.4 Manuelle beregninger .....	2
1.3 Ekstern veiledning .....	3
2. Prosjekteringsgrunnlag .....	4
2.1 Eurokoder.....	4
2.2 Byggforsk håndbok 46.....	5
2.3 Statens vegvesens håndbøker.....	6
2.4 Programvarer.....	6
2.4.1 Revit.....	6
2.4.2 Robot Structural Analysis .....	7
2.4.3 Mathcad 15.....	7
3. Hangarbrua.....	8
4. Aluminium .....	10
4.1 Historie.....	10



4.2	Produksjon .....	12
4.3	Legeringer .....	14
4.4	Ekstrudering og valsing .....	17
4.4.1	Ekstrudering .....	17
4.4.2	Valsing .....	18
4.5	Sveising .....	19
4.5.1	HAZ .....	19
4.5.2	MIG sveising .....	20
4.5.3	TIG sveising .....	20
4.5.4	FSW sveising .....	20
4.5.5	Andre sammenføyningsmetoder .....	20
4.6	Utmatting .....	21
4.7	Korrosjonsbestandighet .....	22
4.8	Temperaturfølsomhet .....	22
5.	Stål .....	24
6.	Materialteknisk sammenligning av aluminium og stål .....	25
7.	Læring om aluminium .....	27
7.1	Innhenting av informasjon .....	27
7.2	Dimensjonering av forenklet modell .....	28
7.2.1	Utgangspunkt og begrensninger .....	28
7.2.2	Forenklet lastsituasjon .....	28
7.2.3	Opptredende moment og skjærkrefter fra forenklet lastsituasjon .....	29
7.2.4	Ståldimensjonering .....	29
7.2.5	Aluminiumsdimensjonering .....	30
7.2.6	Sammenligning .....	31
8.	Laster .....	33

8.1	Permanente laster .....	33
8.1.1	Egenvekt .....	33
8.1.2	Superegenvekt.....	33
8.2	Variable laster .....	33
8.2.1	Vertikale statiske trafikklaster .....	34
8.2.2	Horisontalt statiske trafikklaster .....	35
8.2.3	Snølaster.....	35
8.2.4	Vindlast.....	35
8.2.5	Temperaturlaster .....	37
8.3	Kabelbytte .....	38
8.4	Ulykkeslaster.....	38
8.5	Utmattingslast .....	38
8.6	Grensetilstander og lastkombinering .....	39
8.6.1	Partialfaktormetoden.....	39
8.6.2	Bruddgrensetilstand .....	40
8.6.3	Bruksgrensetilstand.....	42
9.	Digital modell .....	44
9.1	Modellering.....	44
9.2	Beskrivelse .....	44
9.3	Aksesystem .....	46
9.4	Materialer og egenskaper .....	46
9.5	Materialparametere .....	47
9.6	Laster / lastkombinasjoner .....	47
9.7	Randbetingelser.....	48
9.8	Global analyse.....	48
9.9	Opptredende krefter i bruddgrensetilstand.....	48

9.9.1	Aksialkraft.....	48
9.9.2	Moment om sterk akse .....	49
9.9.3	Moment om svak akse .....	49
9.9.4	Skjærkrefter.....	50
9.9.5	Torsjonsmoment .....	51
9.10	Opptredende krefter i bruksgrensetilstand.....	51
9.10.1	Aksialkraft.....	51
9.10.2	Moment om sterk akse .....	51
9.10.3	Moment om svak akse .....	52
9.10.4	Skjærkraft.....	52
9.10.5	Torsjonsmoment .....	53
9.11	Nedbøying.....	53
9.12	Von Mises flytekriterium i bruddgrensetilstand. ....	54
9.13	Utnyttelsesgrad .....	55
10.	Kontrollberegning av strekkbånd med krefter fra RSA.....	57
10.1	Utgangspunkt og begrensninger .....	57
10.2	Opptredende krefter fra RSA-modell.....	57
10.3	Brukte ligninger og tabeller .....	58
10.4	Kontrollberegning.....	58
10.4.1	Momentkapasitet.....	59
10.4.2	Skjærkapasitet .....	60
10.4.3	Strekkapasitet.....	61
10.4.4	Torsjonskapasitet .....	61
10.4.5	Kombinert skjærkrefter og torsjonsmoment .....	62
10.4.6	Kombinert bøyemoment og aksialkrefter .....	62
11.	Bærekraft og miljø .....	64

11.1	Klimafotavtrykk.....	64
11.2	Gjenbruk og resirkulering.....	65
12.	Økonomi .....	67
13.	Diskusjon .....	70
13.1	Dimensjonering.....	70
13.1.1	Manuelle beregninger .....	70
13.1.2	Modell, programvare og global analyse.....	71
13.1.3	Litteratur og standarder.....	73
13.2	Miljø og bærekraft .....	73
13.3	Økonomi .....	74
13.4	Feilkilder .....	75
14.	Konklusjon.....	76
15.	Videre prosess.....	77
	Referanseliste.....	78
	Vedleggsliste.....	85

## Forkortelser

Forkortelse	Betydning
HAZ	Heat affected zone
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
EK	Eurokode
RSA	Robot Structural Analysis
FEM	Finite element analysis
BIM	Bygningsinformasjonsmodellering
AW	Aluminium wrought
AC	Aluminium cast
MIG	Metal inert gas
TIG	Tungsten inert gas
FSW	Friction stir welding
S-N	Stress versus number of cycles
P&F	Profiler og formler
ULS	Ultimate limit state
SLS	Serviceability limit state
EQU	Tap av statisk likevekt
STR	Brudd eller store deformasjoner i konstruksjonen eller konstruksjonsdelene
GEO	Brudd eller store deformasjoner i grunnen
FAT	Utmattingsbrudd

Tabell 1: Oversikt over forkortelser

# 1. Introduksjon

I løpet av de siste tiårene har konstruksjonsbransjens søken etter holdbare, miljøvennlige og kostnadseffektive materialer, drevet av økt fokus på bærekraft, miljøhensyn og kostnadspress, blitt stadig mer tydelig. Disse behovene har ført til innovativ bruk av ulike materialer, inkludert aluminium, som er kjent for sin lave vekt, korrosjonsbestandighet, styrke og høye gjenvinningsgrad. Siden aluminium først ble brukt på brukonstruksjoner under rehabiliteringen av brudekket til *Smithfield Street Bridge* i Pittsburgh i 1933, har materialet vist seg som et godt alternativ til tradisjonelle materialer som stål og betong, særlig i prosjekter der rehabilitering og vektbegrensninger er i fokus (1).

Denne oppgaven undersøker den innovative bruken av aluminium i moderne brukonstruksjoner, med et spesielt fokus på Hangarbrua – et pilotprosjekt utviklet av Statens vegvesen, illustrert i figur 1. Gjennom en kombinasjon av litteraturstudier, analyse av Hangarbrua og samtaler med relevante fagpersoner, søker oppgaven å gi innsikt i hvordan aluminium kan bidra til fremtidens bærekraftige konstruksjonsløsninger.



Figur 1: Illustrasjon av Hangarbrua

## 1.1 Oppgavebeskrivelse

Bacheloroppgavens hensikt er å bruke Hangarbrua som en case-studie for å lære hvordan aluminium kan brukes som et konstruksjonsmateriale, og hvordan man dimensjonerer et lite brukt konstruksjonsmateriale som aluminium. Oppgaven vil ta for seg aluminium som et materiale ved å se på historie, produksjon, mekaniske egenskaper, og økonomiske og bærekrafts aspekter. Gjennom dette og egen dimensjonering og analyse av Hangarbrua skal oppgaven svare på om aluminium burde få en større plass i bygg- og anleggsbransjen.

## **1.2 Avgrensning**

På grunn av oppgavens tidsbegrensninger, omfang og kunnskapsgrunnlaget som ligger til grunn vil det være flere avgrensninger og forenklinger gjennom oppgaven for å sikre at oppgavens kompleksitet og størrelse tilsvarer det som er forventet av en bacheloroppgave. Nedenfor vil de viktigste avgrensningene bli omtalt, men det vil også være noen mindre avgrensninger som er definert i de kapitlene det måtte gjelde.

### **1.2.1 Laster**

I denne oppgaven er det besluttet å kun vurdere vindlast som påvirker bruens lengderetning. Dette innebærer at vindlast i tverr- og vertikalretning ikke vil bli tatt med. Videre er termiske laster, ulykkeslaster og utmattingslaster ikke inkludert. Disse vil imidlertid bli kort omtalt, men ikke beregnet i detalj. Ved beregning av grensetilstander skal man vurdere brudd-, bruks-, ulykkes- og utmattingsgrensetilstander. I denne oppgaven har det blitt besluttet å kun inkludere brudd- og bruksgrensetilstandene. Under bruddgrensetilstanden skal man vurdere risiko for tap av likevekt, deformasjonsbrudd, stabilitetstap og brudd forårsaket av utmattelse. Det er valgt å fokusere på deformasjonsbrudd.

### **1.2.2 Digital modell**

Oppbyggingen av den digitale modellen er avgrenset i form av geometriske avvik fra faktiske tegninger. Dette er gjort for å gjøre modelleringen enklere og dermed spare tid. Disse avvikene er nærmere nevnt i delkapittel 9.1.

### **1.2.3 Stål**

Stål er primært omtalt i oppgaven for å danne et referansepunkt for å vurdere bruken av aluminium i brukonstruksjoner. Stål er et godt etablert konstruksjonsmateriale og foretrukket i mange konstruksjonsapplikasjoner, dermed forventes det at grunnleggende kunnskap om stål allerede er kjent. Stål blir derfor ikke presentert i dybden, men vil bli gjort rede for på en overordnet måte.

### **1.2.4 Manuelle beregninger**

De manuelle beregningene i oppgaven er ikke tiltenkt å gi en fullstendig dimensjonering av et tverrsnitt eller bruen i sin helhet. De brukes for å sammenligne aluminium med og uten *Heat affected zone* (HAZ), samt stål mot hverandre. HAZ vil bli forklart i delkapittel 4.5.1. Manuelle beregninger brukes også for å kontrollere ett element fra den digitale modellen opp mot formelverket i Eurokode 9.

### **1.3 Ekstern veiledning**

Den eksterne veilederen er Martin Næsgaard Myhre fra Statens vegvesen. For Hangarbru-prosjektet er Statens vegvesen byggherre og Myhre fungerer som byggeleder. Han har en mastergrad i bygg og miljø fra NTNU og har jobbet for Statens vegvesen i 15 år. Myhre har gitt oss god innsikt i prosjektet, og har gitt oss tilgang til ulike dokumenter, filer og modeller relatert til Hangarbrua.

Vår kontakt med Martin Næsgaard Myhre oppsto etter en samtale med førsteamanuensis Jomar Tørset ved NTNU, som introduserte oss for aluminium som konstruksjonsmateriale og Hangarbru-prosjektet. Inspirert av diskusjonen med Tørset, begynte vi å utforske temaet videre på egen hånd. Under Bygg- og Miljødagen den 7. november 2023, tok vi initiativ til å snakke med Myhre ved Statens vegvesens stand. Etter samtalen fikk vi et positivt inntrykk av ham, og det virket som han også fant potensialet for et samarbeid både spennende og interessant. Vi avtalte å gjenoppta kontakten etter nyttår, og da vi ringte Myhre tidlig i januar, ble vi enige om at han skulle være vår eksterne veileder for bacheloroppgaven.



## **2. Prosjekteringsgrunnlag**

Prosjekteringsgrunnlaget vil ta for seg ulike elementer som ligger til grunn for å kunne dimensjonere med aluminium. Dette innebærer ulike europeiske standarder som er brukt for å sikre at konstruksjonens sikkerhet er dokumentert etter byggeforskriftenes krav (2). De ulike vegnormalene som Statens vegvesen utgir, er et viktig styringsverktøy for utforming og dimensjonering av offentlig veg- og trafikkanlegg, og er hjemlet i ulike lovverk (3). Programvare vil være et nyttig hjelpemiddel for å sikre nøyaktig og hurtig behandling av data.

### **2.1 Eurokoder**

Eurokodene utgjør en samling med europeiske standarder for prosjektering av byggverk, samt å dokumentere bæreevne og styrke i materialer brukt til konstruksjonsformål. I disse standardene defineres byggverk som alt som konstrueres eller kommer frem av byggearbeid (2).

Det er i alt ti ulike Eurokoder som dekker prosjekteringsgrunnlag, laster, ulike materialer, produkter, nødvendig dokumentasjon av egenskaper og utførelse av nye og eksisterende konstruksjoner (2). Relevante eurokoder for oppgaven er listet opp i tabell 2, og vil her etter i oppgaven bli forkortet som EK-x, der x representerer hvilken Eurokode som det refereres til.

Navn	Forkortelse
NS-EN 1990:2002+A1:2005+AC:2010+NA:2016 Eurokode. Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner.	EK-0
NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2019 Eurokode 1. Laster på konstruksjoner. Del 1-1: Allmenne laster. Tetthet, egenvekt og nyttelaster i bygninger.	EK-1-1-1
NS-EN 1991-1-3:2003+A1:2015+NA:2018. Eurokode 1. Laster på konstruksjoner. Del 1-3: Allmenne laster. Snølaster.	EK-1-1-3
NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009. Eurokode 1. Laster på konstruksjoner. Del 1-4: Allmenne laster. Vindlaster.	EK-1-1-4
NS-EN 1991-1-5:2003+NA:2008. Eurokode 1. Laster på konstruksjoner. Del 1-5: Allmenne laster. Termiske påvirkninger.	EK-1-1-5
NS-EN 1991-1-7:2006+NA:2008. Eurokode 1. Laster på konstruksjoner. Del 1-7: Allmenne laster. Ulykkeslaster	EK-1-1-7
NS-EN 1991-2:2003+NA:2010. Eurokode 1. Laster på konstruksjoner. Del 2: Trafikklast på bruer.	EK-1-2
NS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015. Eurokode 3. Prosjektering av stålkonstruksjoner. Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger.	EK-3-1-1
NS-EN 1993-1-11:2006+NA:2009. Eurokode 3. Prosjektering av stålkonstruksjoner. Del 1-11: Kabler og strekkstag.	EK-3-1-11
NS-EN 1999-1-1:2007+A7:2009+NA:2006. Eurokode 9. Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner. Del 1-1: Allmenne regler.	EK-9

Tabell 2: Oversikt over eurokoder

## 2.2 Byggforsk håndbok 46

Byggforsk håndbok 46 er en lærebok kalt «Aluminiumkonstruksjoner», skrevet av Tarald Rørvik i 1997, og er den første omfattende innføringen i konstruksjonslære for aluminium som baserer seg på beregningsgrunnlaget i EK-9 (4).

«Aluminiumkonstruksjoner» ble skrevet for å dekke et økende behov for en helhetlig fremstilling av material- og konstruksjonslære spesifikt for aluminium, et materiale som var relativt nytt i konstruksjonsbransjen når boken ble publisert. Denne boken kunne fungert både som en lærebok for ingeniørstudenter, og som et fordypningsverk for praktiserende ingeniører i næringslivet. Den gir en innføring i materiallære, og dekker det teoretiske grunnlaget som er spesielt ved dimensjonering av aluminium (4).

Boken er basert på førstandarden av EK-9 som ble publisert i 1997, og kan derfor inneholde forskjeller sammenlignet med dagens versjon fra 2009. Det er derimot ingen grunn til å tenke at selve prinsippene for beregning av aluminiumskonstruksjoner har blitt endret i stor grad fra 1997 utgaven og frem til i dag. Det antas derfor at boken er tilstrekkelig for bruk gjennom bacheloroppgaven. Alle beregninger vil naturligvis ta utgangspunkt i den siste utgaven av EK-9, og denne læreboken brukes kun som et supplement til standarden.

## **2.3 Statens vegvesens håndbøker**

Statens vegvesens håndbøker er en samling av tekniske retningslinjer og spesifikasjoner som regulerer planlegging, bygging og vedlikehold av offentlige veier og infrastruktur i Norge. Disse håndbøkene er viktige for å sikre helhetlige og standardiserte løsninger som ivaretar trafiksikkerhet, funksjonalitet og kvalitet (5).

Håndbok N400, kjent som «Bruprosjektering», er en av de sentrale håndbøkene i denne serien og tar for seg retningslinjer for prosjektering av bruer. Håndboken dekker blant annet krav til belastninger, materialer og konstruksjonsdetaljer, og den legger vekt på å sikre at bruene oppfyller både nasjonale og europeiske standarder.

## **2.4 Programvarer**

Dette kapittelet gir en oversikt over programvarene som er benyttet, hva de gjør, og hvordan de er anvendt i oppgaven. Underveis i arbeidet er programvarene Robot Structural Analysis, Revit og Mathcad 15 benyttet. Disse programmene ble valgt basert på tidligere erfaringer, spesielt med Revit og Mathcad 15. Derimot var Robot Structural Analysis et nytt program, som ikke har blitt benyttet i undervisning ved bachelorutdanningen. Valget falt på dette programmet etter å ha sett det bli brukt i en tidligere bacheloroppgave om aluminium, samt at det er en del av Autodesk, som også står bak Revit. Valget av analyseprogram viste seg i ettertid å være dårlig da det har en rekke begrensningen som blir diskutert i delkapittel 13.1.2.

### **2.4.1 Revit**

Autodesk Revit er en programvare for bygningsinformasjonsmodellering (BIM) som brukes av arkitekter, ingeniører og entreprenører for å designe, dokumentere, og samordne alle stadier av byggeprosjekter. Revit gjør det mulig å skape detaljerte tredimensjonale modeller som ikke bare representerer bygningens geometri, men også inneholder dyptgående data om materialer og komponenter. Dette legger til rette for en mer integrert prosjektstyringsprosess (7). En betydelig fordel med Revit er muligheten for å integrere med RSA. Denne integrasjonen tillater sømløs

overføring av modelldata, slik at man kan enkelt modellere og utføre analyse av konstruksjonen (8).

### **2.4.2 Robot Structural Analysis**

Autodesk Robot Structural Analysis, heretter kalt RSA, er et avansert programvareverktøy utviklet for å hjelpe ingeniører med å utføre omfattende analyser av ulike konstruksjoner, fra enkle bygninger til komplekse industriinstallasjoner. Programvaren benytter seg av numeriske metoder for å simulere og analysere hvordan konstruksjoner reagerer under ulike laster og betingelser, slik som tyngdekraft, jordskjelv, vind og termiske effekter. Dette gjøres ved å bruke en metode kjent som *finite element analysis* (FEM), som deler opp den virkelige konstruksjonen i et nettverk av separate elementer og knutepunkter. Gjennom denne prosessen kan man forutse potensielle svakheter i designet og gjøre nødvendige tilpasninger for å forbedre konstruksjonen. RSA kan håndtere komplekse geometrier og materialer, samt integreres med andre programvareprodukter, deriblant Revit, for å tillate en mer sømløs arbeidsflyt i design- og byggeprosessen (6).

I denne oppgaven er RSA tenkt benyttet til å analysere Hangarbrua. På denne måten kan vi gjennom en global analyse finne opptredende krefter i de ulike konstruksjonselementene under forskjellige lastsituasjoner. Videre er det tiltenkt at modellen skal brukes til å utføre kapasitetskontroller som vil danne grunnlaget for sammenligning med kontrollberegningene.

### **2.4.3 Mathcad 15**

Mathcad 15, program fra *Parametric Technology Corporation*, brukes av ingeniører og forskere i ulike fagområder. Det inneholder noen av mulighetene i et algebrasystem, men er mest kjent for sin brukervennlighet og dokumentasjon av numeriske beregninger (9).

Programvaren er i denne oppgaven brukt for å presentere manuelle beregninger på en ryddig og pen måte, med muligheten for gjenbruk av matematiske uttrykk.

### 3. Hangarbrua

Hangarbrua, som er vår aktuelle case-studie, er et innovativt prosjekt i regi av Statens vegvesen. Dette prosjektet involverer konstruksjonen av en ny nettverksbuebru på Leangen i Trondheim, designet for å tilrettelegge for fotgjengere og syklister. Bruen er plassert for å krysse jernbanen ved Leangen stasjon, og blir en essensiell forbindelse langs hovedsykkelruten som strekker seg mellom Gildheim og Pirbrua, som man kan se på figur 2.

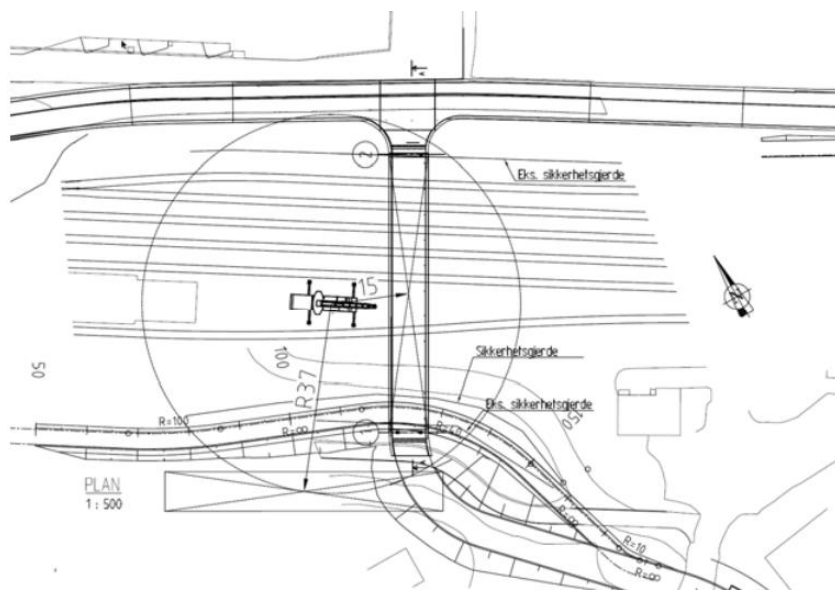


Figur 2: Oversikt over hovedsykkelruten mellom Gildheim og Pirbrua

Prosjektet skal gjøre det enklere å fremme miljøvennlige transportalternativer og bidra til en reduksjon i byens biltrafikk. Mindre biler gir bedre luftkvalitet og kutter utslipp fra fossildrevne biler (10). I tillegg til disse klimafordelene har bruen i seg selv sine egne fordeler.

Bruen har nemlig en relativt innovativ konstruksjon med en rekke tekniske spesifikasjoner som skiller seg fra tradisjonelle bruer. Først og fremst vil brudekket og overbygning bli konstruert av aluminium, et materiale valgt for sine spesielle material- og bærekraftige egenskaper, inkludert potensialet for høy grad av resirkulering, bruens aluminium skal inneholde opptil 70 % resirkulert materiale. Videre vil aluminiums lette vekt bidra til en lavere egenvekt, som i praksis betyr at det kreves mindre underbygning og fundamentering. På Hangarbrua kan pæler under brufundamentet unngås, dermed blir også utslippene lavere sammenlignet med en tyngre stålbru (10).

Ytterligere muliggjør aluminiumens lave vekt at hele brukonstruksjonen kan monteres på riggplass og løftes ved hjelp av mobilkran på sin endelige plass. Se figur 3. Dette er svært gunstig med tanke på å ikke stanse jernbanen i lengre perioder (11).



Figur 3: Oversiktstegning over kranløft.

Bruens utforming er i tråd med anbefalingene i vegnormal N400, som foreskriver at bruer over jernbaner skal utføres i materialer som ikke krever planlagt periodisk vedlikehold. Aluminium har god korrosjonsmotstand, noe som gir en nærmest vedlikeholdsfri bru og reduserer behovet for å stanse togtrafikken (11).

Bruen har en spennvidde på 55m, en total bredde av vegbanen lik 7 m og en pilhøyde på rundt 8,5 m. En mer detaljert beskrivelse av Hangarbrua er gitt i delkapittel 9.3.

## 4. Aluminium

Aluminium er det nest viktigste strukturelle metallet vi har i verden, men likevel er det få som vet mye om det. Siden 1940-tallet, da aluminium raskt ble mer kjent, har ingeniører vært trege med å undersøke hva det har å tilby og hvordan det kan brukes i konstruksjoner (12). Aluminium er et sterkt, lett og bærekraftig materiale, noe som gjør det godt egnet for en rekke bruksområder (13). Aluminium og aluminiumslegeringer blir brukt i alt fra transportmidler, emballasje, husholdningsgjenstander og som byggemateriale (14). Aluminium finnes overalt. Det er det tredje mest utbredte elementet i jordskorpen, etter oksygen og silisium. Dette betyr at det finnes mer aluminium enn jern i verden, og det vil være en ressurs som kan vare i generasjoner med dagens forbruk (13). I tabell 3 kan man se noen sentrale egenskaper med aluminium.

Egenskaper	Symbol	Verdi	Enhet
Atomsymbol	Al		
Atomnummer		13	
Tetthet	$\rho$	2 700	kg/m <sup>3</sup>
Elastisitetsmodul	E	70 000	N/mm <sup>2</sup>
Skjærmodul	G	27 000	N/mm <sup>2</sup>
Smeltepunkt	T <sub>m</sub>	650 – 660	°C
Termisk utvidelseskoeffisient	$\alpha$	23,5 * 10 <sup>-6</sup>	°C <sup>-1</sup>
Varmeledningsevne	$\lambda$	230	W/(K*m)

Tabell 3: Egenskaper/informasjon om aluminium (4, 15-17)

### 4.1 Historie

De første referansene til elementet vi i dag kjenner som aluminium, går helt tilbake til 1807, da den britiske forskeren sir Humphry Davy foreslo eksistensen av elementet «aluminium». Videre, i 1821, oppdaget den franske geologen Pierre Berthier et hardt, rødlig, leiraktig materiale som inneholdt aluminium, og ga det navnet bauksitt (18).

Det var først i 1825 at den danske forskeren Hans Ørsted lyktes med å isolere små partikler av metallet aluminium. Ørsted var fornøyd med å bevise at metallet faktisk eksisterte, og mistet

interessen etter dette. To år senere begynte den tyske professoren Friedrich Wöhler å gjenta Ørsted sine eksperimenter. Wöhler arbeidet med dette i 20 år før han klarte å produsere den første faktiske klumpen av aluminium. Denne biten var stor nok til å undersøke noen av metallens egenskaper, som hvor lett og skinnende det var (12).

Steget fra vitenskapelig nysgjerrighet til kommersielt produkt ble tatt på 1850-tallet av den franske kjemikeren Henri Ste-Claire Deville. Han baserte seg på det tidligere arbeidet til Wöhler, som hadde brukt en kjemisk prosess for å utvinne aluminium ved hjelp av kalium. På grunn av kaliums høye kostnader var kommersiell produksjon upraktisk. Ste-Claire Deville klarte derimot å utvinne aluminium gjennom en reduksjonsprosess med natrium. Dette var det første forsøket på kommersiell aluminiumproduksjon (18). Selv med denne utviklingen ble aluminium et høyt luksuriøst metall forbeholdt de rike og adelige, og ble blant annet brukt som bestikk under kongelige banketter istedenfor bestikk av gull (12).

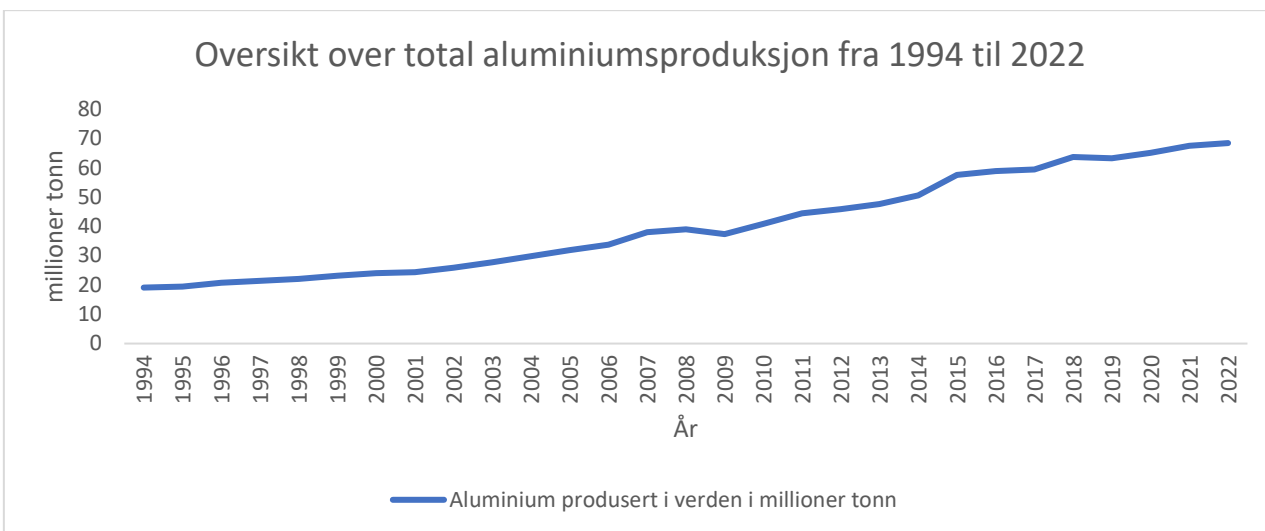
Det store gjennombruddet kom i 1886, da to unge menn, amerikanske Charles M. Hall og franske Paul Héroult, hver for seg fant opp den samme elektrolyseprosessen for fremstilling av rent aluminium. Deres metode brukte aluminiumoksid som råmateriale og smeltet kryolitt som elektrode, sammen med store mengder elektrisitet. Bare et par år senere utviklet Carl Bayer en økonomisk prosess for å utvinne aluminiumoksid fra bauksitt. Med Hall-Héroult- og Bayer-prosessen ble prisen på aluminium redusert med en faktor på ti, og metallet ble et masseprodusert industrielt produkt (12).

Den første aluminiumslegeringen stammer fra 1888, og siden den gang har det blitt utviklet mange forskjellige legeringer. I 1909 oppdaget Alfred Wilm, en tysk metallurg, at en aluminiumslegering med 4 % kobber, som ble herdet ved romtemperatur, økte drastisk i hardhet. Legeringen ble kalt «Duralumin» og ble opprinnelig produsert av Dürener Metallwerke i Tyskland. Innen 1912 var forskningen på aluminiumslegeringer godt etablert, og deformasjonsherdbare legeringer ble de neste som ble utviklet. På 1920-tallet produserte selskapet Birmetals Co. materialet «Birmabright», en legering av aluminium og magnesium med gode korrosjonsegenskaper. Innen slutten av 1939 var de fleste av dagens hovedlegeringer allerede utviklet, bortsett fra én. Den siste legeringen, 7xxx-serien, ble utviklet etter andre verdenskrig (12, 18).

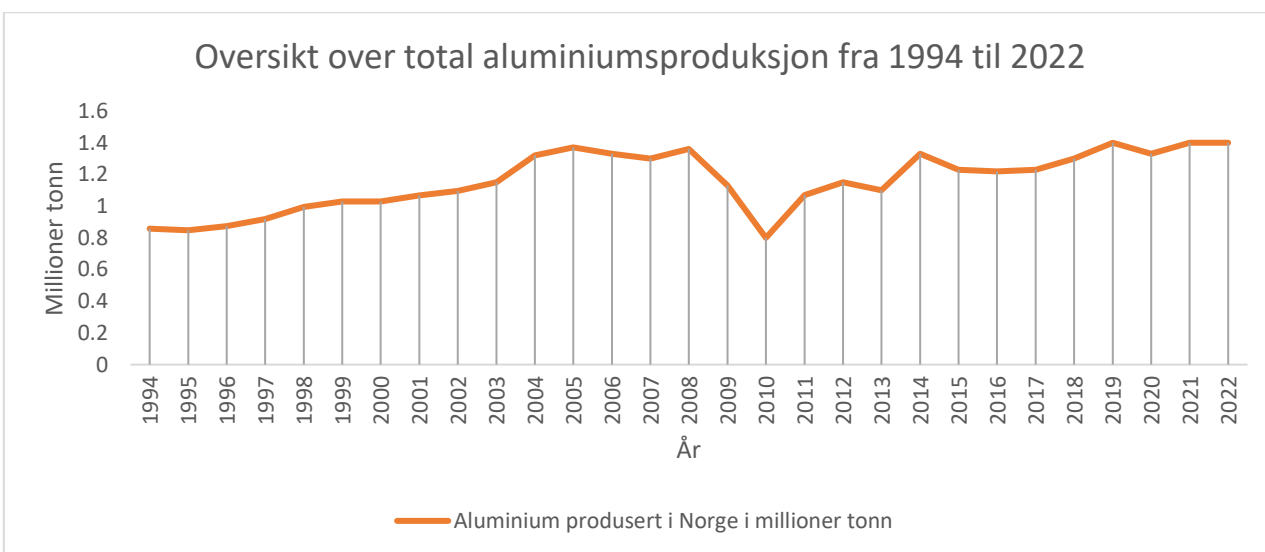
Siden det første kommersielle produktet av aluminiumoksid ble produsert, har den årlige fremstillingen av aluminiumoksid og aluminium økt jevnt over alle industrier. Produksjonen av aluminium har økt fra under 200 tonn i 1885 til rundt 70 millioner tonn i 2022 (18, 19).



Figur 4 og 5 viser en oversikt over aluminiumproduksjon i millioner tonn, henholdsvis globalt og for Norge. Dataene er hentet fra *National Minerals Information Center*. I datasettene var produksjonsverdiene for aluminium i Norge for årene 2018, 2021 og 2022 merket som estimater (19).



Figur 4: Oversikt over total aluminiumsproduksjon fra 1994 til 2022 (19)



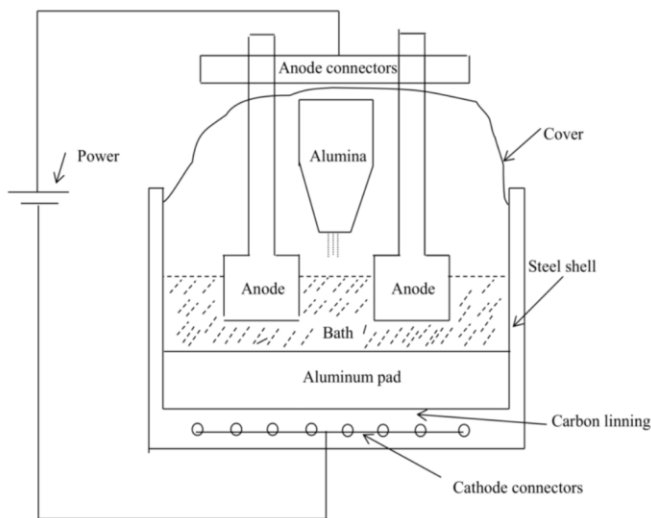
Figur 5: Oversikt over aluminiumsproduksjonen i Norge fra 1994 til 2022 (19)

## 4.2 Produksjon

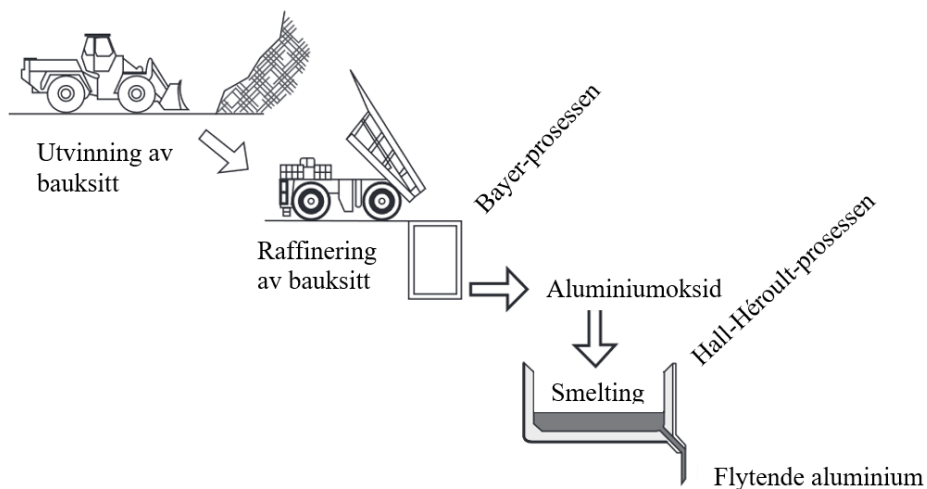
Produksjonen av aluminium starter med malmen bauksitt, som er et av de mest aluminiumsrike mineralene og inneholder 20-30 % aluminiumsoksid (4). Bauksitt forekommer i et belte rundt ekvator, og det meste som utvinnes for Norge i dag kommer fra dagbrudd i Brasil (20). Kina, som er verdens største produsent av aluminium, importerer hovedsakelig bauksitt fra Malaysia (21).

I Norge er det totalt syv aluminiumsverk som produserer primæraluminium, hvorav selskapet Hydro eier fire av disse (22).

Bauksitten knuses og tørkes i roterende tørkeovner, og ved hjelp av Bayer-prosessen utvinnes aluminiumoksid. Deretter fjernes oksygenet fra aluminiumoksidet ved Hall-Héroult-prosessen, se figur 6, resultatet av disse prosessene er rent aluminium. For å fremstille ett tonn rent aluminium trengs to tonn aluminiumoksid, 50 kg kryolitt, 550 kg elektrodemasse til elektrolyseprosessen, og mellom 13 000- og 16 500 kWh elektrisk strøm (4). Figur 7 viser en enkel visualisering av aluminiumfremstillingen.



Figur 6: Hall-Héroult prosessen (23)



Figur 7: Visuell fremstilling på aluminiumsproduksjon (18)

### 4.3 Legeringer

EK-9 benytter seg av AA-systemet for betegnelse av aluminiumslegeringer, et system som bygger på systemet til *American Aluminium Association*. I Eurokoden og andre relevante bøker som bruker dette systemet, vil betegnelsen AW brukes for formbare legeringer og AC for støpelegeringer. I Eurokoden er betegnelsene innledet med «EN». AA-systemet bruker et firesifret tall for de ulike legeringene, hvor første siffer angir hovedlegeringselementet, det andre sifferet angir endring av mengden legeringselement, og de to siste sifrene viser til bestemte variasjoner av legeringens innhold (4).

AA-nummer	Hovedlegeringselement	Egenskaper
1xxx	Ren aluminium (Al)	Lav fasthet Stor duktilitet
2xxx	Kopper (Cu)	Svært høy fasthet Duktilitet og sveisbarhet reduseres
3xxx	Mangan (Mn)	Økt fasthet og korrosjonsmotstand Senket smeltepunkt (fordel i sveisetråd og støping)
4xxx	Silisium (Si)	Noe økt fasthet og duktilitet Senket smeltepunkt
5xxx	Magnesium (Mg)	Markant økning av fasthet Økt korrosjonsmotstand og senket smeltepunkt
6xxx	Magnesium/silisium (MgSi)	Fremmer varmherdeeffekten og gir lettere formbar legering i varm tilstand.
7xxx	Sink (Zn)	Vesentlig økning i fasthet og varmherdbarhet
8xxx	Andre elementer	

Tabell 4: Hovedlegeringselementene med tilhørende AA-nummer og egenskaper (4)

Aluminiumslegeringer til konstruksjonsformål kan deles inn deformasjonsherdbare legeringer (*non heat treatable alloys*) og varmherdbare legeringer (*heat treatable alloys*). Ved

deformasjonsharding økes bruddfastheten ved formendring, for eksempel valsing eller strekking i kald eller varm tilstand, og er vanlig for fremstilling av platematerialer i aluminium. Se tabell 4 og 5 for oppsummering av de ulike betegnelsene fra AA-systemet (4).

Symbol	Grad av deformasjonsharding
F	Framstilt uten spesiell kontroll av temperatur og deformasjon
O	Etter varm- eller kaldforming er materialet glødet (350 – 450 °C) i 1-5 timer for å få lav fasthet med høyest mulig duktilitet.
H1*	Kun deformasjonsherdet, ingen varmebehandling.
H2*	Deformasjonsherdet til høyere fasthet enn tiltenkt og deretter delvis glødet for å øke duktilitet
H3*	Deformasjonsherdet til høyere fasthet enn tiltenkt og deretter lavtemperaturbehandlet til stabil tilstand.

Tabell 5: Oversikt over deformasjonsharding med tilhørende symbol (4)

Det andre sifferet i tabell 6 representerer hardhetsgraden og tykkelsesreduksjonen for deformasjonsherdede legeringer.

Hardhetsgrad	Betegnelse	Tykkelsesreduksjon
H*1		Udefinert
H*2	Kvarthard	20 %
H*3	Halvhard	33 %
H*6	Trekvarthard	50 %
H*7	Helhard	67 %

Tabell 6: Oversikt over hardhetsgradene med tilhørende betegnelse og tykkelsesreduksjon (4)

Varmherding foregår i to trinn, innherding og utharding. Etter disse to trinnene øker fastheten til legeringen betraktelig. Innherding innebærer at legeringen raskt kjøles ned fra oppløsningstemperaturen (450 - 530 °C). Dette gjør at noen av hovedlegeringselementene, for eksempel magnesium og silisium i 6000-serien, blir fastlåst mellom aluminiumatomene. Disse fastlåste atomene gir økt motstand mot bevegelse, noe som resulterer i økt fasthet.

Først etter tre til ti dager ved lagring i romtemperatur oppnår legeringene sin faktiske fasthet, denne prosessen kalles kaldutharding. Ved å varmebehandle legeringen i en ovn på 120 - 185 °C i 6 - 24 timer etter innherding, kan fastheten øke betydelig raskere og høyere. Dette kalles varmutharding (4).

Etter AA-systemet får legeringene bokstaven T med et tall for å angi de ulike varmherdeprosedyrene som legeringen har gjennomgått. Denne skalaen går fra T1 til T10, men for konstruksjonsmaterialer er T4, T5 og T6 mest aktuelle. Ved T4 er legeringen innherdet ved oppløsningstemperatur og deretter kalduthertet ved romtemperatur. For T5 er materialet innherdet ved bearbeidingstemperatur (400 - 500 °C) og deretter varmuthertet. Legeringen med betegnelsen T6 har blitt innherdet ved oppløsningstemperatur og deretter varmuthertet (4).

I Hangarbru-prosjektet og i denne oppgaven vil legeringer fra kun 5000- og 6000-serien benyttes og skal ha minimum bestandighetsklasse B i henhold til EK-9 tabell 3.1a og tabell NA.3(901) (16). Legeringene som benyttes for de ulike konstruksjonsdelene på Hangarbrua er oppsummert i tabell 7.

Konstruksjonsdel	Legering
Strekkbånd – valsede profiler	5383 – H321
Bue – valsede profiler	5383 – H321
Dekke – ekstrudert profil	6082 – T6
Tverrbjelker – flens – ekstrudert profil	6082 – T6
Tverrbjelker – steg – valsede plater	5083 – H116
Vindavstivere – ekstrudert profil	6082 – T6
Rekkverk / utrustningsprofiler	6082 – T6 / 6005A-T6
Fotplater ved opplager	5083 - O
Sveisetilsett	5183
Innvendig stivere (t < 15mm)	5083 – H116
Innvendig stivere (t ≥ 15mm)	5383 – H321

Tabell 7: Oversikt over ulike konstruksjonsdeler i Hangarbrua med tilhørende legering

## 4.4 Ekstrudering og valsing

Aluminium kan formes på flere ulike måter for å oppnå ønsket profil, og det er nettopp denne formbarheten som anses som en av aluminiums store styrker (15). Noen legeringer egner seg best til støping, spesielt de med høyt silisiuminnhold. For konstruksjonsformål blir profiler vanligvis fremstilt gjennom ekstrudering eller valsing (4).

### 4.4.1 Ekstrudering

Selv om ekstrudering er tilgjengelig for noen andre ikke-jernholdige metaller, som messing og bronse, er det med aluminium at ekstruderingsprosessen virkelig har blitt en primær produksjonsmetode (12).

I ekstruderingsprosessen varmes en pressbolt opp og presses gjennom en støpeform, kalt en matrise (20). Pressbolt og matrise kan sees på figur 8. Pressbolten kan fremstilles av både ny og resirkulert aluminium, eller en kombinasjon. Bolten varmes opp til omtrent 400 - 500 °C, og under høyt trykk (1200 - 7000 tonn) presses den oppvarmede pressbolten gjennom matrisen, som har ønsket sluttprofil. Ekstruderingshastigheten varierer med tverrsnittets kompleksitet, men ligger

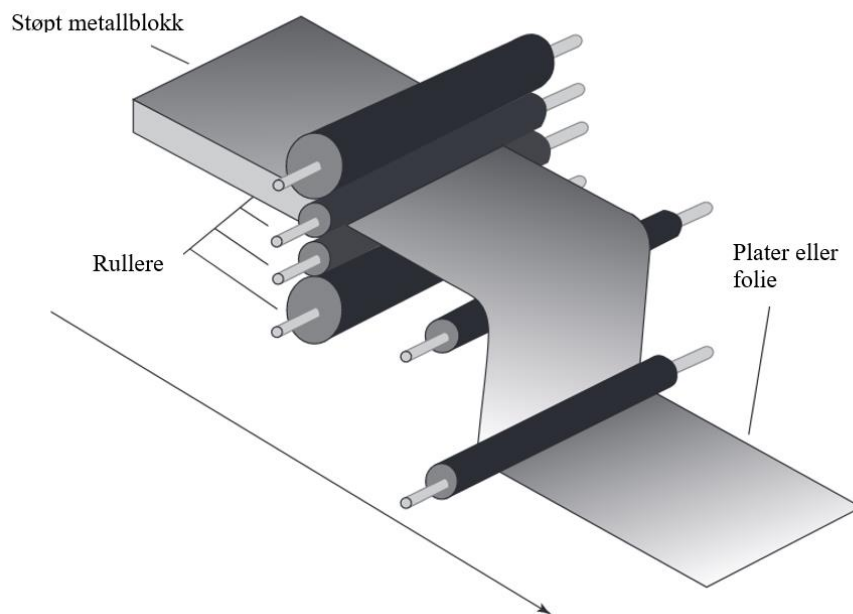
vanligvis mellom 5 og 100 m/min (24). Hvis det ekstruderte profilet er laget av et varmherdbart materiale, blir det bråkjølt med vann eller luft. For å rette opp profilet og jevne ut indre spenninger blir materialet deretter strukket i en strekkmaskin og kuttet i ønskede lengder (4).



Figur 8: Ekstrudering av aluminiumsprofil (25)

#### 4.4.2 Valsing

Plater, bånd og folie blir fremstilt ved valsing av utstøpte blokker. Valseprosessen for aluminium starter med at blokkene først blir varmvalset ved en temperatur på rundt 500 °C. Dette gjentas til man har oppnådd ønsket tykkelse for å starte kaldvalsing. Hvor stor tykkelsesreduksjon som gjøres i kald tilstand, avhenger av ønsket hardhetstilstand. Folie kan vales ned til en tykkelse på 0,007 mm (4, 18). Se figur 9 for en visualisering av valseprosessen.



Figur 9: Visualisering av valseprosess (18)

## 4.5 Sveising

Den vanligste metoden for å sammenføre aluminium er sveising, og de fleste aluminiumslegeringene er godt sveisbare. Imidlertid krever sveising nøye planlegging og forberedelse av materialene. Siden aluminium har en oksidfilm på overflaten med et høyere smeltepunkt enn selve aluminiumen, må denne fjernes før sveising. Dette kan gjøres med kjemiske, mekaniske eller elektriske metoder. Aluminium har et relativt lavt smeltepunkt, og i motsetning til stål endrer det ikke farge når smeltepunktet nærmer seg. Derfor må man være forsiktig for å unngå overoppheting eller smelting av aluminiumen under sveising (18).

Under sveising vil de mekaniske egenskapene til aluminium i den varmepåvirkede sonen bli redusert. Av både økonomiske og kvalitetsmessige årsaker har sveising med *Metal Inert Gas* (MIG) og *Tungsten Inert Gas* (TIG) vært de anbefalte metodene for sveising av bærende konstruksjoner i aluminium (18). For plater er derimot *Friction Stir Welding* (FSW) et godt alternativ, da det er en enkel prosess som gir helt porefrie, lekkasjefrie, tette skjøter med høy styrke (26). For Hangarbrua er MIG-sveising og FSW-sveising brukt for de ulike delene. For eksempel er brudekket bestående av ekstruderte aluminiumsprofiler som er friksjonssveiset sammen til paneler og deretter MIG-sveiset til et fullstendig dekke, mens hulprofilet til strekkbåndet er sveist med MIG.

### 4.5.1 HAZ

Som nevnt tidligere vil sveising påvirke de mekaniske egenskapene til aluminium. Grunnmaterialet rundt sveisen utsettes for høy temperatur, noe som fører til at den ekstra fastheten fra herdeprosessen delvis går tapt (4). Dette betyr at man må ta hensyn til redusert fasthet når man dimensjonerer tverrsnittets kapasitet.

Reduksjonen av flytespenningen i materialet i den varmepåvirkede sonen kan være mer enn halvparten av den opprinnelige styrken. Denne reduksjonsfaktoren finnes i EK-9 tabell 3.2a, 3.2b og NA.3(901) (16). Bredden HAZ regnes i alle retninger fra sveisen og vil variere avhengig av tykkelsen på materialet og hvilken sveisemetode som er brukt. I seksjon 6.1.6.3 (3) og (6) i EK-9 kan man se bredden av HAZ for ulike tverrsnittstykkelser for MIG- og TIG-sveising. For dimensjoneringen av strekkbåndet, som blir behandlet senere i oppgaven, er bredden av HAZ satt til 35 mm, ettersom tverrsnittets tykkelse er mellom 12 og 25 mm og sveist med MIG.



#### **4.5.2 MIG sveising**

MIG-sveising er en form for smeltesveising, hvor grunnmaterialet i sveisefugen varmes opp til det begynner å smelte, og deretter fylles fugen med smeltet tilsetningsmateriale. Som tidligere nevnt, er smeltesveising den mest brukte metoden for å sveise aluminium til bærende konstruksjoner. Metoden egner seg godt for de fleste varianter av 5000-, 6000- og 7000-serien. Ved MIG-sveising føres tilsetningsmateriale gjennom munnstykket, hvor tråden smeltes og fyller fugen. Samtidig blåses nøytralgass (argon eller helium) ned langs sveisetråden for å holde luften borte fra smelten. Dette er viktig for å unngå at fuktighet i luften kommer i kontakt med sveisen, da dette kan føre til sprøhet i sveisen (4).

#### **4.5.3 TIG sveising**

TIG-sveising er også en form for smeltesveising og utføres på lignende måte som MIG-sveising. Forskjellen er at elektroden i munnstykket er av tungsten, et tungtsmeltelig metall som ikke smelter under sveising. Dette betyr at tilsetningsmaterialet må tilføres fra siden. TIG-sveising egner seg best for tynne plater, det vil si tykkelser mindre enn 6 mm, og gir bedre kvalitet enn MIG-sveising (4).

#### **4.5.4 FSW sveising**

Friksjonssveising er en relativt ny sveisemetode sammenlignet med de tidligere nevnte metodene. Sammenføyning av materialene skjer ved at et roterende verktøy skaper trykk og friksjonsvarme på skjøtene, slik at materialet blandes. Materialet når en temperatur på maksimalt 500 °C i en veldig kort periode, før det avkjøles raskt. Denne lave temperaturen betyr at materialet ikke smeltes, i motsetning til de andre metodene, men heller plastifiseres. Dette gir en sveis med minimal varmepåvirkning på materialet, som igjen resulterer i en mindre HAZ (26).

#### **4.5.5 Andre sammenføyningsmetoder**

Sveis er ikke den eneste måten å sammenføye aluminium på. Det finnes også mekaniske metoder og liming. Blant mekaniske forbindelsesmidler finner vi vanlige skruer, nagler, låsebolter, pineskruer og selvgjengende skruer (4). Festemidlene kan være laget av både stål og aluminium. Ved bruk av stålbolter i en aluminiumskonstruksjon må man ta hensyn til galvanisk korrosjon. Dette skjer når to metaller med forskjellig elektrodepotensial er i kontakt i et fuktig miljø, noe som fører til oksidasjon (27). For å forhindre dette er det viktig å unngå direkte kontakt mellom aluminium og stål, for eksempel ved å bruke glassfiberskiver mellom kontaktflatene. På

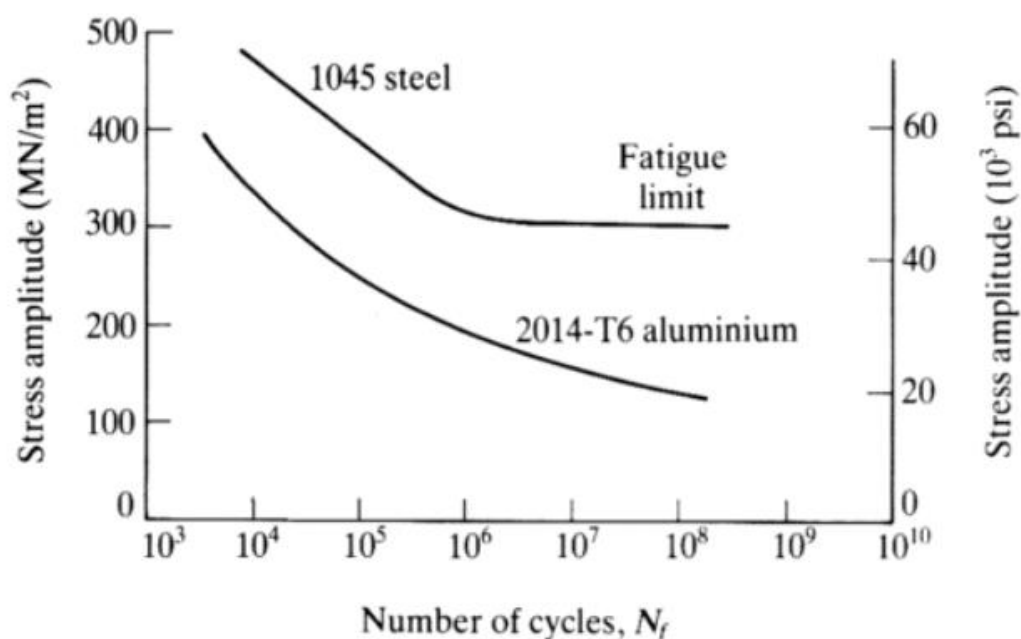
Hangarbrua er dette relevant, ettersom det brukes rustfrie plater ved opplager, og stålmutre og -bolter i rekkverket og brøyteskiver, samt stål i hengestengene.

Liming, i motsetning til sveising, bruker plast som tilsetningsmateriale i stedet for metall. Denne metoden er vanlig i flyindustrien. Styrken og seigheten til limte forbindelser avhenger i stor grad av temperaturen. De fleste limtyper tåler ikke temperaturer over 250 °C, og ved lave temperaturer blir limet hardt og sprøtt. Limte forbindelser er spesielt egnet for skjærbelastninger (4).

## 4.6 Utmatting

Utmatting er små sprekker som oppstår i materialet etter at det har blitt utsatt for vekslende spenninger over tid. Sprekkene vokser gradvis og fører til slutt til brudd. Spenningene er vanligvis så små at de ikke forårsaker synlig plastisk deformasjon, men på mikroskopnivå skyldes utmattingen gjentatte plastiske deformasjoner. Eksempler på slike spenningskonsentrasjoner finnes ofte i sveiseforbindelser eller skarpe overganger (28).

Materialets egenskaper mot utmatting undersøkes ved hjelp av utmattingsprøver. Den første metoden for slike tester, som fortsatt er i bruk, ble utviklet i 1858 av jernbaneingeniør A. Z. Wöhler. Testen går ut på å ta flere like prøvestykker og utsette dem for syklisk varierende belastning med forskjellig spenningsamplitude. Ved brudd på hvert prøvestykke registreres antall perioder, og resultatene tegnes inn i et S-N-diagram (28).



Figur 10: S-N-kurve over 1045-stål og 2014-T6-aluminium (29)

I figur 10 kan man se to S-N-kurver for henholdsvis 2014-T6-aluminiumslegeringen og stålqualiteten 1045 (tilsvarende et stål med en flytegrense på 450 MPa (30)). Denne figuren illustrerer det viktige poenget at aluminium taper mer styrke enn stål ved utmatting, og når heller aldri et nivå der det ikke lenger mister styrke.

#### **4.7 Korrosjonsbestandighet**

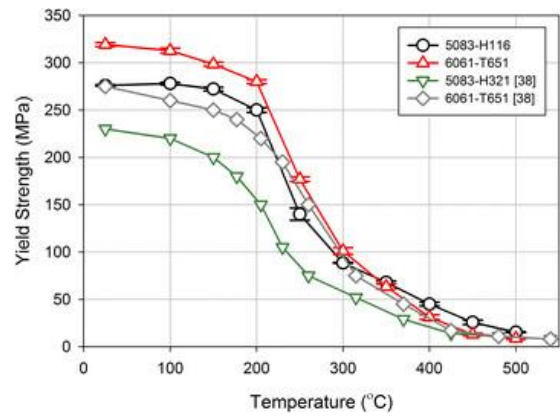
Aluminium, både i ren form og i ulike legeringer, er svært motstandsdyktig mot korrosjon. Når aluminium kommer i kontakt med luft, dannes det en tynn oksidfilm. Denne oksidfilmen, som ble nevnt i delkapittel 4.5 er et problem ved sveising. Oksidfilmen er hard og beskytter aluminiumen mot videre oksidering. Dette er en av flere fremtredende egenskaper ved aluminium som gjør det til et godt egnet materiale i konstruksjoner.

Korrosjonsbestandigheten er en av grunnene til at Hangarbrua konstrueres i aluminium. Som nevnt i kapittel 3 er bruene utformet i henhold til Statens vegvesens anbefalinger, som tilsier at bruene over jernbane skal utføres i materialer som ikke krever planlagt periodisk vedlikehold over den dimensjonerende brukstiden (31).

#### **4.8 Temperaturfølsomhet**

Aluminium, i motsetning til de fleste materialer, får ikke redusert duktilitet eller styrke ved lave temperaturer. Både bruddfastheten  $f_u$ , flytespenningen  $f_o$ , og bruddtøyningen  $\epsilon$  øker faktisk ved lave temperaturer. Aluminiumskonstruksjoner egner seg derfor godt på steder der temperaturene kan bli ekstremt lave (4).

For høye temperaturer, derimot, opplever aluminium en reduksjon i fasthet. Allerede fra ca. 100 °C begynner fastheten å reduseres, og fra 200 - 300 °C oppstår det en drastisk reduksjon. I praksis må det derfor settes en øvre grense på 100 °C for at de karakteristiske fasthetsverdiene skal være gyldige uten reduksjonsfaktor. Hvis det er satt et minstekrav for kollaps under brann, er det nødvendig med isolasjon rundt bærende konstruksjonsdeler i aluminium (4). Se figur 11 for oversikt over ulike legeringers flytegrense ved økende temperatur.



Figur 11: Ulike legeringers flytegrense ved økende temperatur (32)

## 5. Stål

Stål er en legering av jern med maksimalt to vektprosent karbon og kan inneholde flere andre legeringselementer. Stål har et bredt spekter av bruksområder og har vært det viktigste og mest brukte materialet for strukturelle og lastbærende konstruksjoner gjennom tidene (33).

Fremstilling av jern fra jernmalm går flere tusen år tilbake i tid, og oppdagelsen la grunnlaget for jernalderen og bronsealderen. Moderne og økonomisk masseproduksjon av stål startet først i 1855, da engelskmannen Henry Bessemer patenterte sin metode for fremstilling av stål fra flytende råjern. Råjernet renses for forurensninger og legeres etter ønskede egenskaper. I 2020 ble det produsert 1864 millioner tonn ubearbeidet stål i verden (33).

Stål er utsatt for korrosjon, spesielt ved kontakt med fuktighet og oksygen over tid. Korrosjon fører til rust på overflaten, som over tid kan svekke materialet. Siden stål ikke har et naturlig beskyttende lag mot korrosjon, må et slikt lag påføres manuelt. Dette kan være et tynt lag av et annet metall, maling, lakk eller andre overflatebehandlingsmetoder. Dette er et viktig aspekt å vurdere ved valg av materialer, da det medfører kostnader og arbeid gjennom konstruksjonens levetid (34).

For konstruksjonsstål er både sveising og bruk av bolter svært vanlige sammenføyningsmetoder. Sveisbarheten for stål avhenger av legeringer, og lavt karboninnhold er viktig for god sveisbarhet (35). Ved sveising av stål dannes det også en varmepåvirket sone i nærheten av sveiseskjøten, men for sveisbart stål er disse strukturomvandlingene godartede og fører ikke til alvorlige feil eller konsekvenser (36).

Tabell 8 viser noen sentrale egenskaper for stål:

Egenskaper	Symbol	Verdi	Enhet
Atomsymbol	Fe		
Atomnummer		26	
Tetthet	$\rho$	7852 - 8005	kg/m <sup>3</sup>
Elastisitetsmodul	E	210 000	N/mm <sup>2</sup>
Skjærmodul	G	81 000	N/mm <sup>2</sup>
Smeltepunkt	T <sub>m</sub>	1371 - 1454	°C
Termisk utvidelseskoeffisient	$\alpha$	12 * 10 <sup>-6</sup>	°C <sup>-1</sup>
Varmeledningsevne	$\lambda$	50	W/(K*m)

Tabell 8: Egenskaper/informasjon om stål (17, 37, 38)

## 6. Materialteknisk sammenligning av aluminium og stål

I kapittel 4 er aluminium grundig presentert. Kapittelet beskriver veien fra aluminium som et ukjent materiale til et materiale som produseres i flere legeringer, med ulike egenskaper og mange bruksområder. Egenskapene, både positive og negative, er oppsummert for å gi et oversiktlig bilde av aluminium som materiale. I kapittel 5 er stål presentert kort, men med nødvendig informasjon for å gi et enkelt bilde av stål i forhold til aluminium.

I tabell 3 og 8 er de mekaniske egenskapene til henholdsvis aluminium og stål oppsummert. Det som spesielt bør bemerkes er forskjellen i tetthet, elastisitetsmodul, termisk utvidelseskoeffisient og varmeledningsevne.

Aluminium har en tetthet som utgjør litt over en tredjedel av stålets tetthet. Med dette forholdet vil en gitt volumenhet av aluminium veie omtrent en tredjedel av samme volumenhet av stål. Om lav eller høy tetthet skal anses som en fordel eller ulempe, avhenger av konteksten materialet skal brukes i. Aluminium vil være foretrukket der lav vekt er avgjørende. Dette kan også resultere i besparelser på kostnader og tid, med tanke på mindre behov for fundamentering, lettere transport og raskere montering (4).

Videre har aluminium en tredjedel av elastisitetsmodulen til stål, noe som betyr at stivheten er betydelig lavere. Dette resulterer blant annet i større forskyvninger, for eksempel nedbøyninger. For eksempel, en I-bjelke med jevnt fordelt belastning der nedbøyningen er den dimensjonerende faktoren og høyden på bjelken ikke kan endres, vil tverrsnittsarealet på aluminiums-bjelken være tre ganger så stort som for stålbjelken. Selv om tettheten til aluminium er en tredjedel av stålets, vil vekten være den samme for begge bjelkene. Med samme flensareal i bjelkene, må høyden på aluminiums-bjelken økes med 60 % sammenlignet med stålbjelken. I dette tilfellet vil nedbøyningen være den samme, men vekten til aluminiums-bjelken vil være halvparten av vekten til stålbjelken (4).

Termisk utvidelseskoeffisient for aluminium er omtrent dobbelt så stor som for stål. Dette betyr at aluminium vil utvide seg mer enn stål for hver grad økning i temperatur. Dette fenomenet utgjør imidlertid ikke nødvendigvis et problem, forutsatt at det tas hensyn til både generelt og spesielt når aluminium og stål kombineres i samme konstruksjon (4).

Aluminium har over fire ganger så høy varmeledningsevne som stål. Den høye varmeledningsevnen til aluminium er en av årsakene til HAZ-problematikken. Varmen sprer seg

raskt gjennom aluminium og fører til større temperaturgradienter sammenlignet med stål. Den raske varmespredningen kan også føre til ujevn oppvarming og nedkjøling, noe som kan forårsake sprøhet og uønskede indre spenninger i materialet (4).

Stål har et høyere smeltepunkt enn aluminium. Begge materialene er utsatt ved brann, men stål vil beholde noe av sin fasthet lengre enn aluminium. Ved lave temperaturer er aluminium derimot det bedre valget, siden stål blir mindre duktilt ved lave temperaturer, noe som øker faren for at det oppstår brudd uten tydelig forvarsel.

Stål har en vesentlig større utfordring med korrosjon sammenlignet med aluminium. Det naturlige oksidlaget som dannes på aluminium beskytter materialet mot videre korrosjon, mens stål mangler dette, og vil derfor korrodere uten beskyttelse. Dette resulterer i at stålbruer krever betydelig mer vedlikehold enn aluminiumsbruer, noe som fører til høyere kostnader over bruens levetid. I tillegg kan korrosjon svekke stålets strukturelle integritet, noe som ytterligere understreker viktigheten av kontinuerlig vedlikehold.

Sammenføyning av aluminium og stål kan begge gjøres på flere måter. Sveising og bruk av bolter er vanlig for begge, men for aluminium er sveising helt klart mest brukt. Ved sveising av stål slipper man å dimensjonere etter reduksjonsfaktor for HAZ, da stål ikke mister noe styrke.

Videre er utmatting et problem for både stål- og aluminiumskonstruksjoner. Stål har generelt høyere utmattingsstyrke sammenlignet med aluminium. Dette skyldes blant annet stålets høyere elastisitetsmodul. I tillegg vil stål, etter et gitt antall sykluser, nå en utmattingsgrense. Dette betyr at materialet ikke mister mer styrke selv om det utsettes for flere lastsykluser. Aluminium, derimot, har ingen slik utmattingsgrense, noe som gjør det mer sårbart for utmatting over tid (4).

## 7. Læring om aluminium

I denne delen av oppgaven undersøkes det hvordan gruppen tilegnet seg kunnskap om det nye og ukjente emnet aluminium, samt metodene som ble anvendt for å lære om dimensjonering. Det vil bli presentert beregninger for en forenklet statisk modell basert på spennvidden til Hangarbrua, utformet i både stål og aluminium.

### 7.1 Innhenting av informasjon

Dimensjonering av aluminium og bruken av aluminium som konstruksjonsmateriale var et helt nytt fagfelt for oss. Dette temaet er ikke en del av undervisningsplanen på bachelornivå, og det er også en merkbar mangel på relevant tilgjengelig litteratur, faglig materiale og eksempler sammenlignet mot stål. Derfor ble det investert betydelige mengder tid i begynnelsen av semesteret for å identifisere et passende utgangspunkt for vår studie og for å skaffe en forståelse av de relevante temaene som skulle utforskes.

Et av de innledende tiltakene i oppgaven var utskriften og innbindingen av EK-9. Samtidig oppdaget vi en engelsk veiledningsbok for EK-9, som var særlig nyttig i de første forsøkene på å utføre beregninger på et aluminiumsprofil. Ved arkitektur- og byggbiblioteket fant vi noen relevante bøker. Blant disse var *Aluminium Design and Construction* av John Dwight og *Aluminium in Building* av John Lane. Videre fant vi en bok på internett av Ulrich Müller, med tittel *Introduction to Structural Aluminium Design*. Disse tre bøkene har vært fundamentale i prosessen med å utvide vår forståelse av aluminium som materiale.

Fra semesterets begynnelse og i løpet av de påfølgende månedene, ble en betydelig mengde tid brukt på å kommunisere med ulike aktører i byggebransjen via e-post. Dette inkluderte selskaper med spesifikk kunnskap om bruk av aluminium som konstruksjonsmateriale og dimensjonering. Vi rettet særlig oppmerksomheten mot de firmaene som hadde en direkte tilknytning til prosjektet Hangarbrua, som COWI og Leirvik, men vi utvidet også søket til andre aktører som kunne ha relevant erfaring fra andre prosjekter. Blant disse var Ole Terje Midling, *Head of HSEQ & Sustainability* hos Marine Aluminium AS, som i et videomøte ga oss verdifull informasjon om aluminium og dets egenskaper i bærende konstruksjoner. Selv om svarene vi mottok varierte, opplevde vi ofte at de fleste henviste oss til andre som de mente var bedre egnet til å besvare våre spørsmål.



Med påskens ankomst hadde vi samlet nok informasjon til å begynne å skissere oppgavens videre retning. Det neste trinnet var å utvikle en 3D-modell av Hangarbrua i RSA, inkludert bestemmelser og dimensjonering av laster, samt tilhørende kontrollberegninger for modellen. Før de mer omfattende kontrollberegningene begynte, ble den forenklete statiske modellen dimensjonert.

## **7.2 Dimensjonering av forenklet modell**

I denne delen av studien ble et hulprofil på 500x400x15 mm dimensjonert for å tåle belastninger som moment, skjær og nedbøyning, utført i både stål og aluminium – sistnevnte både med og uten HAZ. Formålet med disse beregningene var å sammenligne kapasiteten til aluminium mot stål og undersøke hvordan HAZ påvirker kapasiteten til aluminium. Detaljerte beregninger for stål finnes i vedlegg F, mens beregningene for aluminium finnes i vedlegg G og H.

### **7.2.1 Utgangspunkt og begrensninger**

I disse beregningene har vi tatt utgangspunkt i Hangarbruas spennvidde på 55 m, og ser på den som en enkel 2D-modell. Den statiske modellen representerer en standard en-felts bjelke med et glidelager og et fastlager i hver sin ende. Beregningene er utført kun om sterk akse. Tverrsnittet som er utsatt for HAZ består av valsede plater, sveist sammen i alle fire hjørner. Dette innebærer HAZ ut fra hvert hjørne i begge retninger er inkludert i beregningene.

Før beregningene ble det antatt at kravene til både moment og nedbøyning ikke ville bli opprettholdt på grunn av den betydelige spennvidden. Likevel ble det besluttet å gjennomføre disse vurderingene for å kunne sammenligne resultatene med senere beregninger av Hangarbrua.

### **7.2.2 Forenklet lastsituasjon**

I de innledende beregningene ble det tatt utgangspunkt i en forenklet lastsituasjon. De inkluderte lastene omfatter egenvekt av aluminium eller stål, en jevnt fordelt last fra fotgjengere, samt en punktlast fra tjenestekjøretøy.

Som nevnt i tabell 3 og 8, er egenvekten av aluminium og stål henholdsvis 27 kN/m<sup>3</sup> og 77 kN/m<sup>3</sup>, og tverrsnittets areal er 0,0261 m<sup>2</sup>. Dette resulterer i en jevnt fordelt last fra egenvekt på 0,705 kN/m for aluminium og 2,01 kN/m for stål. For dette eksempelet ble lasten fra fotgjengere satt til 1,5 kN/m, noe som gir en total jevnt fordelt last på 2,2 kN/m for aluminium og 3,5 kN/m for stål.

Lasten fra tjenestekjøretøy, som omtalt i delkapittel 8.2.1, vil fordeles over to akslinger med en avstand på tre meter, med henholdsvis 80 kN og 40 kN på bakre og fremre aksling, som illustrert i figur 12. Denne avstanden på tre meter mellom punktlastene ble neglisjert gitt deres relativt korte

avstand sammenlignet med bruens spenn, noe som innebærer at en samlet punktlast på 120 kN er brukt.

### **7.2.3 Opptredende moment og skjærkrefter fra forenklet lastsituasjon**

I beregningen av de opptredende kreftene ble det vurdert flere lastscenarier for å identifisere hvilke situasjoner som skaper de største momentene og skjærkreftene. Initialt ble det beregnet med kun punktlasten, en situasjon hvor lasten var plassert midt på bjelken og en direkte over opplageret. Deretter ble det vurdert tre scenarier der både jevnt fordelt last fra aluminium og fotgjengere, samt punktlasten, var til stede: ett med punktlasten plassert i midten, ett med punktlasten over opplageret, og ett med punktlasten plassert en meter til høyre for opplageret.

Beregningen viste at situasjonen med lasten sentrert i midten resulterte i det største momentet på 2481,88 kNm, mens punktlasten plassert en meter til høyre for opplageret produserte de største skjærkreftene på 178,3 kN. For stål var de samme lastscenariene gjeldende, men med ny egenvekt ble det største momentet målt til 2973,44 kNm, og de største skjærkreftene til 214,1 kN. For fullstendige håndberegninger og tegninger av lastdiagrammene, se vedlegg C og D.

### **7.2.4 Ståldimensjonering**

For dimensjoneringen av hulprofilet i stål er det benyttet standard stålsort S355, og beregningene er basert på elastisitetsteori. Ligningene som er brukt for dimensjonering er hentet fra EK-3-1-1, og disse er oppført nedenfor.

- Ligning (6.12) – Krav som skal tilfredsstilles for bøyemoment
- Ligning (6.13) – Dimensjonerende kapasitet mot bøyning om én hovedakse
- Ligning (6.19) – Kriterium for tilstrekkelig dimensjonerende elastisk skjærkapasitet
- Ligning (6.20) – Dimensjonerende verdi for skjærspenninger

Det er i tillegg brukt ligninger fra tabell 3.1 i stålkonstruksjoner – Profiler og formler (P&F) for beregning av nedbøyning, og tabell 5.2 i EK-3-1-1 for bestemmelser av tverrsnittsklasse.

Tabell 9 oppsummerer håndberegningene for både moment, skjær og nedbøyning, og viser om kravet er oppfylt.

	<b>Opptredende</b>	<b>Kapasitet / krav</b>	<b>Kontroll</b>
<b>Moment</b>	2973 kNm	1306 kNm	Ikke OK
<b>Skjær</b>	0,086	1	OK
<b>Nedbøying</b>	4108 mm	157,14 mm	Ikke OK

Tabell 9: Oppsummering av håndberegninger – stål

### 7.2.5 Aluminiumsdimensjonering

For dimensjonering av hulprofilet i aluminium er det tatt utgangspunkt i legering 5383 – H321, og beregningene er som tidligere nevnt gjort for både med og uten HAZ. Det er beregnet at både flens og steg er av tverrsnittsklasse 4. Det er derfor regnet med redusert tykkelse for tverrsnittet for å ta høyde for lokal knekking for begge beregningene. Tverrsnittet utsatt for HAZ har også redusert beregningsmessig tykkelse i de varmeutsatte områdene.

Ligninger brukt for håndberegning av aluminium fra EK-9 er:

- Ligning (6.1) – Slankhetsparameter
- Ligning (6.12) – Lokal knekningsfaktor for tverrsnittsklasse 4
- Ligning (6.23) – Krav som skal tilfredsstilles for bøyemoment
- Ligning (6.24) – Momentkapasitet for nettotverrsnitt
- Ligning (6.25) – Momentkapasitet for tverrsnitt
- Ligning (6.28) – Krav som skal tilfredsstilles for skjærkrefter
- Ligning (6.29) – Skjærkapasitet
- Ligning (6.30) – Skjærareal

Det er i tillegg hentet informasjon ut fra tabell NA.3(901), tabell 6.2, tabell 6.3, og tabell 6.4 i EK-9.

Tabell 10 oppsummerer håndberegningene for både moment, skjær og nedbøying, samt viser om kravet er oppfylt.

	<b>Opptredende</b>	<b>Kapasitet / krav</b>	<b>Kontroll</b>
<b>Moment – uten HAZ</b>	2482 kNm	663,3 kNm	Ikke OK
<b>Skjær – uten HAZ</b>	178,3 kN	1682,1 kN	OK
<b>Nedbøying – uten HAZ</b>	11 683 mm	157,14 mm	Ikke OK
<b>Moment – med HAZ</b>	2482 kNm	583,6 kNm	Ikke OK
<b>Skjær – med HAZ</b>	178,3 kN	1586,9 kN	OK
<b>Nedbøying – med HAZ</b>	13 279 mm	157,14 mm	Ikke OK

Tabell 10: Oppsummering av håndberegninger – aluminium

### 7.2.6 Sammenligning

I tabell 11 kan man se utnyttelsesgraden for moment, skjær og nedbøying for de tre ulike situasjonene.

	<b>Moment</b>	<b>Skjær</b>	<b>Nedbøying</b>
<b>Stål</b>	2,28	0,086	26,14
<b>Aluminium u/ HAZ</b>	3,74	0,106	74,35
<b>Aluminium m/ HAZ</b>	4,25	0,112	84,5

Tabell 11: Oversikt over utnyttelsesgrad

Det er en markant forskjell i momentkapasiteten mellom stål og aluminium. For aluminium uten HAZ er momentkapasiteten nesten nøyaktig halvparten av det den er for stål. Utnyttelsesgraden er imidlertid ikke dobbelt så høy, ettersom de opptredende momentene er forskjellige for de to materialene. Forskjellen i momentkapasitet mellom aluminium med og uten HAZ er merkbar, men ikke så stor som først antatt. Det er en forskjell på 79,9 kNm, noe som tilsvarer en reduksjon på omtrent 12 % i momentkapasiteten for tverrsnittet beregnet med HAZ sammenlignet med uten.

Når det gjelder skjærkapasiteten, er forskjellene mellom aluminium og stål mindre, og spesielt mellom aluminium med og uten HAZ. Det er en forskjell på 2 % mellom stål og aluminium uten

HAZ, og 2,6 % mellom stål og aluminium med HAZ. Dette resulterer i en marginal forskjell på kun 0,6 % mellom aluminium med og uten HAZ.

For nedbøyning derimot, observeres det betydelige forskjeller i alle tre situasjonene. På grunn av det store spennet har nedbøyningene blitt ekstremt store. For stål er nedbøyningen over 26 ganger større enn tillatt, og for aluminium øker dette ytterligere. Den betydelige økningen fra stål til aluminium skyldes hovedsakelig to faktorer: Aluminium har en E-modul som er en tredjedel av stålets, og 2. arealmoment endres når tverrsnittet til aluminium reduseres etter tverrsnittsklasse 4 og påvirkningen av HAZ.

## 8. Laster

Dette kapitlet tar for seg de opptredende lastene på bruene. Laster skal klassifiseres etter deres variasjon over tid på følgende måte: permanente virkninger, variable virkninger og ulykkespåvirkninger. Den karakteristiske verdien av påvirkningen bør anvendes som utgangspunkt for å beregne dimensjonerende lasteffekter (31).

### 8.1 Permanente laster

Permanente laster forventes å være omtrent konstante gjennom den aktuelle tidsperioden, ofte betraktet som konstruksjonens levetid. Eksempler på permanent påvirkning inkluderer: tyngde av konstruksjonen (egenlast), tyngde av permanent ballast og utstyr som ikke vil bli fjernet, ytre vanntrykk og jordtrykk. I vår oppgave er det ikke relevant å vurdere vanntrykk og det er valgt å se bort fra jordtrykk.

#### 8.1.1 Egenvekt

Egenvekten er vekten av selve aluminiumskonstruksjonen, dvs. stekkbånd, bue, dekke, vindfagverk, samt hengestengene i stål. Tabell A.4 i EK-1-1-1, oppgir følgende egenvekter som skal benyttes:  $27 \text{ kN/m}^3$  for aluminium og  $77 \text{ kN/m}^3$  for stål (38). RSA er benyttet for å beregne egenvekten, resultatet er 340 kN fordelt på fire opplagre, dette tilsvarer en egenvekt på 34670 kg.

#### 8.1.2 Superegenvekt

Superegenvekt er vekten av permanent utrustning utover selve bærekonstruksjonen. I følge N400 5.2.2.2 skal dimensjonerende belegningsvekt alltid inkluderes. Belegningsvekten er avlest fra tabell 5.2 i N400 til å være  $2 \text{ kN/m}^2$ . Belegningsvekten er fordelt utover gangarealet på bruene som er på  $385 \text{ m}^2$ . Videre er bruene utstyrt med et indre rekkverk og et ytre beskyttelsesrekkverk langs hele bruens lengde. Vanlig gang- og sykkelrekkverk og beskyttelsesrekkverket antas med egenvekt hver på  $0,5 \text{ kN/m}$ .

Samlet resulterer dette i 886 kN fordelt på fire opplagre, dette tilsvarer en total superegenvekt på 89526 kg.

## 8.2 Variable laster

Variable laster, er belastninger på en konstruksjon som varierer i størrelse, posisjon eller tid. Variable laster omfatter trafikklast, støt- og fortøyningslast, naturlaster og andre variable laster (31). Dette delkapitlet tar for seg de variable lastene på bruene.

## 8.2.1 Vertikale statiske trafikklaster

For Hangarbrua vil statiske gangbanelaster være aktuelle. Statiske gangbanelaster er gitt i EK-1-2, punkt 5.3.2. Den består av en jevnt fordelt last,  $q_{fk}$ , en punklast,  $Q_{fk}$  og last fra tjenestekjøretøy,  $P_{serv}$ .

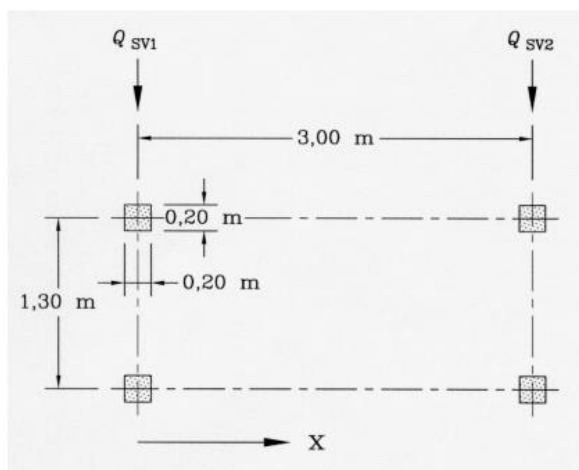
Den jevnt fordelte lasten er, i henhold til punkt 5.3.2.1 (2) gitt til å være  $5 \text{ kN/m}^2$  i tilfeller hvor en stor folkemengde kan samles på bruen. I vårt tilfelle anser vi ikke dette som en risiko og beregner dermed den jevnt fordelte lasten etter ligning (5.1) i EK-1-2:

$$q_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L + 30} \leq 5 \text{ kN/m}^2$$

Resultatet av denne ligningen med innsatt  $L = 55$ , blir  $3,4 \text{ kN/m}^2$ . Lasten er fordelt over bruens gangbaneareal.

I henhold til punkt 5.3.2.2 (3), kan punktlasten utelates hvis det kontrolleres for tjenestekjøretøy. Hangarbrua vil bli kontrollert med tjenestekjøretøy, for eksempel en traktor som utfører brøyting. Dermed kan punktlasten  $Q_{fk}$  utelukkes.

Tjenestekjøretøyet er definert etter punkt 5.6.3 som to akselgrupper med last på  $80 \text{ kN}$  og  $40 \text{ kN}$ . Kjøretøyet skal modelleres med en akselavstand på  $3 \text{ m}$  og en avstand mellom hjulenes senterlinje på  $1,3 \text{ m}$ . Se figur 12.



Figur 12: Lastplassering for tjenestekjøretøy (39)

$X$  = Bruens lengdeakse

$Q_{sv1} = 80 \text{ kN}$

$Q_{sv2} = 40 \text{ kN}$

### 8.2.2 Horisontalt statiske trafikklaster

Ifølge EK-1-2 punkt NA 5.4 skal den karakteristiske verdien av den horisontale kraften  $Q_{fik}$  i bruens lengderetning settes lik den største av følgende (39):

- 10 % av totalt jevnt fordelt last:

$$Q_{flk} = 3,4 \frac{kN}{m^2} * (55m * 7m) * 0,1 = 130,9 kN$$

- 60 % av totalvekten av tjenestekjøretøy, der det er aktuelt.

$$Q_{flk} = 120 kN * 0,6 = 72 kN$$

Horisontal kraft i bruens lengde retning blir 130,9 kN.

Videre opptrer en horisontal kraft i bruens tverretning samtidig med tjenestekjøretøy og settes ifølge punkt NA.5.4 til å være 25% av den horisontale kraften i lengderetningen (39), dvs. 32,7 kN.

### 8.2.3 Snølast

I følge N400 antas det at snølast ikke forekommer samtidig med trafikklaster på veibruer, fergekaier eller gang- og sykkelbruer. Hvis en del av konstruksjonen benyttes som lagringsplass for snø, eller det ikke er forventet at den vil bli ryddet for snø, må lasten vurderes separat (31). Bruen vil bli brøytet, dermed vil ikke snølast opptre på gangarealet. Det vil derimot kunne akkumulere seg noe snølast i området mellom indre rekkverk og ytre beskyttelsesrekkverk. Snølasten leses av tabell NA.4.1(901) i EK-1-1-3, til å være  $3,5 kN/m^2$ . Snølasten er fordelt utover området mellom rekkverkene tilsvarende  $55 m^2$  på hver side av bruene.

### 8.2.4 Vindlast

I beregningen av vindlast på konstruksjoner benyttes EK-1-1-4 og Vegnormal N400. Vindlast er en variabel naturlast som kan påvirke byggverk i varierende grad avhengig av lokasjon. Ved beregning tar man spesielt hensyn for værharde områder, som kysten eller fjellregioner, hvor vindforholdene kan variere betydelig gjennom året. EK-1-1-4 definerer beregninger basert på faktorer som basisvindhastighet, terrengruhet og terrengform (40). Dimensjonering for karakteristisk vindbelastning tar utgangspunkt til den største vindhastigheten som statistisk forekommer hvert 50. år, kjent som referansevindhastigheten. Denne verdien er kritisk for å fastsette karakteristisk vindbelastning for dimensjonering av konstruksjoner, tilpasset de spesifikke lokale forholdene der konstruksjonen er plassert. Dette delkapittelet tar for seg beregning av vindlast kort oppsummert, fullstendige beregninger finnes i vedlegg E.



Beregning av vindlast vil være avgrenset til å ta for seg statisk vindlast i tverretningen. Ifølge N400 punkt 5.4.3.1, faller bruene inn under vindlastklasse 1, og er dermed ikke sensitiv for dynamiske vindlaster. Videre er bruens tverrsnitt lite nok til at vindlasten i lengderetningen blir liten nok til å neglisjere.

Vindhastighetstrykk er uttrykt med ligning (4.8) i EK1 del 1-4:

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2$$

$I_v(z)$  er turbulensintensitet,  $\rho$  er luftens tetthet og  $v_m$  er middel- /stedsvindhastighet.

Turbulensintensitet er uttrykt med ligning (4.7):

$$I_v(z) = \frac{k_t}{C_0(z) * \ln \frac{z}{z_0}}$$

Turbulensintensiteten er avhengig av turbulensfaktoren  $k_t$ , terrengformfaktor  $C_0$  og ruhetslengde  $z_0$  anbefalt verdi for  $k_t$  er gitt i punkt 4.4 til å være 1. Videre er både  $C_0$  og  $z_0$  avhengig av terrenget rundt bruene. Hangarbrua ligger på Lade i Trondheim kommune. Området rundt bruene består av større næringsbygg, boligblokker og butikklokaler. Terrengkategorien antas etter tabell 4.1 i EK1 del 1-4 til å være kategori 3. Fra tabellen kan vi lese av verdien for  $z_0$ .

Tabell 4.1 – Terrengkategorier og terrengparametere

Terrengkategori	$z_0$ m	$z_{min}$ m
0 Kyststrøk som er eksponert for åpent hav	0,003	1
I Innsjøer eller flatt og horisontalt område med lite vegetasjon og uten hindringer	0,01	1
II Område med lav vegetasjon som gress og spredte hindringer (trær, bygninger) med avstand minst 20 ganger deres høyde	0,05	2
III Område med vegetasjon eller bygninger eller med spredte hindringer med avstand minst 20 ganger deres høyde (landsbyer, forstadsterreng, permanent skog)	0,3	5
IV Område der minst 15 % av overflaten er dekket av bygninger, og deres gjennomsnittlige høyde overskrider 15 m	1,0	10

MERKNAD Terrengkategoriene er illustrert i A.1.

Tabell 12: Terrengkategori og terrengparameter (40)

Turbulensintensiteten er beregnet til å være 0,2515 ved  $z = 16$  m over bakkenivå.

Luftens tetthet er satt til å være  $1,25 \text{ kg/m}^3$ .

Middel- /stedsvindhastighet er uttrykt med ligning (4.3):

$$v_m(z) = C_r(z) * C_0(z) * v_b$$

$C_r(z)$  er ruhetsfaktor, uttrykt med ligning (4.4), er beregnet til 0,8565 ved  $z = 16$  m.

$v_b$  er basisvindhastighet og er uttrykt med ligning (NA.4.1). Uttrykket tar utgangspunkt i referansevindhastigheten  $v_{b,0}$  for så å øke eller redusere hastigheten ved hjelp nivåfaktor, retningsfaktor, årstidsfaktor og faktor for returperiode ulikt 50 år. Referansevindhastigheten er avlest fra tabell NA.4(901.1) til å være 26 m/s for Trondheim. Alle faktorene utenom faktor for returperiode settes til 1. Faktor for returperiode beregnes til å være 1,038 og basisvindhastigheten er beregnet til å være 27,0004 m/s.

Middel- /stedsvindhastigheten beregnes da med innsatte verdier til å være 23,1261 m/s.

Dermed beregnes vindhastighetstrykket til å være 0,923 kN/m<sup>2</sup> ved  $z = 16$  m. Tabell 13 oppsummerer turbulensintensitet, middelvindhastighet og vindhastighetstrykk.

<b>I<sub>v</sub>(16m)</b>	<b>v<sub>m</sub>(16 m) [m/s]</b>	<b>q<sub>p</sub>(16 m) [kN/m<sup>2</sup>]</b>
0,2515	23,1261	0,923

Tabell 13: Oppsummering av turbulensintensitet, middelvindhastighet og vindhastighetstrykk

Videre angir N400 og EK-1-1-4 hvordan vindtrykk kan fordeles som linjelaster i x- , y- , og z-retningene i manuelle beregninger. Se vedlegg E for komplett beregning av formfaktoren for dekke, bue og strekkstag.

Til slutt er RSA brukt. Programmet har automatiserte funksjoner for å beregne og visualisere vindlastfordelingen direkte fra innsatt vindhastighetstrykk og vindprofil. Dette gir en effektiv og nøyaktig analyse av vindpåvirkning på konstruksjoner.

### 8.2.5 Temperaturlaster

Ifølge EK-1-1-5 er termiske påvirkninger definert som effekter på en konstruksjon eller deler av den som oppstår grunnet endringer i temperaturfeltet over en bestemt periode (41).

Termisk lengdeutvidelseskoeffisient angir forholdet mellom relativ utvidelse og temperaturforandring i et legeme. Som nevnt i tabell 3 og 8, er denne koeffisienten  $23 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  for aluminium og  $12 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  for stål.

For eksempel, et 3000 mm langt stykke av aluminiumslegeringen 6063 vil, hvis det varmes opp fra  $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$  til  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ , oppleve en termisk ekspansjon som øker lengden til 3003,5 mm. Samme eksempelet for stål vil gi en økt lengde på 3001,8 mm.

Ifølge EK-1-1-5 punkt 6.1.2(1) bør verdier for termiske påvirkninger bestemmes ut fra jevnt fordelte temperaturandeler og temperaturdifferanser. Den jevnt fordelte temperaturendringen er avhengig av den laveste og høyeste temperaturen som antas for en bru. Dette skaper et spekter for temperaturendringen som er jevnt fordelt, og i tilfeller der en konstruksjonsdel ikke er fastholdt, vil dette resultere i en lengdeendring av denne delen. Temperaturdifferanser fra oppvarming og avkjøling på oversiden av et brudekke vil føre til temperaturvariasjoner over et bestemt tidsrom, som et resultat av maksimal oppvarming og avkjøling. Disse forskjellene kan forårsake belastninger i vertikal retning (41).

På grunn av oppgavens tidsbegrensninger og omfang har vi valgt å ikke inkludere videre beregninger av termiske påvirkninger på bruene.

### **8.3 Kabelbytte**

I henhold til håndbok N400, punkt 13.2.4, skal utskifting av hengestag kontrolleres der det er aktuelt. Det er imidlertid, med hensyn til oppgavens omfang, valgt å ikke inkludere denne kontrollen. Dersom det hadde vært inkludert skulle man regnet med et avsperrert areal på 3 m. Det avsperrerte arealet går over hele bruens lengde. Det avsperrerte arealet skal belastes med en nyttelast på 0,5 kN/m<sup>2</sup>.

### **8.4 Ulykkeslaster**

Med tanke på oppgavens omfang vil ikke beregninger av ulykkeslaster bli inkludert. Allikevel vil noen relevante ulykkeslaster nevnes kort.

Kabelbrudd er en svært relevant ulykke som vil påføre de andre kablene rundt bruddet større laster. I følge EK-3-1-11 punkt 2.3.6(2) skal det regnes med en dynamisk tilleggslast ved bortfall (42). Det dynamiske tillegget er gitt i ligning (2.4) i EK-3-1-11.

På grunn av oppfylte krav til fri høyde vil ikke påkjøringslast på overliggende bæresystem være en risiko. Videre er avstanden fra jernbanesporet til bruens underbygning og landkar større enn 5 m i henhold til TRV 525-11 punkt 3, noe som gjør at påkjøringslast i underbygning kan sees bort i fra i henhold til EK-1-1-7 tabell 4.4 (43).

### **8.5 Utmattingslast**

Utmattingslaster og beregninger på utmatting vil ikke bli inkludert i detalj i oppgaven, men vil bli gjort kort rede for.

Som nevnt i delkapittel 4.6 vil gjentatte tøyninger og vekslinger i spenninger vil over tid føre til dannelsen av små sprekker i materialet. Dersom sprekkenes får tid til å vokse kan det føre til utmattingsbrudd i materialet. Dynamiske laster som trafikklast og vindlast vil skape bevegelser i konstruksjonen, som over tid vil kunne bli kritiske.

Det viktig å identifisere de områdene som er mest utsatt for utmatting. Typiske utsatte områder er sveiseforbindelser og overganger. Kritiske områder må dimensjoneres tilstrekkelig slik at komponenten kan tåle de belastningene som oppstår gjennom hele sin levetid.

## **8.6 Grensetilstander og lastkombinering**

I EK-0 blir grensetilstander beskrevet som tilstander som definerer grensene for når en konstruksjon ikke lenger oppfyller de fastsatte kriteriene for dimensjonering (44). Grensetilstander deles inn i fire tilstander; brudd-, bruks-, utmattings- og ulykkestilstand. I utgangspunktet skal alle konstruksjoner kontrolleres etter disse fire tilstandene, før den kan vurderes som sikker for bruk. I vår oppgave har vi av tidsmessige grunner og av hensyn til oppgavens omfang valgt å fokusere på kun brudd- og bruksgrensetilstand.

### **8.6.1 Partialfaktormetoden**

I moderne prosjekteringsarbeid anvendes en teknikk kjent som partialfaktormetoden. Denne tilnærmingen benytter flere sikkerhetsfaktorer, referert til som partialfaktorer eller partialkoeffisienter. Se tabell 16. Disse faktorene tar hensyn til forskjellige typer usikkerheter som kan påvirke de tekniske beregningene, inkludert usikkerhet knyttet til lastverdier ( $\gamma_f$ ) og variabilitet i materialenes egenskaper ( $\gamma_m$ ) (45).

Partialfaktormetoden støtter seg på prinsippet om karakteristiske verdier, som bør fastsettes basert på statistiske metoder. Karakteristiske laster er spesifisert i henhold til EK-0. For å bestemme den dimensjonerende lasten multipliseres den karakteristiske lasten med en partiell sikkerhetsfaktor,  $\gamma$ . Verdiene på disse partialfaktorene, både for laster og materialparametere, er avhengig av hvordan de karakteristiske verdiene de kombineres med er definert. For laster som varierer over tid, som snø og vind, er en karakteristisk verdi  $Q_k$  vanligvis definert slik at sannsynligheten for at verdien overskride er 2 % per år. Dette tilsvarer at  $Q_k$  har en returperiode på 50 år, hvilket indikerer at lastnivået  $Q_k$  statistisk sett vil overskride én gang hvert femtiende år (45).

## 8.6.2 Bruddgrensetilstand

Bruddgrensetilstand, ofte kalt *Ultimate Limit State* (ULS), beskrives i henhold til EK-0 som grensetilstander som er av betydning for menneskers og/eller konstruksjonens sikkerhet. Det kan med andre ord beskrives som tilstander knyttet til sammenbrudd eller andre lignende former for konstruksjonssvikt (44). Dette innebærer hvor stor belastning en konstruksjon skal motstå før brudd. Typiske faktorer som fører til brudd inkluderer tap av likevekt, deformasjonsbrudd, stabilitetstap og brudd som skyldes utmattelse. I punkt 6.4.1 av EK-0 er det spesifisert hvilke typer bruddgrensetilstander som må dokumenteres, se tabell 14. Med hensyn til oppgavens omfang er det valgt å kun kontrollere for bruddgrensetilstanden, STR.

Bruddgrensetilstander som skal dokumenteres:	
<b>EQU</b>	Tap av statisk likevekt for en konstruksjon eller enhver del av den.
<b>STR</b>	Brudd eller store deformasjoner i konstruksjonen eller konstruksjonsdelene.
<b>GEO</b>	Brudd eller store deformasjoner i grunnen.
<b>FAT</b>	Utmattingsbrudd i konstruksjonen eller konstruksjonsdelene.

Tabell 14: Bruddgrensetilstander

Ifølge EK-0 punkt A2.3.1 (4) skal prosjektering av konstruksjonsdeler (STR) uten geotekniske laster gjennomføres ved bruk av de dimensjonerende lastene i tabell NA A2.4(B), se tabell 16. Når man utarbeider både vedvarende og forbigående dimensjonerende situasjoner, vil man anvende kombinasjoner av ligningene (6.10a) og (6.10b) fra EK-0. Ligningen som er mest ugunstig vil være dimensjonerende for konstruksjonen. Tilhørende partielle sikkerhetsfaktorer kan leses ut fra tabell 16 og tilhørende kombinasjonsfaktorer finnes i tabell 15.

Tabell NA.A2.2 – Verdier av  $\psi$ -faktorer for gangbruer

Påvirkning	Symbol	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2^{(1)}$	$\psi_{1,inf}^{(1)}$
Trafikklaster	gr1 (jevnt fordelt last)	0,7 <sup>(2)</sup>	0,7	0,2/0,5	0,8
	Q <sub>trk</sub> (konsentrert last)	0,7 <sup>(2)</sup>	0,7	0,2/0,5	0,8
	gr2 (tjeneskjeretøy)	0,7 <sup>(2)</sup>	0,7	0,2/0,5	0,8
Vindkrefter	F <sub>wk</sub>	0,7	0,6	0/0,5	0,8
	F <sub>w*</sub>	0,7	0,6	0/0,5	0,8
Temperatur <sup>(3)</sup>	T <sub>L</sub>	0,7	0,6	0/0,5	0,8
Snølaster	Q <sub>sn</sub> På tak o.l.	0,7	0,6	0,2/0,5	0,8
	Q <sub>sn</sub> Under utførelse	0,8	-	-	-
Laster i byggetilstand	Q <sub>L</sub>	1,0	-	1,0	-
Istrykk	-	0,7	0,6	0/0,5	0,8
Bølger og strøm	-	0,7	0,6	0/0,5	0,8
Vanntrykk, variabel del	-	0,7	0,6	0/0,5	0,8
Jordtrykk, variabel del	-	0,7	0,6	0/0,5	0,8
Last fra lagerfriskjon	-	0,7	0,6	0/0,5	0,8
Øvrige variable laster	-	0,7	0,6	0/0,5	0,8

<sup>(1)</sup>  $\psi_{1,inf}$  er en faktor beregnet på å definere sjeldent forekommende laster.

<sup>(2)</sup> Der vindlasten behandles som den dominerende lasten, representert ved F<sub>wk</sub>, bør  $\psi_0$  for trafikklast settes lik 0, jf. også A2.2.2(5).

<sup>(3)</sup> Påvirkning fra temperatur medtas i alle lastkombinasjoner, også i bruddgrensetilstand, dersom virkningen er ugunstig.

<sup>(4)</sup> Ved beregning av rissvidder i henhold til NS-EN 1992 for lastkombinasjonen "linærmet permanent" benyttes verdien 0,5. Verdien 0,2 respektive 0 kan benyttes ved beregning av langtidseffekter for tidsavhengige egenskaper.

Tabell 15: Verdier av  $\psi$ -faktorer for gangbruer

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)	$\gamma_{G,imp} G_{k,imp}$	$\gamma_{G,inf} G_{k,inf}$	$\gamma_p P$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} Q_{k,i}$
(Ligning 6.10 b)	$\xi \gamma_{G,imp} G_{k,imp}$	$\gamma_{G,inf} G_{k,inf}$	$\gamma_p P$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} Q_{k,i}$

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

MERKNAD 1 Det skal i bruddgrenstilstanden 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, flytledd 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:

$\gamma_{G,imp}$  = 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>

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

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

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

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

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

$\gamma_D$  = 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  $\gamma_{G,imp}$  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).

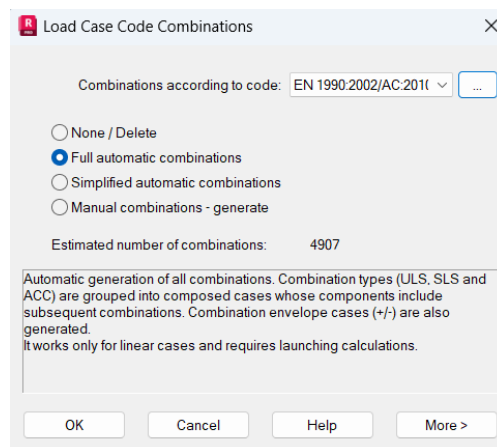
MERKNAD 4 For spesielle påvisninger kan verdiene for  $\gamma_D$  og  $\gamma_Q$  igjen deles inn i verdiene  $\gamma_{Dg}$  og  $\gamma_{Dn}$  og modellens usikkerhetsfaktor  $\gamma_{SD}$ . En verdi for  $\gamma_{SD}$  som ligger mellom 1,05 til 1,15, kan normalt benyttes.

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.

Tabell 16: Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (44)

Ved bruk av RSA kan programmet selv beregne lastkombinasjoner. I programmet kan man angi aktuell dimensjoneringsstandard og anvendte ligninger for å finne mest ugunstig lastkombinasjon. I RSA har man også muligheten til å sette inn egendefinerte sikkerhetsfaktorer og kombinasjonsverdier, se figur 13 og tabell 17.



Figur 13: Automatisk kombinering av laster i RSA

Code:		EN 1990:2002/AC:2010 (Eq.6)	Version:		38.0											
	Nature	Subnature	$\gamma_{max}$	$\gamma_{min}$	$\gamma_s$	$\gamma_a$	$\Psi_{0,1}$	$\Psi_{0,2}$	$\Psi_{0,3}$	$\Psi_{0,n}$	$\Psi_1$	$\Psi_{2,1}$	$\Psi_{2,n}$	$\Psi_k$	$\xi_i$	
1	Dead	STRC	1.35	1	1	1									0.89	
2	Dead	NSTR	1.35	1	1	1									0.85	
3	Live	CAT_A	1.35		1		0.7		0.3		0.7	0.2				
4	Live	CAT_B	1.35		1		0.7		0.3		0.7	0.2				
5	Snow		1.5		1		0.7				0.6					
6	Snow	S_M1000	1.5		1		0.7				0.6					
7	Snow	S_P1000	1.5		1		0.7		0.2		0.5	0.2	0.2			
8	Wind		1.6		1		0.6		0.2		0.2					
9	Temperature		1.5		1		0.6				0.5					
10	Accidental					1										
11	Seismic					1										
12																

Tabell 17: Partielle- og kombinasjonsfaktorer i RSA

### 8.6.3 Bruksgrensetilstand

Bruksgrensetilstand, vanligvis referert til som *Serviceability Limit State (SLS)*, er i henhold til EK-0 definert som tilstander som markerer grensen for når konstruksjonen eller dens deler ikke lenger tilfredsstillende etablerte kravene under vanlig bruk. Denne grensetilstander har betydning for konstruksjonens funksjonsdyktighet ved normalt bruk, utseende og menneskets komfort (44).

I bruksgrensetilstanden er det vanlig å sette alle partialkoeffisienter for de ulike lastene til 1, det vil si at både  $\gamma_G$  og  $\gamma_Q$  er lik 1. EK-0 definerer tre lastkombinasjoner for det generelle scenarioet der det finnes flere variable laster  $Q_{k,i}$ , som anvendes i bruksgrensetilstanden (45).

Karakteristisk kombinasjon, Ligning 6.14b i EK-0:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Hvor  $\Psi_{0,i} Q_{k,i}$  representerer den karakteristiske kombinasjonsverdien for den variable lasten. Denne kombinasjonen resulterer i en høy verdi for den ledende variable lasten ( $\Psi_{0,1} = 1,0$ ) og brukes vanligvis til å beregne korttidsforskyvningene (45).

Ofte forekommende kombinasjon, ligning 6.15b i EK-0:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Hvor  $\Psi_{1,1} Q_{k,1}$  representerer den ofte forekommende verdien av den dominerende lasten  $Q_{k,1}$ , og  $\Psi_{2,i} Q_{k,i}$  angir den tilnærmet permanente (kvasi-permanente) verdien av den variable lasten  $Q_{k,i}$ .

Denne kombinasjonen resulterer i betydelig lavere laster sammenlignet med den karakteristiske kombinasjonen, og den brukes til å vurdere reversible effekter, det vil si effekter som forekommer med en viss regelmessighet, men som avtar når lasten reduseres (45).

Tilnærmet permanent kombinasjon, ligning 6.16b i EK-0:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Verdien  $\Psi_{2,i} Q_{k,i}$  representerer den kvasi-permanente verdien av den variable lasten  $Q_{k,i}$ . Denne spesifikke kombinasjonen brukes for å analysere langtidseffekter, som kryp (45).

Håndbok N400, punkt 3.6.1 stiller funksjonskrav til bruer. Først og fremst skal ikke deformasjon av brukonstruksjonens brubane for noen lastplassering ha større nedbøyning enn  $L/350$ , hvor  $L$  er lengden av det betraktede spenn. Kontrollen utføres med karakteristisk trafikklast alene (31).

Videre nevner N400 at kompensasjon for nedbøyning i brubanen til en bru som skyldes permanente laster, inkludert langtidseffekter, skal oppnås ved å anvende overhøyde. Nødvendige overhøyde skal beregnes ved å bruke en kombinasjon tilnærmet permanent, ligning 6.16b i EK-0. For variable laster skal kombinasjonsfaktoren  $\psi_2$  settes til 0 (31).

Dimensjonerende verdier for laster i bruksgrensetilstander vil bli hentet fra tabell 18 og satt i kombinasjon med kombinasjonsfaktorer hentet fra tabell 15.

Tabell A2.6 – Dimensjonerende verdier for laster til bruk i lastkombinasjoner

Kombinasjon	Permanente laster $G_d$		For-spennning	Variable laster $Q_d$	
	Ugunstig	Gunstig		Dominerende last	Andre laster
Karakteristisk	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$P$	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} Q_{k,i}$
Ofte forekommende	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$P$	$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
Tilnærmet permanent	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$P$	$\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

Tabell 18: Dimensjonerende verdier for laster til bruk i lastkombinasjoner

Som nevnt under delkapittelet 8.6.2, har analyseprogrammet RSA mulighet til å beregne lastkombinasjoner. Dette vil også bli benyttet for å finne mest og minst gunstige lastkombinasjoner i bruksgrensetilstanden.



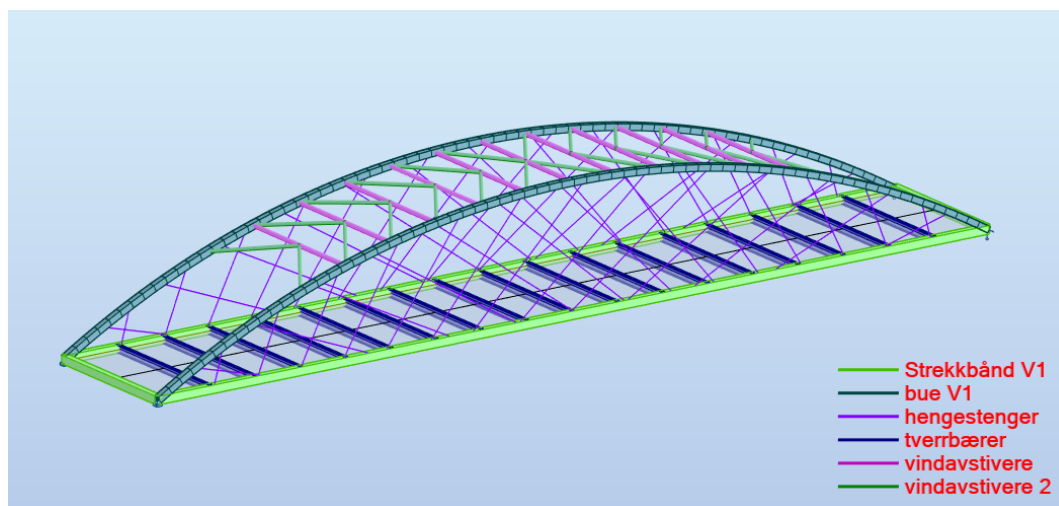
## 9. Digital modell

Dette kapitlet presenterer utarbeidingen, detaljene og resultatene fra den digitale modellen som er brukt i oppgaven.

### 9.1 Modellering

Oppbygningen av den digitale modellen er basert så godt som mulig på COWI og Leirviks snitt- og detaljtegninger. Modellen består av strekkbånd, tverrbærere, dekke, hengestenger, vindfagverk og buene. Modellens dimensjoner gjenspeiler virkelige dimensjoner, men med noen egne antagelser der det mangler gode tegninger å ta utgangspunkt i.

På grunn av relevansen og tidsmessige grunner er det er gjort noen forenklinger i forhold til tegningene, først og fremst er buene og strekkbåndene ikke vinklet innover  $7^\circ$  slik som den virkelige bruene, hengestengene er sentrert på strekkbåndene/buene istedenfor å være forskjøvet over stegene. Strekkbåndene er modellert som horisontale istedenfor å ha kurve i vertikalplanet,  $2^\circ$  tverrfall er heller ikke inkludert. Rekkverk og beskyttelsesskjermer er ikke modellert, men tilhørende laster er inkludert.



Figur 14: Egenprodusert modell i RSA

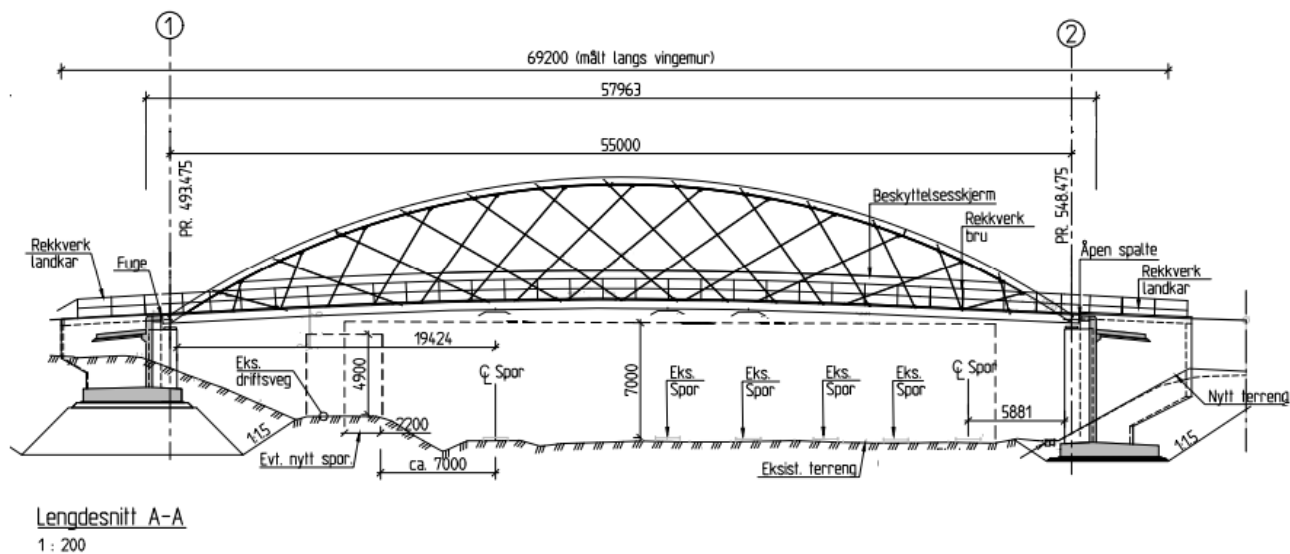
### 9.2 Beskrivelse

Dekket består av ekstruderte aluminiumsprofiler som er 70 mm høye. Disse er festet til 19 tverrbærere med senteravstand 3,25 m/3,0 m. Endetverrbjelkene er oppsveist hulprofil i aluminium mens resterende tverrbjelker er I-profiler. Tverrbjelkene er sveist fast i strekkbåndet som består av oppsveist hulprofil i aluminium. Strekkbåndet og dekket holdes opp av 26 hengestenger i hvert bueplan, totalt 52 hengestenger. Hengestengene er massive stag i stål med diameter  $d = 29$  mm

som er festet i buen med konstant avstand  $l = 2,089$  m og som er vinklet  $45^\circ$  i forhold til buens radius. Buen består av oppsveist hulprofil i aluminium og har en pilhøyde på 8,5 m i vertikalplanet. Buen er stivet av med et vindfagverk bestående av sirkulære aluminiumsprofiler. Bruen er opplagret på pot-lagre i akse 1 og akse 2. Komponentenes lengde vises i tabell 19.

Komponent	Lengde [mm]
Dekke	L=55 000
Tverrbærer (Hulprofil)	L=9 000
Tverrbærer (I-profil)	L=9 000
Strekkbånd	L=55 000
Hengestenger	L=1 700 - 11 660
Bue	L=57 940
Vindavstiver 1	L=9 000
Vindavstiver 2	L=5500

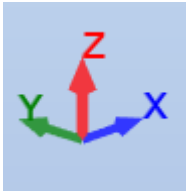
Tabell 19: Komponenter og tilhørende lengde for modulert bru



Figur 15: Lengdesnitt av Hangarbrua benyttet som utgangspunkt ved modellering.

### 9.3 Aksesystem

Den digitale modellen opererer med to aksesystem, et globalt og et lokalt. Det globale gir en felles referanse for hele konstruksjonen. Dette systemet er fast og endres ikke gjennom modellen, noe som gir en konsistent orientering og referanse for alle elementer og komponenter. Modellens globale aksesystem setter x-aksen horisontalt i konstruksjonens lengderetning, y-aksen horisontalt langs konstruksjonens tverretning. Z-aksen representerer den vertikale retningen, se figur 16.



Figur 16: Globalt aksesystem

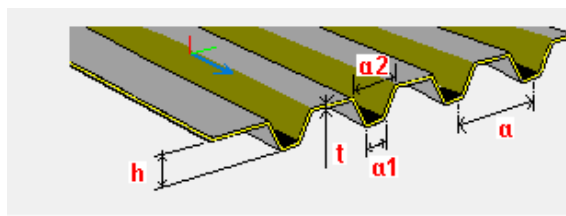
Det lokale aksesystemet er spesifikt for individuelle elementer eller deler av konstruksjonen. Det kan roteres og justeres avhengig av de spesifikke kravene eller geometrien til komponenten det er knyttet til. Dette tillater mer detaljert og tilpasset analyse av strukturelle deler, som kan ha unike belastninger eller støttebetingelser.

### 9.4 Materialer og egenskaper

Ved modellering i RSA bestemmes materialer, tverrsnitt og egenskaper etter COWI og Leirviks forslag, dimensjonene på tverrsnittene er vist i tabell 20.

Konstruksjonsdel	Tverrsnitt [mm]	Materiale
Dekke	$h = 70, b = 9000, t = a = a_2 = 103, a_1 = 0$ se figur 17	Aluminium
Tverrbærer (Hulprofil)	$h = 500, b = 400, t_f = t_w = 15$	Aluminium
Tverrbærer (I-profil)	$h_w = 390, b = 250, t_f = 20, t_w = 10$	Aluminium
Strekkbånd	$h = 500, b = 400, t_f = t_w = 15$	Aluminium
Hengestenger	Ø29, massiv	Rustfritt stål
Bue	$h = 400, b = 400, t_f = t_w = 30$	Aluminium
Vindavstiver 1	$d = 250, t = 7$	Aluminium
Vindavstiver 2	$d = 200, t = 5$	Aluminium

Tabell 20: Konstruksjonsdeler med tilhørende tverrsnittdimensjoner



Figur 17: Dekkeprofil

## 9.5 Materialparametere

Materialparametere brukt i modellen er de samme som nevnt i tabell 3 og 8 i henholdsvis kapittel 4 og 6.

## 9.6 Laster / lastkombinasjoner

Den digitale modellen vil bli påført lastene omtalt i kapittel 8. Programvaren RSA beregner mest og minst ugunstige situasjon for bruks- og bruddgrensetilstand. De påførte lastene er vist i tabell 21.

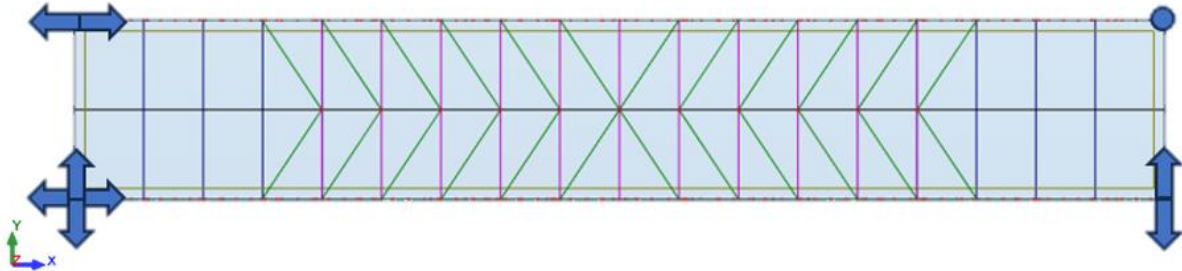
Last	Verdi	Lasttype
Egenvekt	340 kN	Statisk
Superegenvekt	886 kN	Statisk
Personlast	3,4 kN/m <sup>2</sup>	Dynamisk
Tjenestekjøretøy	120 kN	Dynamisk
Snølast	3,5 kN/m <sup>2</sup>	Dynamisk
Vindlast	0,923 kN/m <sup>2</sup> *	Dynamisk

Tabell 21: Påførte laster på den digitale modellen

\* Vindhastighetstrykk brukt i RSA vindsimulering.

## 9.7 Randbetingelser

Modellen er fritt opplagt med to lagre i hver ende, konstruksjonen er fastholdt mot forskyvning i z-retning. Alle opplagerne har fri rotasjon om alle akser. Figur 18 viser de respektive frihetsgradene.



Figur 18: Randbetingelser

## 9.8 Global analyse

En global analyse er en evaluering av hele konstruksjonens respons på påførte laster. En global analyse ser på hvordan den samlede konstruksjonen oppfører seg under ulike lasttilfeller, inkludert hvordan krefter og spenninger fordeler seg.

Formålet med en global analyse er å sikre at konstruksjonen i sin helhet er i stand til å motstå belastningene den vil bli utsatt for igjennom hele dens livsløp.

Analysen er kjørt lineært og tar for seg en intakt bru med alle nødvendige laster beskrevet i delkapittel 9.6, samt kombinasjoner av lastvirkninger til ULS og SLS.

## 9.9 Opptredende krefter i bruddgrensetilstand

Komplett oversikt over ekstremalverdiene for aksielle krefter, moment, skjærkrefter og torsjon for de ulike komponentene i konstruksjonen finnes i vedlegg J. Følgende delkapitler tar for seg vedlegg J oppsummert i tabellform.

### 9.9.1 Aksialkraft

Tabell 22 viser maksimalt opptredende aksialkraft for de ulike konstruksjonsdelene.

Konstruksjonsdel	Maksimal verdi [kN]	Type
Strekkbånd	1205,27	Strekk
Bue	1784,61	Trykk
Hengestenger	117,57	Strekk
Tverrbærere	86,06	Strekk
Tverrbærere	31,15	Trykk
Vindfagverk	68,19	Trykk
Vindfagverk	62,92	Strekk

Tabell 22: Aksialkrefter i ULS

### 9.9.2 Moment om sterk akse

Tabell 23 viser maksimalt opptredende verdier for moment om sterk akse for de ulike konstruksjonsdelene. Med unntak av hengestenger og vindfagverk, da de har sirkulære tverrsnitt og har dermed ingen svak eller sterk akse, derfor betraktes disse rundt x- og y-akse.

Konstruksjonsdel	Maksimal verdi [kNm]	Type
Strekkbånd	54,23	Strekk på oversiden ved opplager
Bue	55,10	Strekk på undersiden
Hengestenger, om y-akse	0,94	Strekk på undersiden
Tverrbærere	98,17	Strekk på undersiden
Vindfagverk, om y-akse	0,31	Strekk på oversiden

Tabell 23: Momenter om sterk akse i ULS

### 9.9.3 Moment om svak akse

Tabell 24 viser maksimalt opptredende verdier for moment om svak akse for de ulike konstruksjonsdelene, med unntak av hengestenger og vindfagverk.

Konstruksjonsdel	Maksimal verdi [kNm]	Type
Strekkbånd	101,25	Strekk på utsiden, ved opplager
Bue	162,79	Strekk på utsiden, ved opplager
Hengestenger, om x-akse	1,69	Strekk på utsiden
Tverrbærere	18,91	Strekk på utsiden
Vindfagverk, om x-akse	5,32	Strekk på oversiden

Tabell 24: Momenter om svak akse i ULS

#### 9.9.4 Skjærkrefter

Maksimale verdier av skjærkrefter for de ulike konstruksjonsdelene er presentert i tabell 25.

Retning beskriver hvilken akse kraften virker langs.

Konstruksjonsdel	Maksimal verdi [kN]	Retning
Strekkbånd	71,43	z-retning
Strekkbånd	49,10	y-retning
Bue	48,09	z-retning
Bue	37,39	y-retning
Hengestenger	0,35	z-retning
Hengestenger	0,88	y-retning
Tverrbærere	35,49	z-retning
Tverrbærere	52,01	x-retning
Vindfagverk	2,29	z-retning
Vindfagverk	1,47	x-retning

Tabell 25: Skjærkrefter i ULS

### 9.9.5 Torsjonsmoment

Konstruksjon	Maksimal verdi [kNm]
Strekkbånd	26,23
Bue	15,82
Hengestenger	0
Tverrbærere	0
Vindfagverk	0

Tabell 26: Torsjonsmomenter i ULS

### 9.10 Opptredende krefter i bruksgrensetilstand

Likt som forrige delkapitler vil følgende tabeller 27 til 31 ta for seg maksimale verdier for aksialkraft, moment, skjærkraft og torsjon for de ulike konstruksjonsdelene i lastkombinasjonen SLS.

#### 9.10.1 Aksialkraft

Tabell 27 viser maksimalt opptredende aksialkraft i de ulike konstruksjonsdelene.

Konstruksjonsdel	Maksimal verdi [kN]	Type
Strekkbånd	939,36	Strekk
Bue	1370,67	Trykk
Hengestenger	90,03	Strekk
Tverrbærere	65,93	Strekk
Tverrbærere	30,51	Trykk
Vindfagverk	24,76	Trykk
Vindfagverk	15,34	Strekk

Tabell 27: Aksialkrefter i SLS

#### 9.10.2 Moment om sterk akse

Tabell 28 viser maksimalt moment om sterk akse for de ulike konstruksjonsdelene.



Konstruksjonsdel	Maksimal verdi [kNm]	Type
Strekkbånd	43,21	Strekk på undersiden
Bue	39,06	Strekk på undersiden, ved opplager
Hengestenger, om y-akse	0,72	Strekk på undersiden
Tverrbærere	102,89	Strekk på undersiden
Vindfagverk, om y-akse	0,12	Strekk på oversiden

Tabell 28: Momenter om svak akse i SLS

### 9.10.3 Moment om svak akse

Tabell 29 viser maksimalt moment om svak akse for de ulike konstruksjonsdelene.

Konstruksjonsdel	Maksimal verdi [kNm]	Type
Strekkbånd	61,85	Strekk på utsiden, ved opplager
Bue	16,44	Strekk på utsiden, ved opplager
Hengestenger, om x-akse	0,03	Strekk på utsiden
Tverrbærere	61,85	Strekk på utsiden, ved opplager
Vindfagverk, om x-akse	1,65	Strekk på undersiden

Tabell 29: Momenter om svak akse i SLS

### 9.10.4 Skjærkraft

Tabell 30 viser maksimal skjærkraft i ulike retninger for de ulike konstruksjonsdelene.

Konstruksjonsdel	Maksimal verdi [kN]	Retning
Strekkbånd	59,27	z-retning
Strekkbånd	30,02	y-retning
Bue	39,92	z-retning
Bue	3,24	y-retning
Hengestenger	0,25	z-retning
Hengestenger	0,02	y-retning
Tverrbærere	36,77	z-retning
Tverrbærere	43,13	x-retning
Vindfagverk	0,77	z-retning
Vindfagverk	0,57	x-retning

Tabell 30: Skjærkrefter i SLS

### 9.10.5 Torsjonsmoment

Tabell 31 viser maksimalt torsjonsmoment i de ulike konstruksjonsdelene.

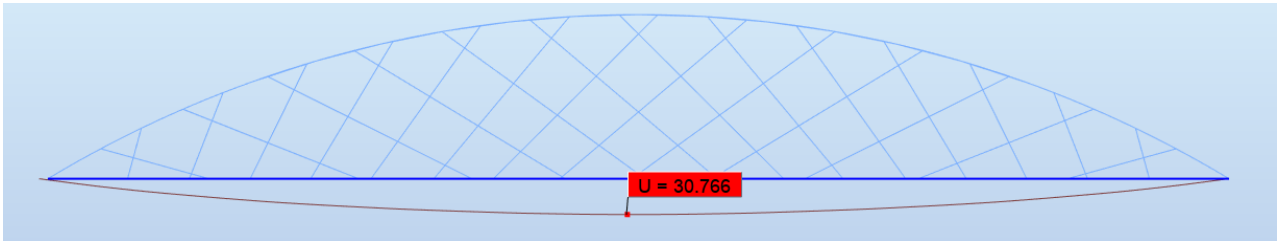
Konstruksjonsdel	Maksimal verdi [kNm]
Strekkbånd	26,98
Bue	1,42
Hengestenger	0
Tverrbærere	0
Vindfagverk	0

Tabell 31: Torsjonsmomenter i SLS

## 9.11 Nedbøying

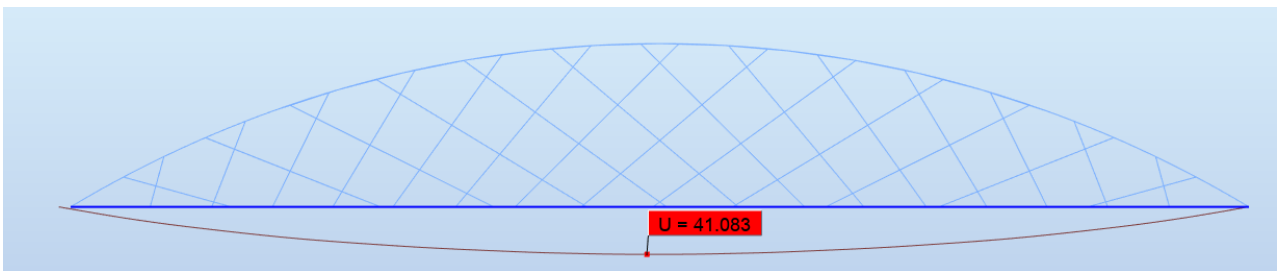
Som nevnt i delkapittel 8.6.3, stilles det funksjonskrav til at bruer ikke skal ha en deformasjon på større enn  $L/350$  med trafikklast alene. Videre skal nedbøying av brukonstruksjonens brubane på grunn av permanente laster, inkludert langtidseffekter, kompenseres med overhøyde. Figur 19 viser

nedbøyningen i det ene strekkbåndet på grunn av karakteristisk trafikklast og figur 20 viser nedbøyning på grunn av permanente laster. Deformasjonen er oppgitt i mm.



Figur 19: Nedbøyning i strekkbånd med karakteristisk trafikklast

Fra figur 19 kan vi se at nedbøyningen er på 30,776 mm, som tilsvarer  $L/1787$  som er mye mindre enn  $L/350$  og er dermed innenfor kravet.

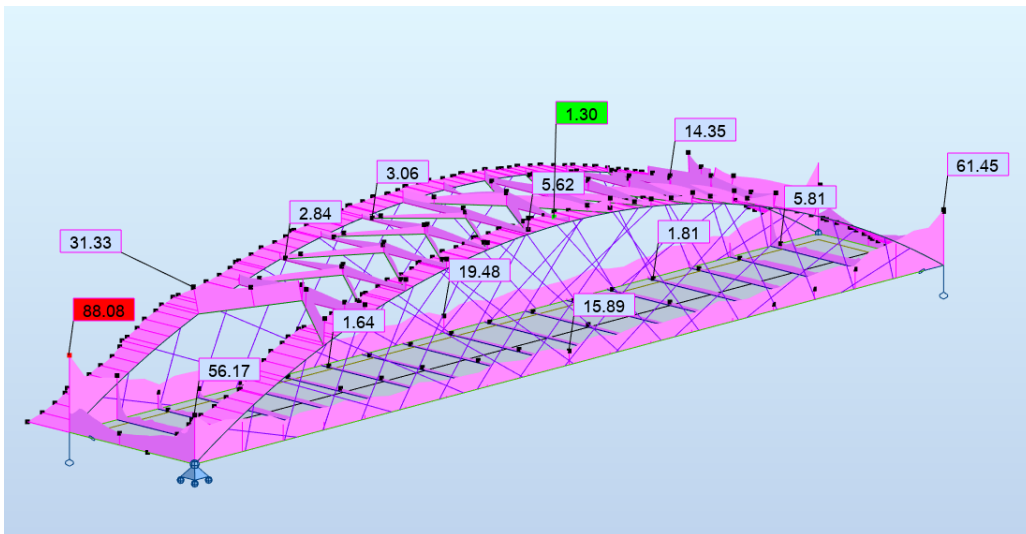


Figur 20: Nedbøyning i strekkbånd med permanente laster

Figur 20 viser at nedbøyningen fra permanente laster er 41,083 mm. Dette tilsvarer nødvendig høyde som må kompenseres med overhøyde.

## 9.12 Von Mises flytekriterium i bruddgrensetilstand.

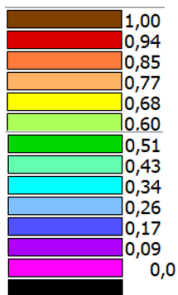
Von Mises flytekriterium beskriver at et materiale vil begynne å plastisk deformere seg dersom spenningen, kjent som von Mises-spenningen ( $\sigma_{\text{von Mises}}$ ), overskrider materialets flytespenning ( $\sigma_y$ ). Kriteriet vurderer effekten av de tre hovedspenningene samlet, og tilbyr dermed et pålitelig estimat for når et materiale vil begynne å flyte under komplekse belastningsforhold. I RSA-analysen ble maksimal  $\sigma_{\text{von Mises}}$  beregnet til 88,08 MPa. Med strekkbåndets dimensjonerende flytespenning på 200 MPa uten HAZ og 131 MPa med HAZ, er det klart at flytekriteriet ikke oppfylles, det vil si at konstruksjonen ikke vil oppleve plastisk deformasjon i noen snitt.



Figur 21: Von Mises-spenninger i ULS

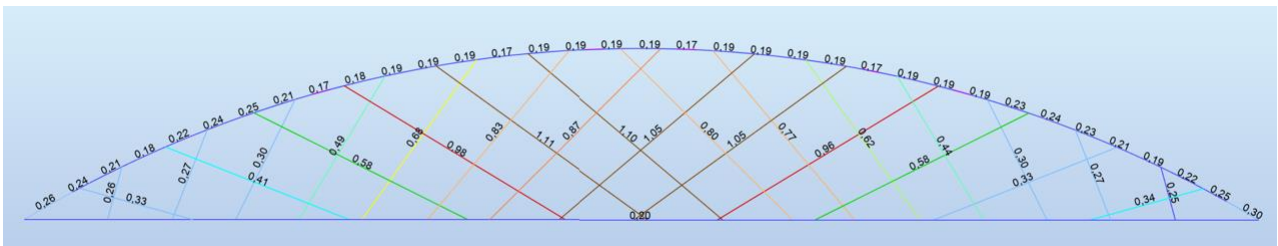
### 9.13 Utnyttelsesgrad

RSAs innbygde kontroll for utnyttelsesgrad viser at store deler av konstruksjonen har tilfredsstillende kapasitet i mest ugunstige lastkombinasjon i ULS, med unntak av fire hengestenger på siden vinden treffer, ifølge RSA er momentet om lokal z-akse i hengestengene for stort. Nøyaktigheten til denne kontrollen er diskutert i delkapittel 13.1.2. I figur 22 kan man se skalaen og tilhørende farger, brukt til å fremheve utnyttelsesgradene. Videre ser man i figur 23 til 26 utnyttelsesgradene til de ulike komponentene fra forskjellige sider.



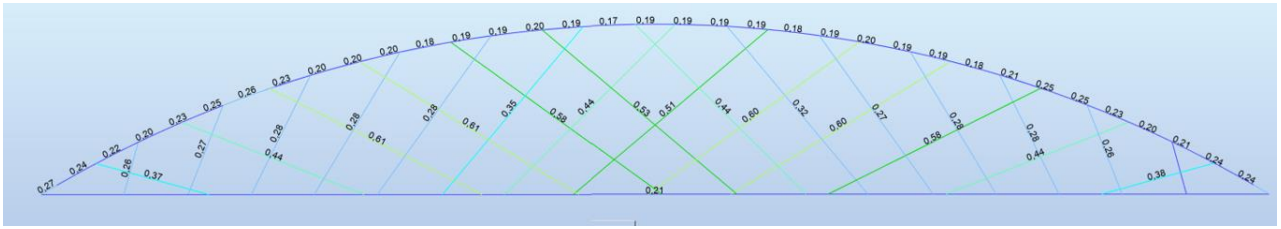
Figur 22: Skala for utnyttelsesgrad

Foran:



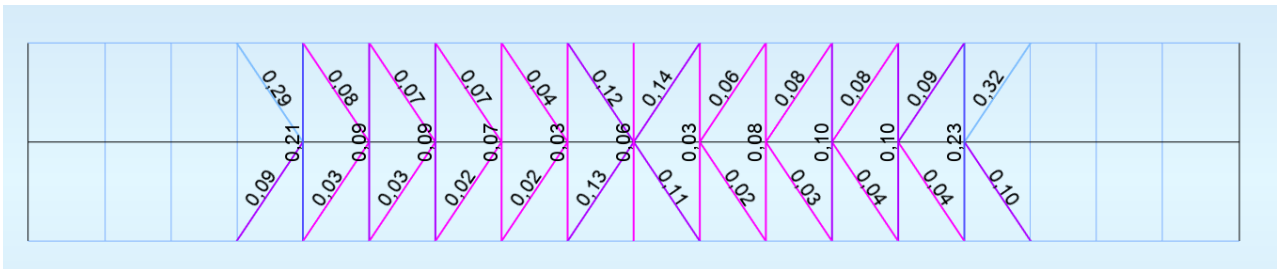
Figur 23: Utnyttelsesgrad sett forfra

Bak:



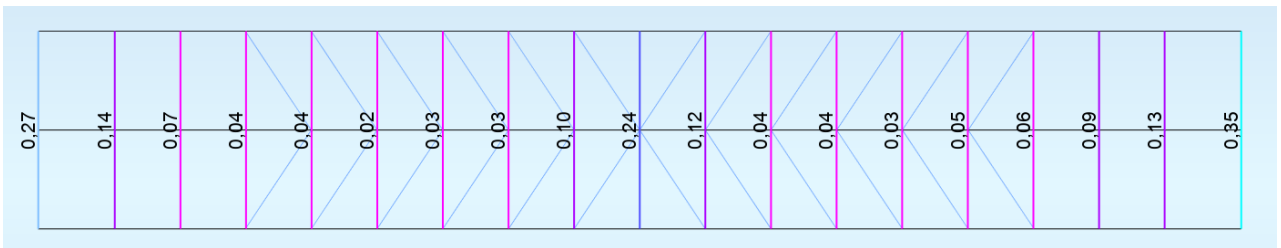
Figur 24: Utnyttelsesgrad sett bakfra

Ovenfra:



Figur 25: Utnyttelsesgrad sett ovenfra

Underside:



Figur 26: Utnyttelsesgrad sett fra undersiden

## 10. Kontrollberegning av strekkbånd med krefter fra RSA

I denne delen av oppgaven vil de manuelle kontrollberegninger bli presentert. Det vil bli forklart hvilke begrensninger som er lagt til grunn og hva som er beregnet. Videre vil noen utvalgte elementer fra beregningene bli forklart for å illustrere tankeprosessen bak disse. Kraftene som virker på strekkbåndet, hentet fra RSA-modellen, nevnes i dette kapitlet. For en detaljert oversikt henvises det til delkapittel 9.9.

### 10.1 Utgangspunkt og begrensninger

Kontrollberegningene for modellen fokuserer på strekkbåndet, som er et hulprofil med dimensjonene 500x400x15 mm, sveiset sammen av valsede plater i legering 5383-H321. I disse beregningene utføres det omfattende kontroller som vurderes om både sterk og svak akse. Det antas også at maksimale krefter opptrer samtidig i samme snitt, noe som ikke alltid er tilfellet i virkeligheten. Denne antakelsen gir grunnlag for konservative og sikkerhetsorienterte resultater i beregningene.

Tverrsnittet er sveist sammen i alle fire hjørner, noe som resulterer i HAZ som strekker seg ut fra hvert hjørne i begge retninger. På grunn av den svekkede materialeegenskapen i disse områdene, er det foretatt en beregningsmessig justering av tykkelsen. Dette er gjennomført ved å anvende en reduksjonsfaktor på tverrsnittets tykkelse for å reflektere påvirkningen fra HAZ.

Reduksjonsfaktoren er satt til 0,66 for flytstyrke og 0,95 for bruddstyrke.

Både flensen og stegene er etter formelverket klassifisert som tverrsnittsklasse 4, noe som indikerer en risiko for lokal knekking. For å ta hensyn til dette, er den beregningsmessige tykkelsen for hele tverrsnittet redusert. Denne reduksjonen er beregnet ved hjelp av en reduksjonsfaktor, som er utledet fra ligning (6.12) og tabell 6.3 i EK-9.

### 10.2 Opptredende krefter fra RSA-modell

De ulike opptredende kreftene i strekkbåndet er:

- Bøyemoment – sterk akse: 54,23 kNm
- Bøyemoment – svak akse: 101,25 kNm
- Skjærkraft – sterk retning: 71,43 kN
- Skjærkraft – svak retning: 49,10 kN
- Strekkraft: 1205,27 kN
- Torsjonsmoment: 26,23 kNm

### 10.3 Brukte ligninger og tabeller

Fra EK-9 er følgende ligninger benyttet for manuelle beregninger på aluminium:

- Ligning (6.1) – Slankhetsparameter
- Ligning (6.12) – Lokal knekningsfaktor for tverrsnittsklasse 4
- Ligning (6.17) – Krav som skal tilfredsstilles for strekkrefter
- Ligning (6.18) – Strekkapasitet for generell flytegrense
- Ligning (6.19b) – Strekkapasitet for lokalt brudd med HAZ
- Ligning (6.23) – Krav som skal tilfredsstilles for bøyemoment
- Ligning (6.24) – Momentkapasitet for nettotverrsnitt
- Ligning (6.25) – Momentkapasitet for tverrsnitt
- Ligning (6.28) – Krav som skal tilfredsstilles for skjærkrefter
- Ligning (6.29) – Skjærkapasitet
- Ligning (6.30) – Skjærareal
- Ligning (6.32) – Krav som skal tilfredsstilles for torsjonsmoment
- Ligning (6.34) – Krav som skal tilfredsstilles for kombinert skjærkrefter og torsjonsmoment
- Ligning (6.37) – Redusert skjærkapasitet
- Ligning (6.43) – Krav som skal tilfredsstilles for kombinert bøyemoment og aksialkrefter

I tillegg er det hentet informasjon ut fra tabell NA.3(901), tabell 6.2, tabell 6.3, tabell 6.4 og tabell 5 i P&F.

### 10.4 Kontrollberegning

Alle kontrollberegningene av strekkbåndet kan ses i vedlegg I.

Først ble tverrsnittets ulike delkapasiteter beregnet. En oversikt over opptredende krefter og momentene, sammen med de beregnede kapasitetene, er presentert i tabell 32. Videre inneholder tabellen konklusjoner om hvorvidt de beregnede kapasitetene er tilstrekkelige for å motstå de påførte belastningene.

	Opptredende	Kapasitet	Kontroll
Moment – sterk akse	54,23 kNm	583,6 kNm	OK
Moment – svak akse	101,25 kNm	528,8 kNm	OK
Skjær – sterk retning	71,43 kN	1586,9 kN	OK
Skjær – svak retning	49,10 kN	1240,5 kN	OK
Strekk	1205,27 kN	4873,2 kN	OK
Torsjon	26,23 kN	646,8 kNm	OK
Redusert skjær – sterk retning	71,43 kN	1522,6 kN	OK
Redusert skjær – svak retning	49,10 kN	1190,2 kN	OK

Tabell 32: Opptredende krefter og kapasiteter

#### 10.4.1 Momentkapasitet

Beregningen av momentkapasitetene er både omfattende og komplekse. Det kreves tre forskjellige motstandsmomenter for både den svake og sterke aksene, hver basert på ulike tverrsnittstykkelse som følge av forskjellige reduksjonsfaktorer. Disse motstandsmomentene anvendes deretter i to ulike formler for å beregne momentkapasiteten. Den laveste verdien fra disse beregningene blir dimensjonerende for konstruksjonens kapasitet. De relevante ligningene er som følger:

$$M_{u,Rd} = \frac{W_{net} * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.24)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{\alpha * W_{el} * f_o}{\gamma_{M1}} \quad (6.25)$$

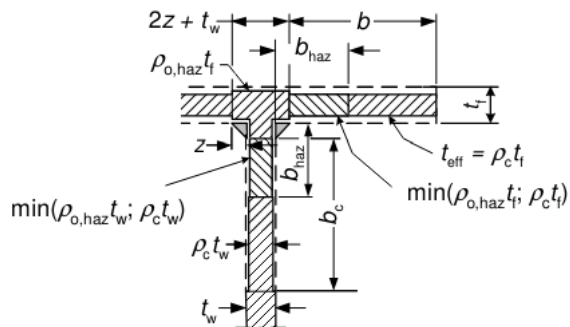
Der verdien alfa er:  $\alpha = \frac{W_{eff,haz}}{W_{el}}$

For å regne ut momentkapasiteten  $M_{c,Rd}$  og verdien  $\alpha$  bruker man altså to forskjellige motstandsmoment,  $W_{el}$  og  $W_{eff,haz}$ . Der  $W_{el}$  er elastisk brutto motstandsmoment for tverrsnittet uten noen form reduksjon i tykkelse.  $W_{eff,haz}$  er det effektive motstandsmomentet etter



tykkelsesreduksjon for både HAZ og tverrsnittsklasse 4. Ved beregning skal man benytte den laveste verdien av de to reduserte tykkelsene for områdene som er både for utsatt HAZ og klassifisert som tverrsnittsklasse 4. For områder som bare tilhører tverrsnittsklasse 4, blir tykkelsen kun redusert etter tverrsnittsklassen.

I dette tilfellet ble hjørnene utsatt for HAZ redusert til en tykkelse lik 9,9 mm, og steget og flensen ned til en tykkelse lik henholdsvis 10,2 mm og 12 mm. Se figur 27, hentet fra EK-9, for visualisering av hvordan man bestemmer effektiv tykkelse.



Figur 27: Effektiv tykkelse for klasse 4 tverrsnitt med sveis

Videre trengs  $W_{net}$  for å regne ut momentkapasiteten  $M_{u,Rd}$ .  $W_{net}$  har en redusert tykkelse over hele tverrsnittet, og tar utgangspunkt i reduksjonsfaktoren for brudd lik 0,95. Dette gir en tykkelse lik 14,25 mm.

Etter at alle de forskjellige tykkelsene er bestemt, regner man ut andre arealmoment og motstandsmoment for de forskjellige tilfellene, for både svak og sterk akse, og sette de inn i ligningene. Dimensjonerende verdi for både svak og sterk akse for dette tverrsnittet ble  $M_{c,Rd}$ . Se tabell 32 ovenfor.

### 10.4.2 Skjærkapasitet

Beregning av skjærkapasitet er vesentlig lettere. Beviser først at tverrsnittet ikke er slankt med punkt 6.2.6 (2) i EK-9, og da blir ligningen for skjærkapasitet lik:

$$V_{Rd} = A_v * \frac{f_o}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} \tag{6.29}$$

Der  $A_v$  er skjærarealet som er gitt ved ligningen:

$$A_v = \sum_{i=1}^n \left[ (h_w - \sum d)(t_w)_i - (1 - \rho_{o,haz}) b_{haz} * (t_w)_i \right] \quad (6.30)$$

Skjærarealet regnes ut for både sterk og svak retning, der sterk retning vil være der  $h_w = 470$  mm og  $h_w = 370$  mm vil gi svak retning. Setter alle verdiene inn i ligningen, og får ut skjærkapasiteten i både sterk og svak retning. Se tabell 32 for resultatet.

Punkt 6.2.8 (2) i EK-9 er brukt for å bevise at skjærkrefter kan neglisjeres i kombinasjon av krefter siden de opptredende kreftene er mindre enn halvparten av den beregnende skjærkapasiteten.

### 10.4.3 Strekkapasitet

Strekkapasitet regnes ut ved å ta utgangspunkt i tre ligninger, der laveste verdi vil være dimensjonerende verdi. Den ene ligningen er for tverrsnitt med hull, noe dette tverrsnittet ikke har, og blir dermed sett bort ifra. De to gjeldende ligningene er:

$$N_{o,Rd} = \frac{A_g * f_o}{\gamma_{M1}} \quad (6.18)$$

$$N_{u,Rd} = \frac{A_{eff} * f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.19b)$$

$N_{o,Rd}$  er kapasiteten for generell flytegrense, og  $N_{u,Rd}$  er for lokalt brudd i HAZ.  $A_g$  og  $A_{eff}$  er begge effektiv tverrsnittsareal etter hver sin reduksjon i tykkelse.  $A_g$  regnes ut ved å redusere HAZ til en tykkelse lik 9,9 mm, og beholder resten av tverrsnittet lik 15 mm.  $A_{eff}$  regnes ut ved å bare redusere hele tverrsnittet ned til 14,25 mm. I dette tilfellet ble  $N_{o,Rd}$  dimensjonerende med en verdi lik 4873,2 kN.

### 10.4.4 Torsjonskapasitet

Det er tatt utgangspunkt i torsjon uten vridning, og da er ligningen for St. Venants torsjonskapasitet gitt som:

$$T_{Rd} = \frac{W_{T,pl} * f_o}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

$W_{T,pl}$  er det plastiske motstandsmomentet mot torsjon og kan skrives slik:

$$W_{T,pl} = \frac{M_{T,p}}{\frac{f_o}{\sqrt{3}}}$$

Der  $M_{T,p}$  er torsjonsmomentet for plastisk tilstand. Fra P&F tabell 5.2, Bredts 1. formel, kan man se at torsjonsmomentet for plastisk tilstand er:

$$M_{T,p} = \frac{f_o}{\sqrt{3}} * 2 * A_m * t_{min}$$

Setter den siste ligningen inn i ligningen for plastisk motstandsmoment, og ender da opp med en forenklet versjon lik:

$$W_{T,pl} = 2 * A_m * t$$

Setter så alle verdier inn i ligningen for St. Venants torsjonskapasitet, og for dette tverrsnittet ble torsjonskapasiteten lik 646,8 kNm.

#### 10.4.5 Kombinert skjærkrefter og torsjonsmoment

Et tverrsnitt sjekkes for kombinert skjærkrefter og torsjonsmoment ved å redusere skjærkapasitet etter torsjonens effekt på tverrsnittet. Det vil si at  $V_{Rd}$  reduseres til  $V_{T,Rd}$ , og kontrolleres opp mot opptredende skjærkrefter,  $V_{Ed}$ . Dette gjøres for både sterk og svak akse. Uttrykket for reduksjonen er gitt som:

$$V_{T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{t,Ed} * \sqrt{3}}{\frac{f_o}{\gamma_{M1}}} \right] * V_{Rd} \quad (6.37)$$

Der  $\tau_{t,Ed}$  er spenningene som oppstår i tverrsnittet forårsaket av det opptredende torsjonsmomentet. Bruker Bredts 1. formel, og får ligningen for spenningen:

$$\tau_{t,Ed} = \frac{T_{Ed}}{2 * A_m * t}$$

Regner så ut redusert skjærkapasitet for både sterk og svak retning, og får ut verdier på henholdsvis 1522,6 kN og 1190,2 kN.

Punkt 6.2.8 (2) og (3) i EK-9 tilsier at denne reduserte skjærkraften også kan neglisjeres hvis de opptredende kreftene er mindre enn halvparten av den nye reduserte beregnende skjærkapasiteten, noe det i dette tilfellet er.

#### 10.4.6 Kombinert bøyemoment og aksialkrefter

For kontroll av tverrsnittet kan flytekriterium for kritisk punkt fra ligning (6.15) fra punkt 6.2.1 (5) i EK-9 benyttes, med mindre andre interaksjonsformler gjelder. I dette tilfellet vil

interaksjonsformel for bøyemoment og aksialkrefter fra punkt 6.2.9.2 være gjeldende, og det blir derfor ikke sjekket for flyt med von Mises.

For hulprofil og massive tverrsnitt benyttes ligningen:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 * N_{Rd}}\right)^\psi + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 * M_{y,Rd}}\right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 * M_{z,Rd}}\right)^{1,7}\right]^{0,6} \leq 1,0 \quad (6.43)$$

Der  $\omega_0$  er en faktor som tar hensyn til lokale sveiser eller hull. Strekkbåndet har ingen slike lokale sveiser eller hull, og verdien for  $\omega_0$  settes derfor lik 1. For hulprofil settes  $\psi = 1,3$ .

Ved å sette inn de aktuelle opptredende kreftene, kapasitetene, og de to faktorene inn i uttrykket, får man ut en verdi lik 0,379. Dette betyr at omtrentlig 38 % av tverrsnittet er utnyttet i kombinasjonen av bøyemoment og strekkrefter.

# 11. Bærekraft og miljø

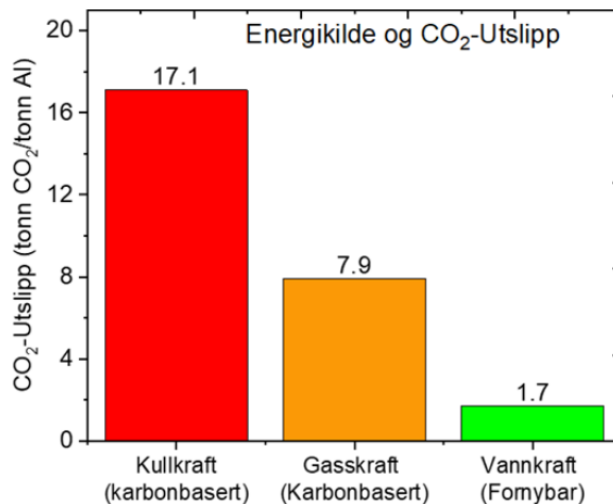
I dette kapittelet utforsker vi de miljømessige aspektene og de bærekraftige egenskapene til aluminium, samt hvordan bruken av dette materialet kan bidra til en mer bærekraftig fremtid.

## 11.1 Klimafotavtrykk

Energibesparelsene og klimafordelene ved bruk av lettmetallet aluminium har potensial til å bidra til å oppnå målet om null nettutslipp av klimagasser innen 2050. Med økende etterspørsel etter aluminium er det avgjørende å redusere utslippene knyttet til aluminiumsproduksjon. Dette innebærer blant annet å implementere mer energieffektive prosesser og å benytte fornybare energikilder i produksjonen (46).

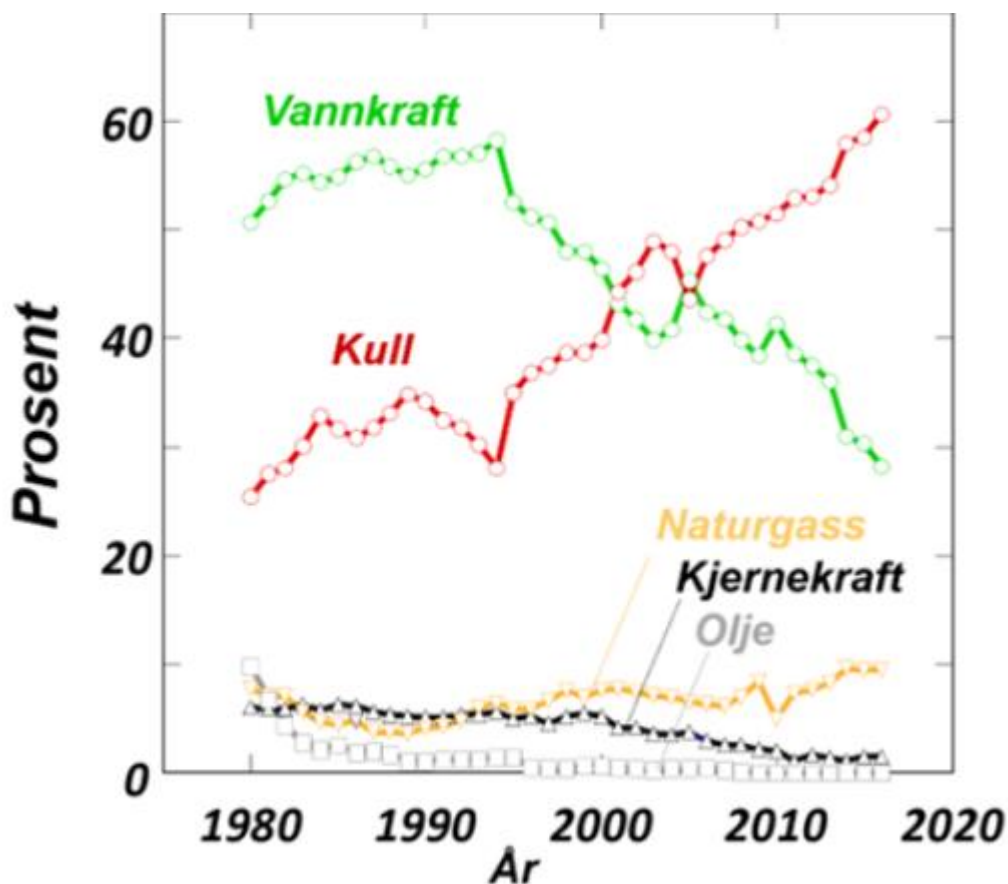
I 2020 ble det produsert over 65 millioner tonn aluminium globalt, hvorav Kina sto for cirka 60 % av produksjonen, mens Norge bidro med 2 %. Dette tilsvarte omtrent 1,3 millioner tonn aluminium produsert i Norge i 2020. For hvert metallatom som produseres, dannes det samtidig tre fjerdedeler av et CO<sub>2</sub>-molekyl, noe som resulterer i et utslipp på 1,5 tonn CO<sub>2</sub> per tonn aluminium som biprodukt. Dette er uten å ta med utslipp fra den nødvendige strømmen for produksjonen. Dermed slapp Norge ut omtrent to millioner tonn CO<sub>2</sub> fra aluminiumsproduksjonen i 2020, hvilket utgjorde omtrent fire prosent av landets totale CO<sub>2</sub>-utslipp (46).

Siden en betydelig del av CO<sub>2</sub>-utslippene knyttet til aluminiumsproduksjon avhenger av energikilden som benyttes, er det essensielt at hovedkilden til elektrisk energi er fornybar og ikke karbonbasert. Figur 28 nedenfor illustrerer CO<sub>2</sub>-utslippet per tonn aluminium fra tre forskjellige primære energikilder (46).



Figur 28: CO<sub>2</sub>-utslipp for aluminiumsproduksjon med tre forskjellige primærenergikilder (46)

Selv om det er velkjent at karbonbaserte energikilder, spesielt kullkraft, medfører høye CO<sub>2</sub>-utslipp, øker likevel andelen av verdens aluminiumproduksjon som bruker kull som energikilde. Dette skyldes den betydelige produksjonsøkningen i Kina, hvor kull er primærenergikilden (46). Denne utviklingen, med en økende andel aluminium produsert ved hjelp av vannkraft og kull som energikilder, vises i figur 29.



Figur 29: Andelen av aluminiumsproduksjon produsert med ulike energikilder (46)

I Norge drives en betydelig del av aluminiumsproduksjonen av fornybare energikilder, med over 70 % av Hydros produksjon basert på fornybar energi. I 2018 var det gjennomsnittlige karbonavtrykket for produksjon av 1 kg aluminium globalt 16,7 kg CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Hydros lavkarbonaluminium, REDUXA, hadde mindre enn fire kg CO<sub>2</sub> per kg aluminium, noe som er mindre enn en fjerdedel av det globale gjennomsnittet (47).

## 11.2 Gjenbruk og resirkulering

En av de store fordelene med aluminium er at det er svært godt egnet for resirkulering. Aluminium er 100 % resirkulerbart og kan gjenvinnes uendelig uten å miste sine mekaniske egenskaper. I tillegg krever resirkulering av aluminium kun 5 % av energien som trengs for å produsere

primæraluminium (48). Dette bidrar til å spare rundt 100 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter globalt hvert år (49).

Nesten 75 % av alt aluminium som noensinne er produsert, er fortsatt i bruk (50). Dette betyr imidlertid at det ikke er tilstrekkelig mengde metall tilgjengelig for resirkulering for å møte den høye etterspørselen. Dermed er det nødvendig med klimavennlig produksjon av primæraluminium, både i Norge og spesielt i land som Kina, hvor produksjonen hovedsakelig er basert på karbonbasert energi.

## 12. Økonomi

Økonomiske faktorer er avgjørende i valg av materialer for brukonstruksjoner, hvor aluminium har blitt stadig mer populært på grunn av sine unike egenskaper. Aluminiumsprisene er imidlertid ikke konstante og påvirkes av variabler som tilbud og etterspørsel, energikostnader, valutakurser og tilgangen på råmaterialer. Historiske prisfluktuasjoner observert i 2008, 2011, 2018 og 2022 understreker hvordan globale økonomiske og politiske hendelser kan ha dramatiske effekter på materialkostnader, langt utover nasjonale grenser.

Like før finanskrisen i 2008 nådde aluminiumsprisene en historisk høyde, for deretter å falle markant frem til tidlig 2009. Prisene steg jevnt frem til 2011, hvor det nådde en betydelig topp før det igjen falt (51). I 2018 førte amerikanske sanksjoner mot oligarker og bedrifter knyttet til Kreml og president Vladimir Putin til et dramatisk fall på Moskva-børsen, mens aluminiumsprisene skjøt i været (52). Fra begynnelsen av koronapandemien til tidlig 2022 økte prisene kraftig og nådde en ny topp.

Denne vedvarende økningen i aluminiumspriser siden pandemiens start har også kastet lys over utfordringene i de globale forsyningskjedene. Fra kullpriser til transportkostnader, hvert ledd i forsyningskjeden påvirker sluttprisen på materialene betydelig. For en detaljert gjennomgang av prisutviklingen, se tabell 33, som også viser valutakurser i norske kroner for hver måned, basert på historiske data fra DNB (53).

År	Pris dollar	Kronekurs	Pris nok
<b>Juni 2008</b>	3065	5,2	16 000
<b>Februar 2009</b>	1308	6,8	8 900
<b>April 2011</b>	2759	5,4	14 900
<b>Mai 2018</b>	2298	8.1	18 613
<b>Mars 2022</b>	3491	8,8	30 700
<b>Mai 2024</b>	2588	11,03	28 500

Tabell 33: Oppsummering av aluminiumspris i dollar og norske kroner (51)

Siden aluminium handles i amerikanske dollar, påvirkes prisen på aluminium i Norge direkte av kronekursen (54). Derfor fører en svekkelse av den norske kronen til at aluminium blir dyrere for



norske kjøpere. Som det kan observeres i tabell 33, var prisen på aluminium i dollar høyere i 2008 enn i både 2018 og 2024. Imidlertid var prisen i norske kroner høyere i både 2018 og i 2024 sammenlignet med 2008. Figur 30 gir en oversikt over prisutviklingen på aluminium fra 1990 til dags dato, noe som tydelig illustrerer både kortsiktige svingninger og langvarige trender i markedet.



Figur 30: Oversikt over aluminiumprisen i dollar per tonn fra 1990 til 2024 (51)

I COWI sitt forprosjekt for Hangarbrua har det blitt gjennomført estimater for materialmengder og økonomi. Analysen baserer seg på data hentet fra tre tidligere nettverksbuebruer. Enhetsprisene fra disse prosjektene, som dateres tilbake til 2015, har blitt justert opp med 50 % for å reflektere prisstigningen fram til 2022, slik data fra Statistisk Sentralbyrå sin konsumprisindeks indikerer. Resultatet av disse beregningene anslår at totalvekten på materialene som kreves for Hangarbrua vil være på 58 488 kg med en total kostnad på 8,4 millioner kroner. Denne prisen omfatter ikke bare selve materialkostnadene, men også kostnader for montasje og transport av hengestenger, samt påslag fra leverandører.

For å sette dette i perspektiv, peker COWI på et tidligere forprosjekt der Hangarbrua var tenkt konstruert i rustfritt stål. I dette tilfellet ville vekten på materialene økt til 140 tonn, med tilhørende materialkostnader på om lag 22 millioner kroner. Denne signifikante forskjellen i materialkostnader fremhever aluminiumens fordeler, ikke bare i vekt, men også i økonomisk effektivitet.

Aluminium, på grunn av sin lavere vekt, minsker behovet for tungt løfteutstyr under konstruksjonen, noe som kan redusere både installasjonskostnadene og tiden det tar å bygge bruene. Aluminiums lave vekt bidrar også til lavere transportkostnader og kan ha en positiv effekt på bruens overordnede strukturelle integritet og levetid ved å minske belastningen på fundamentene.

## 13. Diskusjon

I diskusjonsdelen av denne oppgaven vil vi utforske og analysere de viktigste funnene fra studien av aluminium som konstruksjonsmateriale i hangarbru-prosjektet. Vi vil vurdere dimensjoneringen og modelleringen av aluminiumskonstruksjoner, i tillegg til å utforske de tekniske, miljømessige og økonomiske aspektene.

### 13.1 Dimensjonering

#### 13.1.1 Manuelle beregninger

De innledende håndberegningene ga et solid grunnlag for å sammenligne oppførselen til stål og aluminium, både med og uten HAZ. Som forventet hadde ingen av bjelkene tilstrekkelig kapasitet, men resultatene illustrerer et tydelig poeng. Beregningene viser hvordan materialene responderer på de samme lastene, og spesielt hvordan HAZ påvirker den strukturelle kapasiteten til aluminium.

Momentkapasiteten for aluminium uten HAZ er omtrent halvparten av stålets, mens skjærkapasiteten er sammenlignbar mellom de to materialene. Den minimale forskjellen i skjærkapasitet mellom aluminium med og uten HAZ indikerer at selv med redusert tykkelse i tverrsnittet i HAZ, er effekten på skjærkapasiteten begrenset. Nedbøyningen var derimot betydelig større for aluminium enn for stål, hovedsakelig på grunn av aluminiums lavere elastisitetsmodul.

Målet med kontrollberegningene for strekkbåndet var å demonstrere dimensjonering av aluminium i henhold til EK-9 og oppnå resultater som samsvarer med kapasitetskontrollen utført i RSA. Kontrollberegningene har vært vellykkede i den forstand at de gir en utnyttelsesgrad som kan sammenlignes med resultatene fra modellen. Utfordringen ligger i at sammenligningsgrunnlaget mellom kontrollberegningene og modellen ikke er tilstrekkelig. Dette skyldes begrensninger i RSA, som vil bli nærmere utdypet i punkt 13.1.2.

Selv om sammenligningsgrunnlaget ikke er helt gyldig, er det mulig å vurdere resultatene fra kontrollberegningene opp mot modellen. Utnyttelsesgraden for strekkbåndet i RSA-analysen er på 21 %, mens kontrollberegningene for kombinert strekk og moment, der skjær og torsjon er neglisjert, viser en utnyttelse på 38 %. Forskjellen er markant, men gitt at resultatene fra RSA kan være upålitelige og muligens konservative, er det forventet at kontrollberegningene indikerer en høyere utnyttelse av tverrsnittet.

For å nærmere undersøke forskjellen så kan man se på formlene for momentkapasitet for aluminium og stål. Disse er bygd opp på samme måte, men for aluminium inneholder uttrykket

både en reduksjonsfaktor  $\alpha$ , har en større sikkerhetsfaktor, og har lavere flytespenning.  $\alpha$  i denne oppgaven ble 0,76 for sterk akse, og 0,77 for svak akse,  $\psi_{M1}$  er etter EK-9 lik 1,1 og etter EK-3-1-1 er  $\psi_{M0}$  lik 1,05, og til slutt er  $f_0$  lik 220 Mpa, der  $f_y$  er lik 355 Mpa. Disse tre parameterne, som alle virker negativt på kapasiteten til aluminium, gir naturligvis lavere kapasitet og kan være med å forklare forskjellen mellom kontrollberegningene og analysen fra RSA.

$$\text{Aluminium: } M_{c,Rd} = \frac{\alpha * W_{el} * f_0}{\gamma_{M1}} \qquad \text{Stål: } M_{c,Rd} = \frac{W_{el} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

Til ettertanke burde det vært utført kontrollberegninger på et mer kritisk tverrsnitt eller utforsket mulighetene for optimalisering av strekkbåndet. Grunnet tidsbegrensninger ble strekkbåndet valgt for kontroll, og kontrollberegningene ble gjennomført parallelt med modelleringen av bruene. Med mer tid til rådighet ville det vært mer hensiktsmessig å først fullføre modellen og analysen, for deretter å kontrollere det mest kritiske tverrsnittet, som modellen viser er tverrbærerne.

Siden tverrsnittsdimensjonene til strekkbåndet er basert på data fra Leirvik og COWI, samt at bacheloroppgaven inneholder både en forenklet digital modell og laster, er de resulterende opptredende kreftene og utnyttelsesgraden for strekkbåndet sannsynligvis lavere enn i virkeligheten. Det ville derfor vært interessant å undersøke optimalisering av tverrsnittet i forhold til de anvendte lastene i oppgaven, og dermed vurdere potensialet for materialbesparelse for Hangarbrua.

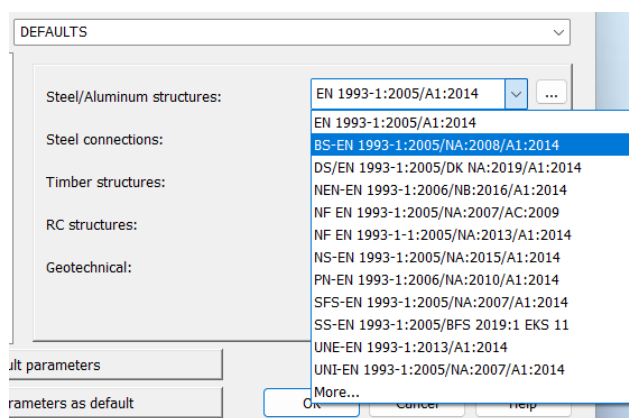
### 13.1.2 Modell, programvare og global analyse.

Diskusjonen om bruk av programvare og digitale modeller i ingeniørfaglige applikasjoner gir et viktig perspektiv på både potensialet og begrensningene ved slik teknologi. I vårt prosjekt ønsket vi å utnytte den digitale modellen for å utføre kapasitetskontroller, hente opptredende krefter, analysere mest påkjente snitt, og se på knutepunkt. Disse kontrollene er viktig for å sikre konstruksjonens sikkerhet og levetid.

Hensikten med å lage modellen var for å gjennomføre en omfattende global analyse av konstruksjonens respons på belastning, underveis støtte vi på begrensninger med RSA. Disse begrensningene i programmet forhindret oss fra å fullføre den globale analysen som planlagt, da enkelte nøkkelfunksjoner som var relevante for vårt spesifikke prosjekt, ikke var tilgjengelige.

Dette illustrerer behovet for nøye evaluering av programvarens funksjonalitet og kompatibilitet med prosjektets spesifikasjoner før implementering.

Til tross for programvarens mange avanserte funksjoner, er det flere utfordringer og begrensninger, aktuelle for vårt prosjekt, som må gjøres rede for. Den mest relevante begrensningen er RSAs manglende mulighet til å velge EK-9 som designkode for å utføre beregninger, se figur 31, samt at den ikke kan inkludere HAZ i beregningene. Vi forsøkte å jobbe oss rundt dette ved å benytte materialparameterne for aluminium og lot RSA beregne etter EC-3. Dette medførte upålitelig kapasitetskontroll og at den digitale modell ikke kunne utnyttes til sitt fulle potensiale.



Figur 31: Valg av designkode i RSA

Denne problematikken var noe vi ikke klar over når vi valgte å benytte programmet. Dersom dette var klart ville valg av program falt på noe annet, for eksempel Skyciv eller SAP2000. Videre er modellens sensitivitet for inn-dataenes nøyaktighet en viktig utfordring. Små feil i input-verdier for utforming av modellen, materialparametre eller laster kan føre til betydelige avvik i resultatene. Dette understreker behovet for presise tegninger, målinger og verifiseringer i den innledende fasen og underveis i modelleringen.

Vi fikk allikevel benyttet modellen til å utføre en begrenset global analyse som hjalp med å hente ut egenvekter som ble benyttet i lastberegninger, opptredende krefter som ble brukt i kontrollberegningene, og vi gjennomførte kontroll av spenninger og utnyttelsesgrad som viste at de fleste konstruksjonsdelene har tilstrekkelig kapasitet.

For å kunne realisere vårt opprinnelige ønske om å utføre nøyaktige kapasitetskontroller, analysere mest påkjenne snitt og knutepunkter, burde vi utforsket RSAs egenskaper mer nøye, samt utforsket alternative programvareplattformer som tilbyr de nødvendige funksjonene. Å identifisere slike

begrensninger tidlig i prosessen ville latt oss å ta informerte beslutninger om programvarevalg og implementering, og dermed bidra til å unngå unødvendige hindringer og utfordringer i prosjektet.

### **13.1.3 Litteratur og standarder**

Tilgangen på litteratur om aluminium er ikke så omfattende som man kunne ønske. Det er uten tvil mer fagstoff tilgjengelig for materialer som for eksempel stål. For stål finnes det rikelig med fagstoff fra tidligere emner, flere muligheter for hjelp fra forelesere, samt utallige bøker og tidligere oppgaver som eksempler. Dette er ikke særlig overraskende, da bruken av aluminium som konstruksjonsmateriale ikke er like utbredt som for andre kjente materialer.

Selv med begrenset tilgang på litteratur finnes det noen gode kilder. Blant annet har Tarald Rørviks bok «Aluminiumkonstruksjoner» vært en uvurderlig ressurs som har blitt brukt flittig gjennom hele arbeidet. I tillegg har tre tidligere oppgaver om aluminium fra NTNU de siste årene fungert som nyttig støttelitteratur.

## **13.2 Miljø og bærekraft**

Kombinasjonen av aluminium produsert av fornybar energi, lavt energibehov ved gjenvinning, og at materialet kan gjenvinnes i det uendelig gjør at det har potensialet til å bli et klimavennlig materiale. Det at gjenvinning av aluminium bare krever 5 % av energien som det trengs for å produsere nytt, understreker dets effektivitet og miljøfordeler. Med over 65 millioner tonn aluminium produsert globalt i 2020, er det viktig å adressere de betydelig CO<sub>2</sub>-utslippene knyttet til dagens aluminiumsproduksjon, spesielt fra karbonbaserte kilder. Produksjonen i Kina, som står for en stor del av verdens aluminium, skaper betydelig mengder CO<sub>2</sub>-utslipp. I motsetning til dette, er Norges produksjon av aluminium betydelig renere på grunn av omfattende bruk av vannkraft. Norges gjennomsnittlige utslipp fra produksjon av aluminium likt fire tonn CO<sub>2</sub> per tonn aluminium, mot det globale gjennomsnittet på over 16 tonn CO<sub>2</sub> per tonn, understreker effektiviteten av fornybare energikilder.

Andre løsninger for å redusere miljøpåvirkningene kan være teknologiske innovasjoner eller politiske reguleringer. Implementering av karbonfangst- og lagringsteknologier, i spesielt land som Kina kan redusere CO<sub>2</sub>-utslippene betydelig.

Videre kan overgangen til fornybar energi ved internasjonale samarbeid og politikk være en viktig løsning. Disse tiltakene ikke bare viktig for å redusere klimafotavtrykket fra

aluminiumsproduksjon, men også viktig for å nå Parisavtalen og FN's bærekraftsmål, spesielt mål 12 om ansvarlig forbruk og produksjon (55).

Ved å styrke den internasjonale innsatsen for å gjøre aluminiumsproduksjonen mer bærekraftig, kan vi fremme en mer miljøvennlig bruk av dette viktige metallet.

### **13.3 Økonomi**

Aluminium er generelt dyrere enn tradisjonelle materialer som stål, særlig i anskaffelsesfasen. Dette kan øke prosjektkostnadene betraktelig. Prisen på aluminium påvirkes av en rekke globale faktorer som tilbud og etterspørsel, energipriser og geopolitiske hendelser. Aluminiumsprisene kan til en viss grad sees på som forutsigbare, men de er ustabile. Som nevnt tidligere kan for eksempel de geopolitiske spenningene i 2018 og svingninger i valutakurser resultere i betydelige prisøkninger, noe som viser risikoen for budsjettoverskridelser i prosjekter som er avhengige av dette materialet.

Investeringen av aluminium i konstruksjoner kan gi langsiktige økonomiske fordeler over stål. Aluminiums lavere vekt kan redusere transport- og installasjonskostnader, spesielt i områder med begrenset tilgjengelighet eller der infrastruktur for transport av tunge laster er begrenset. Videre kan den lavere vekten redusere belastningen på andre komponenter i bruen, som for eksempel underbygningen, noe som kan gi mindre vedlikeholdskostnader.

Aluminiums gode korrosjonsbestandighet gjør at det krever mindre vedlikehold sammenlignet med stål. Dette vil resultere i lavere langsiktige vedlikeholdskostnader, noe som kan bidra til å oppveie innkjøpskostnadene over tid. Videre er også aluminium fullstendig resirkulerbart uten kvalitetstap. Dette kan gi økonomiske fordeler ved prosjektet, siden materialet kan selges og resirkuleres, noe som gir en potensiell restverdi som kan tas med i den økonomiske totalvurderingen.

Samlet sett krever økonomien ved bruk av aluminium i brukonstruksjoner en omfattende vurdering av både kortsiktige og langsiktige kostnader og fordeler. Økonomiske analyser bør inkludere scenarioer som tar høyde for prisvolatilitet og valutarisiko, samtidig som man også vurderer de potensielle besparelsene i vedlikehold og drift. Ved å veie disse faktorene nøye kan prosjektledere og beslutningstakere sikre at valget av aluminium er både økonomisk forsvarlig og tilpasset prosjektets spesifikke behov og rammebetingelser.

## 13.4 Feilkilder

Det er tidligere nevnt flere feilkilder, spesielt relatert til modellen og kapasitetskontrollen. At RSA ikke kan beregne i henhold til EK-9 eller ta hensyn til HAZ er sannsynligvis de to største feilkildene i oppgaven. Dette er imidlertid ikke de eneste, gjennom oppgaven er det flere steder hvor mulige feilkilder må vurderes kritisk.

Det første eksempelet bygger videre på problematikken rundt den digitale modellen og programvaren som er brukt for å lage den. RSA var et helt ukjent program før oppstarten av bacheloroppgaven, og all kunnskapen som er brukt for å lage en modell og gjennomføre en analyse er tilegnet gjennom internettartikler og YouTube-veiledninger. Dette medfører en viss risiko for at kunnskapsnivået for programvaren er for lavt, dermed kan det ha oppstått problemer med input i modellen, eller at viktige elementer har blitt utelatt.

Videre er det naturligvis en fare for feiltolkning av regelverket i EK-9 og tilhørende hjelpelitteratur, noe som kan ha ført til at deler av de manuelle beregningene ikke er utført korrekt. Med et større utvalg av støttelitteratur tilgjengelig, for eksempel flere regneeksempler, kunne slike mulige feil blitt minimert.

En generell risiko i alle akademiske tekster er bruken av utdaterte kilder. Det er derfor viktig å være kritisk til hvilke kilder som benyttes, og helst finne flere kilder som støtter hverandre. For eksempel ble det brukt tre bøker i store deler av kapittel 4, hvorav to er skrevet i 1997 og 1999, og den siste i 2011. Det var essensielt å sikre at bøkene ikke var utdaterte, og at de forskjellige bøkene støttet hverandre.



## 14. Konklusjon

Gjennom litteraturstudier, analyse av Hangarbrua og samtaler med relevante fagpersoner, har oppgaven tatt for seg de tekniske, økonomiske og miljømessige aspektene ved bruk av aluminium i brukonstruksjoner med noen sammenligninger mot stål.

Etter arbeidet med oppgaven kan det generelt konkluderes med at aluminium har et potensiale som konstruksjonsmateriale for gang- og sykkelbruer. Det har vist seg at aluminium har både fordeler og ulemper innenfor områdene vi har undersøkt.

En betydelig utfordring i oppgaven var begrensningene og feilene i programvaren RSA, som førte til at vi ikke fikk ønsket grunnlag for sammenligning av manuelle og digitale beregninger. Dette understreker viktigheten av å bruke egnet programvare for aluminiumskonstruksjoner.

Kontrollberegningene derimot kan ansees som relativt sikre. Detaljerte analyser av moment- og skjærkapasitet, torsjonsmotstand, samt de kombinerte virkningene av bøyemoment og aksialkrefter ga innsikt i hvordan svekkelser i HAZ påvirker konstruksjonens styrke under realistiske lasttilfeller. Selv med reduserte styrkeverdier i HAZ-området, viste beregningene at strekkbåndet opprettholdt en tilstrekkelig sikkerhetsmargin. Disse resultatene viser aluminiums egnethet som konstruksjonsmateriale i gang- og sykkelbruer.

Økonomisk sett har aluminium fordelene av lavere vekt, noe som kan redusere transport- og installasjonskostnader, samt gi mindre belastning på andre komponenter i bruen. Selv om aluminium har høyere anskaffelseskostnader, kan de langsiktige vedlikeholdskostnadene være lavere på grunn av materialets korrosjonsbestandighet.

Miljømessig har aluminium potensial til å være et klimavennlig materiale, spesielt når det produseres med fornybar energi. Gjenvinning av aluminium krever kun 5 % av energien som trengs for å produsere nytt, og materialet er fullstendig resirkulerbart uten kvalitetstap.

Opgaven har gitt oss en dypere forståelse av aluminium som konstruksjonsmateriale og demonstrerer at potensialet for fremtidig bruk er betydelig, spesielt i prosjekter der vektbegrensninger og miljøhensyn er prioritert. Videre forskning og utvikling, samt flere case-studier på reelle prosjekter, vil være avgjørende for å realisere aluminiums fulle potensial som konstruksjonsmateriale.

## 15. Videre prosess

Oppgaven har vært svært lærerik og interessant, samtidig som det har vært en utfordrende oppgave. Med tilnærmet lik null forkunnskaper har læringskurven vært bratt, men givende. Ved bruk av de midlene og tiden som har vært tilgjengelig har problemstillingen blitt utforsket i stor grad, men det er flere ting som gjerne skulle blitt sett mer på.

Det kunne blant annet vært interessant å sett nærmere på kapasitet til sveis, spesielt i knutepunkter med høy spenningskonsentrasjon, med bruk av både manuelle beregninger og digital modell. Et annet viktig tema som bare har blitt kommentert er utmatting. Analyse og beregning av dette hadde vært et kritisk element for en fullverdig analyse av bruens kapasitet. Til slutt hadde også en dypere analyse av kostander og miljøpåvirkninger for Hangarbrua vært essensielt for å danne et fullverdig bilde av aluminiumens fordeler og ulemper.

Som nevnt i forordet, er det et ønske at denne oppgaven skal være til hjelp for andre studenter som ønsker å utforske aluminiumsdimensjonering og bruken av aluminium som konstruksjonsmateriale. Vi tror at denne oppgaven gir et solid utgangspunkt, men for å gi et helhetlig bilde av aluminium er det behov for flere realiserte prosjekter hvor aluminium anvendes som bærende konstruksjonsmateriale, samt mer forskning på disse prosjektene. NTNU, Statens vegvesen og Hangarbru-prosjektet vil bidra i stor grad til dette gjennom målinger og undersøkelser av bruens gjennom dens levetid.

## Referanseliste

1. Siwowski T. Aluminium Bridges – Past, Present and Future 2006 [cited 2024 03/04].
2. Standard Norge. Eurokoder u.d. [cited 2024 04/04/2024]. Available from: <https://standard.no/fagomrader/eurokoder/>.
3. Statens vegvesen. Vegnormalene Vegvesen.no: Statens vegvesen; 2021 [updated 29.06.2021; cited 04/04 2024]. Available from: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker/vegnormalene/>.
4. Rørvik T. Aluminiumkonstruksjoner  
Innføring i material- og konstruksjonslære: Norges byggforskningsinstitutt; 1997.
5. Statens vegvesen. Om håndbøkene u.d. [cited 2024 06/05]. Available from: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker/om-handbokene/>.
6. Virginia E-learning. 7 Reasons why Autodesk Robot Structural is the best Structural Analysis Tool! 2016 [cited 2024 25/04]. Available from: <https://www.virginiae-learning.com/blogs/news/first-post>.
7. Microsol Resources. What Is Revit Used For? : Microsol Resources,; u.d. [cited 2024 25/04]. Available from: <https://microsolresources.com/tech-resources/article/what-is-revit-used-for/>.
8. Autodesk. Robot Structural Analysis Integration: Autodesk; u.d. [cited 2024 25/04]. Available from: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2023/ENU/?guid=GUID-7126D350-187F-435E-A682-92D739A3167B>.
9. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Mathcad ntnu.no: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet; u.d [cited 2024 24/04]. Available from: <https://i.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/Mathcad>.

10. COWI. Slik kutter de klimagassutslipp i samferdselsprosjekter: COWI; 2023 [cited 2024 25/04]. Available from: <https://www.cowi.no/om-cowi/nyheter-og-presse/slik-kutter-de-klimagassutslipp-i-samferdselsprosjekter>.
11. Statens Vegvesen. Hangarbrua i Trondheim kan sette standarden for framtidens aluminiumsbruer Statens Vegvesen2023 [cited 2024 25/04]. Available from: <https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/prosjekt/sykkelrutertrondheim/nyhetsarkiv/kan-sette-standarden-for-fremtidens-aluminiumsbruer/>.
12. Dwight J. Aluminium Design and Construction: E & FN Spon; 1999.
13. Hydro. Fakta om aluminium: Hydro; u.d [cited 2024 17/04]. Available from: <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/om-aluminium/fakta-om-aluminium/>.
14. Pedersen B, Kaland T. aluminium Store norske leksikon.u.d [updated 23. oktober 2023; cited 2024 17/04]. Available from: <https://snl.no/aluminium>.
15. Nordic Steel. 5 fordeler ved å velge aluminium u.d [cited 2024 19/04]. Available from: <https://www.nordicsteel.no/fagartikler/5-fordeler-ved-a-velge-aluminium>.
16. Den europeiske standardiseringsorganisasjonen. NS-EN 1999-1-1:2007+A7:2009+NA:2009 Eurokode 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner  
Del 1-1: allmenne regler. Standard Norge; 2009.
17. Helseth LE. Varmeledningsevne snl.no: Store norske leksikon; u.d [updated 16. november 2024; cited 2024 17/04]. Available from: <https://snl.no/varmeledningsevne>.
18. Müller U. Introduction to structural aluminium design. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing; 2011. 182 p.
19. National Minerals Information Center. Aluminum Statistics and Information United States Geological Survey: National Minerals Information Center; u.d [cited 2024 18/04]. Available from:

<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/aluminum-statistics-and-information>.

20. Hydro. Slik lages aluminium u.d [cited 2024 18/04]. Available from:

<https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/om-aluminium/slik-lages-aluminium/>.

21. Saieed Z. Malaysia set to gain from Indonesia's ban on bauxite exports 2023 [updated

01/01/23; cited 2024 18/04]. Available from: [https://www.straitstimes.com/asia/se-asia/malaysia-](https://www.straitstimes.com/asia/se-asia/malaysia-set-to-gain-from-indonesia-s-ban-on-bauxite-exports)

[set-to-gain-from-indonesia-s-ban-on-bauxite-exports](https://www.straitstimes.com/asia/se-asia/malaysia-set-to-gain-from-indonesia-s-ban-on-bauxite-exports).

22. Norsk Industri. Om Aluminiumsbransjen norskindustri.nou.d [cited 2024 08/05]. Available

from: <https://www.norskindustri.no/bransjer/aluminium/om-aluminiumsbransjen/>.

23. Obaidat M, Al-Ghandoor A, Phelan P, Villalobos R, Alkhalidi A. Energy and Exergy Analyses of Different Aluminum

Reduction Technologies2018 [cited 2024 08/05]. Available from:

[https://www.researchgate.net/publication/324562838\\_Energy\\_and\\_Exergy\\_Analyses\\_of\\_Different\\_Aluminum\\_Reduction\\_Technologies](https://www.researchgate.net/publication/324562838_Energy_and_Exergy_Analyses_of_Different_Aluminum_Reduction_Technologies).

24. Raufoss Aluminium. Ekstrudering u.d [cited 2024 19/04]. Available from:

<https://raufossaluminium.com/ekstrudering>.

25. Momentum manufacturing group. Aluminum Extrusion Manufacturing 101: Understanding

Extrusion Die Types u.d. [cited 2024 09/05]. Available from:

<https://mmgextrusions.com/resources/aluminum-extrusion-die-types/>.

26. Hydro. Friksjonssveising u.d [cited 2024 21/04]. Available from:

<https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/produkter/ekstruderte-profiler/aluminiumsprofiler-i-bruk/ekstruderinger-for-store-applikasjoner/friksjonssveising/>.

27. Øglænd system. Korrosjon u.d [cited 2024 21/04]. Available from: [https://www.oglaend-](https://www.oglaend-system.no/losninger/materialer/korrosjon/)

[system.no/losninger/materialer/korrosjon/](https://www.oglaend-system.no/losninger/materialer/korrosjon/).

28. Almar-Næss A. utmatting (teknikk) snl.no: Store norske leksikon; Store norske leksikon (2005-2007) [cited 2024 22/04]. Available from: <https://snl.no/utmatting - teknikk>.
29. efunda. The S-N Curve efunda.com [cited 2024 22/04]. Available from: [https://www.efunda.com/formulae/solid\\_mechanics/fatigue/fatigue\\_highcycle.cfm](https://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/fatigue/fatigue_highcycle.cfm).
30. Matweb. AISI 1045 Steel, cold drawn, high temperature stress relieved, 50-75 mm (2-3 in) round matweb.com.u.d [cited 2024 22/04]. Available from: [https://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=193434cf42e343fab880e1dabdb143ba](https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=193434cf42e343fab880e1dabdb143ba).
31. Vegdirektoratet. Bruprosjektering  
prosjektering av bruer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner  
Håndbok N400. 2015.
32. Summers PT, Chen Y, Rippe CM, Allen B. Overview of aluminum alloy mechanical properties during and after fires2015.
33. Solberg JK, Christensen N, Almar-Næss A. Stål snl.no: Store norske leksikon; u.d [cited 2024 22/04]. Available from: <https://snl.no/st%C3%A5l>.
34. Haaberg GM. korrosjon snl.no: Store norske leksikon; u.d [cited 2024 22/04]. Available from: <https://snl.no/korrosjon>.
35. Nordic Steel. Hva inneholder konstruksjonsstål? nordicsteel.nou.d [cited 2024 23/04]. Available from: <https://www.nordicsteel.no/fagartikler/ulike-typer-stal-og-materialgrader>.
36. Johansen H. Sveisbare konstruksjonsstål2008 [cited 2024 23/04]. Available from: file:///C:/Users/Marius%20Karlsen/Downloads/Materiallaere-sveisbare%20konstruksjonsstal-kompendium(1).pdf.
37. Den europeiske standardiseringsorganisasjonen. NS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015

### Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner

Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger. Standard Norge; 2015.

38. Den europeiske standardiseringsorganisasjonen. NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2019

### Eurokode 1: Laster på konstruksjoner

Del 1-1: Allmenne laster

Tetthet, egenvekt og nyttelaster i bygninger. Standard Norge; 2019.

39. Den europeiske standardiseringsorganisasjonen. NS-EN 1991-2:2003+NA:2010

### Eurokode 1

Laster på konstruksjoner

Del 2: Trafikklast på bruer. Standard Norge; 2010.

40. Den europeiske standardiseringsorganisasjonen. NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009

### Eurokode 1

Laster på konstruksjoner

Del 1-4: Allmenne laster

Vindlaster. Standard Norge; 2009.

41. Den europeiske standardiseringsorganisasjonen. NS-EN 1991-1-5:2003+NA:2008

### Eurokode 1

Laster på konstruksjoner

Del 1-5: Allmenne laster

Termiske påvirkninger. Standard Norge; 2008.

42. Den europeiske standardiseringsorganisasjonen. NS-EN 1993-1-11:2006+NA:2009

### Eurokode 3, Prosjektering av stålkonstruksjoner

Del 1-11: Kabler og strekkstag. Standard Norge; 2006.

43. Den europeiske standardiseringsorganisasjonen. NS-EN 1991-1-7:2006+NA:2008

Eurokode 1 Laster på konstruksjoner

Del 1-7:

Allmenne laster

Ulykkeslaster. Standard Norge; 2008.

44. Den europeiske standardiseringsorganisasjonen. NS-EN 1990:2002+A1:2005+AC:2010+NA:2016

Eurokode

Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner. Standard Norge; 2016.

45. Norske limtreprodusenters forening. Limtreboka: Norske limtreprodusenters forening; 2015. 312 p.

46. Senanu S, Solheim A, Skybakmoen E. Sju veier til grønnere aluminium 2021 [cited 2024 30/04]. Available from: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/sju-veiertilgronnere-aluminium/>.

47. Hydro. 10 grunner til at aluminium bør være det neste materialet du velger hydro.com2021 [cited 2024 30/04]. Available from: <https://www.hydro.com/no-NO/om-hydro/stories-by-hydro/10-grunner-til-at-aluminium-bor-vaere-det-neste-materialet-du-velger/>.

48. Infinitum. Aluminium – Et regnestykke der svaret er resirkulering infinitum.no: Infinitum; u.d. [cited 2024 01/05]. Available from: <https://infinitum.no/aktuelt/aluminium-et-regnestykke-der-svaret-er-resirkulering/>.

49. Hydro. Resirkulering av aluminium Hydro.com2020 [cited 2024 01/05]. Available from: <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/om-aluminium/resirkulering-av-aluminium/>.



50. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Aluminium- bærekraft og resirkulering ntnu.no: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet; u.d [cited 2024 01/05]. Available from: <https://www.ntnu.no/eit/tfy4851>.
51. Trading Economics. Aluminum u.d [cited 2024 01/05]. Available from: <https://tradingeconomics.com/commodity/aluminum>.
52. Benedicte Storm Bamvik, Sveen S. Analytiker etter nye sanksjoner: – Prisene skal opp2024 [cited 2024 01/05]. Available from: [https://www.finansavisen.no/ravarer/2024/04/15/8118786/analytiker-etter-nye-sanksjoner-prisene-skal-opp?zephyr\\_sso\\_ott=it3bED](https://www.finansavisen.no/ravarer/2024/04/15/8118786/analytiker-etter-nye-sanksjoner-prisene-skal-opp?zephyr_sso_ott=it3bED).
53. Den norske Bank. Markets - Måneds-og årssnitt dnb.no: Den norske Bank; u.d [cited 2024 01/05]. Available from: <https://www.dnb.no/bedrift/markets/valuta-renter/valutakurser-og-renter/HistoriskeValutakurser/Hovedvalutaer-mndogor/Hovedvalutaer-mndogor.html>.
54. Sæter SO. Aluminium er på sitt dyreste på ti år: – Snuoperasjon for Kina e24.no2021 [cited 2024 01/05]. Available from: <https://e24.no/internasjonal-oekonomi/i/47bl96/aluminium-er-paa-sitt-dyreste-paa-ti-aar-snuoperasjon-for-kina>.
55. Regjeringen. Bærekraftsmålene for Norge regjeringen.nou.d [cited 2024 02/05]. Available from: <https://berekraft.regjeringen.no/baerekraftsmalene-i-norge/12-ansvarlig-forbruk-og-produksjon/>.

## **Vedleggsliste**

Vedlegg A: Artikkel

Vedlegg B: Plakat

Vedlegg C: Lastvirkningsdiagram – Aluminium

Vedlegg D: Lastvirkningsdiagram – Stål

Vedlegg E: Vindberegning

Vedlegg F: Dimensjonering av forenklet modell – stål

Vedlegg G: Dimensjonering av forenklet modell – Aluminium u/ HAZ

Vedlegg H: Dimensjonering av forenklet modell – Aluminium m/ HAZ

Vedlegg I: Kontrollberegning av strekkbånd med krefter fra RSA

Vedlegg J: Global analyse – RSA