

Mulighetsstudie for aluminium i fagverksbroer – Økonomiske og bærekraftige aspekter ved gjenoppbygningen av Tretten bru

Aluminium feasibility study for truss bridges – Economic and sustainable aspects of rebuilding Tretten bridge

Trondheim Mai 2023

Yvonne Desiree Stenlund

Mathias Borge Kristiansen

Markus Karel Færevik

Intern veileder:

Jomar Tørset

Ekstern veileder:

Norsk Hydro

Prosjektnr:

2023 - 22

Rapporten er ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Rapporten er ÅPEN

Problemdefinering, prosjektbeskrivelse og resultatmål

Denne oppgaven skal belyse muligheten for bruk av aluminium i fagverksbroer for fremtiden. I sammenheng med kollapsen av Tretten bru, skal det vurderes bruk av aluminium i gjenoppbygging av ny brokonstruksjon. Det skal tas utgangspunkt i de eksisterende fundamentene, samt bli diskutert ulike sikkerhetstiltak rundt kollapsen.

Oppgaven skal utforme fagverksløsninger i både aluminium og stål, for å undersøke de tekniske, økonomiske og bærekraftige aspektene det vil medføre for de ulike materialene. Ved analyse og beregning skal det fremkomme hvilket alternativ som er mest optimal, med tanke på økonomi, bærekraft og sikkerhet. Utrekninger skal utføres i programvare og kontrolleres ved hjelp av håndberegninger.

Målet med oppgaven er å dimensjonere en trygg fagverksbro i aluminium som erstatning til Tretten bru. Gjennom oppgaven skal samtlige i gruppen ha tilegnet seg ny kunnskap og erfaring om forskjellene ved ulike typer brodesign. Samtidig forstå de økonomiske og bærekraftige virkningene av henholdsvis aluminium og stål i brukonstruksjoner.

Stikkord for prosjektet: Aluminium, stål, tekniske aspekter, økonomiske aspekter, bærekraft, brokonstruksjon.

Forord

Bachelorgruppen består av tre studenter med spesialisering i konstruksjonsteknikk ved Institutt for Bygg- og Miljøteknikk ved NTNU i Trondheim. Arbeidet med oppgaven startet i høstsemesteret før selve gjennomføringen våren 2023, der alle studentene deltok aktivt. Omfanget av bacheloroppgaven tilsvarer 20 studiepoeng, og blir ansett som avsluttende oppgave for 3.årig bachelorgrad, bygg.

Formålet med oppgaven er å undersøke om aluminium kan være et anvendelig materiale i fagverkskonstruksjoner. For å konkretisere oppgaven skal det gjennomføres en mulighetsstudie av aluminium sammenlignet med stål, for å øke konkurransedyktigheten og forhåpentligvis også bidra til å øke bruken av aluminium i bransjen. Med interesse for dimensjonering og design av konstruksjoner har vi derfor valgt å designe en fagverksbru i aluminium og en tilsvarende i stål. Samtidig har det vært dagsaktuelt å se på sikkerhetsvurderinger rundt brukonstruksjoner, som følge av kollapsen til Tretten bru. Vi bestemte oss derfor for å gjenbruke fundamentet til broen, og drøfte sikkerhetstiltak som følge av dette.

Markedet har vist en økende interesse i bruken av aluminium, og etterspørsel etter kunnskap har blitt større. Hydro, som en av verdens største aluminiumsprodusenter, har derfor vært en viktig aktør for gjennomføring og kompetanseutveksling.

Vi ønsker å takke våre eksterne veiledere, Trond Furu og Harald Vestøl. Vi er takknemlig for muligheten å jobbe med denne oppgaven, og den kunnskapen dere har delt med oss. Vi ønsker også å takke vår interne veileder Jomar Tørset, førstelektor ved Institutt for bygg- og miljøteknikk ved NTNU Trondheim, som har gitt god veiledning og innspill underveis.

Sammendrag

I denne oppgaven utforskes muligheten for å bruke aluminium i fagverksbroer. Studien fokuserer spesielt på kollapsen av Tretten Bru og vurderer en mulig gjenoppbygning ved å sammenligne aluminium og stål som alternative materialer for brokonstruksjonen.

Gjennomføringen av oppgaven inkluderer en vurdering av både tekniske, økonomiske og miljømessige aspekter ved stål og aluminium. De ulike broalternativene ble utformet på en liknende måte for enkel sammenligning av materialkvaliteter og for å belyse dimensjoneringsproblematikk knyttet til aluminium. Modellene ble analysert ved hjelp av FEM-analyseprogram, og resultatene ble kontrollert ved hjelp av håndberegninger.

Foreløpige analyser indikerer at aluminium ikke er en konkurransedyktig erstatning for stål i den undersøkte utformingen. Det påpekes i midlertidig at dette arbeidet representerer en første vurdering som kan legge grunnlaget for videre undersøkelser. Videre fremheves positive egenskaper ved aluminium og hvordan materiale kan bidra til å utvikle økonomiske og bærekraftige broløsninger for fremtiden.

Ved å integrere og videreutvikle disse funnene kan fremtidige studier og prosjekter dra nytte av denne bacheloroppgaven til anvendelsen av aluminium i fagverksbroer.

Abstract

This thesis explores the possibility of using aluminium in truss bridges. The study specifically focuses on the collapse of Tretten Bridge and evaluates the feasibility of its reconstruction by comparing aluminium and steel as alternative materials for bridge construction.

The execution of the study includes an assessment of technical, economical, and sustainable aspects of steel and aluminium. The bridges were designed in a similar manner to facilitate a straightforward comparison of material qualities and to highlight dimensioning issues associated with aluminium. The models were analysed using FEM analysis software, and the results were verified through manual calculations.

The conclusion of the thesis indicates that aluminium is not a competitive substitute for steel in the investigated design. However, it is noted that this work represents an initial iteration and can serve as a foundation for further investigations. Furthermore, the positive attributes of aluminium and its potential to contribute to development of economically and environmentally sustainable bridge solutions are emphasized.

By integrating and expanding upon these findings, future studies and projects can benefit from the insights provided by this bachelor's thesis regarding the application of aluminium in truss bridges.

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon	- 1 -
1.1	Oppgavebeskrivelse	- 1 -
1.2	Avgrensninger.....	- 2 -
1.3	Ekstern veileder Hydro	- 2 -
2	Prosjekteringsgrunnlag.....	- 3 -
2.1	Eurokoder	- 3 -
2.2	NORSOK.....	- 3 -
2.3	Statens vegvesen håndbøker	- 4 -
2.4	Krav til utforming av ny bro	- 4 -
	2.4.1 Krav til fri høyde.....	- 4 -
	2.4.2 Krav til bredde	- 5 -
2.5	Programvare.....	- 6 -
2.6	Gjenoppbygging av Tretten bru.....	- 7 -
	2.6.1 Området.....	- 7 -
	2.6.2 Gjenbruk av tidligere fundament	- 8 -
3	Grunnlag for vurdering av laster.....	- 9 -
3.1	Permanente laster.....	- 9 -
3.2	Variable laster	- 9 -
	3.2.1 Trafikklaster	- 10 -
	3.2.2 Vindlast	- 15 -
	3.2.3 Termiske påvirkninger	- 17 -
3.3	Ulykkeslaster	- 19 -
3.4	Utmattingslast	- 19 -
3.5	Lastkombinasjoner.....	- 20 -

	3.5.1	Bruddgrensetilstand	- 20 -
	3.5.2	Brukgrensetilstand	- 22 -
4		Sikkerhet	- 24 -
	4.1	Kollapsen av Tretten bru	- 24 -
	4.1.1	Hendelsesforløp	- 24 -
	4.1.2	Foreløpige undersøkelsesresultater	- 25 -
	4.2	Sikkerhetsfilosofi	- 26 -
	4.2.1	NORSOK N-001	- 26 -
	4.2.2	Krav 1.1.4-1 i N400	- 27 -
	4.2.3	Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner.....	- 28 -
5		Aluminium som konstruksjonsmateriale	- 29 -
	5.1	historisk tilbakeblikk	- 29 -
	5.1.1	Hydros innflytelse på Aluminiumproduksjon.....	- 29 -
	5.2	Hydro sin produksjon av aluminium	- 31 -
	5.3	Legeringer.....	- 32 -
	5.4	Produkter i aluminium	- 33 -
	5.5	Utfordringer med aluminiumsveis	- 34 -
	5.5.1	MIG-sveising	- 35 -
	5.5.2	HAZ	- 35 -
	5.5.3	Friksjon rørsveising.....	- 36 -
	5.5.4	Andre sammenføyingsmetoder	- 37 -
	5.6	Utmatting og kapasitet.....	- 37 -
6		Kort om stål.....	- 39 -
7		Tekniske forskjeller mellom aluminium og stål	- 40 -
	7.1	Mekaniske forskjeller	- 40 -

7.2	Forskjeller i utforming.....	- 41 -
8	Bæresystemer	- 42 -
8.1	Fagverksbro	- 42 -
8.2	Buebro.....	- 42 -
8.3	Hengebro.....	- 42 -
8.4	Skråstagbro	- 43 -
9	Prosjektering av nye Tretten bru.....	- 44 -
9.1	Forutsetninger	- 44 -
9.2	Broens utforming.....	- 44 -
9.3	Stålmodell.....	- 47 -
9.3.1	Fra analyse av stålmodell i SAP2000	- 47 -
9.4	Aluminiumsmodell	- 49 -
9.4.1	Fra analyse av aluminiumsmodell i SAP2000.....	- 51 -
9.5	Manuell kontroll av kapasitet	- 53 -
9.5.1	Manuell kontroll av nedbøyning av aluminiumsmodell	- 53 -
9.5.2	Manuell kapasitetskontroll av stålmodell	- 53 -
9.5.3	Manuell kapasitetskontroll av modell i aluminium.....	- 54 -
10	Vurdering av bærekraft.....	- 56 -
10.1	Materiale	- 56 -
10.2	Levetid.....	- 57 -
10.3	Fotavtrykk.....	- 58 -
10.4	Gjenbruk	- 59 -
11	Økonomi.....	- 60 -
11.1	Kostnadsberegninger av stål og aluminium.....	- 60 -
11.2	Kostnader rundt vedlikehold, bygging, transport og material	- 63 -

12	Diskusjon	- 65 -
12.1	Dimensjonering.....	- 65 -
12.1.1	Design	- 65 -
12.1.2	Standarder	- 67 -
12.1.3	Sikkerhet	- 67 -
12.1.4	Problemer knyttet til utmatting	- 68 -
12.2	Klima og miljø.....	- 69 -
12.2.1	Resirkulert aluminium.....	- 69 -
12.2.2	Materialmengde	- 70 -
12.2.3	Transport og montering.....	- 70 -
12.3	Økonomi	- 70 -
12.4	Feilkilder.....	- 71 -
12.4.1	Kunnskap og mangel på litteratur	- 71 -
12.4.2	Dimensjonering og design	- 72 -
12.4.3	Kostnadsestimat	- 72 -
13	Konklusjon	- 73 -
14	Videre prosess	- 74 -

Figurliste

Figur 2-1 Krav til fri avstand fra terreng.....	- 5 -
Figur 2-2 Krav til sideavstand til trafikkprofilet.....	- 6 -
Figur 2-3 Områdekart over Tretten kommune.....	- 7 -
Figur 2-4 <i>Plan og profil over gamle Tretten bru</i>	- 8 -
Figur 3-1 Påføring av lastmodell 1.....	- 12 -
Figur 3-2 Retninger for vindpåvirkninger på bruer.....	- 16 -
Figur 4-1 Oversiktsbilde etter brokollapsen.....	- 24 -
Figur 4-2 Vestre elvefundament (akse 2) etter kollaps.....	- 25 -
Figur 5-1 Fremstilling av aluminium.....	- 31 -
Figur 5-2 Hydal profilproduksjon.....	- 34 -
Figur 5-3 Aluminiumsstruktur som følger av HAZ.....	- 35 -
Figur 5-4 Friction stir welding.....	- 36 -
Figur 5-5 Galvanisk korrosjon.....	- 37 -
Figur 5-6 S-N kurve.....	- 38 -
Figur 8-1 Illustrasjonsbilde 1 fra Revit.....	- 45 -
Figur 8-2 Illustrasjonsbilde 2 fra Revit.....	- 46 -
Figur 8-3 Snitt A-A hentet fra tidligere tegninger av Tretten bru.....	- 46 -
Figur 8-4 Standardisert løsning fra Canam bridges.....	- 47 -
Figur 8-5 Nedbøyning av stålmodell i SAP2000.....	- 48 -
Figur 8-6 Kapasitetskontroll av stålmodell i SAP2000.....	- 48 -
Figur 8-7 Ekstruderingsdimensjoner ved verksted til Hydro i Lichterwelde.....	- 49 -
Figur 8-8 Tverrsnitt av kasseløsning i aluminium.....	- 50 -
Figur 8-9 Parkettmønster.....	- 51 -
Figur 8-10 Nedbøyning av aluminiumsmodell i SAP2000.....	- 51 -
Figur 8-11 Tverrsnittsprofil H400x900.....	- 52 -
Figur 8-12 Kapasitetskontroll av aluminiumsmodell i SAP2000.....	- 52 -
Figur 9-1 Global klimasporing for bygninger.....	- 56 -
Figur 9-2 Utslippstall for forskjellig aluminiumsprodukter fra Hydro.....	- 58 -

Tabelliste

Tabell 3-1 Nummer og bredde av kjørefelt	- 10 -
Tabell 3-2 Karakteristiske verdier for lastmodell 1	- 11 -
Tabell 3-3 Beregnede karakteristiske verdier for vertikale laster	- 13 -
Tabell 3-4 Karakteristiske verdier for sentrifugalkrefter	- 14 -
Tabell 3-5 Karakteristiske verdier av påvirkninger fra sammensatte grupper	- 14 -
Tabell 3-6 Terrenkategorier og terrengparametere	- 15 -
Tabell 3-7 Anbefalte verdier for varierende temperaturdifferanseandel.....	- 18 -
Tabell 3-8 Dimensjonerende verdier for laster i bruddgrense.....	- 21 -
Tabell 3-9 Verdier av ψ – faktorer for veibruer	- 22 -
Tabell 3-10 Dimensjonerende verdier for laster i bruksgrensetilstand	- 23 -
Tabell 5-1 Hovedgrupper av aluminiumslegeringer	- 32 -
Tabell 6-1 Fysiske egenskaper til aluminium og stål	- 40 -
Tabell 10-1 Prisestimat pr. kilo konstruksjonsstål S450	- 60 -
Tabell 10-2 Total lengde og pris pr. meter for stålprofiler.....	- 61 -
Tabell 10-3 Materialkostnader for ferdig monterte stålprofiler	- 61 -
Tabell 10-4 Prisestimat pr. kilo aluminium fra rapport Langenuen.....	- 62 -
Tabell 10-5 Total lengde og pris pr. meter for aluminiumsprofiler	- 62 -
Tabell 10-6 Materialkostnader for ferdig monterte aluminiumsprofiler.....	- 63 -

1 INTRODUKSJON

Byggebransjen står for omtrent en tredjedel av verdens klimagassutslipp, og er derfor en stor bidragsyter til dagens globale miljøutfordringer. Kursen samfunnet har i dag tilsier at det ikke vil være realistisk å oppnå Parisavtalens klimamål (globalt). Dette vil medføre at det i fremtiden vil stilles strengere krav til miljøsertifisering. Med bakgrunn i dette må også byggebransjen finne nye, innovative løsninger som kan bidra til å redusere utslippene. Aluminium er av mange vurdert som et miljøvennlig alternativ til andre materialvalg.

I Norge er det allerede gjort tiltak som energieffektivisering av både nye og eksisterende bygg, utslippsfrie byggeplasser og bedre avfallshåndtering. I tillegg brukes miljøvennlig byggematerialer, som trevirke, i økende grad. Med et ønske om å gå foran som en ledende nasjon innen fagverksbroer i tre, ble det i perioden 1996 - 2012 bygd hele 14 trebroer på Østlandet. I august 2022 kollapset Tretten bru, som førte til full stans i produksjon av trebroer. Etter et økende antall inspeksjoner, som følge av kollapsen, fant Statens vegvesen alvorlige avvik i halvparten av de eksisterende broene. Selv om det ikke har kommet en endelig konklusjon fra Statens havarikommisjonen, har det vært naturlig for gruppen å undersøke andre løsninger. Med økende vektlegging på bærekraft, har det vært interessant å se på broløsninger i aluminium som kan ivareta miljøfokus og bidra til reduksjon av klimagasser.

1.1 OPPGAVEBESKRIVELSE

Hensikten med denne bacheloroppgaven er å se på muligheten til å gjenoppbygge Tretten bru som en fagverkskonstruksjon i aluminium. I oppgaven ønskes det å belyse de eventuelle økonomiske og bærekraftige forskjellene mellom aluminium og stål, gjennom dimensjonering og analyse av samme broløsning for de to metallene. Resultatet for oppgaven skal gi et resonnement om hvorvidt det vil være økonomisk, bærekraftig og sikkerhetsmessig å bruke aluminium som et byggemateriale for fagverksbroer i fremtiden.

1.2 AVGRENSNINGER

- Eksisterende fundamenter til gamle Tretten bru blir brukt i utforming av ny bro, og gruppen tar utgangspunkt i at disse har tilstrekkelig kapasitet.
- Lastmodell 3 for spesialtransport vil ikke bli tatt med, som et resultat av minimal eksponering av kjøretøy i disse dimensjonene.
- Umatting og beregninger av knutepunkt er ikke utført, men vil bli diskutert.
- Beregning av ulykkeslaster vil ikke bli tatt med, men vil bli nevnt drøftet under kapittel 3 *Laster*.

1.3 EKSTERN VEILEDER HYDRO

Norsk Hydro ASA er et Norsk industrikonsern, med virksomhet innen aluminium og energi. Konsernet er Norges nest største og har virksomhet i over 50 land over hele verden. Gjennom Næring- og fiskeridepartementet, eier den norske stat 34,26 prosent av aksjene i selskapet. Deres formål er å skape et mer livskraftig samfunn gjennom nyskapende og effektiv utvikling av naturressurser til løsninger og produkter. Hydro har kompetanse og erfaring som gjør dem til et ledende selskap i produksjon av lavkarbonaluminium og fornybar energi. Hydro tror på at gjennom samarbeid, kan verdens klimaendringer håndteres. Veien dit starter ved å produsere mer for mindre (1).

2 PROSJEKTERINGSGRUNNLAG

Standarder som blir brukt i prosjekteringen av nye Tretten bru er Eurokoder, Statens vegvesen håndbøker og NORSOK.

2.1 EUROKODER

Eurokoder er en felles europeisk serie standarder for prosjektering av byggverk og dokumentasjon av bæreevnen til produkter som brukes til konstruksjonsformål. Med byggverk vil det si alt som kan bygges eller resultatet av et byggearbeid. Formålet med standardene er å dokumentere sikkerheten til konstruksjonen i forhold til byggeforskriftens krav. Alle eurokodene har blitt Norsk Standard ettersom tidligere nasjonale standarder for konstruksjonsteknikk har blitt erstattet.

Behovet for standardene kommer under planlegging, prosjektering, utførelse og verifikasjon av bygg- og anleggskonstruksjoner. Disse standardene tar for seg ulike materialer, produkter og konstruksjonstyper som er nødvendig for dokumentering av egenskaper og utførelse av nybygg og eksisterende konstruksjoner.

Gjeldene eurokoder for prosjekteringen av nye Tretten bru vil være Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner, Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner og Eurokode 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner (2).

2.2 NORSOK

NORSOK (The Norwegian shelf's competitive position) er en standard utviklet av den norske petroleumsindustrien. Formålet med standarden er å sikre tilstrekkelig sikkerhet, verdiskapning og kosteffektivitet for industriens utvikling og operasjoner (3).

I forhold til kollapsen av Tretten bru har det derfor vært nødvendig å se til denne standarden for å vurdere sikkerhetsaspekter ved brokonstruksjoner. Under punkt 7 "General structural design" i NORSOK N-001 blir det skrevet om hvordan komponenter og detaljer bør designes i henhold til ISO 19 900, samt. etter følgende prinsipper listet opp under punkt 7.1 «Design objectives».

Opprettholdes en slik sikkerhetsfilosofi skal ikke den gjeldende konstruksjon kollapse fullstendig, dersom en komponent svikter. Det vil si at man designer konstruksjonen med forbehold om at en komponent kan gå til brudd, men at dette ikke vil gå utover totalsikkerheten til installasjonen.

2.3 STATENS VEGVESEN HÅNDBØKER

Håndbøkene til Statens vegvesen utgir vegnormaler, retningslinjer og veiledninger for prosjektering av all offentlig veg. Vegnormalene er kravdokumenter som stiller krav til Statens vegvesen og andre myndigheter under prosjektering. Retningslinjer gjelder kun for riksveger og vegvesenet. Veiledningene er hjelpedokumenter som understøtter vegnormalene. Disse inneholder utdypende fagstoff utover det som nevnes i vegnormalene (4). For oppgaven har det vært relevant å bruke dette for å vise til krav for utforming av ny bro, samt. for lastberegninger.

2.4 KRAV TIL UTFORMING AV NY BRO

For utforming av bruer blir det stilt flere krav fra Statens vegvesen. Kravene er forbeholdt bredde til kjørebane og gangfelt, og avstander fra bærende konstruksjoner. Videre stilles det også krav om fri høyde både over og under broen. Kravene som settes finner man i følgende håndbøker:

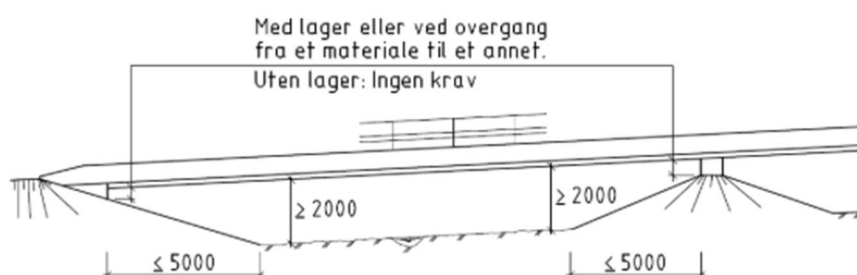
- Vegnormal N100 Veg- og gateutforming
- Vegnormal N101 Trafikksikkert sideterreng og vegsikringsutstyr
- Vegnormal N400 Bruprosjektering

2.4.1 Krav til fri høyde

Etter krav 5.4-1 i N100, forbeholdt veger og gateareal for motorisert trafikk, bør kjøretøy med høyde inntil 4,50 meter være dimensjonert for. Under kapittel 5.4.1 *Bruer*, vil krav til fri høyde sikre at kjøretøy ikke tar opp i tverrbruer eller overliggende bæresystemer. Videre blir kravet til fri høyde spesifisert under krav 5.4.1-1, der høyden for bruer over veg eller bruer med overliggende bæresystem skal minst være 4,90 meter. Samtidig skal man ta hensyn til vegens tverrfall. Krav 5.4.1-2 poengterer at fri høyde for gang- og sykkelvegruer med overliggende bæresystem skal minst være 3,10 meter.

Under kapittel 4.2.4 *Fri høyde over vassdrag* i N400, skal vegbanen ligge minst 0,5 meter høyere enn vannstanden ved dimensjonerende 200-årsflom. I prosjekteringen av ny bru har det ikke blitt foretatt beregninger av vannføringen i forhold til flomvurderinger. Da det blir tatt utgangspunkt i eksisterende fundament fra gamle Tretten bru, vil eksisterende fri høyde over vassdraget oppfylle kravet.

Fri avstand fra terreng til underkant av bru skal være minst 2,0 m etter krav 3.6.2-4, og blir illustrert i figur 2-1 under.



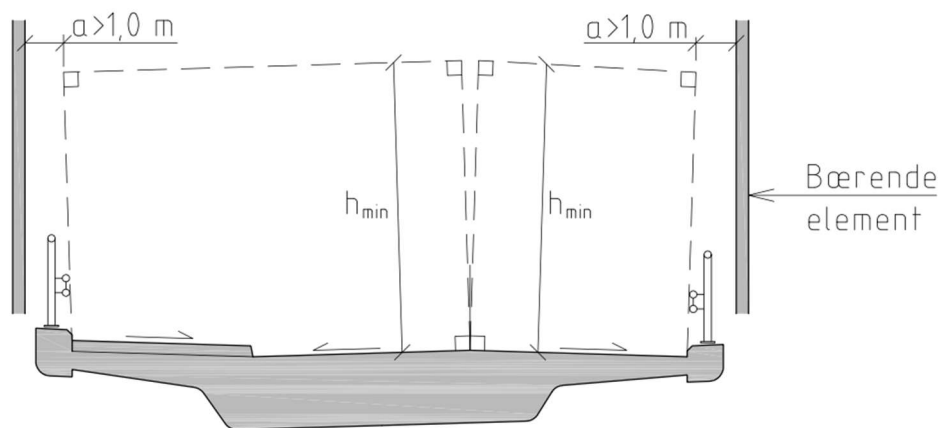
Figur 2-1 Krav til fri avstand fra terreng

2.4.2 Krav til bredde

Krav for bredde av kjørebane og gang- og sykkelveg er oppgitt i N100. Under 2.3.2 *Kjørefelt* skal kjørefelt tilrettelegges for kjørende, både motorisert trafikk og syklende, der bredden avhenger av gatens funksjon og hvilken trafikantgruppe som prioriteres.

Etter krav 2.3.2-3 skal kjørefeltbredden være 3,25 meter ved 50 km/t. Videre blir det stilt krav under 4.10-1 til overgangen mellom veg og bru, der vegen på bru skal ha samme bredde som tilstøtende veg. Bredden på bruer med 2-felts veg uten midtrekkverk skal uansett være minimum 7,5 meter. Etter krav 4.10-2 skal fortau eller gang- og sykkelveg ha uendret bredde over bruen på minst 2,5 meter.

I vegnormal N400, under kapittel 4.1.2 *Fri bredde over rekkverk*, stilles det krav til rekkverk. Figur 2-2 viser minimum sideavstand a lik 1,0 meter til trafikkprofilet, som vegbruer med overliggende bærende konstruksjon skal tilfredsstill.



Figur 4.1: Fri høyde og bredde over kjørebane med takfall

Figur 2-2 Krav til sideavstand til trafikkprofil

2.5 PROGRAMVARE

I oppgaven benyttet gruppen programvarene Revit 2024, SAP2000 og Mathcad, som har vært viktige verktøy i mulighetsstudien gjort om brokonstruksjoner i aluminium.

Revit er en BIM- programvare (building information modeling), som hjelper til med modellering av former, strukturer og systemer i 3D med parametrisk nøyaktighet, presisjon og letthet. Det har brukt til å fremstille renderte bilder, og for å illustrere broens utforming i forhold til terrenget.

SAP2000 er et program for analyse og design av strukturelle konstruksjoner, og har blitt anvendt i oppgaven for å sjekke konstruksjonenes kapasitet mot effekter som nedbøyning, spenninger og dynamikk. Programmet kan brukes til å modellere i både 2D og 3D.

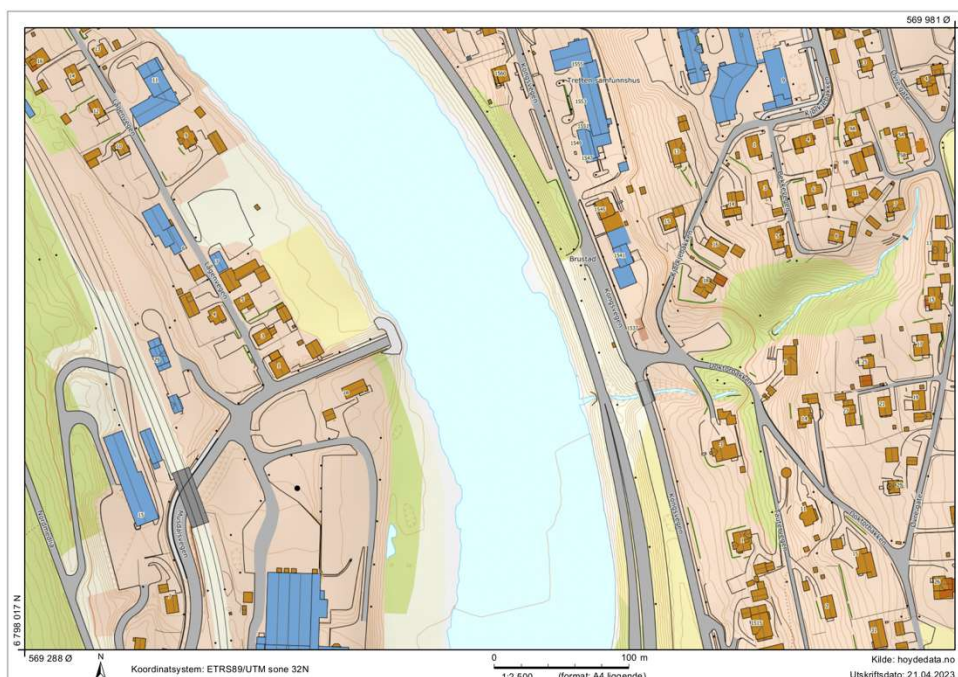
PTC Mathcad Prime lar seg enkelt bruke til analyse, dokumentasjon, løsninger og deling av tekniske beregninger. Verktøyet har blitt brukt til å validere og verifisere beregninger gjennom oppgavens fremdrift. Programmet er omfattende, men intuitivt som utfører nøyaktige beregninger med matematiske notasjoner og muliggjør sporing (5).

2.6 GJENOPPBYGGING AV TRETEN BRU

I 2012 ble Tretten bru bygget og erstatning den daværende stålbroen, som hadde stått siden 1895. Broen tok utgangspunkt i en fagverkløsning der overgurt, undergurt og diagonalstaver var av limtre og vertikalstavene av stål. Den ble videre utformet med en bredde på 10 meter, som inneholdt to kjørebener og ett fortau. Prosjektet var utført av Norconsult i samarbeid med Plan Arkitekt (6).

2.6.1 Området

Området Tretten bru ligger i, er del av prosjektet E6 Øyer-Tretten med kjørestrekning på 13,5 kilometer. Figur 2-3 viser til beliggenheten til broen, som ble åpnet opp for trafikk 12. Desember i 2012. Broen ligger på fylkesvei 254, som Innlandet fylkeskommune eier og vedlikeholder. Veien har en fartsgrense på 50 km/t med en ÅDT lik 1800. Broen har total lengde på 148 meter fordelt på tre spenn, og strekker seg over elven Gudbrandsdalslågen.



Figur 2-3 Områdekart over Tretten kommune

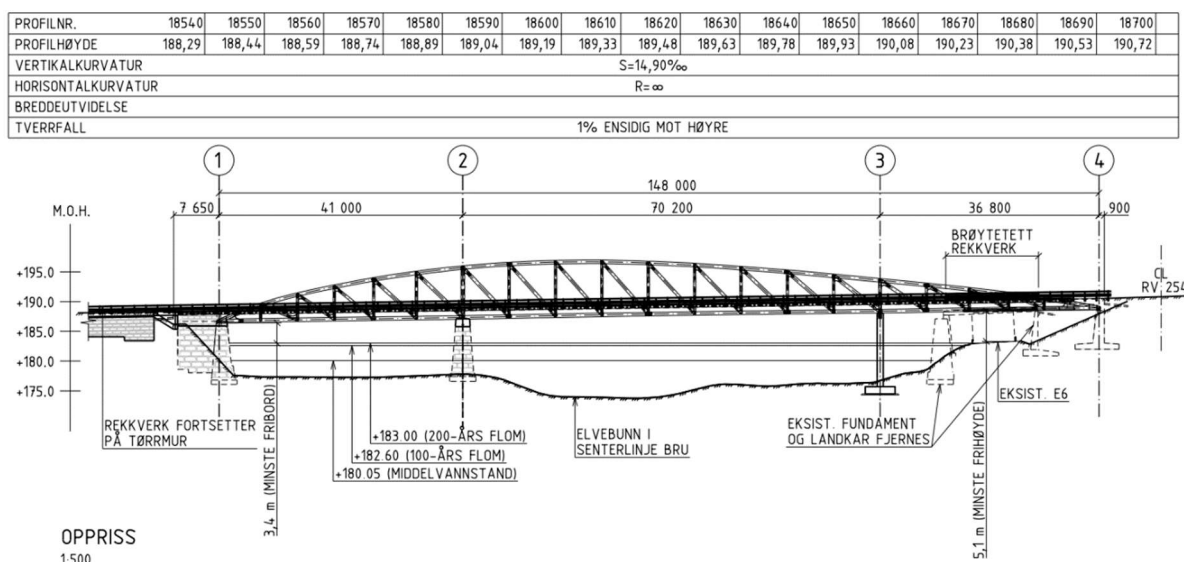
Tretten er et tettsted med 870 innbyggere med et areal på 1,22 km² (7). Tettstedet ligger langs europavei 6, og har derfor mye gjennomkjøring og turisttrafikk. I tillegg har området næringsmiddelindustri (ysteri), trevareindustri, skiferproduksjon, trykkeri og plastindustri (8).

“Brua er et viktig bindeledd og vil være med på å utvikle Tretten i framtida. Ikke bare vil næringslivet nyte godt av bedre transportmuligheter, men vel så viktig er trafikksikkerheten for små og store trettinger som skal bruke den daglig. Brua har også blitt et estetisk landemerke å hvile øynene på for reisende og fastboende” (9).

Kollapsen av Tretten bru medfølger økonomiske kostnader som følge av nedstengning over lengre tid. Samtidig vil dette ha direkte konsekvenser på omkjøringsveier i form av mer slitasje på vei, og omlegging av kollektivruter (10). Fraværet av Tretten bru vil bryte med mulighetene og utviklingen av området, slik fylkesordfører Gro Lundby uttalte seg under den offisielle åpningen.

2.6.2 Gjenbruk av tidligere fundament

Da den nye broen skulle bygges i 2011, ble det eksisterende landkaret på vestsiden gjenbrukt. Forsterkninger ved akse 1 i figur 2-4 måtte likevel til for å tilfredsstille de nye standardene. I tillegg ble den eksisterende steinpilaren ved akse 2 i figuren gjenbrukt og forsterket med betong. For å redusere det opprinnelige spennet på 107 meter, ble også to stålkjernerpeleer slått ned 40 meter i bunnen ved akse 3, som vist i figuren.



Figur 2-4 Plan og profil over gamle Tretten bru

3 GRUNNLAG FOR VURDERING AV LASTER

Laster vil være påvirkninger på brukonstruksjonen i dimensjonerende situasjon. Ifølge Vegnormal N400, Krav 5.1-1 skal den karakteristiske verdien av påvirkningen benyttes som grunnlag for beregninger av lastvirkningen. I tillegg kan laster defineres som krefter påført konstruksjonen som medfører spenninger og/eller tøyninger. Laster kvalifiseres etter variasjonen over tid som permanente-, variable- og ulykkespåvirkninger.

3.1 PERMANENTE LASTER

Innenfor det tidsrommet som betraktes vil permanente påvirkninger være tilnærmet konstant. Permanente laster regnes som tyngde av konstruksjonen, permanent ballast og utstyr som ikke fjernes, ytre vanntrykk, jordtrykk og eventuelle setninger. Egenlasten inkludert belegningsvekt til konstruksjonen vil anses som en permanent påvirkning. I henhold til tabell 5.1 i N400 er minstekrav til dimensjonerende belegningsvekt i kjørebane gitt til $2,5 \text{ kN/m}^2$ ved største spennvidde mellom 50 og 200 m. For vegbruer med gang- og sykkelvei er denne satt til min. $2,0 \text{ kN/m}^2$ for spennvidde mindre eller lik 200. Egenvekten til konstruksjonen, ifølge *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-1: Allmenne laster. Tetthet, egenvekt og nyttelaster*, vil være 27 kN/m^3 for aluminium og 77 kN/m^3 for stål. Det vil også tas utgangspunkt i egenvekten til rekkverk lik 100 kg/m . Det medfølger til en egenvekt lik $0,1 \text{ kN/m}^2$ for kjørebanebredde lik 10 meter. Samlet permanent last vil være $2,325 \text{ kN/m}^2$. For detaljerte beregninger av permanente laster se vedlegg A.

3.2 VARIABLE LASTER

Variable påvirkninger anses som laster som varierer i tid, og omfatter trafikklast, støt- og fortøyningslast, naturlaster og andre variable laster som installering eller variabel ballast. Under naturlaster inngår snø- og vindlast påført konstruksjonen innen en gitt tidsperiode. Ifølge krav 5.12-1 skal ikke snølast regnes å opptre samtidig med trafikklasten på vegbruer, fergekaier eller gang- og sykkelbruer. Dermed kan denne variable påvirkningen neglisjeres i videre beregninger.

3.2.1 Trafikkklaster

Karakteristiske verdier for trafikkklaster på bro blir hentet fra *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 2: Trafikklast på bru*. Med utgangspunkt i teoretisk kjørefeltsbredde kan antall kjørefelt bestemmes fra tabell 3-1. Lokasjonen av de forskjellige trafikklastene på bruene bestemmes av de teoretiske kjørebanelene.

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

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

Tabell 3-1 Nummer og bredde av kjørefelt

I prosjekteringen av en ny bro vil verdier fra eksisterende tegninger, som vist i figur 8-3 under kapittel 8.2 *Broens utforming*, bli brukt. Tretten bru ble designet med utgangspunkt i to kjørefelt med kjørefeltsbredde på 3,25 meter, og resterende felt vil ifølge nevnt figur være på 1,0 m. Etter 4.2.4(2) vil man ta utgangspunkt i en belastning der effekten fra lastmodellene er mest ugunstig. I dette tilfellet vil kjørefeltene derfor plasseres inntil hverandre med lik bredde på 0,50 m på begge sider.

Karakteristiske verdier for vertikale laster representeres ved bruk av fire lastmodeller.

Intensjonen for bruk av disse lastmodellene er for kontroll av bruks- og bruddgrensetilstand.

Viser til følgende trafikkklaster som oppstår av hver lastmodell og tilhørende egenskaper gitt i 4.3.1(2)(a-d):

- Lastmodell 1 (LM1): Konsentrert og jevn last som dekker den største delen av lastvirkninger fra trafikken av lastebiler og personbiler.
- Lastmodell 2 (LM2): Inngår enkelaksellast påført på spesifikke kontaktområder, og som dekker dynamiske effekter stykkevis.

- Lastmodell 3 (LM3): Tar for seg et sett med aksellaster for spesielle kjøretøy, blant annet industriell transport, som kan kjøre på ruter der unormale belastninger tillates.
- Lastmodell 4 (LM4): Folkelast.

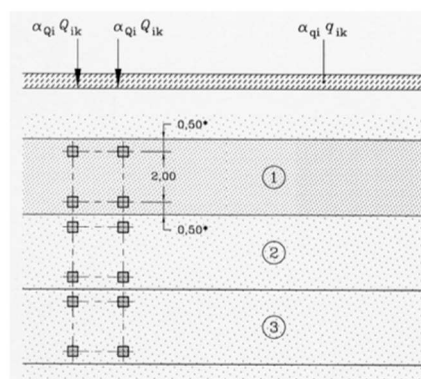
Etter 4.3.2(1) vil lastmodell 1 bestå av to delsystem. Delsystem (a) dobbel-aksel konsentrert last, der hver aksel har følgende vekt $a_Q Q_k$. Det blir brukt dobbel-aksel per kjørebane, der hver aksel vil ha en hjullast lik $0,5a_Q Q_k$. Overflaten til hvert hjul bør også betraktes som en firkant med sider på 0,40 m. Delsystem (b) består av jevnt fordelt last (UDL), der vekten $a_q q_k$ fordeles jevnt over kjørebanen og opptrer samtidig som punktlasten fra hjulakslingen. Lastene som brukes i prosjekteringen vil betraktes som punktlast for å oppnå mest ugunstig effekt under analyse. Resterende felt vil dekkles av en jevnt fordelt last $a_{qr} q_{rk}$.

Verdiene for korrelasjonsfaktorene a_{Qi} , a_{qi} og a_{qr} er gitt i det nasjonale tillegget NA.4.3.2. Disse verdiene gjelder for beregninger av globale lastvirkninger for broer der største spennvidde er opptil 500 m. De karakteristiske verdiene for lastmodell 1 blir oppgitt i tabell 4.2 i EK-1(Del 2), og blir representert som tabell 3-2 i rapporten.

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

Tabell 3-2 Karakteristiske verdier for lastmodell 1

Detaljer for lastmodell 1 illustreres i figur 3-1.



Key
 (1) Lane Nr. 1 : $Q_{1k} = 300 \text{ kN}$; $q_{1k} = 9 \text{ kN/m}^2$
 (2) Lane Nr. 2 : $Q_{2k} = 200 \text{ kN}$; $q_{2k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$
 (3) Lane Nr. 3 : $Q_{3k} = 100 \text{ kN}$; $q_{3k} = 2,5 \text{ kN/m}^2$
 * For $w_l = 3,00 \text{ m}$

Figur 3-1 Påføring av lastmodell 1

Under 4.3.3(1) oppgis karakteristisk verdi for lastmodell 2 for en singel aksel last til $b_Q Q_{ak}$, der Q_{ak} settes lik 400 kN. Etter NA.4.3.3(2) benyttes b_Q lik 1,0, som gir verdi for singel aksling lik verdien for Q_{ak} på 400kN. Lastmodell 1 og lastmodell 2 bruker forskjellige kontaktflater for hjul, der kontaktflaten for LM2 bør være rektangelformet per hjul med dimensjon (0,35x0,60) m.

Karakteristiske verdier for lastmodell 3 fastsettes i NA.4.3.4 i det enkelte prosjektet.

Lastmodell 3 vil ikke være med i beregningsgrunnlaget da øvrige beregninger vil være mer relevant i prosjektet. Samtidig blir omfanget av oppgaven for stor i forhold til tid dersom man skal studere forskjellige spesialtransport.

Etter 4.3.5 Lastmodell 4 blir folkelasten representert som en jevnt fordelt last lik 5 kN/m^2 .

Denne lasten anvendes på den relevante bredden og lengden av brodekket.

Oppsummert i tabell 3-3 finner man beregnede karakteristiske verdier for vertikale laster.

Lastmodell	Kjørefelt 1	Kjørefelt 2	Resterende felt
LM1	480 kN	200 kN	2,5 kN/m ²

LM2	400 kN	400 kN	-
LM3	-	-	-
LM4	5 kN/m ²	5 kN/m ²	5 kN/m ²

Tabell 3-3 Beregnede karakteristiske verdier for vertikale laster

Som følge av nedbremsing og akselerasjon må man også betrakte opptredende horisontalkrefter som kan påvirke kjørebanelen, samt. De tverrkrefter som virker på tvers. Brems- og akselerasjonskrefter blir definert under 4.4.1(2), der den karakteristiske verdien Q_{1k} er begrenset til 900 kN for den totale bredden av broen. Beregningene tar utgangspunkt i beregnede verdier fra lastmodell 1, og lastene vil i all hovedsak påføres kjørefelt 1. For beregninger av horisontale lastvirkninger blir likning (4.6) brukt.

$$Q_{1k} = 0,6\alpha_{Q1}(2Q_{1k}) + 0,10\alpha_{q1}q_{1k}w_1L = 527,8 \text{ kN}$$

$$180\alpha_{Q1} \text{ (kN)} \leq Q_{1k} \leq 900 \text{ (kN)}$$

der:

L er lengden av overflaten som skal analyseres. I dette tilfellet vil lengden til broen være, lik 148 m.

Tverrkraften Q_{trk} er lik 25 % av akselerasjonskraften, og vil opptre samtidig som Q_{1k} . Det vil si at den karakteristiske verdien for tverrkraften er lik:

$$Q_{trk} = 0,25 * Q_{1k} = 0,25 * 527,8 \text{ kN} = 131,95 \text{ kN}$$

Etter 4.4.2(1) bør sentrifugalkraften Q_{tk} betraktes som en varierende tverrkraft etter kjørebanelens radius. Siden konstruksjonen vil være rettstrukket, vil radius gå mot uendelig. Det vil si at den karakteristiske verdien for Q_{tk} , etter tabell 4.3, vil være lik null. Med andre ord vil det ikke opptre sentrifugalkrefter på broen, som vist i tabell 3-4.

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

Tabell 3-4 Karakteristiske verdier for sentrifugalkrefter

For at man skal få en mest mulig ugunstig virkning på fagverkskonstruksjonen vil både horisontal- og sentrifugalkrefter plasseres som punktlaster. For beregninger se vedlegg A.

For karakteristiske verdier for sammensatte grupper av trafikklaster benyttes tabell NA.4.4a.

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

Tabell 3-5 Karakteristiske verdier av påvirkninger fra sammensatte grupper

Relevante lastgrupper i prosjekteringen er gr1a, gr1b, gr2 og gr4. Karakteristiske verdier for hvert tilfelle finner man i vedlegg B. I tabell 3-5 spesifiseres det at kombinasjonsverdien for gangbane og fortau under lastgruppe gr1a skal være lik 2,5 kN/m². Siden lastmodell 4 blir tatt hensyn til, kan karakteristisk verdi for gangfeltlast under gr3 sløyfes. I tillegg vil ikke gr5 bli tatt hensyn til, grunnen til dette blir forklart under avgrensninger. Karakteristiske verdier for horisontale krefter under lastgruppe gr2 vil være lik Q_{1k} for bremse- og akselerasjonskrefter og Q_{tk} for tverkkrefter. For oversikt over resterende lastgrupper se vedlegg B.

3.2.2 Vindlast

For beregninger av vindlast blir *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-4: Allmenne laster, Vindlaster* og Vegnormal N400 brukt. Fra punkt 3.1(1) er vindpåvirkninger noe som varierer med tiden, der vinden virker som direkte trykk på konstruksjonen. Virkningen av vind avhenger av konstruksjonens størrelse, form og dynamiske egenskaper. I tillegg vil vind variere med de lokale og regionale forholdene, der konstruksjonen er plassert.

Tretten bru befinner seg i innlandet i et område der det forekommer lav vegetasjon og spredte hindringer med min. avstand 20 ganger deres høyde. Fra tabell 3-6 leser man derfor av terrengkategori II, samt. Tilhørende verdier som blir brukt i videre beregninger.

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 3-6 Terrengkategorier og terrengparametere

Under 8.1(4) ved vurdering av vegtrafikk og vind samtidig, bør kombinasjonsverdien $\gamma_0 F_{wk}$ for vindpåvirkningen på bruene og kjøretøyene begrenses til en verdi F_w^* . Denne bestemmes ved å erstatte referansevindhastigheten $v_{b,0}$ med anbefalt verdi $v_{b,0}^*$ lik 23 m/s. Ettersom referansevindhastigheten oppgitt i Tabell NA.4(901.1) for Øyer kommune er lik 22 m/s, vil denne brukes for tilfelle med og uten vindlast. Det kommer av at den er lavere enn den anbefalte verdien $v_{b,0}^*$. Referansevindhastigheten er den karakteristiske 10 minutters middelvindhastigheten, og er uavhengig av vindretning og årstid.

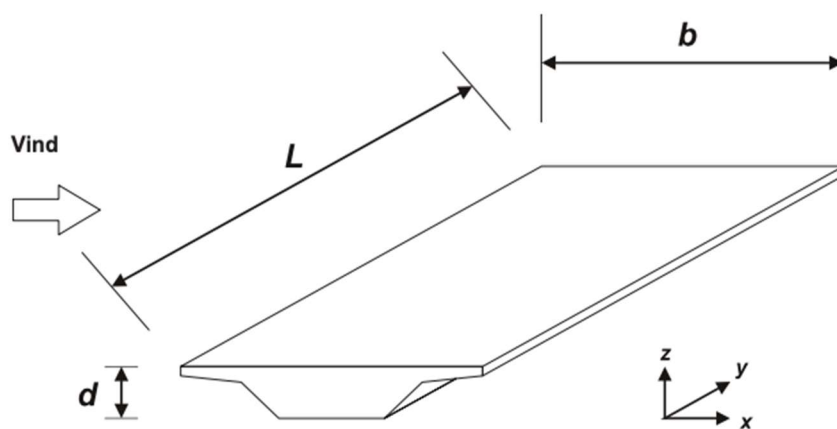
For bestemmelse av basisvindhastigheten blir formel NA.4.1 brukt der referansevindhastigheten reduseres ved hjelp av nivåfaktor, retningsfaktor, årstidsfaktor og returperioden som normalt settes til 50 år. Som følge av dette vil alle faktorer se lik 1, og basisvindhastigheten v_b vil være lik 22 m/s.

Ettersom det vil forekomme variasjon i høyde vil stedsvindhastigheten $V_m(z)$ ved en høyde z over terrenget måtte beregnes. Høyden over terrenget i prosjekteringen antas å være 5,1 m. Antagelsen er basert på gitte tegninger fra gamle Tretten bru. Ved bruk av ligning (4.3) under 4.3.1(1) kommer man fram til $V_m(z)$ verdi lik 19,3 m/s.

Videre må det bli tatt hensyn til vindturbulens for å finne verdien for vindhastighetstrykket. For beregning av turbulensintensiteten $I_v(z)$ vil man være nødt til å bruke ligning (4.6) og (4.7). Da ender man opp med en verdi lik 0,353. Bestemmelsen av vindhastighetstrykket $q_p(z)$ gjøres ved å bruke anbefalt ligning (4.8). Verdier for lufttetthet gis under 4.5(1) MERKNAD 2. Dermed ender man opp med et vindhastighetstrykk $q_p(z)$ lik 584,8 N/m².

For beregninger av vindlast med trafikk tar man utgangspunkt i vindkasthastigheten ved kjørebanelens høyeste punkt $V_p = 35$ m/s gitt i nasjonalt tillegg punkt NA.8.1(4). Som følge av trafikken vil vindhastighetstrykket $q_p(z)$ være lik 760,0 N/m².

Vindpåvirkninger på bruer vil danne krefter i x-, y- og z-retning, som vist i figur 3-2.



Figur 3-2 Retninger for vindpåvirkninger på bruer

For beregninger av horisontale vindkrefter brukes ligning:

$$q_D = C_f \cdot q_p(z) \cdot h \quad (5.7)$$

der:

C_f er kraftfaktoren og h er referansehøyden.

Vindkraften i x-retning settes lik q_{Dx} . For langsgående vindkrefter på brudekket i y-retning etter punkt NA.8.3.4(1), vil anbefalt verdi q_{Dy} for fagverkbruer være henholdsvis lik 50 % av vindkreftene i x-retningen. For beregninger av vertikale vindkrefter brukes tilsvarende ligning (5.7), men referansehøyden erstattes med bredden til bruene.

Hvilken type vindlast på brukonstruksjonen bestemmes etter følgende vindklasser under 5.4.3.1 i N400. Siden den nye prosjekterte bruene skal være av brutypen fagverkbru, vil man kunne plassere den nye Tretten bru i vindlastklasse I. Det vil si at konstruksjonen vil ha en ubetydelig dynamisk lastvirkning fra vind, der høyeste egensvingeperiode er mindre enn 2 s. Dette gir vurderingsgrunnlag for konstruksjonen og krav til dimensjonering av vindlast. For beregninger av vindlaster se vedlegg A.

3.2.3 Termiske påvirkninger

I beregninger av termiske påvirkninger vil *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-5: Allmenne laster, Termiske påvirkninger* brukes. Etter 4(2) vil størrelsen av de termiske virkningene avhenge av lokale klimatiske forhold, samt. Konstruksjonens orientering, masse og overflate.

I følge 6.1.2(1) bør termiske påvirkninger fastsettes ved hjelp av den jevnt fordelte temperaturandelen og temperaturdifferansen. Bestemmelse av bruoverbygning bestemmes etter NA.6.1.1(1), der overbygningen i denne prosjekteringen er av type 1.

Representative lufttemperaturer bestemmes fra isotermkart. Fra figur NA.A1 i EK-1(Del 1-5) leses maksimumstemperatur i skyggen, ved havnivå med en returperiode på 50 år, til T_{max} lik $36^{\circ}C$. Minimumstemperaturen leses av figur NA.A2 til T_{min} lik $-40^{\circ}C$. For fagverksdragere og platebærere i stål kan verdien for T_{max} reduseres med $3^{\circ}C$ etter nasjonalt tillegg punkt NA.6.1.3.1. Dermed vil den reduserte verdien til T_{max} være lik $33^{\circ}C$.

Ved beregning av den jevnt fordelte temperaturandelen, bør man også fastsette den laveste og høyeste jevnt fordelte brutemperaturandelen $T_{e,min}$ og $T_{e,max}$. Anbefalte verdier blir gitt i figur NA.6.1, og vil være lik:

$$T_{e,max} = T_{max} + 16 = 33^{\circ}C + 16 = 49^{\circ}C$$

$$T_{e.min} = T_{min} - 3 = -40^{\circ}\text{C} - 3 = -43^{\circ}\text{C}$$

Videre bestemmer man den karakteristiske verdien for maksimalt temperaturkontraksjonsintervall og temperaturekspansjonsintervall for jevnt fordelt brutemperaturandel $\Delta T_{N,con}$ og $\Delta T_{N,exp}$. Initialtemperaturen T_o for ei bru på tidspunktet når konstruksjonen fastholdes finnes i NA.A.1(3), og settes normalt lik 10°C .

For beregninger av $\Delta T_{N,con}$ og $\Delta T_{N,exp}$ blir ligning (6.1) og (6.2) brukt. Dermed vil $\Delta T_{N,con} = 53^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T_{N,exp} = 39^{\circ}\text{C}$. Anbefalte verdier for lagere og ekspansjonsfuger finner man i 6.1.3.3(3) MERKNAD 2, der $\Delta T_{N,con} = 73^{\circ}\text{C}$ og $\Delta T_{N,exp} = 59^{\circ}\text{C}$. I tillegg vil totalintervallet for jevnt fordelt brutemperatur $\Delta T_N = T_{e,max} - T_{e,min} = 92^{\circ}\text{C}$ ifølge MERKNAD 1.

For 6.1.4(1) temperaturdifferanser vil oppvarming og avkjøling på oversiden av et brodekke resultere i temperaturvariasjon, som følge av maks oppvarming og avkjøling, i løpet av et bestemt tidsrom. Slike forskjeller kan forårsake lastvirkninger i vertikal retning. Derfor bør det tas hensyn til denne differansen, ved å undersøke anbefalte verdier $\Delta T_{M,heat}$ og $\Delta T_{M,cool}$ gitt i tabell 3-7. Anbefalte verdier som brukes er for bruoverbygning type 1.

Type bruoverbygning	Overside varmere enn underside	Underside varmere enn overside
	$\Delta T_{M,heat} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_{M,cool} (^{\circ}\text{C})$
Type 1: Stålbruer	18	13
Type 2: Samvirkebruer	15	18
Type 3: Betongbruer: – betongbjelke med kassetvernsnitt – betongbjelke – platebru	10 15 15	5 8 8
<p>MERKNAD 1 Verdier angitt i tabellen er øvre grenseverdier for lineært varierende temperaturdifferanse for typiske brugeometrier.</p> <p>MERKNAD 2 Verdier angitt i tabellen er basert på et belegg med en tykkelse på 50 mm for vegbru og jernbanebru. For andre beleggtykkelser bør disse verdiene multipliseres med faktoren k_{sur}. Anbefalte verdier for faktor k_{sur} er gitt i tabell 6.2.</p>		

Tabell 3-7 Anbefalte verdier for varierende temperaturdifferanseandel

Som vist i tabellen over, under MERKNAD 2, vil man basere valget for verdier på et belegg med tykkelse på 50 mm for vegbru.

Ved bestemmelse av lastvirkninger forårsaket av temperatur vil man måtte bruke verdier for lineære utvidelseskoeffisienter α_T gitt i tabell C.1. For materiale aluminium vil $\alpha_T = 24 \times 10^{-6}$

$6/^\circ\text{C}$, mens for konstruksjonsstål vil $\alpha_T = 12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Resultatet av temperaturvirkningene tilsier at aluminium vil utvide seg dobbelt så mye som stål ved eksponering av varme.

Oversikt over endelig lastvirkninger som følge av temperatur blir nærmere forklart i vedlegg A.

3.3 ULYKKESLASTER

Det vil ikke bli tatt hensyn til beregninger i denne prosjekteringen som følge av oppgavens omfang. Kapittel 5.6.1 i N400 definerer ulykkeslaster som laster konstruksjonen kan bli utsatt for som et resultat av et ulykkestilfelle eller unormal hendelse som påkjøringslaster fra kjøretøy, last fra fallende gjenstander osv. Forekomst av ulykkeslaster vil være liten, men konsekvensen av en ulykke kan ha fatale konsekvenser for konstruksjonens styrke.

Konsekvensen av brannbelastning vil være omfattende. Ved kollisjon eller et ulykkestilfelle må man forutsette at det kan oppstå brann i kjøretøyet. Brannbelastning på bærende konstruksjonsdeler i bruer vil føre til reduksjon av bæreevne. Som forklart under kapittel 3.2.3 *Termiske påvirkninger* vil temperaturpåvirkningen på aluminium være dobbel så stor som på stål. Det vil si at dersom konstruksjonsdeler i aluminium utsatt for brann blir eksponert for ekstrem varme, vil bruene etter tid miste kritisk bæreevne.

3.4 UTMATTINGSLAST

Beregninger av utmattingslast vil ikke bli tatt med, men vil bli diskutert. Påvisning av utmatting gjøres ved å definere lasthistorien til konstruksjonen.

Utmattingslaster oppstår som følge av gjentatte lastvekslinger over tid. Slike vekslinger ligger som regel under bruddgrensen, men kan med tiden føre til mikroskopisk sprekktilvekst.

Dersom sprekktilveksten blir betraktelig i størrelse, vil man få et utmattelsesbrudd.

Utmattelsesbrudd skjer hurtig, da materiale oppfører seg sprøtt i denne fasen (11).

I brokonstruksjoner vil noen områder være mer utsatt enn andre, mer spesifikt overganger og sveiseforbindelser. I disse områdene blir det tatt opp store spenninger som følge av dynamiske lastvirkninger. Trafikk- og vindlaster vil ha markant innvirkningen på konstruksjonen, da disse lastene har størst variasjon. Kontinuerlig påkjenning av slike laster vil sette i gang svingninger i konstruksjonen, og vil over tid være kritisk med tanke på utmatting.

Når det gjelder utmattingslaster vil det være kritisk å lokalisere områdene som er mest utsatt for utmatting. Disse områdene vil derfor måtte dimensjoneres ettersom, slik at komponenten tåler de påkjenningene som oppstår gjennom levetiden. Selv om gruppen har valgt å ikke beregne utmattingslasten, har Statens Vegvesen konkludert gjennom utviklingsprosjektet Langenuen bru at den største utfordringen med aluminium var å sikre utmattingslevetiden for den aktuelle trafikkbelastningen. Statens Vegvesen begrunner denne påstanden som følge av en lavere tillatt kapasitet for utmatting i aluminium sammenlignet med typiske forbindelser i stål (12).

3.5 LASTKOMBINASJONER

Ved dimensjonering av grensetilstander bør det gjøres kontroll av brudd- og bruksgrensetilstand. Bruddgrensetilstand har betydning for menneskers sikkerhet og/eller konstruksjonens sikkerhet. For klassifisering av bruksgrensetilstander vil konstruksjonens funksjonsdyktighet ved normal bruk, menneskers komfort og konstruksjonens utseende ha betydning.

Dimensjonering skal baseres på bruk av lastmodeller og modeller for konstruksjonsberegning for de aktuelle grensetilstandene. For brudd- og bruksgrensetilstand skal lastfaktorer og kombinasjonsfaktorer etter N400 hentes fra *Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*.

Oppgaven vil ha fokus på selve konstruksjonen. Det vil derfor ikke bli kontrollert brudd eller store deformasjoner i grunnen (GEO). I tillegg vil dimensjonerende brukstid for broer settes likt 100 år etter punkt NA.A2.1.1.

3.5.1 Bruddgrensetilstand

Ved bruddgrensetilstander vil det være aktuelt å undersøke bruddsituasjoner og for store deformasjoner i konstruksjonen/konstruksjonsdelene der byggematerialenes fasthet har betydning. For dimensjonerende verdier for laster brukes tabell NA.A2.4(B) fra EK-0. Ved fremstilling av vedvarende og forbigående dimensjonerende situasjon vil kombinasjoner av ligninger (6.10a) og (6.10b) bli tatt i bruk.

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

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

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

MERKNAD 2 Det benyttes følgende sett med γ - og ζ -verdier ved bruk av uttrykk 6.10a og 6.10b:

$\gamma_{0,imp}$ = 1,35 for permanent last, unntatt de som er listet under ^{1) 2)}
1,00 for irreversibile deformasjonslaster ³⁾
1,20 for permanent del av vanntrykk

$\gamma_{0,inf}$ = 1,0 for permanent last ^{1) 2)}
0 for irreversibile deformasjonslaster ³⁾
1,0 for vanntrykk

ζ = 0,89 for egenvekt ¹⁾

γ_p = verdier gitt i de aktuelle Eurokodene ⁴⁾

γ_0 = 1,35 for vegtrafikk fra kjøretøyer og fotgjengere, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)
 γ_0 = 1,5 for jernbanetrafikk, hvis ugunstig (0 hvis gunstig). For lastmodell SW/2 benyttes $\gamma_0 = 1,2$
 γ_0 = 1,60 for laster fra vind, belger og strøm, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)
 γ_0 = 1,20 for temperaturlast, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)
 γ_0 = 1,35 for last fra lagerfriksjon og variabel del av vanntrykk, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)
 γ_0 = 1,50 for øvrige variable laster, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)

¹⁾ Disse verdiene gjelder for egenvekt av bærende og ikke-bærende konstruksjonsdeler, ballast, jord, flytbare laster osv.

²⁾ De karakteristiske verdiene for laster av samme opprinnelse, for eksempel egenvekt, multipliseres med $\gamma_{0,imp}$ hvis resultatet i form av den totale lastvirkningen er ugunstig, og med $\gamma_{0,inf}$ hvis resultatet i form av den totale lastvirkningen er gunstig. Dette gjelder også om forskjellige materialer er brukt.

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

⁴⁾ Der dette er aktuelt, gjelder verdiene også for indirekte virkninger av spennkrefter, dvs. som hvangskrefter i statisk ubestemte konstruksjoner.

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

MERKNAD 4 For spesielle påvisninger kan verdiene for $\gamma_{0,1}$ og $\gamma_{0,i}$ igjen deles inn i verdiene $\gamma_{0,1}$ og $\gamma_{0,i}$ og modellens usikkerhetsfaktor $\gamma_{0,1}$. En verdi for $\gamma_{0,1}$ 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 3-8 Dimensjonerende verdier for laster i bruddgrense

Siden konstruksjonen består av mindre overflater, vil vindlast alene ses bort fra. Samtidig kan man observere at kraften fra vindlasten er rimelig liten, noe som vil si at man kan anta trafikklasten som den dominerende, variable lasten for bruddgrensetilstanden.

Fra tabell 3-8 vil verdier for de respektive lastene i bruddgrense hentes ut, og bli satt i kombinasjon med verdier av ψ - faktorer for veibruer gitt i tabell 3-9. Lastkombinasjonene vil danne grunnlaget for analyse i programvaren SAP2000 og bli brukt til å finne dimensjonerende lasttilfelle i bruddgrense.

Tabell NA.A2.1 – Verdier av ψ -faktorer for vegbruer

Påvirkning	Symbol	ψ_0	ψ_1	$\psi_2^{5)}$	$\psi_{1,inf}^{1)}$	
Trafikklaster (se NS-EN 1991-2, tabell 4.4)	gr1a (LM1 + horisontale laster + laster på gangbaner/fortau)	Boggilast (BL)	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
		Jevnt fordelt last (JFL)	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
		Horisontale laster	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
		Laster på gangbaner/fortau ²⁾	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
		gr1b (enkel aksling)	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
		gr2 (horisontale krefter)	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
		gr3 (laster på gangbaner/fortau)	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
	gr4 (LM4 – Laster fra ansamling av mennesker)	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8	
	gr5 (LM3 – Spesialkjøretøyer)	-	-	-	-	
Vindkrefter	F_{wk} - Vedvarende dimensjonerende situasjoner	0,7	0,6	0/0,5	0,8	
	F_{wk} - Under utførelse	0,8	-	-	-	
	F_w^*	0,7	0,6	0/0,5	0,8	
Temperatur ⁴⁾	T_k	0,7	0,6	0/0,5	0,8	
Snølaster	$Q_{Sn,k}$ - På tak o.l.	0,7	0,6	0,2/0,5	0,8	
	$Q_{Sn,k}$ - Under utførelse	0,8	-	-	-	
Laster i byggetilstand	Q_c	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 lagerfriksjon	-	0,7	0,6	0/0,5	0,8	
Øvrige variable laster	-	0,7	0,6	0/0,5	0,8	

¹⁾ $\psi_{1,inf}$ er en faktor beregnet på å definere sjeldent forekommende laster.
²⁾ Kombinasjonsverdien for laster på gangbaner/fortau angitt i tabell 4.4a i NS-EN 1991-2, er en redusert verdi, og ψ -faktorene gjelder for denne verdien.
³⁾ Der vindlasten behandles som den dominerende lasten, representert ved F_{wk} , bør ψ_0 for trafikklast settes lik 0, jf. også A2.2.2(5).
⁴⁾ Påvirkning fra temperatur medtas i alle lastkombinasjoner, også i bruddgrensetilstand, dersom virkningen er ugunstig.
⁵⁾ Ved beregning av rissvidder i henhold til NS-EN 1992 for lastkombinasjonen "tilnærmet permanent" benyttes verdien 0,5. Verdierne 0,2 respektive 0 kan benyttes ved beregning av langtidseffekter for tidsavhengige egenskaper.

Tabell 3-9 Verdier av ψ – faktorer for veibruer

Gjennom analyse i SAP2000 vil antagelsen om trafikklast som dominerende lasttilfelle bekreftes. Der verste lastkombinasjon vil etter ligning (6.10 a) være gr1a under trafikklast i bruddgrensetilstand. For oversikt over lastkombinasjoner se vedlegg C.

3.5.2 Bruksgrensetilstand

Funksjonskrav for broer i N400 blir gitt i kapittel 3.6.1, der deformasjon av brukonstruksjonens brobane ikke skal ha større nedbøyning enn $L/350$, uansett lastplassering. Lengden L av det betraktede spennet vil være bruens lengde. Kontroll av nedbøyning skal utføres med karakteristisk trafikklast i kombinasjon med vind- og temperaturlaster. Maksimal nedbøyning for denne konstruksjonen, med utgangspunkt i det lengste spennet, vil være:

$$\frac{70200 \text{ mm}}{350} = 200,6 \text{ mm}$$

Som følge av permanente laster, inkludert langtidseffekter, skal nedbøyning av brobanen kompenseres med overhøyde. Nødvendig overhøyde skal beregnes i bruksgrensetilstand tilnærmet permanent, der kombinasjonsfaktoren ψ_2 for variable laster settes lik 0.

Ofte forekommende kombinasjon av laster kan uttrykkes som:

$$E_d = \Sigma G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (6.15b)$$

Den ofte forekommende kombinasjonen illustrert ved ligning (6.15b) brukes vanligvis for reversible grensetilstander. I prosjekteringer blir det antatt at grensetilstanden er reversibel, som følge av at man ønsker å oppnå en duktil konstruksjon, og få et forvarsel før konstruksjonen går til brudd.

For langtidsvirkninger og konstruksjonens utseende brukes vanligvis ligning (6.16b) for den kvasi-permanente kombinasjonen. Den permanente kombinasjonen kan uttrykkes som: $E_d = \Sigma G_{k,j} + P + \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad j \geq 1; i \geq 1 \quad (6.16b)$

Fra tabell 3-10 vil dimensjonerende verdier for laster i bruksgrensetilstanden bli hentet ut, og bli satt i kombinasjon med verdier fra tabell 3-9. For å finne verst tenkelig lasttilfelle som tidligere nevnt under kapittel 3.5.1 *Bruddgrensetilstand*.

Kombinasjon	Permanente laster G_d		For-spennning	Variable laster Q_d	
	Ugunstig	Gunstig		Dominerende last	Øvrige laster
Karakteristisk	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	P	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} Q_{k,i}$
Sjeldent forekommende	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	P	$\psi_{1,inf} Q_{k,1}$	$\psi_{1,i} Q_{k,i}$
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 3-10 Dimensjonerende verdier for laster i bruksgrensetilstand

Dimensjonerende lasttilfelle være lik i bruksgrensetilstand som i bruddgrensetilstand. For utfyllende beregninger og oversikt over bruksgrensetilstand se vedlegg C.

4 SIKKERHET

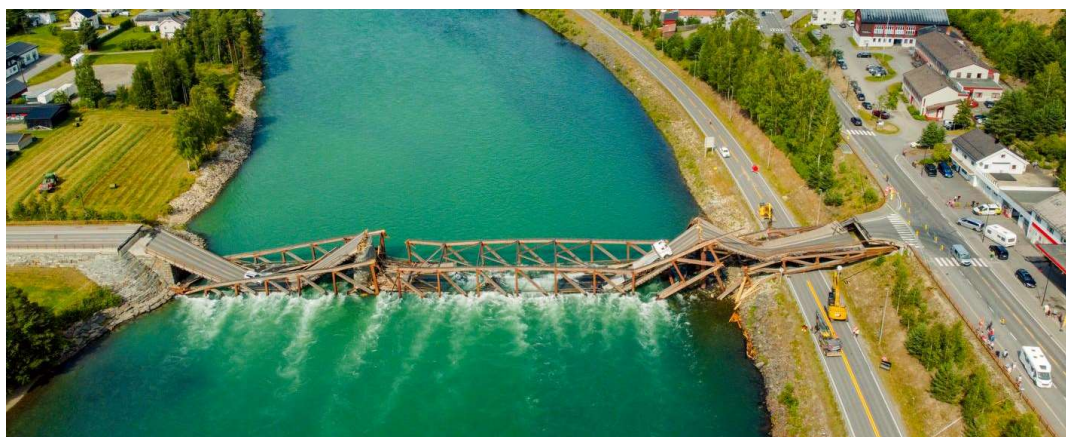
Byggetekniske forskrifter tar for seg et eget punkt som omhandler konstruksjonssikkerhet. Det stilles krav til utforming og materialvalg, som skal sørge for en sikker og funksjonell konstruksjon.

4.1 KOLLAPSEN AV TRETTE BRU

Årsakene til kollapsen av Tretten bru er fortsatt under pågående undersøkelser, det har derfor ikke kommet en endelig konklusjon. Statens havarikommisjon fremla 2. desember 2022, den siste utgaven av deres foreløpige undersøkelsesresultater (13). Rapporten kan derfor inneholde feil og unøyaktigheter.

4.1.1 Hendelsesforløp

15. August 2022 kollapset Tretten bru mens en personbil og lastebil med påhengsvogn kjørte over. Lastebilen med totalvekt på 48 tonn var lastet med kalk (14). Samme dag ankom havarikommisjonen, som besluttet å iverksette en sikkerhetsundersøkelse av hendelsen. Kommisjonen består av fagressurser fra Aas-Jakobsen, NTNU, SINTEF og SWECO. Undersøkelsen har som formål å kartlegge grunner til kollapsen, og undersøke sikkerhetsproblemer for å se på bakenforliggende årsaker til hendelsen.



Figur 4-1 Oversiktsbilde etter brokollapsen

4.1.2 Foreløpige undersøkelsesresultater

Den endelige rapporten fra havarikommisjonen, er antatt å være ferdigstilt august 2023. Så langt har det kommet frem foreløpige resultater på bakgrunn av tekniske undersøkelser og statistisk analyse av broen. Undersøkelsene underbygger teorien om at primær skadeårsak til kollapsen er brudd i en av diagonalstavene i midtspennet inn mot elvefundamentet i akse 2.



Figur 4-2 Vestre elvefundament (akse 2) etter kollaps

Figur 4-2 viser knutepunktene inn mot vestre elvefundamentet, tilknyttet diagonalene i midtspennet. Disse er markert med røde ringer, og bildene i figuren illustrerer knutepunktene som lå under vann. Det er indentifisert at bruddformen kommer fra blokkutrivning mellom treverket og ståldyblene ved knutepunktet. Dette er en type brudd som oppstår når en blokk av materiale blir revet ut av en forbindelse som følge av strekk- og skjærbrudd mellom boltehull. Bruddet skjer momentant og kan resultere i en overbelastning i andre deler av broen og dermed medføre kollaps. Denne formen for brudd støttes opp av tekniske undersøkelser av brudeler, bildemateriell og vitneobservasjoner, samt utførte strukturelle analyser og beregninger.

Årsaken til bruddet skal så langt være vurdert til en betydelig overbelastning av broens bæreevne og toleranse mot lastpåvirkninger. Broen var prosjektert etter NS 3470 (Norske

prosjekteringsstandard), hvor blokkutrivning ikke var en spesifisert kontroll. Her kommer det frem at kapasiteten i diagonalstavene, var halvparten av den dimensjonerte kapasiteten i bruddgrensetilstand. Til tross for at sikkerhetsfaktorer på både laster og styrke på materialer var tatt hensyn til.

I rapport fra Statens havarikommisjon har Tretten bru vært “Kontrollert etter anbefalte beregningsmetoder i dagens gjeldende regelverk for prosjektering av trekonstruksjoner, var utnyttelsesgraden i forbindelsene på de aktuelle diagonalene rundt 200 %” (15). Det kommer ikke fram om reduksjon av broens kapasitet, som følge av belastning, utmatting, råte eller korrosjon, har vært en årsak. En av utfordringene er å avdekke hvilke av skadene som oppstod under kollapsen og etter konstruksjonens sammenstøt med vannet og grunnen under seg.

Tidligere sjefsingeniør Tormod Dyken har kommet med en teori der forskjellen mellom egenskapene til stål og treverk kan være en faktor til kollapsen. Han viser til at disse forskjellene er lite utforsket, og at det verken finnes en lignende løsning i utlandet eller andre steder i Norge (16).

Dyken har selv ledet arbeidet med første håndbok for brokonstruksjoner i tre av Statens vegvesen utgitt i 2013. I intervju gjort av Teknisk ukeblad peker han på forskjellen mellom egenskaper til stål og tre, som blant annet tvangskrefter i konstruksjonen ved temperaturendringer. Der treets egenskaper blir påvirket av fukt og uttørking, vil ikke stål endre seg. Stål utsatt for varme vil utvide seg raskere enn tre, som kan medføre til strekk i treverket. Det kan da oppstå små sprekker ved knutepunktene. Dersom denne prosessen gjentar seg, vil sprekkenes utvides og føre til nedsatt styrke. Denne hypotesen har hittil ikke blitt bekreftet, men Dyken mener at dette kan ha vært en av flere faktorer som har ført til svekkelser i konstruksjonen.

4.2 SIKKERHETSFILOSOFI

4.2.1 NORSOK N-001

NORSOK N-001 punkt (7.1) tar for seg syv prinsipper for hvordan en konstruksjon skal utformes for å oppnå best mulig sikkerhet, pålitelighet og funksjonalitet i et bæresystem. En konstruksjon skal utformes med duktilitetsmotstand, som vil si at den skal ha evnen til å

deformere seg plastisk uten å bryte sammen eller miste sine mekaniske egenskaper. Dette fører til at konstruksjonen tåler større belastinger før den går til brudd, som også er med på å redusere risikoen for uforventede kollapser. Det er samtidig viktig å minimere risikoen for en uønsket hendelse som videre eskalerer til en ulykke med større omfang. Med andre ord vil det si at selv om det oppstår et brudd i en del av konstruksjonen, skal ikke det medføre til total kollaps. På samme måte er det viktig å utforme konstruksjonen slik at dynamiske spenningskonsentrasjoner blir minimert i enkelte deler, og at enkel spenningsdistribusjon oppnås.

Når det skal utformes en konstruksjon er det viktig å betrakte overflatens utseende, slik at det sikres nødvendig tilgang og innsikt til kritiske deler. Ved nøye utførelse av detaljarbeid, profilutforming og materialvalg, kan man samtidig minske faren for korrosjonsdannelse. I tillegg kan tilstrekkelige forhåndsregler for spesialtilfeller være nødvendig. Dette gjør at konstruksjonen lett kan inspiseres, og nødvendige avgjørelser kan tas for å opprettholde sikkerhet og funksjonalitet. Samtidig bør det tas høyde for muligheten til å bytte ut eventuelle komponenter for å bidra til konstruksjonens levetid. Tilfredsstillende funksjonalitetskravene gitt i utformingsspesifikasjonene vil en konstruksjon ha tilstrekkelig sikkerhet, pålitelighet og funksjonalitet (17).

4.2.2 Krav 1.1.4-1 i N400

Håndbok N400 *Bruprosjektering* fra Statens Vegvesen, tar for seg generelle konstruksjonskrav som en bro bør oppfylle. I likhet med NORSOK sine prinsipper, stilles det krav til konstruksjonen og dens enkelte elementer. Konstruksjonen skal prosjekteres og utformes på en måte som sikrer at den oppfører seg duktilt i bruddgrensetilstand. I tillegg skal broen være lite ømfintlig for lokale skader og uforutsette hendelser, altså være tilpasset naturmiljø, landskap og grunn- og fundamenteringsforhold. Samtidig være logisk og konsekvent i sin oppbygging. Lokaliseringen og naturpåkjenninger, som snøskred, jordskred og flom, skal ikke ha urimelig store konsekvenser for konstruksjonen.

Utformingen av broen skal sikre en god fremkommelighet og brukbarhet for alle trafikanter, samtidig som den skal bygges på en sikker og forsvarlig måte. Det skal være mulighet for inspisering, vedlikehold og reparasjonsmuligheter, samtidig som trafikksikkerheten opprettholdes og krav til framkommelighet ikke reduseres vesentlig. Utformingen skal sikre at

uvedkommende ikke får tilgang til uønskede områder, som kabler, underflenser, buer og lignende. Det må også tas hensyn til utskifting av utstyr og elementer med kortere dimensjonerende brukstid uten at kravene til fremkommelighet reduseres. På denne måten kan man sikre at konstruksjonen oppfyller alle nødvendige krav (18).

4.2.3 Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner

Eurokoden brukes tilsvarende som NORSOK og N400 for utforming av generelt nye konstruksjoner, men kan også anvendes i prosjektering av broer. Standarden tar hensyn til pålitelighet som kreves for konstruksjoner, samt. utformingskravene knyttet til de respektive eurokodene NS-EN 1990 til NS-EN 1999. Under kapittel 2 *Krav* blir det nevnt hvilke tiltak som bør legges til grunne for prosjektering av nye konstruksjoner, der grunnleggende krav, pålitelighet, dimensjonerende brukstid, bestandighet og kvalitetssikring belyses.

I utformingen av en ny konstruksjon vil det derfor være en prioritet å prosjektere med tilstrekkelig grad av pålitelighet under den forutsatte brukstid. Det vil også si at konstruksjonen skal ivareta nødvendige økonomiske hensyn, motstå alle påvirkninger som kan oppstå under utførelse og bruk, samt. tilfredsstillende krav til brukbarhet. I tillegg skal dens utforming være i samsvar med eurokodene, og det skal prosjekteres med hensyn til miljøpåvirkninger og forventet vedlikeholds nivå.

5 ALUMINIUM SOM KONSTRUKSJONSMATERIALE

Aluminium har et allsidig bruksområde, og kan bli funnet i alt fra kjøkkenskuffen til flyene som tar oss jorden rundt. Grunnstoffet har atomnummer 13 og atomsymbol Al. På grunn av den kjemiske sammensetningen finnes kun isotop Al^{3+} i naturen. Aluminium har affinitet¹ mot oksygen, som ved eksponering av luft danner et beskyttelsessjikt av aluminiumoksid på overflaten. Metallet utgjør 8,1 vektprosent av jordskorpen, og er med det tredje mest vanlige grunnstoffet etter oksygen og silisium. Det blir fremstilt fra råmaterialet bauksitt, som er et restprodukt dannet etter millioner av år med kjemisk forvitring av bergarter med aluminiumsilikater (19).

5.1 HISTORISK TILBAKEBLIKK

Historien har vist at katastrofer og utfordringer kan føre til nytenkning og teknologisk fremgang. Hungersnød og frykten for ikke å ha nok mat spredde seg i Europa mot slutten av 1800-tallet, som et resultat av flere munnar å mette. Naturlig gjødsel var ikke lengre nok for å tilfredsstille behovet for økende matproduksjon, som fikk en rekke ingeniører til komme med en løsning på dette problemet. I 1905 ble Norsk Hydro etablert av Sam Eyde og Kristian Birkeland, som kort tid etter startet verdens første industrielle produksjon av nitrogengjødsel. Dette gjorde de ved hjelp av Europas største vannkraftverk på Notodden.

5.1.1 Hydros innflytelse på Aluminiumproduksjon

Aluminium var lenge forbeholdt eliten, og var utilgjengelig for den alminnelige person. Frem til midten av 1800-tallet ble metallet brukt til bestikk og servise for adelige, og hadde høyere markedsverdi enn gull.

¹ Affinitet er tiltrekningskraften mellom kjemiske emner, som gjør at disse reagerer med hverandre.

I 1854 annonserte den franske kjemikeren Henri Étienne Sainte-Claire Deville hvordan primæraluminium kunne fremstilles ved hjelp av elektrolyse. Fremstillingen var en prosess der elektrisk strøm ble tilført i redoksreaksjoner for å skape en kjemisk reaksjon. Denne industrialiseringen medførte til prisfall helt fram til starten av 1900-tallet. Dette fikk store, positive innvirkninger globalt, spesielt for flyindustrien. Som følge av denne fremgangen kunne aluminium anvendes i ulike produkter. Det førte til at Wright Brothers annonserte verdens første motoriserte fly i 1903, som følge av redusert motorvekt (20).

Produksjon av aluminium krevde likevel mye strøm. Norge ble derfor en viktig aktør som produsent av billig strøm som følge av tilgang på vannkraft. Allerede i 1908 ble det første aluminiumsverket i Sunnfjord satt i drift av British Aluminium Company (BACO) (7). Dette var mye takket være Hydro sin innflytelse på utbygging av vannkraft. En av Eydes sine nærmeste medarbeider Sigurd Kloumann var sterkt medvirkende i suksessen, og ledet utbyggingen av Rjukan kraftstasjon. Etter ferdigstillingen i 1911, skar det seg imidlertid mellom de to. Kloumann startet derfor opp for seg selv, og etablerte Norges første integrerte aluminiumselskap Norsk Aluminiums Compagni (NACO) i 1915 (21).

Det var ikke før under andre verdenskrig at det delvis tyskeide Hydro og Kloumanns aluminiumselskap møtes. Kloumann leverte aluminiumsplater til tyske kampfly, mens Hydro i samarbeid med Hermann Görings Luftwaffe bygde et lettmetallverk. Etter krigen ble Hydro delvis kjøpt opp av den norske stat, og tok med seg erfaringer fra lettmetallproduksjon. Det medførte at selskapet gikk fullt inn i aluminiumsindustrien i 1963, samtidig som de tok del i leting av olje i Nordsjøen. Selskapet ble med det eneste norske aktør i 1969, da oljefunnet på norsk sokkel var et faktum. Oljeinntekten og teknologiutviklingen førte til et stort løft for bedriften utover 70- og 80-tallet, og de kunne med det kjøpe opp andre selskaper og ekspandere sin virksomhet. I 1986 ble derfor Kloumanns aluminiumsverk kjøpt opp av Hydro.

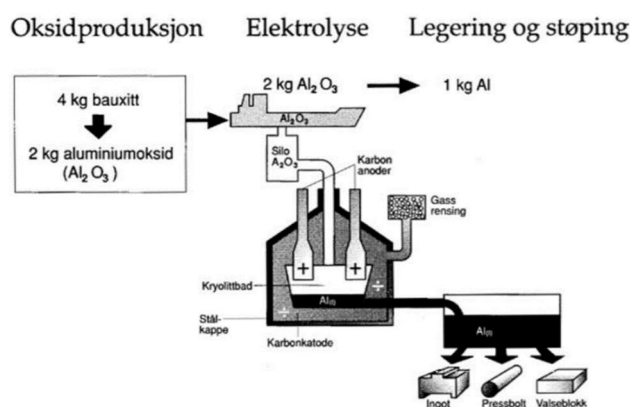
Etter 40 år med olje- og gassvirksomhet trekker Hydro seg ut i 2007, og satser fullt på aluminiumsproduksjon og vannkraft. I 2010 fusjonerer de seg med det brasilianske gruveselskapet Vales, som genererte en økning av bauksitt forekomster. Fusjonen medførte til dagens største aluminaraffineri med navn Alunorte. Hydro anses som en global aktør for

aluminiumsproduksjon, og etter overtakelse av Sapa i 2017 har de blitt en ledene leverandør av ekstruderte produkter (22).

5.2 HYDRO SIN PRODUKSJON AV ALUMINIUM

Hydro sin aluminiumsproduksjon starter i gruver i Brasil, henholdsvis i Paragominas og Trombetas. Her utvinnes råmaterialet bauksitt, en leirelignende jordtype, som finnes i et belte rundt ekvator. Det kjennes til rundt 29 millioner tonn bauksittreserver i dag, der 15-25% av innholdet er aluminium. Bauksitt blir transportert til et anlegg hvor leire blir vasket bort og resterende blir knust. Videre blir bauksitt raffinert til alumina ved hjelp av Bayer prosessen, som blir gjennomført på Hydro sitt anlegg i Alunorte. Når aluminaen Al_2O_3 har blitt skilt fra bauksitten, varmes blandingen opp og filtreres, før gjenværende produkt tørkes til hvitt pulver.

Aluminaen som trengs til aluminiumsproduksjon blir sendt videre til Hydro sine produksjonsfabrikker i blant annet Norge, mens resten blir solgt til andre selskaper. I smelteverket ved elektrolyseprosess omdannes alumina til aluminium. Elektrisitet ledes mellom en positiv anode og negativ katode laget av karbon, og slik blir aluminium- og oksygenatomet i alumina separert. Gjennom energikrevende framstilling, som illustrert i figur 5-2, står man igjen med aluminium og CO_2 .



Figur 5-1 Fremstilling av aluminium

I denne prosessen skiller Hydro seg fra andre leverandører, med sitt lave klimaavtrykk og tilgang til ren energi. Produksjon av aluminium fra bauksitt har et forhold på 1: 4. Resultatet er flytende aluminium, som kan støpes til pressbolt, valseblokker eller støpelegeringer.

5.3 LEGERINGER

Rent aluminium er et relativt mykt metall, som er mindre egnet for lastbærende konstruksjoner. Ved å lage legeringer med andre metaller har aluminium muligheten til å utvide sitt bruksområde til ønsket formål. De ulike legeringene deles inn i åtte serier som vist i tabell 5-1. Hver hovedgruppen beskriver herdeegenskapene til de ulike legeringene. Mekanisk herding benyttes for legeringer som ikke kan utsettes for varme, og blir kalt kaldbearbeiding. Dette gjøres ved å skape plastiske deformasjoner i metallet, som fører til økt tetthet av kryssende og delvis fastlåste dislokasjoner. Ved ulik varmebehandling og nedkjøling endres kornstrukturen til materiale. Mengden tilsatt legeringsmetall skaper ytterligere egenskapsforskjeller i hver av hovedgruppene.

Serie	% Al	Legering	Herdeegenskaper
1xxx	99-100	Rent aluminium	Kan ikke herdes
2xxx	92,2-96,7	Kobber	Varmeherding
3xxx	97,8-99,8	Mangan	Mekanisk herding
4xxx	85-98,3	Silisium	Mekanisk herding
5xxx	93,5-99,3	Magnesium	Mekanisk herding
6xxx	95,7-98,9	Magnesium og silisium	Varmeherding
7xxx	85,7-99	Sink	Varmeherding
8xxx	87,5-99,3	Andre elementer	Varierer

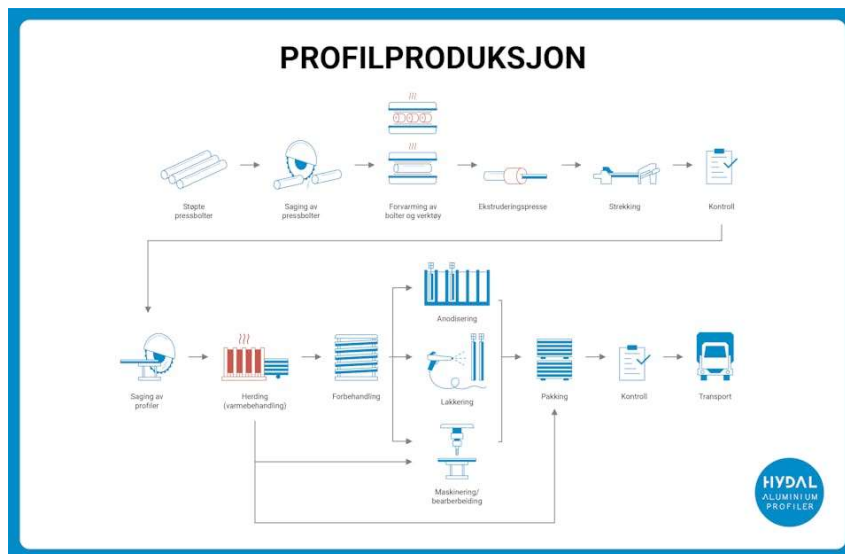
Tabell 5-1 Hovedgrupper av aluminiumslegeringer

Den viktigste faktoren for en bærende konstruksjon som Tretten bru er styrken på legeringen. Det har derfor blitt valgt en 6082-legering i denne oppgaven, som følge av dens høye styrke. I tillegg er den best egnet for sveis og kan enkelt ekstruderes (23).

5.4 PRODUKTER I ALUMINIUM

Hydro leverer årlig over 3 millioner tonn med støpeprodukter globalt. De vanligste anvendelsene av primæraluminium er ekstrudering, valsing og støpning. Aluminium er et mykt metall med lavt smeltepunkt sammenlignet med stål, og er derfor enklere å utforme til forskjellige profiler. I denne oppgaven ses det nærmere på ekstruderte H- profiler.

Ekstruderingsprosessen starter med forvarming av pressbolt til 450-500°C for å myknes opp. Pressbolten er en kompakt sylinder som består av den ønskede legeringen. Et typisk mål er to m lang og 30 cm i diameter, med et volum på 0.14 m³. Bolten blir så presset gjennom et profilverktøy kalt matrise, der matrisen avgjør tverrsnittet på profilen. Siden denne kan formes etter ønsket profil, er det få begrensinger på hvilke tverrsnitt som kan produseres. Det er derimot begrensinger på profillengden, siden volumet er fastsatt av pressbolten. For å opprettholde kvalitet må deler av endene kappes bort, og man mister derfor litt av pressboltens volum. Den ferdige ekstruderte profilen blir videre nedkjølt ved hjelp av enten vifter eller vannbad. Dette avhenger av profilstørrelse, veggtykkelser, form, legering og ønskede egenskaper. Til slutt blir profilen strukket for å fjerne eventuelle spenninger i materialet og samtidig rette det opp. Når ønsket tverrsnittet og egenskaper er oppnådd, kappes den til ønsket lengde og sendes til herding (24). Denne ekstruderingsprosessen blir illustrert i figur 5-2.



Figur 5-2 Hydal profilproduksjon

Herdeprosessen vil variere gitt de ulike legeringstilfellene, da de har ulike kjemiske egenskaper. Herding av aluminium bidrar til en forsterket styrke på materialet, der varmeherding gir høyest styrke. I denne oppgaven blir herdemetode T6 brukt, siden det gir størst styrke sammenlignet med alternativet T4. Ved metode T6 vil profilene bråkjøles i vann etter ekstruderingen, dette kalles kunstig herding. I tillegg blir aluminiumen oppbevart i herderom på 170-200°C for å øke styrken ytterligere. På bakgrunn av dette blir profiler av aluminiumslegering 6082-T6 benyttet.

Som tidligere nevnt er det utfordrende å produsere lange profiler med store tverrsnitt, men kan løses ved å dele opp tverrsnittet i mindre seksjoner. Disse kan sveises sammen til ønsket form.

5.5 UTFORDRINGER MED ALUMINIUMSVEIS

Sveising av aluminium er spesielt vanskelig, siden aluminium naturlig danner et oksidlag når det kommer i kontakt med luft. Oksidlaget smelter først ved temperaturer rundt 2050°C, mens aluminiumslegeringer har et smeltepunkt på rundt 650°C. Skulle oksidlaget smelte bort på konvensjonelle måter ville aluminiumen rent bort. Derfor må oksidlaget fortrennes før man sveiser, og kan løses ved å eksponere aluminium for inertgasser som rent argon (25).

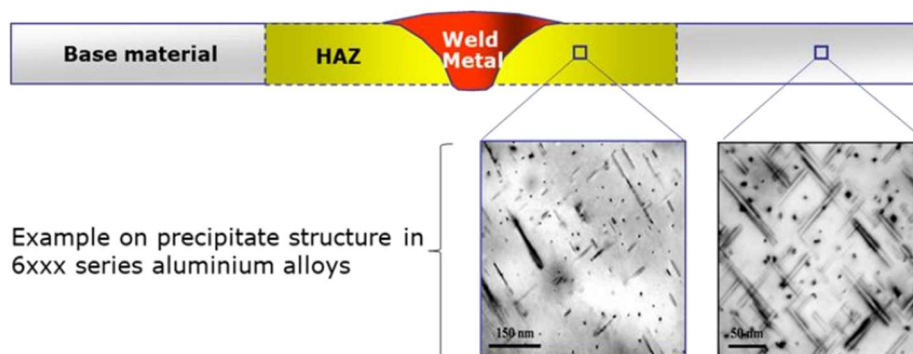
5.5.1 MIG-sveising

En type sveisemetode er MIG-sveising, som står for Metal Inert Gas. Denne typen lysbuesveising brukes til å sammenføye metaller. I en MIG-sveiseoperasjon mates en metalltråd kontinuerlig inn i en sveisebrenner. Metalltråden smelter ved eksponering av en lysbue. Tråden fungerer som en elektrode og bærer strømmen til sveisepunktet. Samtidig beskytter den lysbuen mot reagerende oksygen, ved hjelp av inertgass som strømmer ut av gassdyser. Dette skaper høy varme som bidrar til å smelte metallet, og lager en sveisesøm når det avkjøles.

Fordelene med MIG-sveising inkluderer høy sveisehastighet, god sveisekvalitet, minimalt med sveisesprut, og muligheten til å sveise ulike metaller. Sveisemetoden er allsidig og brukes i mange industrier, inkludert konstruksjon. Det er verdt å merke seg at MIG-sveising har noen begrensninger, som blant annet at metoden egner seg for tynne materialer og sveisesømmer (25).

5.5.2 HAZ

En annen utfordring ved sveising av aluminium er det varmpåvirkede området, referert til som HAZ, Heat Affected Zone. Utfordringen er høy termisk ledningsevne og et lavt smeltepunkt sammenlignet med andre metaller. Dette medfører at aluminium raskt leder varmen bort fra sveiseområdet og forårsaker en rask avkjøling av sveisen. Som et resultat kan det dannes et større og mer sprøtt område, som kan føre til uønskede spenningskonsentrasjoner. Dette kan igjen føre til sveisesprekker og deformasjoner i det oppvarmede området (26).



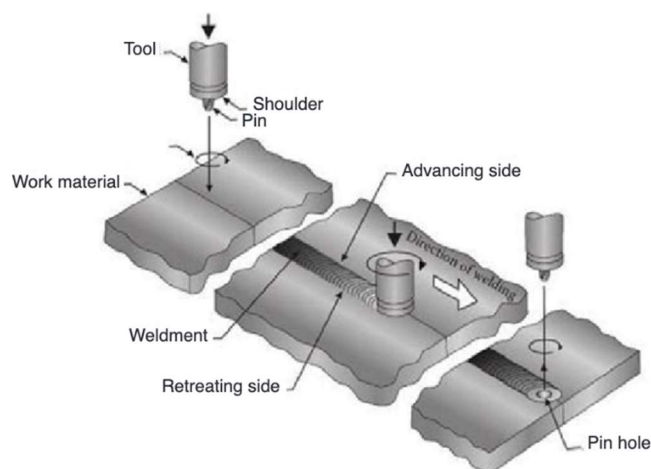
Figur 5-3 Aluminiumsstruktur som følger av HAZ

Et annet problem med HAZ er knyttet til den fornyede oppvarmingen av metallet. Som nevnt under kapittel 5.4 har oppvarming og nedkjøling av metallet en påvirkning på egenskapene. Under herdingprosessen kontrolleres temperaturen i en ideell tidsperiode. Når sveiseområdet blir oppvarmet og nedkjølt dannes det ny struktur i HAZ som illustrert i figur 5-3. For 6082-T6 er redusert flytespenning fra 260 Mpa til 125 Mpa på grunn av HAZ-reduksjon etter Eurokode 9 Tabell 3.2a.

For å håndtere utfordringene knyttet til sveising av aluminium og HAZ, er det viktig å tilpasse sveiseparameterne og sveiseteknikken. Ved bruk av lavest mulig strømstyrker, optimal sveisehastighet og riktig gasstilførsel, kan størrelsen på HAZ reduseres. Videre kan etterbehandlingstiltak, som varmebehandling eller termisk etterbehandling av aluminiumet være nødvendig, for å gjenopprette de ønskede mekaniske egenskapene i sveiseområdet.

5.5.3 Friksjon rørsveising

Figur 5-4 illustrerer friksjon rørsveising, en annen sveisemetode som er relevant for aluminiumsveising, som ble utviklet av The Welding Institute. Denne er formen for sveising baserer seg på et roterende redskap, som presses mot metallet og føres langs sveisesømmen. På denne måten blandes aluminiumen fra de to komponentene sammen på grunn av temperaturen som oppstår av friksjonen. Dette gjør at det ikke er behov for ekstra sveisemettall eller gass som MIG-sveisemetoden benytter. Fordelen med dette er minimale termiske deformasjoner og reduksjon i HAZ (27).



Figur 5-4 Friction stir welding

5.5.4 Andre sammenføyingsmetoder

Aluminium på lik linje med stål sammenføyes ved hjelp av bolter. Siden aluminium har lav styrke, må bolter i aluminium være store for å håndtere kreftene som oppstår. For å redusere sannsynligheten for brudd mellom bolt og profil er alternativet å bruke bolter av stål. Det er ikke ønskelig å benytte seg av denne metoden, siden galvanisk korrosjon kan oppstå når aluminium kommer i kontakt med et edlere metall som stål. Dette blir illustrert i figur 5-5. I dette tilfellet vil stål oppføre seg som en katode og aluminium som en anode, hvor elektroner forflytter seg fra stål til aluminium. Dette fører til rust fra stålet vil forflytte seg over til aluminiumet, og vil dermed ødelegge dens naturlige korrosjonsbeskyttelse.



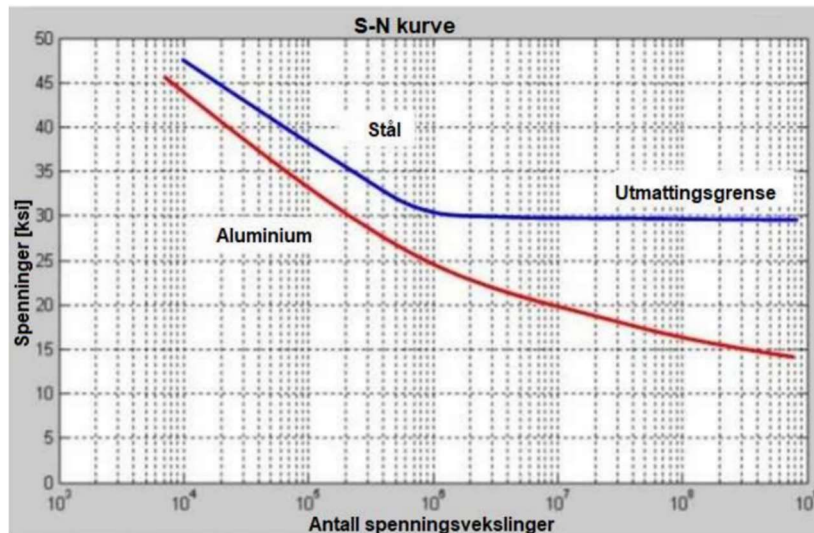
Figur 5-5 Galvanisk korrosjon

Det vanligste metoden for å unngå galvanisk korrosjon er å isolere de to metallene fra hverandre elektrisk. Ved å benytte seg av stålbolter som dekket av et beskyttelsessjikt, av et mindre edelt metall enn aluminium. Sink er et metall som har vist seg å fungere godt til en slik utforming (28).

5.6 UTMATTING OG KAPASITET

Utmattning er svekkelsen av materialets struktur og egenskaper over tid som følge av vekslende spenninger, svingninger og vibrasjoner. Selv om konstruksjonen ikke har vært utsatt for krefter større enn det den er dimensjonert for, kan utmattning fortsatt forekomme. For konstruksjoner i aluminium sammenlignet med stål, er utmattning spesielt viktig å ta hensyn til. Siden den lave elastisitetsmodulen til aluminium gir en mindre stiv konstruksjon. Dette får konsekvenser for de statiske egenskapene til konstruksjonen, da materialet vil være mer utsatt for svingninger fra de ulike lasttilfellene. I delene av konstruksjonen hvor spenningen er størst vil det forekomme større deformasjoner i materialet, som over tid vil føre til små sprekker og

riss i metallet. Ved stadig påføring av spenninger vil rissene vokse og føre til brudd. I figur 5-6 illustreres forholdet mellom antall svingningscykluser og spenninger som blir påført de to metallene.



Figur 5-6 S-N kurve

Som figuren viser, er det betydelige forskjeller mellom stål og aluminium når det gjelder utmatting av metallene. Selv om forskjellen ikke er betydelig for et få antall spenningsvekslinger, vil stål generelt oppnå bedre resultater i løpet av sin levetid. Årsaken til dette er at stål har en utmattingsgrense på 300 MPa, gitt som 30 ksi i figur. Det betyr at spenninger under dette nivået ikke påvirker konstruksjonens holdbarhet. Dette gjelder imidlertid ikke for aluminium, som på sin side ikke har en klar utmattingsgrense. Selv små spenninger over lengre tid kan føre til svekkelser i konstruksjonen. I tillegg er aluminiumskonstruksjoner mer mottakelige for termiske påkjenninger på grunn av den høye termiske utvidelseskoeffisienten.

6 KORT OM STÅL

Stål er blant de viktigste materialene som finnes i dag. Det var i 1855 at den britiske ingeniøreren og oppfinneren Henry Bessemer oppdaget en storskala måte å produsere stål på, kalt bessemerprosessen. Stål er en legering av jern og karbon, som inneholder under 2% karbon, rundt 1% mangan og andre grunnstoffer som silikon, fosfor, svovel og oksygen. Sammensetningen varierer som følge av bruksområdet, siden dette gir ulike egenskaper. Mesteparten av stål består av råmateriale jern som utgjør 5% av vekten til jordskorden, og er det fjerde vanligste grunnstoffet.

Etter at det ble mulig å masseprodusere metallet, bidro det til å forme den moderne verden og stål ble billigere. Egenskapene til metallet utfordret tidligere byggemetoder, ved at man kunne konstruere større og sterkere enn før. Det ikoniske Eiffeltårnet, som ble representert under verdensutstillingen i 1889, illustrerte dette. Stål har siden blitt brukt i produksjon av verktøy, til jernbaner, offshore og brokonstruksjoner.

I dag består samtlige norske metallfagverksbroer av stål (29), som er det foretrukne metallet i konstruksjoner. Dette er på grunn av stålets høye styrke-vekt forhold, som gir et slankt og elegant design. Stål har en god evne til å motstå store ytre påkjenninger som vindbelastninger eller jordskjelv, og er derfor et pålitelig valg. Det kan formes etter ønsket profil, og legeres etter ønskede egenskaper. Dette gir stål en viss korrosjonsmotstand, spesielt når materialet overflatebehandles. Korrosjon er allikevel en av de største utfordringene, spesielt når det blir utsatt for høy luftfuktighet og salt. Dette kan medføre til store kostnader etter installasjon som følger av vedlikehold og reovering.

Stål har svært gode evner når det kommer til sammenføyingsmetoder. Det kan enkelt sveises sammen uten store svekkelser av metallet. I tillegg kan stålkonstruksjoner lett boltes uten store komplikasjoner, siden samme materiale brukes.

7 TEKNISKE FORSKJELLER MELLOM ALUMINIUM OG STÅL

De karakteristiske egenskapene til de to materialene har noen vesentlige forskjeller. Som tidligere nevnt har aluminium sine fordeler og ulemper ved bruk i bærekonstruksjoner. På en annen siden har stål vært det foretrukende valget siden 1855. I dag er aluminium det fremste materialet til å erstatte stål i brobygging på grunn av dens korrosjonsmotstand, lave vekt og CO₂-avtrykk.

7.1 MEKANISKE FORSKJELLER

I tabell 6-1 vises en sammenligning mellom de fysiske egenskapene til aluminiumslegering 6082-T6 (30) og konstruksjonsstål S450 (31), som brukt i oppgaven. Det er også oppgitt et tilnærmet forholdstall for å indikere hvordan de to materialene vil opptre i forhold til hverandre.

Fysiske egenskaper	Symbol	6082-T6	S450	Forhold
Tetthet [g/cm ³]	ρ	2,7	7,85	1 : 3
Smeltepunkt [°C]		650	1538	1 : 2,5
Flytespenning [Mpa]	f_y	260	440	1 : 2
Varmeledningsevne [W/m•K]	κ	180	65,2	3 : 1
Spesifikk varmekapasitet [J/kg•K]	c	896	2081	1 : 2,5
Poisson's ratio	ν	0,3	0,3	1 : 1
Utvidelseskoeffisient [°C ⁻¹]	α	$2,3 * 10^{-5}$	$1,2 * 10^{-5}$	2 : 1
Elastisitetsmodul [Gpa]	E	69	210	1 : 3

Tabell 7-1 Fysiske egenskaper til aluminium og stål

Som tabellen illustrerer har stål en tydelig fordel når det kommer til styrke, med rundt tre ganger så høy elastisitetsmodul. Samtidig er styrke-vekt forholdet likt mellom de to materialene. En annen viktig faktor for bruken av aluminium i bærende konstruksjoner, er forskjellen i utvidelseskoeffisient. Aluminium vil utvide seg dobbelt så mye som stål, og er en viktig faktor å ta hensyn til i dimensjoneringsprosessen.

7.2 FORSKJELLER I UTFORMING

Forskjellene i de tekniske egenskapene til de to materialene vil påvirke utformingsmulighetene til en fagverksbro. Som nevnt er det utfordringer knyttet til sveising av aluminium, mens stål på sin side har muligheten til å sveises på konvensjonell måte. På grunn av varmeledningsevnene vil aluminium i tillegg få et mye større område, påvirket av varmen som blir produsert i en sveiseprosess. Av den grunn må det tas større hensyn til kapasitetsreduksjon som et resultat av HAZ.

For en fagverksløsning vil derfor utformingen av knutepunktene utgjøre de største forskjellene. Knutepunktene er spesielt viktig siden det er her kreftene blir tatt opp og videre distribuert i konstruksjonen. Kunnskapen om virkningen av knutepunkter i aluminium er lite forsket på, og det er fortsatt usikkerheter rundt utformingen. Stål på sin side har gode rutiner og standarder for hvordan dette skal gjøres. Siden aluminium ikke har en definert utmattingsgrense som stål, vil deformasjoner fra spenninger og vibrasjoner ha en lagt større påvirkning.

8 BÆRESYSTEMER

Innledningsvis vil det være viktig å undersøke hvilke bæresystemer som kan være relevant i en brokonstruksjon i aluminium. I prosjektet har det blitt valgt å designe en fagverkskonstruksjon, men det vil uansett bli nevnt ulike brokonstruksjoner som kunne vært et alternativ til oppgaven.

8.1 FAGVERKSBRO

Karakteristikken ved en fagverksbro er sammenføring av mindre individuelle konstruksjonselementer til en serie av sammenkoblede trekkanter. En slik struktur skaper stivhet der stavene vekselvis får trykk- og strekkspenninger. Fordelen med denne type konstruksjon er dens gode egenskap mot deformasjoner og vridninger, som følge av god spenningsfordeling gjennom hele strukturen. Fagverket bidrar til avstivning av veibanen, og til å holde konstruksjonen sammen mot de ulike påkjenningene (32).

8.2 BUEBRO

Buebro anses som den nest eldste brokonstruksjonen som eksisterer i dag. Denne form for bæresystem er gunstig da det ikke er nødvendig med søyler midt på. Med den buede strukturen oppnår man høy motstand mot bøyekrefter. I motsetning til bjelke- og fagverksbroer festes begge ender horisontalt, det vil si at man ikke har bevegelse i denne retningen. Dersom det blir plassert laster på broen, som for eksempel en passerende bil, vil det oppstå horisontale krefter i buens lager. Det vil si at en slik konstruksjon kun kan brukes der underlaget er stabilt (Vedlegg D).

8.3 HENGEBRO

Sammenlignet med andre brokonstruksjoner tillater hengebroen lengre spenn. Dette bæresystemet har en karakteristisk utforming, der sammenhengende dragere med ett eller flere tårn henger i en bærekabel og lager en sadel. Kablene forankres i grunnen ved hjelp av massive motvekter. Fordelen med en slik utforming er at kablene kan gli når laster trekker fra sidene, samt. Blir lastene overført jevnt fra kabel til tårn. Selv om en slik konstruksjon anses som ekstremt sterk og fleksibel, kan den være ganske sårbar mot vindkrefter. Spesielt med tanke på vibrasjoner og svingninger som kan oppstå ved kraftig vind (Vedlegg D).

8.4 SKRÅSTAGBRO

Skråstagbro kan minnes om hengebro. Forskjellen ligger i utformingen av stagene og kjennetegnes ved at disse strekkes diagonalt ned på begge sider. Som tidligere nevnt under 7.3 *Hengebro*, vil sammenhengende dragere holdes oppe av kablene og være festet til ett eller flere tårn. I tillegg vil også skråstagbro være spesielt utsatt for vindkrefter som hengebroen (33).

9 PROSJEKTERING AV NYE TRETTE BRU

Broen dimensjoneres med de eksisterende fundamentene til gamle Tretten bru, som gir tre spenn på henholdsvis 41, 70,2 og 36,8 meter. Den utformes med bakgrunn av gamle tegninger, der den opprinnelige konstruksjonen hadde to kjørefelt med en gang- og sykkelvei og 1% helling mot øst. Prosjektet tar utgangspunkt i en type fagverkskonstruksjon for stål. For aluminium skal det undersøkes en alternativ brokasseløsning. Design og dimensjonering gjøres etter eurokoder og Statens Vegvesen (SVV) sine håndbøker. Modellene analyseres i SAP2000, og vil bli kontrollert ved hjelp av håndberegninger i Mathcad. De respektive modellene som konstrueres vil danne grunnlag for hvilke økonomiske og bærekraftige påvirkninger de ulike løsningene vil ha i videre arbeid.

9.1 FORUTSETNINGER

Under vurderingene av aluminium og stål har det blitt satt noen begrensninger og gjort noen forenklinger. Det kreves store mengder analyse og utprøvinger av løsninger ved den dimensjonen som har blitt valgt, og for å finne mest gunstig løsning. Med utgangspunkt i en bacheloroppgave vil dette bli for omfattende, og det har derfor blitt valgt å begrense undersøkelsen. Det blir derfor forutsatt å designe en brokasse i aluminium og en tradisjonell fagverksløsning i stål.

Under analyse av samtlige broer har det blitt valgt å se bort ifra kravet om tverrfall på 3% for både kjørebane og gangfelt. Dette vil ikke ha noe stor betydning for kraftfordelingen, samtidig som det forenkler de statiske beregningene. I tillegg vil beregningene være forenklet ved å neglisjere reduksjon i kapasitet ved et sveiset profil. Styrken til broen vil derfor være noe lavere i virkeligheten enn som vist i modell.

9.2 BROENS UTFORMING

Broen prosjekteres med en veibanebredde på 10 meter, med kjørefelt i begge retninger og gangfelt på en side. Figur 2-4 viser fordeling av fundamenter som tidligere har vært brukt til å støtte gamle Tretten bru. Med referanse til figuren vil første fundament ved første akse ha fast boltelager i overgangen mellom søyle og undergurt. Videre blir det plassert glidelager ved andre til fjerde akse, mellom resterende fundamenter og undergurten.

Det har blitt valgt en nokså identisk utforming for begge tilfeller. Hovedforskjellen mellom modellene vil være underbyggingen, der aluminiumsmodellen består av en brukasse og stålmodellen av tre store H-profiler. Dette har blitt gjort for å enkelt kunne sammenligne oppførselen til begge materialene. Det er likevel viktig å presisere at materialenes ulike egenskaper skiller dem, som gjør at en bør omstille seg ved prosjektering av en bru i aluminium.

Stål har lenge blitt brukt som et konstruksjonsmateriale sammenlignet med aluminium. Tall viser at stål ble anvendt i store stålkonstruksjoner som Iron Bridge i England allerede i 1776 (34). I 1825 ble aluminium oppdaget, og Forsmo bru i Norge er den eneste broen konstruert utelukkende i dette materiale. Med andre ord har stål vært brukt i mange flere år, sammenlignet med aluminium. Det vil derfor være behov for videre forskning av aluminium for å ha like håndfast litteratur som for stål. Funnene i sammenligningen vil derfor være preget av begrensningene i undersøkelsen, og vil være tenkt som en første vurdering for en mulig utførelse i aluminium og erstatning for Tretten bru. Samtidig legger dette grunnlaget for videre undersøkelse.

I Revit har det blitt laget flere illustrasjoner, som viser hvordan en slik løsning kan se ut i terrenget. Figur 8-1 viser første illustrasjonsbilde, der det tydelig blir illustrert en fagverksbro med de forutsetninger som har blitt tatt tidligere i utforming og valg av design. Området rundt står uforandret i bilde, og det kan observeres at tidligere fundament er identisk til det som fortsatt består etter kollapsen av Tretten bru.



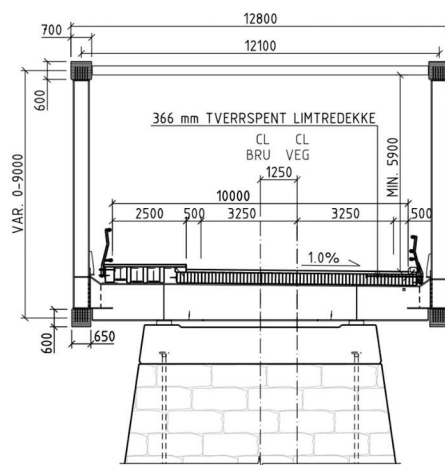
Figur 9-1 Illustrasjonsbilde 1 fra Revit

Figur 8-2 viser andre illustrasjonsbilde, der utformingen av veibanen blir illustrert nærmere. Veibanen vil være identisk som vist i gamle tverrsnittstegninger av Tretten bru.



Figur 9-2 Illustrasjonsbilde 2 fra Revit

Som tidligere nevnt har figur 8-2, som viser illustrasjonsbilde 2, tatt utgangspunkt i figur 8-3. I denne figuren vises snitt A-A fra tidligere Tretten bru, og utforminger i den reviderte modellen er tilsvarende like som vist i snittet. Det vil bli brukt store HEB-bjelker i undergurten til stålmodellen, som i utgangspunktet vil medføre til noen forandringer av figur 8-3.



SNITT A-A
1:100

Figur 9-3 Snitt A-A hentet fra tidligere tegninger av Tretten bru

9.3 STÅLMODELL

Stålmodellen tar utgangspunkt i standardiserte løsninger fra Canam bridges, som tilbyr predesignede broer på opptil 100 meter. Figur 8-4 viser utformingen av en standard fagverkskonstruksjon de kan levere (35).



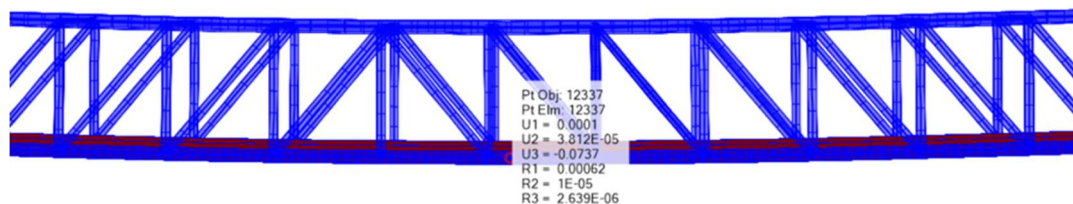
Figur 9-4 Standardisert løsning fra Canam bridges

I utformingen har det blitt valgt å bruke konstruksjonsstål S450. Denne typen har høy styrke, og for varmvalsete profiler ligger flytegrensen på 440 MPa. Stålmodellen består av tre HEB600 profiler i undergurten, plassert med fem meters mellomrom. Vertikal- og diagonalstavene består av HEA400 profiler. I overgurten har det blitt valgt å bruke HEA600 profiler, mens avstiverne i toppen består av HEA300 bjelker.

9.3.1 Fra analyse av stålmodell i SAP2000

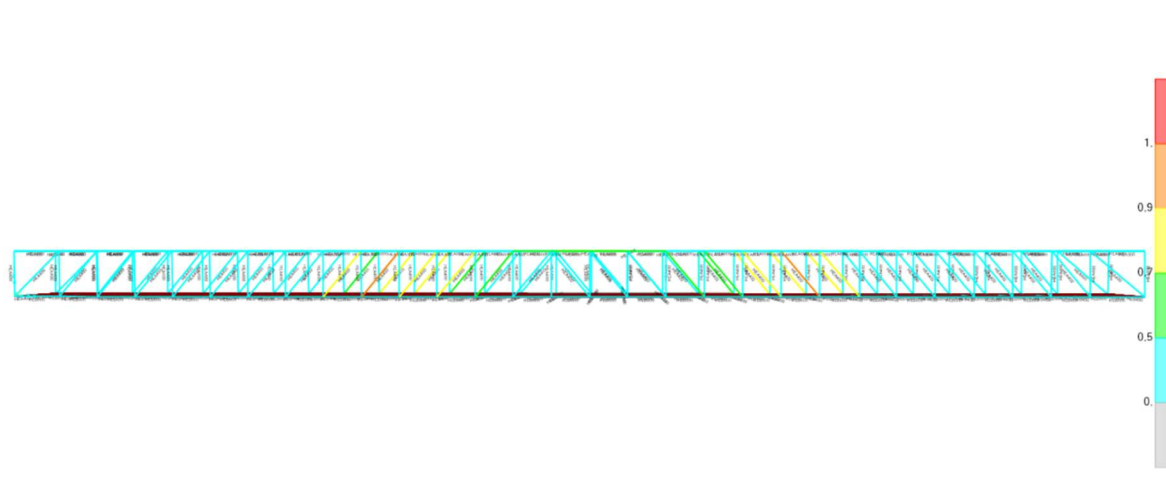
Stålmodellen er analysert i SAP2000 med lastkombinasjoner fra N400. Under analysen ble det valgt å påføre laster for det verste scenarioet, som er høy konsentrasjon av trafikklaster på det midterste spennet.

Figur 8-5 viser et utklippsbilde fra analysen i SAP2000, der nedbøyningen ble 73,7 mm. Med antagelser gjort på bakgrunn av N400, vil dette resultatet ligge godt innenfor kravet på 200,6 mm.



Figur 9-5 Nedbøyning av stålmodell i SAP2000

SAP2000 har også en avansert funksjon som sjekker kapasiteten til staver opp mot gjeldende regelverk. Kapasitetskontrollen gjort i programmet ble sjekket opp mot kravene i Eurokode 3. Figur 8-6 illustrerer graden av påkjenning for de respektive staver og bjelker i modellen, rangert fra null til 1. Stavene i figuren med størst påkjenning vil være farget rødt.



Figur 9-6 Kapasitetskontroll av stålmodell i SAP2000

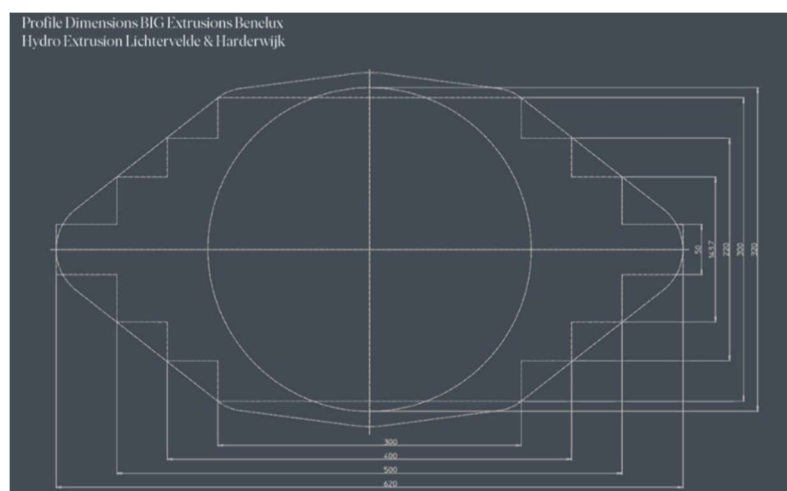
For å verifisere resultatene fra SAP2000 ble det gjort en manuell kontroll av de mest påkjente stavnene. Kontrollen viste at stavnene hadde tilfredsstillende kapasitet i henhold til Eurokode 3, og blir nærmere forklart under kapittel 8.5.1 *Manuell kapasitetskontroll av stålmodell*.

I videre analyse ble det også påvist at stålmodellen har en egenperiode for nedbøyning på 0,35 sekunder. Denne verdien er langt innenfor kravene fastsatt i N400, som bør være under 2,0 sekunder for å sikre komfort for brukerne av broen.

9.4 ALUMINIUMSMODELL

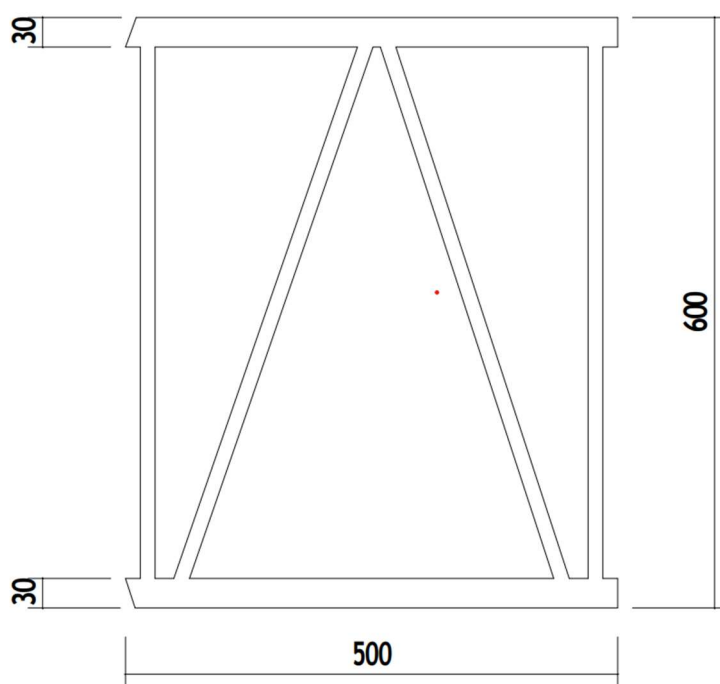
Modellen i aluminium utformes med legering 6082-T6. Legeringen blir mye brukt i skip og konstruksjoner med store påkjenninger. Den utmerker seg godt som valg for strukturelle komponenter som krever høy styrke, og dekker godt anvendelsen som ekstruderbar profil for ikke kompliserte tverrsnitt (36).

Aluminiumsmodellen har blitt undersøkt med bruk av en brukasse som bærende element. Kassekonstruksjonen vil bli sammensatt av 500 mm brede segmenter, som sveises sammen i bredderetningen. Den vil begrenses av den maksimale bredden, fordi verkstedet i Lichterwelve kun produserer ekstruderte profiler med maksimal høyde lik 600 mm. Produksjonen av større dimensjoner begrenses av ekstruderingspressen. Det vil derfor ikke være mulig å dra nytte av fordelene ved ekstrudering, når det produseres større profiler enn som vist i figur 8-7 (37).



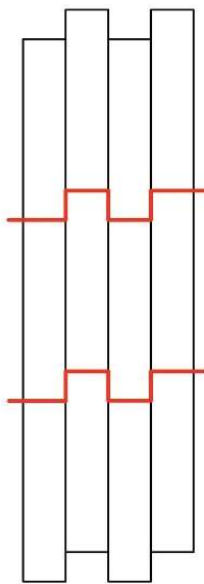
Figur 9-7 Ekstruderingsdimensjoner ved verksted til Hydro i Lichterwelve

Lengden av profilet som kan ekstruderes blir bestemt av volumet til pressbolten. Den har et sirkulært tverrsnitt med diameter på 30 cm og lengde på to meter. Ved produksjon av den 600 mm brede platen vil det kunne oppnås lengder på åtte meter, der omtrent tre meter må skrapes bort. Det kommer av at endene mister kapasitet. Brukassen vil derfor bestå av fem meter lange segmenter, som må festes sammen ved hjelp av sveising. Kassene utformes som illustrert i figur 8-8 for å forenkle montering og sveising.



Figur 9-8 Tverrsnitt av kasseløsning i aluminium.

Som tidligere nevnt er utmatting et problem for aluminium på grunn av høy duktilitet. Det vil derfor være viktig å minimere denne effekten ved å bruke gode sveisemetoder. Ved innfesting mellom elementene i lengderetning, har det blitt sett på muligheten for å legge kasseelementene i et parkettmønster. Det åpner opp for jevn fordeling av laster, og kan sørge for at man unngår intensiteten av krefter i enkelte punkter. Samtidig kan dette bidra til å redusere konsentrerte spenninger og risikoen for utmatting lokalt. Figur 8-9 viser hvordan en slik løsning kan bli seende, der de røde strekene illustrerer sveisen mellom segmentene.

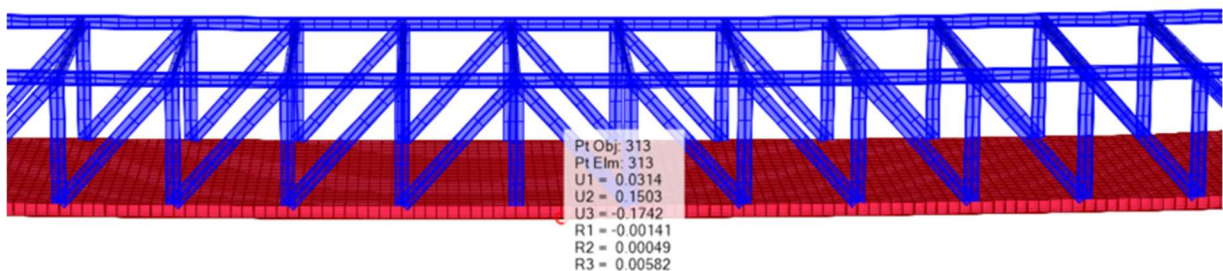


Figur 9-9 Parkettmønster

9.4.1 Fra analyse av aluminiumsmodell i SAP2000

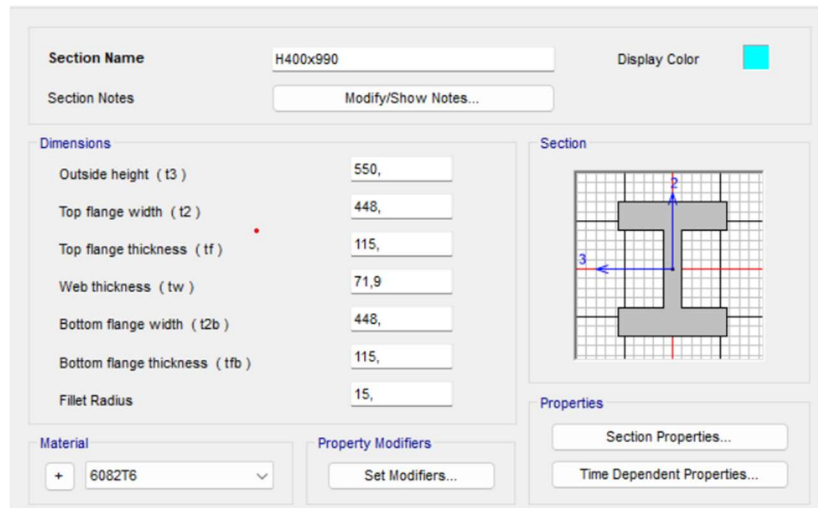
Da analysen for de ulike lastkombinasjonene i N400 skulle gjennomføres, ble det tydelig belyst hvilke utfordringer som medfulgte bruløsningen i aluminium. Problemet rundt nedbøyning ved det største spennet førte til en ytterligere undersøkelse av løsninger.

Det opprinnelige designet bestod av brukasse og overgurt med HEA600 bjelker. I likhet med analysen av stålmodellen ble det undersøkt nedbøyning av det verst tenkelig lastscenarioet, der kravet på 200 mm ble overskredet. For å løse problemet ble overgurten erstattet med H400x900 bjelker. Figur 8-10 viser til en nedbøyning på 174,2 mm, som tilfredsstillers kravet.



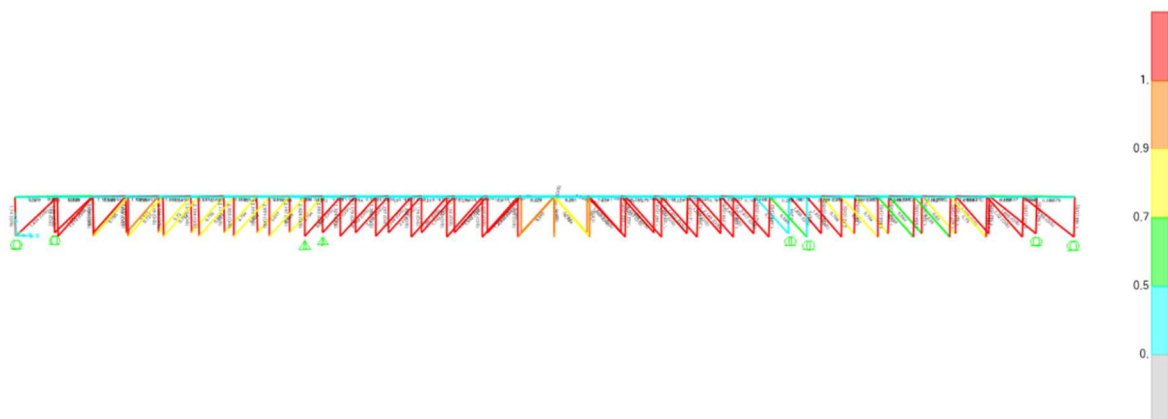
Figur 9-10 Nedbøyning av aluminiumsmodell i SAP2000

H-profilet i figur 8-11 kan ikke ekstruderes ved fabrikken i Lichterwelde, men kan derimot sveises sammen med friksjonsveis. Det er usikkert om det er mulig å sveise profilet med tilnærmet lik kapasitet som det ekstruderte profilet, og har blitt tatt med som en avgrensning under kapittel 8.1 *Forutsetninger*.



Figur 9-11 Tverrsnittprofil H400x900

Som tidligere nevnt under kapittel 8.3.1 *Fra analyse av stålmodell i SAP2000*, vil det også bli gjennomført kontrollsjekk av kapasitet på staver for aluminiumsmodellen opp mot Eurokode 9. Figur 8-12 viser i hvor stor grad stavene er påkjent av de opptredende lastene i gjeldende lastsituasjon.



Figur 9-12 Kapasitetskontroll av aluminiumsmodell i SAP2000

I figuren for aluminium kan man observere en større grad av store påkjenninger, sammenlignet med figur 8-6 for stål. Fra resultatene vil begge alternativer for overgurt medføre at kapasiteten til stavene overskrives. Henholdsvis illustrert i figur 8-12, der majoriteten av stavene har rød farge.

Ved hjelp av manuell kontroll gjort under kapittel 8.5.2 *Manuell kontroll av modell i aluminium* bekreftes det at samtlige valgte staver ikke tilfredsstiller flere krav.

9.5 MANUELL KONTROLL AV KAPASITET

For å kontrollere kapasitet og utelukke markante avvik i SAP2000, har det blitt gjort en manuell kontroll av både aluminium- og stålmodellen i Mathcad. Det har blitt tatt utgangspunkt i de mest påkjente stavene for de respektive tilfellene.

9.5.1 Manuell kontroll av nedbøyning av aluminiumsmodell

For å verifisere resultatene av nedbøyning i SAP2000, ble det gjort en manuell kontroll for aluminiumsmodellen. Kontrollen ble gjort ved enkel lastkombinasjon og sammenlignet opp mot verdiene fra programmet. Etter sammenligning av tallene fra SAP2000 mot håndberegningene ble det observert liten differanse. Differansen skyldes forenkling av det andre arealmomentet for tverrsnittet. SAP2000 indikerte en nedbøyning med lastkombinasjonen på 135.31 mm, mens håndberegningene viste en nedbøyning på 128.69 mm. Sammenligning antyder at resultatene fra analyse i SAP2000 er korrekt, også for mer kompliserte lastkombinasjoner. Detaljerte håndberegninger blir vist i vedlegg I.

9.5.2 Manuell kapasitetskontroll av stålmodell

For kapasitetssjekk av valgte staver i stålmodellen, som har størst påkjenning, blir følgende likninger fra Eurokode 3 listet opp under.

- Likning (6.9) - Krav til dimensjonerende trykkraft
- Likning (6.10) - Dimensjonerende tverrsnittskapasitet for sentrisk trykk
- Likning (6.6) - Bruttotverrsnittets dimensjonerende plastiske kapasitet
- Likning (6.5) - Krav til dimensjonerende strekkraftkapasitet
- Likning (6.12) - Krav til dimensjonerende moment

- Likning (6.13) - Dimensjonerende tverrsnittskapasitet mot bøyning om en akse
- Likning (6.36) - Kapasitet for bøyning og aksialkraft
- Likning (6.41) - Kriterium for dobbelakset bøyning med aksialkraft
- Likning (6.49) - Reduksjonsfaktor for knekking
- Likning (6.61/6.62) - Kontroll mot knekking for kombinert bøyning og aksialkraft

Utfyllende håndberegninger blir nærmere vist i vedlegg E, og sammenlignet med vedlegg F der automatisk stavsjekk i SAP2000 blir gjennomført.

9.5.3 Manuell kapasitetskontroll av modell i aluminium

Ved manuell kapasitetskontroll har Eurokode 9 blitt tatt i bruk. Følgende ligninger, som har blitt brukt i håndberegninger for valgte staver i aluminium, blir listet opp under.

- Ligning (6.17) - Krav til dimensjonerende verdi av strekkraften
- Ligning (6.18) - Dimensjonerende strekkmotstand til tverrsnittet langs stav
- Ligning (6.19a) - Dimensjonerende strekkmotstand til tverrsnittet ved lokal svikt ved en seksjon med hull
- Ligning (6.19b) - Dimensjonerende strekkmotstand til tverrsnittet ved lokal svikt ved en seksjon med HAZ
- Ligning (6.20) - Krav til dimensjonerende verdi av aksial trykkraft
- Ligning (6.21) - Dimensjonerende trykkmotstand i seksjoner med ufylte hull
- Ligning (6.22) - Dimensjonerende trykkmotstand for andre seksjoner
- Ligning (6.48) - Krav til dimensjonerende verdi for knekking
- Ligning (I.14) - Elastisk knekklast om y-akse for bøyning
- Ligning (I.15) - Elastisk knekklast om z-akse for bøyning
- Ligning (I.16) - Knekklast for torsjon
- Ligning (6.51) - Relativ slankhet for bøyning
- Ligning (6.50) - Reduksjonsfaktor for aktuell knekkmodul
- Ligning (6.49) - Dimensjonerende knekkmotstand for trykkstav
- Ligning (6.54) - Krav til dimensjonerende verdi for knekking utsatt for bøyning om hovedakse
- Ligning (I.1) - Kritisk elastisitetmoment for lateralt-torsjonsknekking

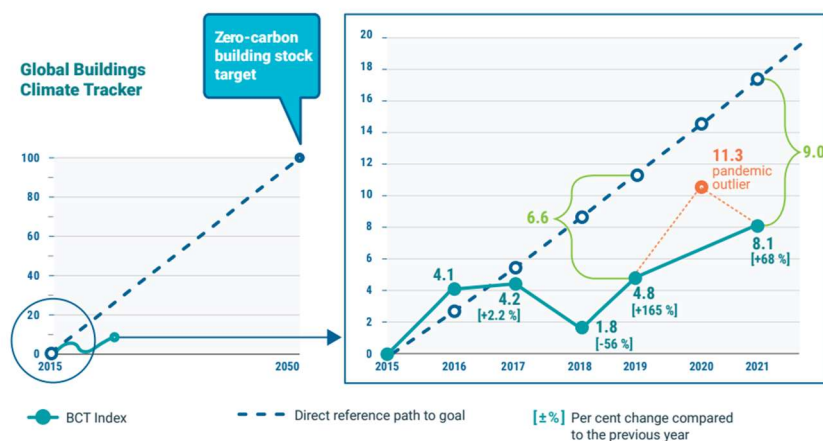
- Ligning (6.58) - Relativ slankhet for lateralt-torsjonsknekking
- Ligning (6.57) - Verdi for å bestemme reduksjonsfaktoren for lateralt-torsjonsknekking
- Ligning (6.56) - Reduksjonsfaktor for lateralt-torsjonsknekking
- Ligning (6.55) - Dimensjonerende momentmotstand for knekking
- Ligning (6.28) - Krav til dimensjonerende verdi av skjærkraft
- Ligning (6.30) - Skjærareal for seksjoner som inneholder skjærsteg
- Ligning (6.29) - Dimensjonerende skjærmotstand for tverrsnittet
- Ligning (6.38) - Redusert designverdi av styrke med hensyn til tilstedeværelse av skjærkraft
- Ligning (6.39) - Resulterende verdi av redusert momentmotstand i tilfelle med en I-seksjon med like flenser
- Ligning (6.63) - Krav til dimensjonerende verdi for tverrsnitt symmetrisk om hovedaksen, sentralt- eller dobbeltsymmetrisk
- Ligning (6.68a) - Relativ slankhet for varmpåvirket område

Utfyllende beregninger blir vist i vedlegg G, og sammenlignet med vedlegg H der automatisk stavsjekk for aluminium i SAP2000 blir gjennomført.

10 VURDERING AV BÆREKRAFT

FNs oppdaterte statusrapport for bygg og konstruksjon fra 2022, viser til utslippstall fra 2021. Bygg- og konstruksjonssektoren står for rundt 37% av energi- og prosessrelaterte CO₂-utslipp, samt. 34% av energibehovet globalt (38). Med andre ord har denne sektoren stor innflytelse på klima- og miljøutviklingen, og kan anses som en signifikant aktør i veien til å oppnå Parisavtalens mål. Det vil derfor være nødvendig å gjøre endringer i konstruksjonsdrift og prosesser, for å minimere den globale oppvarmingen og for å oppnå tilstrekkelig utslippsreduksjon i sektoren.

Figur 9-1 viser til en negativ utvikling, der økt energiforbruk og CO₂-utslipp har vært markant i klimasporingen. Nedgangen siden 2015 kan være ringvirkningen av pandemi og Ukrainakrigen, som følge av høy etterspørsel av energi. 80% av den europeiske energien blir produsert ved hjelp av fossilt brensel, siden utviklingen av fornybare energikilder ikke er i samsvar med energietterspørselen. BCT Index, i forhold til det ønskede målet “Zero-carbon building stock target”, står derfor i korrelasjon med økt energiforbruk.



Figur 10-1 Global klimasporing for bygninger

10.1 MATERIALE

Aluminium har et lite utnyttet potensial som et mer bærekraftig materialvalg, og kan bli en nøkkelaktør i fremskyndelsen av sirkulærøkonomien. For å minimere karbonavtrykket til aluminium tilbyr Hydro sertifiserte produkter av lavkarbonaluminium og resirkulert aluminium.

I omsmeltingsprosessen brukes kun 5% av den opprinnelige energien det krever for å produsere primæraluminium, og over halvparten av aluminium som blir brukt er resirkulert. Derfor kan aluminium anses som en energibank, fordi det kan brukes uendelig når det først er produsert. Mye av materiale som produseres består ikke kun av primæraluminium, men også av forbruker- og prosesskrapp (39).

Forskningsteamet tilknyttet Langenuen prosjektet konkluderer med at aluminium kan være løsningen for fremtidens brukasser. Aluminium er konkurransedyktig sammenlignet med stål, og nye studier viser at dette materialet kan være et kostnadseffektivt og klimavennlig alternativ som følger av sine egenskaper. Hydro prøver aktivt å integrere bruken av aluminium i byggebransjen, da mange faktorer trekker frem positive aspekter ved materiale. Aktuelle fordeler med aluminium er blant annet materialets vekt, lave behov for vedlikehold, lavere CO₂-avtrykk og hurtig produksjon (40).

10.2 LEVETID

Levetiden til aluminium vil konservativt være 100 år, uten nødvendig eller lite vedlikehold. Arvida Aluminium Bridge, som er lokalisert i Canada, har stått tilnærmet ubehandlet siden 1950. Til tross for minimalt vedlikehold av samtlige elementer i broen, kunne en observere korrosjon i overgangen mellom bunnplatene av stål og aluminiumsøylene allerede i 1984.

Etter undersøkelse av skaden ble det konkludert at det hadde oppstått eksfolieringskorrosjon, der deler av materiale hadde skalet av. Ikke alle legeringer er like mottagelig til en slik form for korrosjon, men det oppstår ofte i 2xxx serien, som var brukt i denne brokonstruksjonen. Samtidig blir det ofte observert ved avskårne kanter, og når aluminium kobles til et mer edelt metall. Selv om en slik skade oppstod har ikke styrken til bruene blitt svekket, og levetiden består (41).

I Norge eksisterer det kun en veibru i aluminium, Forsmo bru. Statens vegvesen har gode erfaringer med denne konstruksjonen etter åpningen i 1995. Hittil har det vært minimalt eller ingen vedlikehold av brukonstruksjonen i dens levetid (42).

Aluminium blir i tillegg ofte blitt brukt i offshore konstruksjoner, der man kan observere mer ekstremvær og større opptredende krefter. Helikopterdekk og mindre fabrikkerte elementer

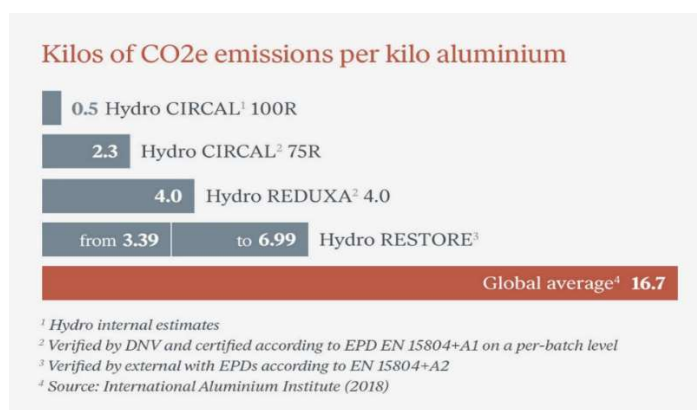
brukes ofte, og selv om disse konstruksjonene står eksponert vil ikke korrosjon som følge av blant annet saltvann være kritisk.

Det vil derfor være realistisk at en konstruksjon i aluminium vil kunne stå uten reduksjon av bæreevne, og med lite eller ingen vedlikehold ut sin levetid.

10.3 FOTAVTRYKK

Globalt blir det produsert i gjennomsnitt 16,7 kilo CO₂ ekvivalente per kilo aluminium. I Hydro produseres det lavkarbonaluminium Hydro REDUXA 4,0 som har et gjennomsnittlig karbonavtrykk på 4,0 kilo CO₂. Dette inkluderer utslipp knyttet til råvarer, transport og andre utslipp oppstrøms (43). Utslipet har blitt redusert betraktelig som følge av energien som brukes i produksjonsprosessen av Hydro REDUXA. Grønn energi i form av vann-, vind- og solkraft blir hovedsakelig tatt i bruk. Sammenlignet med Kina, som ofte bruker kull i produksjon av aluminium.

Hydro har fokusert på å effektivt utnytte skrap før og etter forbruk for å kunne tilby sertifisert resirkulert aluminium med et enda lavere karbonavtrykk. Hydro CIRCAL har lavere utslipp enn primæraluminium. CIRCAL 75R består av 75% resirkulert materiale, og har et utslipp på 2,3 kilo CO₂ per kilo aluminium. Ønske er å kunne oppnå 100% resirkulert aluminium, og dermed redusere utslippet til 0.5 kilo CO₂ ekvivalente. Fullstendig resirkulerte produkter av aluminium går under navnet Hydro CIRCAL 100R, og leveres med sertifisering som beskriver miljøfotavtrykket. Figur 9-2 viser forholdsvis CO₂-utslipp til de respektive aluminiumsproduktene Hydro tilbyr (44).



Figur 10-2 Utslippstall for forskjellig aluminiumsprodukter fra Hydro

Sammenlignet med utslippet til stål vil aluminium komme sterkere fram i en miljøanalyse. Stål står for 7% av verdensgjennomsnittlig CO₂-utslipp. For hvert tonn produsert stål vil det i snitt slippes ut 1,85 tonn CO₂. I Europa er mengden utslipp noe lavere, og ligger på 1,4 tonn CO₂ ekvivalente per tonn stål. Mengde utslipp varierer noe som følge av stålproduksjonen og legeringen som brukes. Når det er sagt så kan også stål resirkuleres som aluminium, men det krever langt mer energi grunnet stål sitt høye smeltepunkt (45).

10.4 GJENBRUK

Gjenvinning av 1 tonn aluminium sparer 6 tonn råmateriale bauksitt og 9 tonn CO₂-utslipp. Globalt bidrar resirkulering av aluminium til å spare mer enn 100 millioner tonn CO₂ hvert år. Gjennom Hydro sine løsninger for lavkarbonaluminium og resirkulert aluminium vil man kunne få fremgang på veien mot nullutslipp. Sertifiserte produkter minimerer karbonavtrykket til produktene deres, og åpner opp for kundene til å også redusere sitt fotavtrykk (36).

Hydro RESTORE blir laget i kombinasjon av resirkulert produksjonsskrap, resirkulert brukt skrap og primæraluminium. Avanserte aluminiumproduksjoner genererer skrap. Hydro jobber kontinuerlig med reduksjon av produksjonsskrap, ved å optimalisere produksjonsprosessen og samarbeide med kunder. Innsamling av skrap gjøres fra egne anlegg og fra kunder for gjenvinning, slik at det returnerte materialet kan bli brukt i nye produkter. Dette minimerer avfallet, og sikrer at verdifullt aluminium vil gå tilbake til produksjon (46).

Produksjon av primæraluminium krever betydelige mengder energi i sammenligning med resirkulerte produkter. Når resirkulert materiale brukes, skapes det mindre varme. Vanligvis bidrar varmeenergien som kreves for å produsere materialer til økte CO₂-nivåer i atmosfæren. Så ved å få ned varmen som kreves, vil det resultere i lavere CO₂-utslippene.

11 ØKONOMI

Den økonomiske analysen er basert på materialkostnader for de to materialene. Det har ikke blitt tatt hensyn til vedlikeholdskostnader og installasjonskostnader. Kostnader tilknyttet vedlikehold, installasjon m.m. er likevel diskutert under kapittel 11.2.

11.1 KOSTNADSBEREGNINGER AV STÅL OG ALUMINIUM

For å sammenligne de økonomiske kostandene av de to bruløsningene blir det tatt utgangspunkt i priser for ferdig monterte profiler. I den økonomiske sammenligningen blir det også sett på et scenario med middels pris for de gitte prisestimatene.

Stålkostnader ble hentet inn som et prisestimat i samarbeid med Straye Stålbygg AS. Figur 10-1 viser til estimatet på 55-60 kr/kg for ferdig monterte profiler, malt til korrosjonsklasse C5.

Prisestimat fra Straye stålbygg AS		
Konstruksjonsstål S450 [pris per kg]		
Lavt	Middels	Høyt estimat
55	57	60

Tabell 11-1 Prisestimat pr. kilo konstruksjonsstål S450

Tabell 10-2 viser total pris pr. meter for de respektive profilene, som har blitt brukt i modelleringen av nye Tretten bru. Vekt per meter og den totale lengden har blitt hentet ut fra SAP2000.

Profiler	Vekt per meter [kg]	Total lengde [m]	Pris per meter
HEA 400	88,70425476	1149,3	5056,14252 kr

HEA 600	177,3496622	296	10 108,9307 kr
HEA 300	88,69879171	347,6	5055,83113 kr
HEB 450	155,4031955	319,2	8857,98214 kr
HEB 600	211,852027	444	12 075,5655 kr

Tabell 11-2 Total lengde og pris pr. meter for stålprofiler

Data fra materialuttak i SAP2000 viser til en samlet vekt på 328,942 tonn. Basert på gitte referansepriser har den totale kostnaden til stålmodellen blitt estimert til 18,75 millioner kroner. Den totale kostnadsberegninger av valgte profiler vises i tabell 10-3.

Profiler	Samlet vekt [kg]	Pris per profil
HEA 400	101 947,8	5 811 024,6 kr
HEA 600	52 495,5	2 992 243,5 kr
HEA 300	30 831,7	1 757 406,9 kr
HEB 450	49 604,7	2 827 467,9 kr
HEB 600	94 062,3	5 361 551,1 kr
Totalt	328 942,0	18 749 694,0 kr

Tabell 11-3 Materialkostnader for ferdig monterte stålprofiler

Ved prisestimering av aluminium ble det tatt utgangspunkt i referansepris fra rapport Langenuen. Rapporten viser til prisestimat på 55,84 – 68,24 per kg ferdigmonterte profiler, og blir illustrert i tabell 10-4 (47).

Prisestimat fra rapport E39 Langenuen bro		
Aluminium Alloy 6082-T6 [pris per kg]		
Lavt estimat	Middels	Høyt
55,84	62,04	68,24

Tabell 11-4 Prisestimat pr. kilo aluminium fra rapport Langenuen

Som illustrert i tabell 10-5 har tilsvarende materialuttak for aluminium, som gjort for stålmodellen, blitt hentet ut. Tallene fra SAP2000 viser til total lengde og vekt for de ulike profilene.

Profiler	Vekt per meter [kg]	Total lengde [m]	Pris per meter
Brukasse	66,01498311	5920	4095,56955 kr
HEA 600	61,02050844	1113,2	3785,71234 kr
H400*900	227,2914414	444	14 101,161 kr

Tabell 11-5 Total lengde og pris pr. meter for aluminiumsprofiler

Den betydelige lengden på midspennet fører til et behov for relativt store aluminiumsprofiler, slik at krav til nedbøyning og bæreevne oppfylles. Dette resulterer til en betydelig økning i vekt, noe som gjenspeiler seg i tabell 10-6, kostnadsestimatet til aluminium, sammenlignet med stål. Fra materialuttak i SAP2000 blir den totale vekten for modellen i aluminium på 559,654 tonn. Det vil si en tilnærmet dobling av vekt i forhold til stålmodellen. Den totale kostnaden har derfor blitt estimert til 34,72 millioner kroner.

Profiler	Samlet vekt [kg]	Pris per profil
Brukasse	390 808,7	24 245 771,75 kr
HEA 600	67 928,03	4 214 254,981 kr
H400*900	100 917,4	6 260 915,496 kr
Totalt	559 654,13	34 720 942,23 kr

Tabell 11-6 Materialkostnader for ferdig monterte aluminiumsprofiler

Utførelsen i aluminium har vist seg betydelig dyrere enn stålmodellen. Ved å vurdere andre kostnadsfaktorer som vedlikehold, bygging, transport og material kan dette muligens rettferdiggjøres. Andre kostnadsvurderinger blir videre diskutert i kapittel 10.2.

11.2 KOSTNADER RUNDT VEDLIKEHOLD, BYGGING, TRANSPORT OG MATERIAL

Den totale kostnaden av et byggeprosjekt baserer seg på flere faktorer enn de som er undersøkt i kostnadsanalysen. Vedlikehold, transport og installasjonskostnader er betydelige når en endelig løsning besluttes.

For byggeprosjektet vil kostnader knyttet til transport ha en del å si. Transportkostnadene vil i stor grad styres av transportlengde og vekt. Vekten til aluminium gjør at det i mange tilfeller er et billigere materiale å frakte. I undersøkelsen av aluminium som byggemateriale for nye Tretten Bru har kapasitetskravet gjort at broen har en høyere vekt enn stålutførelsen. Behovet for store ekstruderte profiler gjør også at produksjon må skje ved Hydro sin fabrikk i Lichterwelde, dette vil medføre til en lang transport. Dette vil også bidra til å øke utgiftene ved en utførelse i aluminium.

I løpet av broens levetid er vedlikeholdskostnader en viktig faktor, som må tas til betraktning ved bestemmelse for valg av løsning. Vedlikeholdskostnader er en av fordelene ved å bruke aluminium som materiale, da levetiden til en konstruksjon i aluminium er konservativt satt til 100 år uten noe form for overflatebehandling.

Stål må overflatebehandles for å øke levetiden til konstruksjonen. Det er i dag flere alternative behandlinger, der varmforzinking/galvanisering er det rimeligste alternative i de aller fleste tilfeller. Varmforzinking er en prosess hvor stål dyppes i flytende zink etter rengjøring. Dette gjør at det dannes en legering mellom jern og zink som er korrosjonsbeskyttende og slitesterkt. Denne behandlingen gjør at levetiden for konstruksjoner i innlandsmiljø normalt er på 50-100 år (48).

Det har vist seg utfordrende å finne et nøyaktig estimat for vedlikeholdskostnader, men ut ifra materialenes egenskaper og erfaringer fra eksisterende prosjekter vil det sannsynligvis være større vedlikeholdskostnader tilknyttet stål. Over broens levetid er det mulig at en løsning i aluminium, med de lave vedlikeholdskostnadene knyttet til materiale, er det mest økonomiske alternativet.

12 DISKUSJON

I utførelsen av brokonstruksjonen har det blitt valgt å designe tilnærmet lik bro for både aluminium og stål. Stålmodellen ble primært designet på bakgrunn av løsningen i aluminium, slik at man enklere kan gjøre en sammenligning. Under gitte forutsetninger vil det være mer gunstig med en annen tilnærming til aluminiumsbroen med tanke på optimalisering, da den ikke gir det beste resultatet i denne casen. Med mer tid og ressurser ville man muligens oppnå et mer positivt utfall. Andre type løsninger vil derfor bli diskutert og drøftet i dette kapitlet.

12.1 DIMENSJONERING

12.1.1 Design

Etter analyse, med utgangspunkt i det gamle fundamentet til Tretten bru, har det gjort gruppen oppmerksom på vanskeligheten rundt bruk av eksisterende søyler. Det kommer av at bjelkene i konstruksjonen må dimensjoneres opp, for å kunne tilfredsstillende nedbøyningskravet til det lengste spennet. Som igjen medfører til en betraktelig vektøkning av konstruksjonen i aluminium, sammenlignet med den i stål. Det vil derfor ikke være gunstig å bygge i aluminium for den type fagverksbro som har blitt undersøkt. Utfordringene knyttet til midtspennet gjør at aluminiumsbroen blir både dyrere og tyngre enn stålalternativet.

Alternativ løsning kunne vært å fjerne de eksisterende fundamentene og bygge opp nye fundament med like spenn. Ved å eventuelt sette opp fire nye søyler vil man kunne se en reduksjon i nedbøyningskravet fra 200.6 mm til 105.7 mm. Å redusere lengden mellom hvert opplager, kan medføre til en reduksjon i bjelketverrsnitt og dermed bidra til å minske vekten til broen. Med bakgrunn i gruppens mulighetsstudie, der fokuset har vært å finne en bærekraftig og økonomisk løsning for Tretten bru, vil dette kunne bidra til å redusere materialbruken. Dermed gjøre det mer økonomisk å konstruere en fagverksbro i aluminium. Med andre ord kan da aluminium anses som en bedre konkurrent mot stål, da vekt og kostnader kuttes ned.

En annen løsning kan være å beholde fundamentene som allerede står, og heller tilføye et ekstra fundament i midten av det lengste spennet. Beholder man de tre søylene som fortsatt eksisterer, kan man forvente at de økonomiske kostnadene vil være mindre enn ved utskifting.

Samtidig vil man korte ned det lengste spennet som man underveis i oppgaven har sett skaper problemer med tanke på blant annet vekt. Ved hjelp av et ekstra fundament har det vist seg at overgurten vil kunne dimensjoneres ned, mens dimensjonene i fagverket beholdes for å unngå knekking.

Videre kunne man ha undersøkt en annen utforming, der det blir brukt en annen form for bæresystem. Et alternativ kunne vært å konstruere en bro lignende Arvida Bridge i Canada, der man har en bukonstruksjon som utnytter materialets trykkstyrke. En slik løsning kan være reell, men det krever større inngrep i grunnen og geotekniske undersøkelser, for å tilfredsstille kravet om fri høyde over undergående veibane. Det kunne også vært en mulighet å endre på selve fagverkskonstruksjonen ved å erstatte det med en nettverksbue. Med samme utgangspunkt som en bukonstruksjon vil en nettverksbue være med på å motvirke belastningene i selve dekket, ved at en større del av trykkspenningene blir tatt opp i fagverket. En nettverksbue kan også føre til en økning av antall staver, som igjen er med på å fordele lastene mer jevnt over konstruksjonen.

Gjennom analysen i SAP2000 har det vist seg vanskelig å beholde en økonomisk konstruksjon for aluminium, som følge av store tverrsnitt. Gruppen så seg derfor nødt til å bruke de største ekstruderte profilene Hydro kunne tilby, slik at konstruksjonen kunne tåle de opptredende lastene. For å oppnå vektreduksjon i fagverket kunne man undersøkt om krysstaver med mindre tverrsnitt ville vært en god løsning. Ved å bruke flere staver i fagverket vil konstruksjonen avstives, med andre ord være mer mottakelig for påkjenninger i samtlige retninger. Samtidig vil lastfordelingen bli mer jevnt fordelt, som igjen kan medføre til mindre profiler.

I tillegg kunne en undersøkt muligheten til å bygge en kombinert løsning i aluminium og stål, der dekke blir konstruert i aluminium og bæresystemet i stål. Det finnes i dag flere løsninger med brudekker i aluminium, blant annet SAPA-systemet til Hydro. Systemet er godt utprøvd, og blir brukt i flere bruer i dag. SAPA vil være et godt alternativ, da lastene blir tatt opp lokalt og ikke bidrar til svekkelse av den globale styrken.

12.1.2 Standarder

Gjennom arbeidet med denne oppgaven er det påpekt viktige faktorer for mulighetene til å gjenoppbygge Tretten bru i aluminium, enn å skulle brukt stål. Aluminium er mye mindre brukt som materiale i større konstruksjoner, og har av den grunn større usikkerheter knyttet til seg. I sammenligning med Tretten bru, som var av tre, ble det sett på hvordan mindre utprøvde byggematerialer kan ha ført til kollapsen. Det er derfor naturlig å tenke seg at utviklingen av standarder i aluminium kommer til å endre seg med kommende år, som et resultat av mer forskning. Det er derfor spesielt vanskelig å finne gode kilder til informasjon, som kan ha vært en av grunnene til at det ikke finnes mange broer i aluminium globalt.

Dette kan presiseres ytterligere når det legges til grunn at Statens Vegvesens håndbok for broprosjektering inneholder et eget kapittel for stålbroer, mens det ikke er et tilsvarende kapittel for aluminium. Ved hjelp av Hydro sin utvikling av lavutslipp aluminiumsprofiler, er det tenkelig at det også blir utformet bedre standarder for bruken av aluminium for fremtidige broer.

12.1.3 Sikkerhet

Når det bygges nye konstruksjoner, stilles det stadig strengere krav til utforming for å overholde sikkerhet. Det er derfor blitt sett på kollapsen av Tretten bru, og hvilke konsekvenser det fikk. Til tross for at det ikke ble noen menneskelige skader, er de økonomiske og miljømessige konsekvensene store. Samtidig vet man fra andre hendelser at en brokollaps kan ha enda større konsekvenser enn det som ble sett i Tretten.

Ved prosjektering av nye Tretten bru, skal det tas hensyn til gjeldene krav og NORSOK sine punkter om sikkerhet, pålitelighet og funksjonalitet. Når det gjelder duktilitet, altså materialets formbarhet og evne til å deformere seg, er aluminium duktilt som følge av sin lave tetthet. Det er samtidig vært å merke seg at stål har den samme egenskapen, og samtidig tre ganger så høy tetthet som aluminium. Når det kommer til de-eskalering av hendelse knyttet til brudd i deler av konstruksjonen, ser man at det er visse problemer knyttet til den designede aluminiumsbroen, fordi denne modellen allerede har støtt på utfordringer. Blant annet problemer rundt kapasiteten til aluminium som bromateriale over store spenn i en fagverksløsning.

Et tiltak for å øke sikkerheten til den designede broen vil være, som nevnt under kapittel 12.1.1, å sette inn et ekstra fundament. Ved å fordele spenningen i broen ytterligere, vil antall kritiske punkter minske. Når det er sagt er broen utformet etter norske standarder og sikkerhetsfaktorer i brudd- og bruktgrensetilsand. Dette vil si at broen i utgangspunktet skal være tilstrekkelig dimensjonert for å oppta lastene som virker på den.

Forskjellen i kunnskapen om de to materialene vil også ha en innvirkning på sikkerhetsaspektet, knyttet til uvissheter rundt aluminium. Ved å gjøre flere studier om temaet, er det naturlig å se for seg en bedre forståelse for å optimalisere egenskapene til aluminium og dens bruksområde. Siden det har kommet frem at diagonalstavene ikke var prosjektert tilstrekkelig nok, kan kollapsen av Tretten bru være et resultat av dette. Det er derfor tenkelig at kollapsen vil medføre til en endring av hvordan trevirke blir brukt som byggemateriale i fremtiden.

Når det kommer til korrosjonsmotstand, ser man en stor fordel ved å bruke aluminium. Sammenlignet med stål som krever mye vedlikehold grunnet korrosjon, har gruppen sett flere eksempler med aluminiumsbroer der det har vært lite behov for dette.

12.1.4 Problemer knyttet til utmatting

Problemer knyttet til utmatting vil være viktig å undersøke da aluminium er et mykt materiale sammenlignet med stål. Aluminium har ikke en definert utmattingsgrense som vist i S-N kurven under kapittel 5.5 *Utmattning og kapasitet*, og det vil derfor være komplisert å ta for seg problematikken rundt dette.

Plasseringen av Tretten bru bidrar positivt med tanke på utmatting, siden broen ligger i innlandet. Det vil si at konstruksjonen ikke er like utsatt for store vindkast, som igjen minimerer problematikken rundt utmattingsbrudd på grunn av mindre svingninger i konstruksjonen. Til tross for dette er det viktig å belyse at aluminium er spesielt utsatt for utmatting, spesielt i knutepunkter og andre overganger. Knutepunktsproblematikk er et viktig tema i bruprojektering, og undersøkelser av dette kan bidra til å minimere sannsynligheten for sprø brudd. Som ingeniører ønsker man et duktilt brudd, for å unngå lignende hendelser som kollapsen av Tretten bru. Dersom det skulle blitt utført beregninger for utmatting, ville

svingninger som følge av trafikkklaster vært mest kritisk sammenlignet med vindkrefter for fagverksbroer.

Det har derfor blitt valgt å neglisjere beregninger av utmatting, som følge av færre normer og retningslinjer rundt dette tema for aluminium i forhold til stål.

12.2 KLIMA OG MILJØ

Som oppgaven har påpekt tidligere, er produksjonen av primæraluminium en svært energikrevende prosess. Hydro kan vise til tall som er fire ganger lavere enn verdensgjennomsnittet, når det kommer til CO₂-utslipp per kilo aluminium produsert. Hovedgrunnen til dette er at mesteparten av aluminium som produseres internasjonalt ikke får energien sin fra bærekraftige energikilder. Dette gjør at aluminium ikke nødvendigvis kommer særlig godt ut i klimaregnskapet, hvis man ser utenfor landegrensene. Når det er sagt, kan Norge med Hydro i fronten gå frem som et forbilde for bærekraftig produksjon av aluminium og forskning på innovative løsninger med materialet.

12.2.1 Resirkulert aluminium

Der det er størst mulighet til å kutte utslipp er ved aluminiumproduksjon med resirkulert materiale. Aluminium mister ingen egenskaper ved omsmelting, og ses derfor på som et bærekraftig materiale. Hydro kan derfor vise til aluminiumsprodukter som kommer fra 100% resirkulert materiale. Dette er i stor grad ubrukte rester og skrap som følge av avkapp fra ekstruderingsprosessen eller som av andre grunner ikke havner hos kunden. For aluminium som allerede har vært i bruk, kreves det noe mer tiltak før det kan bli omgjort til høykvalitetsprodukter. Det er også viktig å merke seg at stål har samme forutsetninger for resirkulering, men krever over dobbelt så høye temperaturer for å smeltes om. Når det er slik at byggindustrien står for rundt 34% av verdens energibehov, kan økt bruk av resirkulert aluminium ha positive innvirkninger på utslippene.

The International Aluminium Institute (IAI), spår at etterspørselen av aluminium vil øke med 70-80% innen 2050 (49). For at man skal kunne møte dette behovet og samtidig bidra til en bærekraftig fremtid, er det essensielt å se på sirkulære løsninger der materialet gjenvinnes og brukes om igjen. Derfor er videre utvikling og mer kunnskap om materialet en nødvendig faktor.

12.2.2 Materialmengde

En fordel med å benytte aluminium istedenfor stål, er at det muliggjør reduksjon av materialmengden med bakgrunn i materialets vekt og styrke-vekt-forhold. Det kom frem ved utformingen av nye Tretten bru at dette ikke alltid er tilfellet. Som nevnt under diskusjon av design, er det flere alternative løsninger som kunne vært gjort for å redusere materialbruken, og gjort designet til aluminium som den foretrukne løsning. Det kommer også frem fra Langenuen rapport, at en brokasse av aluminium vil være med å redusere behovet for mengde material.

Materialmengden kan også reduseres gjennom broen sin levetid, grunnet mindre vedlikehold. Den naturlige korrosjonsbeskyttelsen som aluminium har, vil føre til mindre utskifting av konstruksjonsdeler. Stål vil sammenlignet med aluminium, gjennom en levetid på 100 år, ha langt større behov for vedlikehold og etterkostnader.

12.2.3 Transport og montering

Reduksjonen av vekt vil også ha en positiv påvirkning på klimaavtrykket når det gjelder transport. Både Hydro og Hydal kan levere aluminiumsprofiler fra flere ulike lokasjoner i Norge. Dette medfører korte reiseveier fra produksjon til monteringslokasjon. I tillegg til at lav vekt ved transport medfører mindre utslipp fra lastebiler, samt. slitasje på de veiene det må kjøres på. Montering kan samtidig gå fortere, og muliggjøre at større profiler kan heises på plass for tilsvarende energimengder som mindre stålalternativer.

12.3 ØKONOMI

Resultatene fra den økonomiske sammenligningen er preget av utfordringene rundt nedbøyningen for den undersøkte utførelsen i aluminium. Aluminiumsutførelsen kommer dårligere ut økonomisk når man ser på profilkostnadene.

For å få et mer detaljert bilde av de økonomiske kostnadene for de to alternativene, må det undersøkes mer rundt kostnader for vedlikehold, installasjonskostnader og transport. Det lave behovet for vedlikehold på en konstruksjon i aluminium er potensielt en svært besparende kvalitet. Rådgivende ingeniørers forening har skrevet tre tilstandsrapporter for offentlige bygg

og infrastruktur, funnet i rapporten viste at det var et etterslep på vedlikehold for hele 3200 milliarder kroner i 2021. Mye av etterslepet bestod av kritisk rustent stål.

For aluminium er situasjonen en helt annen, erfaringer fra konstruksjoner med aluminium som Forsmo bro er gode. Det har siden åpningen av broen ikke vært noe særlig behov for vedlikehold, dette var også intensjonen da bruene ble bygd i 1995. Man ønsket å bruke et materiale som ikke krevde planlagt periodisk vedlikehold. Utfordringen er å utvikle metoder for å bygge større og lengre med aluminium, dersom det skal bli en seriøs konkurrent til stål i byggebransjen. Forprosjektet til Langenuen bru er derfor svært interessant og et viktig fremskritt for aluminium.

Dersom man klarer å løse utfordringene til aluminium som byggemateriale i større konstruksjoner vil samfunnet kanskje spare store summer på vedlikehold og annet som vil medfølge.

12.4 FEILKILDER

12.4.1 Kunnskap og mangel på litteratur

Gjennom utdanningen har det ofte blitt sett på mindre avanserte strukturer, der omfanget ikke er like omfattende som designet bachelorgruppen har valgt å undersøke i mulighetsstudien. For å gjennomføre prosjektet har det derfor blitt foretatt en del avgrensninger.

Gjennom egne antagelser av standarder kan det derfor oppstå avvik som følge av mistolkninger og feilberegninger. Dette kan føre til følgefeil i analysen av modellen. Det som blir beskrevet i Eurokode 9 om aluminium har også blitt ansett som 100% troverdig. I tillegg står det ikke om aluminium i håndbok N400 Bruprosjektering, som har blitt brukt for beregninger av laster og utdypning av krav. Mangel på litteratur og kunnskap kan utgjøre små feil, og eventuelt gi et annet utfall enn det gruppen ønsker. Feil og mangler i standarder og håndbøker som har blitt brukt underveis er ikke til å unngå, da disse revideres jevnlig.

12.4.2 Dimensjonering og design

Under prosjektering av bruene er det brukt standarder, analyseprogram og beregninger for hånd. På veien fram til sluttproduktet er det mange steg der det kan ha forekommet feil. Mistolkning av standarder, slurvefeil under beregninger som blir brukt videre i analyse kan skape mindre og større avvik fra den reelle situasjonen. For analyse har det stort sett blitt brukt SAP2000, og utbytte fra programmet har blitt sett på som riktige. Det har blitt gjort kontroll av dataene ved hjelp av håndberegninger som i stor grad har samstemt med funnene i SAP2000. Allikevel kan det være menneskelige feil i de verdiene som har blitt lagt inn i programmet. Dette er vurdert som den største feilkilden, da det anses som sannsynlig at denne type feil kan skje og som videre kan gi store utslag for resultatene. Selv om analysen i SAP2000 er blitt sett på som troverdig, er det allikevel viktig å være kritisk da det også kan ha skjedd flere feil i modelleringen, som påvirker resultatene.

12.4.3 Kostnadsestimat

Kostnadsberegningene har basert seg på priser for ferdig monterte profiler. Vedlikeholdskostnader og transportkostnader ble det valgt å diskuteres, men ikke tallfestes da det er potensielt mange feilkilder. Dermed er det vanskelig å få et nøyaktig kostnadsestimat over broens levetid.

Referanseprisen for de to materialene er hentet fra noe ulik tid. De siste årene har prisene på materialer økt betraktelig, og begge materialene er en del av marked med store prissvingninger. Dette kan resultere i at kostnadsberegningene utført i denne oppgaven avviker fra virkeligheten. Referanseprisene for stål er fra Straye Stålbygg As, mens de for aluminium er hentet fra Statens Vegvesen rapport om Langenuen bru. Selv om disse to kildene anses som pålitelige, er det mulig at andre aktører kan operere med et annet prisestimat. Store prosjekter legges ofte ut til anbud, hvor den aktøren som tilbyr den mest gunstige prisen vinner.

13 KONKLUSJON

Basert på funnene i denne studien konkluderes det med at utførelsen av broen i aluminium, med de gjeldende forutsetningene, ikke representerer et tilfredstillende alternativ til stål for den undersøkte brotypen. Det store midtspennet medfører til en nødvendig og betydelig økning i vekt, samt. en høyere kompleksitet i aluminiumsløsningen. Løsningen er en dårlig konkurrent med stålmodellen når det gjelder bæreevne og byggekostnad.

For å oppnå en mer omfattende og realistisk sammenlikning av materialvalg for brodesign, anbefales det å gjennomføre ytterligere undersøkelser og beregninger som tar hensyn til alternative utforminger, livsløpskostnader og virkningen av den varmpåvirkende sonen (HAZ) på sveisede aluminiumsprofiler. Dette vil gi en mer helhetlig forståelse av de mulige fordelene og begrensningene ved bruk av aluminium som bromateriale. Videre forskning på disse områdene vil bidra til å informere beslutningstakere og ingeniører om de faktiske fordelene og utfordringene knyttet til aluminiumsbroer og deres langsiktige bærekraft.

14 VIDERE PROSESS

Som en mulighetsstudie om aluminium i fagverksbroer, er det mange punkter å gå videre med. Til tross for at det kom frem i resultatene, at aluminium nødvendigvis ikke var den beste løsningen for det designet oppgaven tok for seg. Oppgaven har fått frem flere gode grunner til hvorfor aluminium er et viktig tema å se videre på.

Neste steg for studiet angående gjenoppbyggingen av Tretten bru i aluminium, ville vært å se på utforming av andre brotyper. Fra Langenuen rapporten har det kommet frem at en hengebro med aluminiumsdekke kan være et godt alternativ for lange spenn. Samtidig har Arvida bridge vist at aluminium er et fungerende materiale i buebroer. Når det gjelder Langenuen, så skal det komme en ny og forbedret utgave av rapporten, uten at det er fastsatt en dato enda. Denne vil bidra til en ytterligere forbedret forståelse, og trekke fornyede konklusjoner.

Den generelle veien videre for utforming av broløsninger i aluminium vil være å se nærmere på usikkerheten rundt sveisede forbindelser, og metoder for hvordan dette kan bedre løses. Dette er fortsatt et tema som mye forskes på, blant annet ved å komme frem til legeringer som kan egne seg enda bedre til sveis. Utmattingsproblematikken knyttet til aluminium er også et tema som må undersøkes mer. Dette er noe man forventer en økende kompetanse på i tiden som kommer.

For denne oppgaven har det blitt satt noen avgrensinger, for å simplifisere tidsomfanget. For veien videre ville det derfor vært naturlig å ta for seg disse. Spesielt er kostnadsestimatet for aluminium begrenset til tall fra Langenuen rapporten, som kan være avvikende for dette prosjektet. Dette er i tillegg prisantydninger som ikke nødvendigvis er oppdatert med dagens priser. Når det er sagt, er det heller ikke tatt for seg de økonomiske aspektene rundt montering og installasjon av broen. På samme måte som materialestimat måtte man gjort en økonomisk evaluering knyttet til vedlikeholdsarbeid for både stål og aluminium. Når det gjelder broens levetid, er også de bærekraftige aspektene noe å gå videre med. Med å gjøre en grundig livsløpsanalyse av broens levetid over 100 år, kunne man fått en dypere forståelse på klimapåvirkningene en bro i ulike materialer ville hatt.

Som konkludert i Statens Vegvesen Rapport nr. 557, punkt 3.5 aluminium, vises det til grunner hvorfor bruken av aluminium i broer er begrenset i dag. Studier som dette er derfor med på å inspirere flere til å komme på banen for å arbeide med de utfordringen som aluminium står ovenfor, og hvorfor aluminium bør konkurrere med konvensjonelle byggematerialer (50).

Referanseliste

1. Om Hydro [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2023 [Hentet 12. mars 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/no-NO/om-hydro/>
2. Eurokoder [Internett]. Standard Norge; 2023 [Hentet 02. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/eurokoder1/>
3. NORSOK [Internett]. Standard Norge; 2023 [Hentet 02. mai 2023]. Tilgjengelig fra: [https://www.standard.no/no/webshop/norsok/?utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=Produkter&utm_term=norsok&utm_content=NORSOK%20\(Norge\)](https://www.standard.no/no/webshop/norsok/?utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=Produkter&utm_term=norsok&utm_content=NORSOK%20(Norge))
4. Handbøker om vei- og transportanlegg [Internett]. Statens vegvesen; 2023 [Hentet 02. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker/om-handbokene/>
5. Mathcad [Internett]. PTC; 2023 [Hentet 12. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.mathcad.com/en/>
6. Tretten bru [Internett]. Statens vegvesen; 2022 [Hentet 02. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/om-oss/presse/aktuelt/2022/08/tretten-bru/>
7. Tettsteders befolkning og areal [Internett]. Statistisk sentralbyrå; 2022 [Hentet 02. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/befolkning/folketall/statistikk/tettsteders-befolkning-og-areal>
8. Thorsnæs, Geir; Tretten [Internett]. Store norske leksikon; 28. desember 2022 [Hentet 03. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Tretten>
9. Nye Tretten bru [Internett]. Bygg.no; 26. juni 2012 [Hentet 05. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.bygg.no/nye-tretten-bru/91104!/>
10. Fylkeskommunen ber om pengehjelp - mener kollapsen vil koste minst 300 millioner [Internett]. Teknisk Ukeblad; 16. september 2022 [Hentet 05. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/fylkeskommunen-ber-om-pengehjelp-mener-kollapsen-vil-koste-minst-300-millioner/522298?key=3Pq9cvGN>
11. Almar-Næss, Almar: Utmatting - teknikk [Internett]. Store norske leksikon; 23. november 2020 [Hentet 05. april 2023]. Tilgjengelig fra: https://snl.no/utmatting_-_teknikk
12. Brukase i aluminium - eit konkurransedyktig materialval [Internett]. Statens vegvesen; 15. juni 2020 [Hentet 05. mai 2023]. Tilgjengelig fra:

<https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/europaveg/e39stordos/nyhetsarkiv/brukasse-i-aluminium--eit-konkurransedyktig-materialval/>

13. Undersøkelse av hendelsen med hendelsesnummer 22/441 [Internett]. Statens Havarikommisjon for Transport; 2. desember 2022 [Hentet 20. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://havarikommisjonen.no/Vei/Undersokelser/22-441>
14. Vegvesenet: Ingenting som tyder på at brua kollapset på grunn av lastebilen [Internett]. Teknisk ukeblad; 2022 [Hentet 20. mai 2023]. Tilgjengelig fra: [Vegvesenet: – Ingenting som tyder på at brua kollapset på grunn av lastebilen - Tu.no](https://www.tu.no/artikler/vegvesenet-her-er-svakhetene-pa-tretten-bru-ett-element-skiller-seg-ut-mener-ekspert/521852?p=a7417c45)
15. Vegvesenet: Her er svakhetene på Tretten bru - ett element skiller seg ut, mener ekspert [Internett]. Teknisk Ukeblad; 2022 [Hentet 20. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/vegvesenet-her-er-svakhetene-pa-tretten-bru-ett-element-skiller-seg-ut-mener-ekspert/521852?p=a7417c45>
16. Inspeksjonsrapport for Tretten-bru [Internett]. Statens vegvesen; 15.08.2022 [Hentet 20. mai 2023]. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/globalassets/nyheter/bilder/komm/inspeksjonsrapport_tretten-bru.pdf
17. NORSOK 001 [Internett]. N-001:2019 Teknisk regelverk for bygningsteknikk - NS-EN 1990; 4. februar 2004 [Hentet 04. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/pagefiles/1148/n-001.pdf>
18. N400 bruprojekteringge [Internett]. Statens vegvesen; 1. januar 2022 [Hentet 04. mai 2023]. Tilgjengelig fra: [N400:2022 | Viewer \(vegvesen.no\)](https://www.vegvesen.no/nyheter/bruprojekteringge)
19. Pedersen, Bjørn; Kaland, Trine; Allkunne: Aluminium [Internett]. Store norske leksikon; 12. januar 2023 [Hentet 08. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/aluminium>
20. Aluminium Leader - History [Internett]. Aluminium Leader; [Hentet 01. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.aluminiumleader.com/history/>
21. Gram, Trond: Stangfjorden Elektrokemiske Fabriker [Internett]. Store norske leksikon; 23. juli 2021 [Hentet 01. april 2023]. Tilgjengelig fra: https://snl.no/Stangfjorden_Elektrokemiske_Fabriker
22. Hydros historie [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2023 [Hentet 01. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/no-NO/om-hydro/bedriftshistorikk-innhold/hydros-historie2/>

23. Legeringer for ekstruderte profiler [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2023 [Hentet 08. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/produkter/ekstruderte-profiler/legeringer-for-ekstruderte-profiler/>
24. Produksjon av profiler [Internett]. Hydro Aluminium Profiler AS; 2023 [Hentet 20. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://hap.hydal.com/227/hva-gjor-vi-2/ekstrudering/produksjon-av-profiler/>
25. MIG/MAG-sveising [Internett]. Fronius International GmbH; 2023 [Hentet 20. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.fronius.com/nb-no/norway/sveiseteknikk/verden-av-sveising/migmag-sveising/>
26. Langenuen Suspension Bridge - Aluminium Girder Alternative [Internett]. Statens vegvesen; 26. juni 2020 [Hentet 20. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/contentassets/be6d51d284cb4ea39a67a4e0cefd23fa/languen-suspension-bridge-aluminium-girder-alternative.pdf>
27. Friction Stir Welding: Increasing Design Freedom and Cutting Costs [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2023 [Hentet 05. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.shapesbyhydro.com/en/design-thinking/friction-stir-welding-increasing-design-freedom-and-cutting-costs/>
28. Galvanic Corrosion in Bolted Aluminium Joints [Internett]. Highrise; 2023 [Hentet 15. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://highrise.nl/galvanic-corrosion-in-bolted-aluminium-joints/>
29. Solberg, Jan Ketil; Christensen, Nils; Almar-Næss, Almar: Stål [Internett]. Store norske leksikon; 03. juni 2022 [Hentet 02. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/st%C3%A5l>
30. Legeringer [Internett]. Hydal AS; 2023 [Hentet 08. mai 2023]. Tilgjengelig fra: [HAP Profilhandbok 2014 NO_Magda.pdf \(hydal.com\)](#)
31. Ulike typer stål og materialgrader [Internett]. Nordic Steel AS; 2023 [Hentet 08. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.nordicsteel.no/fagartikler/ulike-typer-stal-og-materialgrader>
32. What is a Truss Bridge? [Internett]. Tennessee Department of Transportation [Hentet 18. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.tn.gov/tdot/structures-/historic-bridges/what-is-a-truss-bridge.html>

33. Øderud, Hans Thomas; Nordahl, Rasmus S.: Bro [Internett]. Store norske leksikon; 27. september 2022 [Hentet 18. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/bro>
34. Materialet [Internett]. Stålforbundet; [Hentet 10. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.stalforbund.no/materialet/>
35. Steel Standard Truss Bridges [Internett]. Canam-Bridges; 2023 [Hentet 12. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.canambridges.com/products/steel-bridges/steel-standard-truss-bridges/>
36. 6082 Aluminum Profiles [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2023 [Hentet 05. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/en-us/profiles/6082-aluminum>
37. Big Extrusions in Benelux [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2023 [Hentet 05. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/en-BE/aluminium/products/extruded-profiles/profiles-made-in-benelux/big-extrusions-in-benelux/>
38. Tracking Progress - Global Status Report [Internett]. Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC); 2022 [Hentet 09. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://globalabc.org/our-work/tracking-progress-global-status-report>
39. Resirkulering av aluminium [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2023 [Hentet 09. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/om-aluminium/resirkulering-av-aluminium/>
40. Aluminiumbru over Langenuen kan bli en realitet [Internett]. Statens vegvesen; 28. oktober 2019 [Hentet 18. april 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/europaveg/ferjefrie39/nyhetsarkiv/aluminium-bru-over-langenuen-kan-bli-en-realitet/>
41. Smith, Frank N.: Corrosion Damage Repairs to the Arvida Aluminum Bridge [Internett]. Materials Performance; 05. april 2020 [Hentet 10. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.materialsperformance.com/articles/material-selection-design/2019/03/corrosion-damage-repairs-to-the-arvida-aluminum-bridge>
42. Skoglund, Jarle: Dette er Norges eneste veibru i aluminium - ingen hindre for at det kan bli flere, sier statsråden [Internett]. Veier24; 24. mars 2023 [Hentet 10. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.veier24.no/artikler/dette-er-norges-eneste-veibru-i-aluminium-ingen-hindre-for-at-det-kan-bli-flere-sier-statsraden/528355>

43. On the Way to Net Zero Aluminium [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2021 [Hentet 18. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/no-NO/media/news/2021/on-the-way-to-net-zero-aluminium/>
44. Lavkarbon- og resirkulert aluminium [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2023 [Hentet 07. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/produkter/lavkarbon-og-resirkulert-aluminium/>
45. Reduser CO2-utslippene dine med miljømetall [Internett]. Norsk Stål AS; 2022 [Hentet 10. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.norskstaal.no/aktuelt/produktnyheter/reduser-co2-utslippene-dine-med-miljoemetall>
46. Hydro Restore [Internett]. Norsk Hydro ASA; 2023 [Hentet 07. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.hydro.com/no-NO/aluminium/produkter/lavkarbon-og-resirkulert-aluminium/recycled-aluminium/hydro-restore/>
47. Dalh, Morten: Mulig å forseret etterslep på vedlikehold [Internett]. Metal Supply; 3. oktober 2022 [Hentet 20. mai 2023]. Tilgjengelig fra: https://www.metalsupply.no/article/view/870882/mulig_a_forsere_etterslep_pa_vedlikehold
48. Varmforzinking [Internett]. Ferrozink AS; [Hentet 20. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://www.ferrozink.no/produkter/varmforzinking>
49. Forecasting global aluminium flows to demonstrate the need for improved sorting and recycling methods [Internett]. The International Aluminium Institute; 2022 [Hentet 16. mai 2023]. Tilgjengelig fra: [Forecasting global aluminium flows to demonstrate the need for improved sorting and recycling methods | Elsevier Enhanced Reader](#)
50. Nye materialer for bruk i tunnel og bru [Internett]. Statens vegvesen; 2023 [Hentet 20. mai 2023]. Tilgjengelig fra: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2624800/SVV%20rapport%20557%20Nye%20materialer%20for%20bruk%20i%20tunnel%20og%20bru.pdf?sequence=1>

Vedleggsliste

Vedlegg A: Lastberegninger

Vedlegg B: Samtidige grupper av trafikklaster

Vedlegg C: Lastkombinasjoner i brudd- og bruksgrensetilstand

Vedlegg D: Forklaring av ulike brotyper

Vedlegg E: Manuell kapasitetskontroll av stålstaver

Vedlegg F: Automatisk kapasitetskontroll av stålstaver i SAP2000

Vedlegg G: Manuell kapasitetskontroll av staver i aluminium

Vedlegg H: Automatisk kapasitetskontroll av staver i aluminium i SAP2000

Vedlegg I: Kontroll av nedbøyning for midtspenn

Vedlegg J: Poster

Vedlegg K: Artikkel