



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:
Konstruksjoner og materialer /
Byggkonstruksjoner

Vårsemesteret, 2021

Åpen / Konfidensiell

Forfatter:
Mikael Ruud

Mikael Ruud

.....
(signatur forfatter)

Fagansvarlig:
Sudath Siriwardane

Veileder(e):
Martin Cepelka (COWI AS)
Sudath Siriwardane

Tittel på masteroppgaven:
Parametrisk analyse av fagverksbruer i tre: Optimalisert materialbruk med redusert karbonavtrykk

Engelsk tittel:
Parametric analysis of timber truss bridges: Optimized material use with reduced carbon footprint

Studiepoeng: 30

Emneord:
Fagverksbru i tre, trebru, limtre, CO₂,
utslipp, klimagassutslipp, parametrisk
analyse

Timber truss bridge, timber bridge, glulam,
CO₂, emissions, greenhouse gas emissions,
parametric analysis

Sidetall: 87

+ vedlegg/annet: 25

Stavanger, ...12.06/2021...
dato/år

Abstract

The demand for bridges in Norway is increasing as more new highways are built. Norwegian highway crossing bridges are almost exclusively made of concrete, and only a few are timber bridges. Meanwhile, climate is becoming a bigger issue with more players in the industry embracing the green shift. Timber truss bridges are an alternative if highway crossing bridges are to be made of timber. Therefore, this thesis investigates how to reduce the carbon footprint of timber truss bridges through a parametric analysis. The competitiveness of a timber truss bridge compared with concrete bridges in a climate perspective is also examined.

A short theoretical introduction on timber truss bridges and timber as a construction material is given. Moreover, the methodology for the parametric analysis, the loads used, the capacity of the bridge elements and the emission analysis is reviewed.

A parametric analysis of a bridge model based on the timber truss bridge Tveit bru is done. The bridge parameters truss height, number of truss triangles and deck thickness and their impact on the degree of utilization and greenhouse gas emissions of the timber truss bridge is investigated.

The results show that the number of truss triangles, which is closely related to the amount of steel used, is the parameter with the biggest impact on greenhouse gas emissions. If the number of truss triangles is reduced by one, the emissions are cut by 7.1 %. The truss height has almost no impact on emissions, and a 20 % reduction of truss height only yields 0.3 % lower emissions. The deck thickness has a moderate impact on emissions, and a 25 % reduction in thickness cuts emissions by 2.8 %. A combination of reducing the number of truss triangles by one and increasing the truss height by 20 % gives a 6.2 % cut of emissions, but also leads to a critical increase of the degree of utilization of the deck by almost 40 %. A satisfying combination of parameter changes for the timber truss bridge that significantly reduces emissions while sufficiently maintaining the degree of utilization of the deck has not been found.

The greenhouse gas emissions of the timber truss bridge are calculated as 936 kg CO₂e per m² effective bridge deck area, and is 42 %, 23 % and 9 % lower than the emissions of three Norwegian highway crossing concrete bridges. This confirms the competitiveness and advantage of the timber truss bridge compared with a set of concrete bridges in a climate perspective.

Sammendrag

Behovet for overgangsbruer i Norge øker i takt med at flere nye motorveier bygges. Norske overgangsbruer er i all hovedsak utført i betong, og kun et fåtall av dem er trebruer. Samtidig blir klimaet viktigere og flere aktører i industrien omfavner det grønne skiftet. Fagverksbruer i tre er et alternativ dersom overgangsbruer skal gjennomføres i tre. Derfor vil denne oppgaven gjennom en parametrisk analyse undersøke hvordan en kan redusere karbonavtrykket for fagverksbruer i tre. Konkurransedyktigheten for en fagverksbru i tre sammenliknet med betongbruer i et klimaperspektiv er også gransket.

En kort teoretisk innføring i fagverksbruer og tre som byggemateriale er gitt. Videre er metodikken for den parametriske analysen, benyttede laster, kapasiteten til bruelementene og utslippsanalysen gjennomgått.

Det er gjennomført en parametrisk analyse av en brumodell basert på trefagverksbrua Tveit bru. Bruparameterne fagverkshøyde, antall fagverksledd og dekketykkelse og deres effekt på utnyttelsesgraden og klimagassutslippene til trebrua er undersøkt.

Resultatene viser at antall fagverksledd er den parameteren med størst påvirkning på klimagassutslippene da den i stor grad påvirker mengden stål som brukes i brua. Reduseres antall fagverksledd med én, kuttes utslippene med 7.1 %. Fagverkshøyden har nesten ingen påvirkning på utslippene, og en 20 % reduksjon i fagverkshøyden gir kun 0.3 % mindre utslipp. Dekketykkelsen har en moderat effekt på utslippene, og en 25 % reduksjon i tykkelse gir 2.8 % utslippskutt. En kombinasjon av ett fagverksledd mindre og 20 % økt fagverkshøyde gir et utslippskutt på 6.2 %, men leder til en kritisk økning av dekkets utnyttelsesgrad på nesten 40 %. Det er ikke funnet en tilfredsstillende kombinasjon av parameterendringer for fagverksbrua som reduserer utslippene betydelig og samtidig vedlikeholder utnyttelsesgraden tilstrekkelig for dekket.

Trefagverksbruas klimagassutslipp er beregnet til 936 kg CO₂e per m² effektivt brudekkeareal, og er 42 %, 23 % og 9 % lavere enn utslippene til 3 norske overgangsbruer i betong. Det bekrefter konkurransedyktigheten og fordelene med fagverksbrua i tre sammenliknet med et knippe betongbruer i et klimaperspektiv.

Forord

Denne masteroppgaven utgjør avsluttende del av masterstudiet Konstruksjoner og materialer ved Universitetet i Stavanger. Oppgaven er gjort etter et initiativ og med ekstern veiledning fra COWI AS.

Jeg vil først og fremst takke for all bistanden jeg har fått fra Martin Cepelka i COWI AS. Den faglige og utenomfaglige veiledningen, tilbakemeldingene og hjelpen har vært uvurderlig fra start til slutt. Trebruer er et område jeg ikke hadde spesielt mye kunnskap om på forhånd, og Martin sin faglige ekspertise på trebruer har vært til stor hjelp. Jeg setter stor pris på tiden du har tatt deg med å veilede, svare på spørsmål og stille til møter, da jeg vet at det også har vært et travelt år for deg.

Videre vil jeg takke Sudath Siriwardane ved UiS for god veiledning og råd underveis. En stor takk rettes også til Andreas Skaare ved UiS og Audun Mathias Øvstebø i COWI AS for god hjelp med programvare, brumodellen og skriptet, som var en hard nøtt å knekke.

Så vil jeg takke familien min og venner som har vært en stor støtte under studiene og skrivingen av masteroppgaven.

Mikael Ruud

Lørenskog, 12. juni 2021

Innhold

Abstract.....	i
Sammendrag	ii
Forord	iii
Innhold	v
Figurer	vii
Tabeller.....	viii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål	1
1.3 Omfang	2
1.4 Parametere og begrensninger	2
2 Fagverksbruer i tre	4
2.1 Tre som byggemateriale	4
2.2 Limtre.....	5
2.3 Fagverk.....	7
2.4 Fagverksbruer i tre.....	8
2.4.1 Tveit bru	10
2.4.2 Warren-fagverk.....	11
2.5 Tverrspent dekke	11
3 Metode.....	13
3.1 Parametrisert bruskript og modell i Grasshopper og Sofistik	13
3.2 Laster.....	17
3.2.1 Lasttilfeller	18
3.2.2 Lastkombinasjoner	20
3.2.3 Permanente laster	22
3.2.4 Trafikkklaster: lastmodell 1	22
3.3 Kapasitet.....	26
3.3.1 Kapasitet av fagverkselementer	26
3.3.2 Kapasitet av dekke	32
3.3.3 Kapasitet av tverrbærere	39
3.4 Utslippsanalyse av trebru.....	44
4 Parametrisk analyse av trebru	48
4.1 Bruparametere.....	48

4.2 Sammenlikningsgrunnlag: Trebru 0	49
4.2.1 Utnyttelsesgrad	51
4.2.2 Utslippsanalyse	55
4.3 Lavere fagverk: Trebru 1	57
4.3.1 Utnyttelsesgrad	57
4.3.2 Utslippsanalyse	60
4.4 Færre fagverksledd: Trebru 2	61
4.4.1 Utnyttelsesgrad	62
4.4.2 Utslippsanalyse	65
4.5 Redusert dekketykkelse: Trebru 3	66
4.5.1 Utnyttelsesgrad	66
4.5.2 Utslippsanalyse	69
4.6 Færre fagverksledd + høyere fagverk: Trebru 4	70
4.6.1 Utnyttelsesgrad	70
4.6.2 Utslippsanalyse	73
4.7 Redusert dekketykkelse + høyere fagverk: Trebru 5	74
4.7.1 Utnyttelsesgrad	74
4.7.2 Utslippsanalyse	77
4.8 Sammenlikning med utslipp fra 3 betongbruer.....	78
5 Diskusjon og konklusjon	82
5.1 Diskusjon og konklusjon	82
5.2 Usikkerhetsmomenter	86
5.3 Videre forskning	87
Referanser.....	88
Vedlegg	90
Vedlegg A: Tegninger av bruer	90
Vedlegg B: Krefter, momenter og nedbøyning i Sofistik for Trebru 0	93
Vedlegg C: Beregnings- og utslippsfaktorer.....	107

Figurer

Figur 1.1: Fagverk med 6 fagverksledd skravert.....	3
Figur 2.1: Hovedakser i tre i forhold til fiberretning og årringer.....	5
Figur 2.2: Limtreelement bestående av 7 lameller.....	6
Figur 2.3: Fagverksbruer med ulik plassering av brudekke i forhold til fagverk.....	8
Figur 2.4: Ulike fagverkstyper.....	9
Figur 2.5: Lengdesnitt av Tveit bru.....	10
Figur 2.6: Tverrsnitt av Tveit bru.....	10
Figur 2.7: Warren-fagverk.....	11
Figur 2.8: Tverrspent dekke fra Mølledammen bru.....	12
Figur 3.1: Egenprodusert brukript i Grasshopper.....	13
Figur 3.2: Geometrisk modell av trebru i Rhino.....	14
Figur 3.3: Resulterende krefter i fagverk vist i Sofistik.....	14
Figur 3.4: Randbetingelser for lagre og fagverk.....	15
Figur 3.5: Material- og tverrsnittsinput for fagverkselementer.....	15
Figur 3.6: Modellering av dekke.....	16
Figur 3.7: Material- og stivhetsinput for det tverrsente dekket.....	16
Figur 3.8: Material- og tverrsnittsinput for tverrbærerne.....	17
Figur 3.9: Visualisering av 3D-modell av trebrua i Sofistik.....	17
Figur 3.10-3.14: Plassering av trafikklaster for lasttilfelle 1.....	18-19
Figur 3.15-3.19: Plassering av trafikklaster for lasttilfelle 2.....	19-20
Figur 3.20: Inndeling av felt etter EN 1991-2.....	23
Figur 3.21: Generell inndeling av kjørefelt.....	24
Figur 3.22: Knekking av overgurt i planet.....	29
Figur 3.23: Knekking av overgurt ut av planet.....	29
Figur 3.24: Skråstag for Tveit bru.....	29
Figur 3.25: Knekk lengde for Sletta bru.....	30
Figur 3.26: Tverrsnitt av overgurt med akser.....	30
Figur 3.27: Systemfasthetsfaktor k_{sys} for laminerte gulvdekker.....	33
Figur 3.28: Spredning av konsentrerte laster fra kontaktbredden b_w	34
Figur 3.29: Spredningsvinkel β	34
Figur 3.30: Tverrsnitt av stålbjelke for klassifisering av steg.....	39
Figur 3.31: Tverrsnitt av stålbjelke for klassifisering av flens.....	40
Figur 3.32: Hovedfaser og moduler i en livsløpsvurdering.....	44
Figur 3.33: Skjerm bilde fra Excel-regnearket VegLCA v4.10.....	45
Figur 4.1: Fagverk i Tveit bru.....	49
Figur 4.2: Tverrspent dekke i Tveit bru.....	50
Figur 4.3: Fargeskala for utnyttelsesgrad.....	51
Figur 4.4: Klimagassutslipp fra modul A1-A4 fordelt etter materiale.....	56
Figur 4.5: Fordeling av klimagassutslipp fra trevirke.....	57
Figur 4.6: Fagverk med 4 ledd i Trebru 2.....	61
Figur 4.7: Endret plassering av trafikklaster for lasttilfelle 1, Trebru 2.....	62
Figur 4.8: Endret plassering av trafikklaster for lasttilfelle 2, Trebru 2.....	62
Figur 4.9: Lengdesnitt av Skjerdingsstadbrua.....	78

Figur 4.10: Lengdesnitt av Hofstadbrua.....	78
Figur 4.11: Lengdesnitt av Stillingabrua.....	79
Figur 5.1: Sammenlikning av klimagassutslipp for trebruene.....	84
Figur 5.2: Sammenlikning av klimagassutslipp for trebrua og betongbruene.....	85

Tabeller

Tabell 2.1: Enkelte fasthetsverdier for GL30c og GL30h fra NS-EN 14080.....	7
Tabell 2.2: Systemegenskaper til tverrspente dekker i henhold til Eurokode 5-2.....	12
Tabell 3.1: Karakteristiske trafikklaster i lastmodell 1.....	25
Tabell 3.2: Dimensjonerende trafikklaster i lastmodell 1 for trebrua.....	25
Tabell 3.3: Verdier av kombinasjonsfaktorer for vegbruer.....	25
Tabell 3.4: Partialfaktorer for ulike trematerialer og -produkter.....	27
Tabell 3.5: Verdier av fasthetsfaktoren k_{mod}	27
Tabell 3.6: Dimensjonerende friksjonskoeffisienter.....	39
Tabell 3.7: Material- og elementliste for utslippsanalyse av trebruene.....	47
Tabell 4.2.1: Krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 1, Trebru 0.....	51
Tabell 4.2.2: Krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 2, Trebru 0.....	52
Tabell 4.2.3: Krefter, momenter og utnyttelsesgrad i tverrbærerne, Trebru 0.....	52
Tabell 4.2.4: Spenninger og utnyttelsesgrad i dekket, Trebru 0.....	53
Tabell 4.2.5: Nedbøyning av Trebru 0.....	54
Tabell 4.2.6: Utnyttelsesgrader for Trebru 0.....	54
Tabell 4.2.7: Materialmengder for Trebru 0.....	55
Tabell 4.2.8: Klimagassutslipp for Trebru 0.....	55
Tabell 4.3.1-4.3.8: Samme tabeller for Trebru 1.....	57-60
Tabell 4.4.1-4.4.8: Samme tabeller for Trebru 2.....	62-65
Tabell 4.5.1-4.5.8: Samme tabeller for Trebru 3.....	66-69
Tabell 4.6.1-4.6.8: Samme tabeller for Trebru 4.....	70-73
Tabell 4.7.1-4.7.8: Samme tabeller for Trebru 5.....	74-77
Tabell 4.8.1: Hovedinformasjon om betongbruene.....	78
Tabell 4.8.2: Material- og elementliste for utslippsanalyse av betongbruene.....	79
Tabell 4.8.3-4.8.5: Materialmengder for betongbruene.....	80
Tabell 4.8.6-4.8.8: Klimagassutslipp for betongbruene.....	81
Tabell 5.1: Oversikt over utnyttelsesgrad for trebruene.....	82

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

En rekke nye motorveier bygges i Norge, og de krysser typisk eksisterende veinettverk. Dette skaper behov for et stort antall nye overgangsbruer. I Norge er overgangsbruer nesten eksklusivt laget av betong. Av de rundt 17 800 bruene på Norges Riksvei- og Fylkesveinettverk som Statens vegvesen er ansvarlige for [1], er kun 134 av dem trebruer, hvorav 55 er åpen for motorisert trafikk [2]. Med andre ord er det et stort potensial for økt bruk av trebruer som overgangsbruer i Norge. Den siste tiden har viktige aktører i industrien i Norge omfavnet det grønne skiftet mot mer klimavennlige løsninger. Nye Veier, som fungerer som byggherre for flere overgangsbruer langs nye motorveier, har satt som målsetning å kutte klimagassutslipp med 40 % i konstruksjonsfasen og 75 % i driftsfasen [3]. De nevner blant annet «bevisst valg av materialer og materialmengder» som en av måtene de vil oppnå et redusert karbonavtrykk på. Tre er trolig et mer klimavennlig konstruksjonsmateriale enn betong [4], og i et klimaperspektiv vil det være logisk å bygge flere trebruer etter hvert som behovet for overgangsbruer over motorveier øker. En av utfordringene er manglende kunnskap og erfaring med tre og trebruer blant aktørene i industrien. Derfor er det av interesse å se på hvordan trebruer kan optimaliseres med tanke på klimagassutslipp og hvordan ulike bruparametere påvirker trebrua. Trebruer med spenn store nok til å krysse motorveier kan oppnås ved bruk av fagverk som hovedbæresystem. Derfor er det fagverksbruer i tre som skal undersøkes dypere i denne oppgaven.

1.2 Mål

Hovedmålet med denne oppgaven er å undersøke hvordan en gjennom bruparameterendringer kan optimalisere materialbruken i en fagverksbru i tre for å redusere karbonavtrykket. Oppgaven tar også sikte på å undersøke konkurransedyktigheten til en fagverksbru i tre som et alternativ til overgangsbruer i betong i et klimaperspektiv.

1.3 Omfang

Oppgaven omfatter følgende:

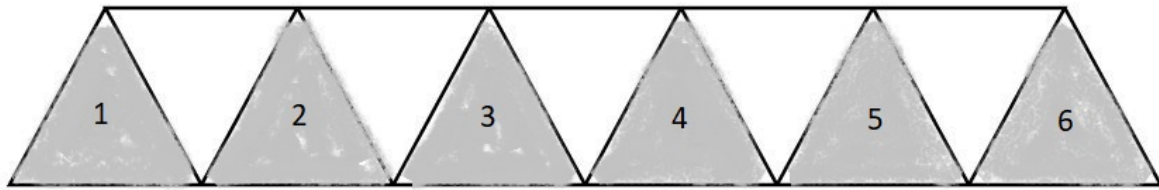
- En teoridel som utdyper:
 - o Tre som byggemateriale, fagverksbruer i tre og tverrspente dekker
- En metodedel som omfatter:
 - o Arbeidsflyt med programvare for å lage og teste en parametrisert brumodell
 - o Lastmodell, lastkombinasjoner og lasttilfeller for konstruksjonsanalyse av trebrua
 - o Kapasitet for trebruelementer
 - o Metodikk for utslippsanalyse
- En parametrisk analyse som:
 - o Undersøker hvilken effekt endring av bruparameterne fagverkshøyde, antall fagverksledd og dekketykkelse har på utnyttelsesgraden til bruelementene og klimagassutslipp for trebrua
- Et delkapittel som sammenlikner klimagassutslipp for trebrua med 3 overgangsbruer i betong
- En diskusjonsdel med:
 - o Diskusjon og tolkning av resultatene fra den parametriske analysen og utslippsanalysen, usikkerhetsmomenter og videre forskning

1.4 Parametere og begrensninger

Parameterne som skal undersøkes i trebrua er:

- Fagverkshøyden
- Antall fagverksledd
- Dekketykkelsen

Antall fagverksledd er i denne oppgaven definert som antall «liggende» trekantformer i fagverket. For fagverket i figur 1.1 er hvert fagverksledd skravert, og fagverket består av 6 fagverksledd.



Figur 1.1: Fagverk med 6 fagverksledd skravert

Alle andre bruparametere som f.eks. spennvidde, bredde og materialer holdes konstante gjennom den parametriske analysen.

I oppgaven er følgende forenklinger og begrensninger gjort med tanke på omfang og fokusområdet til oppgaven.

- Fagverket anses som en ideell fagverksmodell
- Knutepunkt i fagverket antas å ha tilstrekkelig kapasitet
- Kun bruddgrensetilstanden for konstruksjonsdeler STR betraktes
- Lastkombinasjonene inkluderer vertikale laster fra egenvekt og trafikklaster
- Horisontale laster fra vind, bremsing og andre kilder sees bort ifra
- Utslippsanalysen er avgrenset til LCA-modulene A1-A4 og B4-B5

Implikasjonene av forenklingene og begrensningene er flersidet. For det første så begrenser det omfanget av oppgaven og gjør at oppgaven kan sikte seg mer spesifikt inn på fokusområdene. På den andre siden må resultatene fra analysene sees i lys av forenklingene og begrensningene som er gjort. Resultatene vil ikke være like altomfattende og vil ikke gi et like helhetlig bilde av virkeligheten som en analyse uten begrensninger eller forenklinger. Forenklingene og begrensningene og hvorfor de er gjort er videre behandlet og diskutert i de forskjellige kapitlene der de hører hjemme.

2 Fagverksbruer i tre

2.1 Tre som byggemateriale

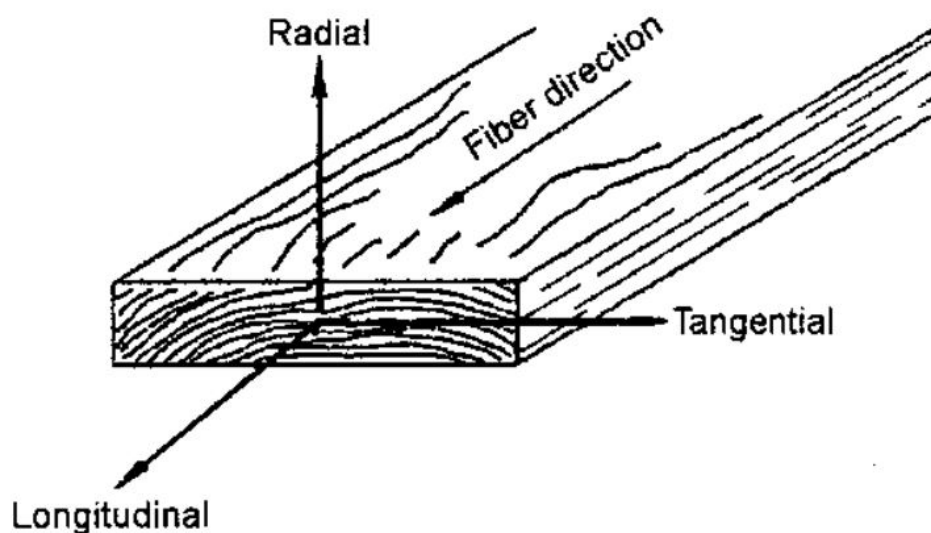
Tre har en lang historie som byggemateriale i Norge, og har lenge blitt brukt til hus, hytter og bruer. I Norge har tre blitt brukt i bygging av hjem siden vikingtiden, mens trebruer har blitt bygd i flere hundre år av ulik kompleksitet. I verden ellers vet en at trebruer har blitt bygget så langt tilbake som 600 f.Kr [5]. Tre har mange gunstige egenskaper som gjør det godt egnet som byggemateriale. Blant annet er det lett tilgjengelig, miljøvennlig, lett å håndtere og bearbeide, estetisk tilfredsstillende, og har gode mekaniske egenskaper.

Tre er det mest tilgjengelige av de oftest benyttede byggematerialene betong, stål og tre. En stor grunn til det er at skog dekker rundt 38 % av Norges landareal [6]. Tilgjengeligheten av tre i Norge er en viktig faktor for at de fleste hus bygges i tre. Det sirkulære kretsløpet med avskoging, påskoging og naturlig skogutvidelse sørger for at skogarealet i Norge holder seg ved like [7]. Dermed er tre et tilgjengelig byggemateriale også for framtiden.

En av de største fordelene med tre som byggemateriale er at det er mer miljøvennlig og bærekraftig sammenliknet med de konkurrerende byggematerialene. Tre har en netto positiv effekt på klimaet med tanke på klimagassutslipp om en ser på livsløpet fra treet blir plantet og gjennom bruksperioden for trevirke. Trær absorberer karbondioksid (CO₂) fra atmosfæren mens de vokser, og lagrer det videre i stammen, grener og blader. Denne CO₂-en forblir lagret i treet gjennom dets levetid og beholdes også gjennom tømmerproduksjon, bearbeiding av trevirket og gjennom brukstiden for ulike trekonstruksjoner. Det er først når trevirke forbrennes eller råtner at den absorberte CO₂-en slippes ut. Norske bruer prosjekteres med en levetid på 100 år, slik at trevirkets absorberte CO₂ ligger lagret i trebrua gjennom hele bruas levetid. På den ene siden kan en si at det bare blir å forskyve klimagassutslippene framover. Samtidig er 100 år veldig lenge i et teknologisk tidsperspektiv, og det er fullt mulig at karbonfangst og -lagring ved energigjenvinning av trevirke har blitt mer effektivt når trebrua skal avhendes i framtiden.

Sammenliknet med produksjonen av stål og betong er produksjonen av tømmer mer klimavennlig. Tømmerproduksjon krever mindre fossil energi per volumenhet skapt, og sammenliknet med standard betong sparer en rundt 800 kg CO₂e (karbondioksidekvivalent) i utslipp for hver m³ sagd tømmer som produseres [8]. Om en tar hensyn til den lave densiteten til tre og ser på utslipp per masseenheter skapt, er tømmer også å foretrekke. Det gir rundt 1.35 kg mindre CO₂e-utslipp per kg sagd tømmer enn for standard betong [8].

Tre er et ortotropisk materiale, og det har unike egenskaper i ulike retninger. De tre hovedretningene er bestemt i forhold til fiberretningen i trematerialet. Den langsgående aksene går parallelt med fiberretningen, den radielle aksene går vinkelrett på både fiberretningen og årringene, mens den tangentielle aksene går vinkelrett på fiberretningen og tangent på årringene.



Figur 2.1: Hovedakser i tre i forhold til fiberretning og årringer [9]

Forskjellen i treets egenskaper mellom radiell og tangentiell retning er relativt liten. Det er derimot store forskjeller i egenskaper når en sammenlikner de to retningene med den langsgående retningen [10]. Derfor skilles det vanligvis bare mellom langsgående og vinkelrett retning, der radiell og tangentiell retning inngår i sistnevnte.

2.2 Limtre

Limtre er et konstruksjonselement av tre som er bygd opp av flere lag med lameller som er limt sammen. Lamellene som inngår i et limtreelement limes sammen slik at

fiberretningene til lamellene er parallelle med hverandre. Ved å lime sammen flere lameller skaper en et konstruksjonselement som er sterkere og mer solid enn lamellene er på egen hånd. Det gjør at limtreelementer kan benyttes over større spenn og for tyngre laster enn for vanlig trevirke.

Dimensjonene til limtreelementet bestemmes av lamellens bredde, tykkelse og lengde, og hvor mange lameller limtreelementet består av. Høyden for et limtreelement, f.eks. en limtrebjelke, er da et produkt av hvor stor lamelltykkelsen er og antallet lameller som er limt sammen. Det er i utgangspunktet ikke noen teoretisk begrensning på hvor lange limtreelementene kan være, men som oftest ligger den begrensende faktoren i fabrikking og transport av limtreelementene [10].



Figur 2.2: Limtreelement bestående av 7 lameller [11]

I trebruer er limtre egnet som blant annet bjelker i over- og undergurt, diagonale trykk- og strekkstaver i fagverk, tverrspente brudekker og bjelker i buebruer. Limtre deles inn i ulike fasthetsklasser. Fra standarden for limtre NS-EN 14080 finner en materialinformasjon for ulike fasthetsklasser for limtre, som f.eks. GL30c. GL står for det engelske uttrykket for limtre, «glue laminated timber», som ofte forkortes til «glulam». Tallet som følger etter står for limtreets karakteristiske bøyefasthet. Videre skilles det mellom limtre som er satt sammen av lameller kun fra samme fasthetsklasse, og limtre der de midtre lamellene har en lavere fasthetsklasse enn de ytre lamellene. Den første typen limtre angis i fasthetsklassen med en h (for homogen) etter den karakteristiske bøyefastheten. Den andre typen limtre angis med en c (for combined).

Tabell 2.1: Enkelte fasthetsverdier for GL30c og GL30h fra NS-EN 14080

Egenskap	Symbol	GL30c	GL30h
Bøyefasthet	f_{mk}	30	30
Skjærfasthet	f_{vk}	3.5	3.5
Strekfasthet	f_{t0k}	19.5	24
Trykkfasthet	f_{c0k}	24.5	30

Som en ser av tabell 2.1 er bøy- og skjærfastheten den samme for GL30c og GL30h. Det er derimot en forskjell i strekk- og trykkfastheten, der den homogene typen limtre har høyere verdier. Den homogene limtreetypen kan derfor være mer egnet for søyler og rene strekk- og trykkstaver, mens den kombinerte limtreetypen kan være bedre egnet for bjelker eller tverrspente dekker [10].

2.3 Fagverk

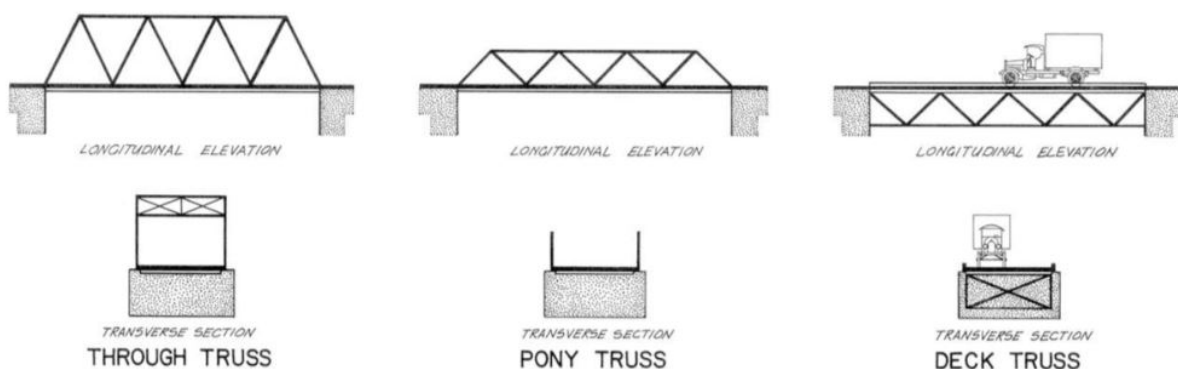
Et fagverk kan defineres som en samling av strukturelle medlemmer som danner et stivt rammeverk [12]. Videre kan et fagverk vanligvis deles inn i rette enkeltmedlemmer, ofte kalt staver, en overgurt og en undergurt. Stavene er knyttet til hverandre og gurtene i knutepunkter. Stavene og gurtene er tilknyttet og organisert slik at de sammen danner et nettverk av trekanter. Stavene er såkalte «tokraftsmedlemmer», som vil si at krefter kun påføres ved stavens to endepunkter. Det betyr at det ikke er noen momenter som påføres stavene, og at stavene enten er i strekk eller trykk, eller veksler mellom de to. Overgurten er den øvre langsgående delen av fagverket og er vanligvis i trykk. Undergurten er den nedre langsgående delen av fagverket og er vanligvis i strekk. Trekantformene gir fagverket strukturell stabilitet og tillater jevn lastfordeling.

Fagverk benyttes blant annet i bruer, tak i bygninger og i kraner. Det finnes flere fordeler med å benytte fagverk i konstruksjoner. En kan oppnå større spennvidder enn om en hadde benyttet enkle rette bjelker. Fagverk har en relativt lav egenvekt sammenliknet med bjelker på grunn av den effektive strukturen. De trenger mindre mengder materiale for å bære en gitt last, og bruk av fagverk kan derfor redusere materialkostnader. Videre reduserer fagverk nedbøyningen og de er kapable til å bære større laster enn bjelker.

2.4 Fagverksbruer i tre

Med en bru menes en konstruksjon som spenner over en elv, vei eller annen hindring og som tillater mennesker og kjøretøy å krysse fra den ene til den andre siden [13]. En bru kan hovedsakelig deles inn i to deler: en overbygning og en underbygning. Overbygningen består vanligvis av hovedbæresystemet, mens underbygningen kan bestå av blant annet pilarer ned til grunn, fundament og landkar. Hovedfunksjonen til underbygningen er å fordele og overføre lastene fra brua og ned til grunnen, og danne en trygg base for overbygningen [10]. For noen bruer vil underbygningen også inkludere et hovedbæresystem som ligger under brudekke. Trebruer kjennetegnes ved at selve hovedbæresystemet er laget av tre. Andre deler av brua, slik som underbygningen vil vanligvis bli konstruert i andre materialer som betong og stål siden disse ofte er bedre egnet der.

Fagverksbruer består vanligvis av to fagverksvegger, et brudekke og avstivende elementer. Fagverksbruer kan utføres på en rekke forskjellige måter, både med tanke på plassering av dekket og geometrisk utforming av fagverket. Ulike fagverksbruer kan i første instans skilles på hvor dekket er plassert i høyden i forhold til fagverket. Det kan være plassert langs undergurtene, over eller langs overgurtene, eller et sted mellom over- og undergurtene, illustrert i figur 2.3.

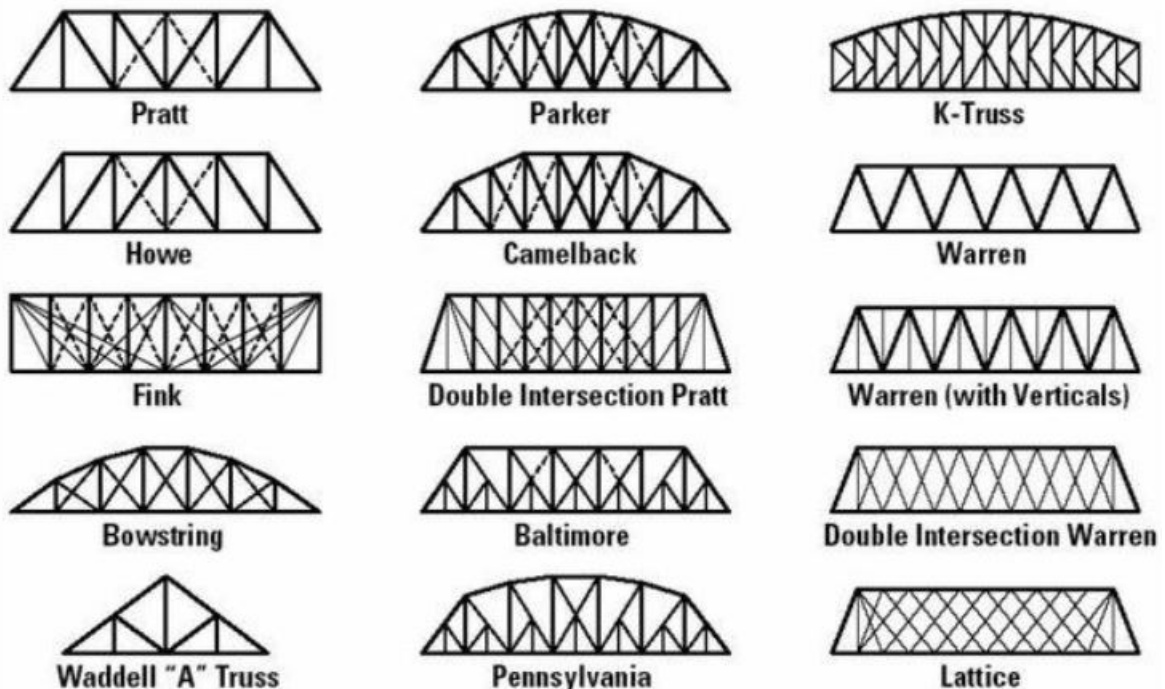


Figur 2.3: Fagverksbruer med ulik plassering av brudekke i forhold til fagverk [14]

Figur 2.3 viser også hvordan avstivningen er forskjellig for de ulike typene. For det som på engelsk kalles «deck truss» avstives overgurtene av selve dekke. Denne typen bruer kan være nyttige over elver, daler og generelt der fagverket ikke er i veien for ulik type undergående trafikk. «Pony truss» typen oppnår avstivning av overgurtene ved hjelp av U-formen som dannes av fagverksveggene og f.eks.

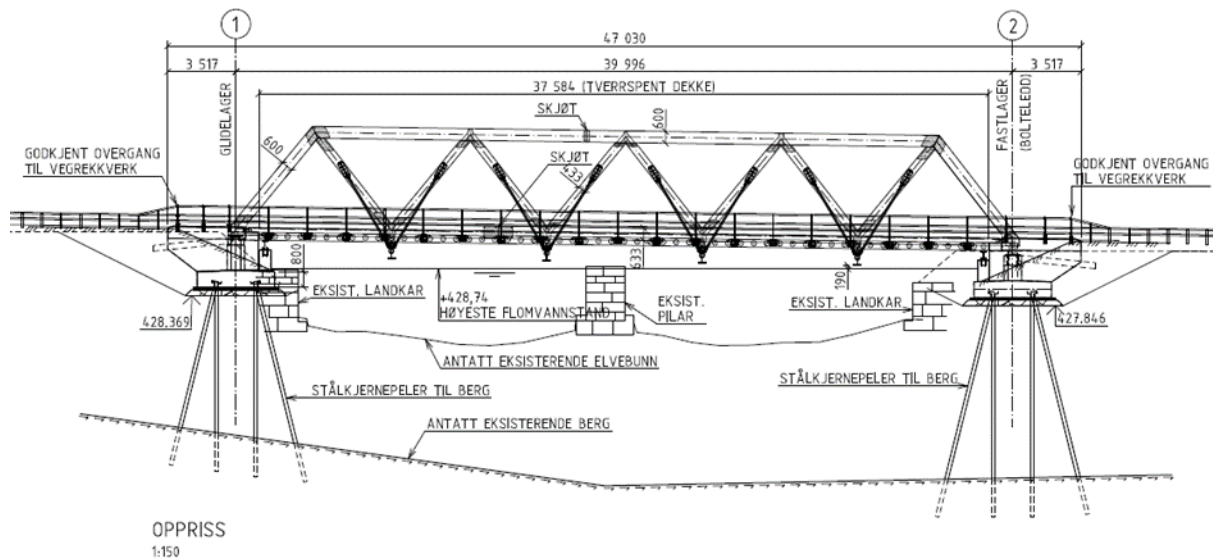
underliggende tverrbærere. «Through truss» typen har avstivning mellom de to overgurtene og gir bedre avstivning enn U-formen, men begrenser også den frie høyden og dermed høyden på kjøretøy som kan passere gjennom. Jo større spennvidden på fagverksbrua er jo større er også behovet for avstivning. For typiske overgangsbruer over motorveier med spenn på rundt 40 meter er det fullt mulig å benytte seg av avstivning gjennom U-formen. Dette er basert på utformingen av flere av fagverksbruene som går over norske motorveier.

Videre er det i teorien veldig mange forskjellige måter fagverket kan utformes geometrisk. Det er likevel en del kjente typer som er mer brukte enn andre, og noen av disse er avbildet i figur 2.4 nedenfor.



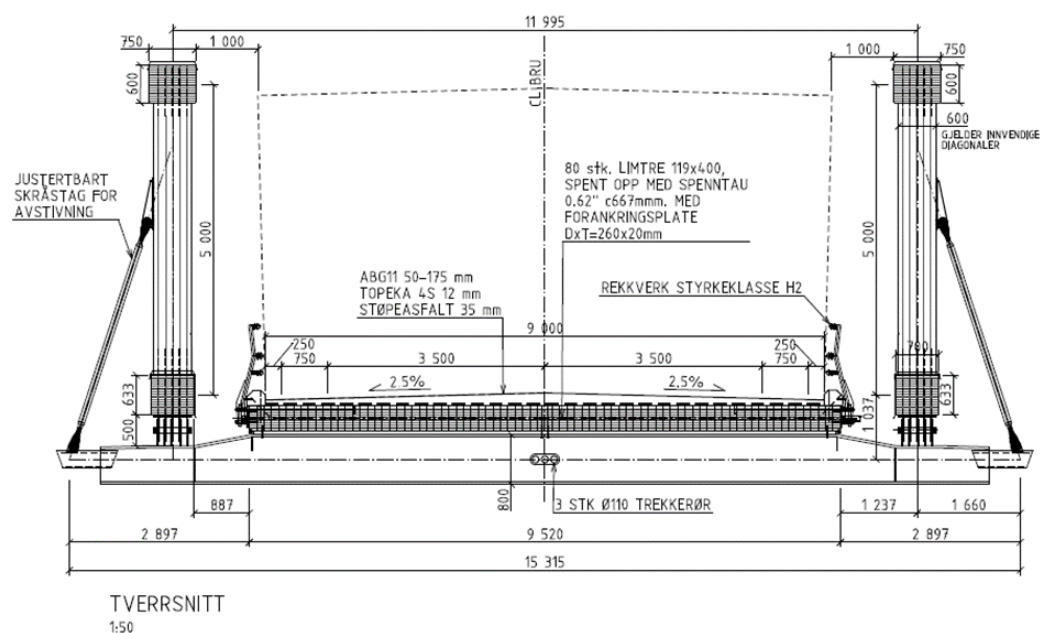
Figur 2.4: Ulike fagverkstyper [15]

2.4.1 Tveit bru



Figur 2.5: Lengdesnitt av Tveit bru [16]

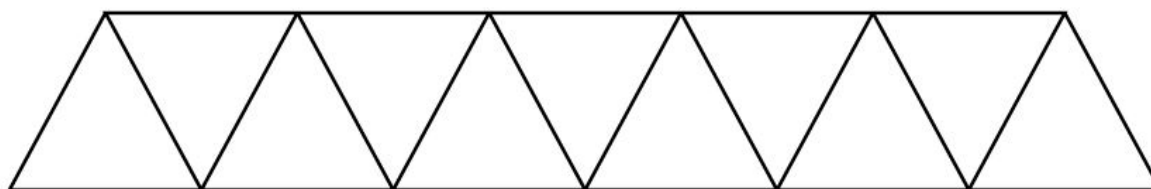
Tveit bru, som brumodellen i oppgaven vil baseres på, er en norsk fagverksbru i tre som ble bygget i 2020. Brua krysser en elv, men på grunn av brulengden og bæresystemet er selve brukonseptet overførbart til en overgangsbru over motorvei. Det statiske bæresystemet er fagverk av typen Warren. Den har et spenn på 40 meter og et glidelager og et fastlager i de to endene. Trafikklastene overføres fra det tverrspente brudekket til underliggende tverrbærere og ut til de to fagverksveggene. Videre overfører fagverket kreftene til lagrene, betongfundamentene og stålpelene i endene. Skråstagene bidrar til sideveis avstivning.



Figur 2.6: Tverrsnitt av Tveit bru [16]

2.4.2 Warren-fagverk

Det er flere fordeler og ulemper med de ulike typene fagverk. Warren-fagverket består av en overgurt og undergurt som er bundet sammen av diagonale staver i en relativt enkelt utforming. Sett fra siden utgjør denne geometrien en rekke med vekselvis omvendte trekanter. Disse trekantformene tillater at lasten på brua kan spres relativt jevnt utover delene av fagverket. De diagonale stavene veksler mellom å være i trykk og strekk fra stav til stav. Stavene er videre av lik lengde som gjør det mer økonomisk og lettere å fabrikkere. Den geometriske utformingen til Warren-fagverket er ganske materialøkonomisk, og krever mindre materialer enn andre fagverkstyper. En ulempe ved Warren-fagverk er at det ikke sprer konsentrerte laster like bra som den sprer fordelte laster i fagverket [17].



Figur 2.7: Warren-fagverk

Det som knytter sammen de ulike limtreelementene i fagverksbruer er knutepunktene. De utføres som oftest i stål med innslissede plater og stavdybler. For denne oppgaven beregnes fagverkene som ideelle fagverk, og knutepunktene antas å ha tilstrekkelig kapasitet og undersøkes ikke nærmere. I et ideelt fagverk vil knutepunktene være å anse som ideelle punkter og hovedsakelig overføre aksialkrefter [10]. Undersøkelser av et typisk fagverksknutepunkt med 3 staver har vist at en ideell fagverksmodell er mer representativ enn en rammemodell og at momenter som oppstår kun er nødvendig å sjekke i spesielle tilfeller [10].

2.5 Tverrspent dekke

Brudekket er et sekundært bæreelement i brua og kan overføre laster fra kjøretøy videre til underliggende tverrbærere. Det er ulike måter et dekke kan utføres på. For trebruer i Norge er bruken av tverrspente dekker veldig utbredt i dag. I et tverrspent dekke dannes et stivt dekke ved å spenne flere limtre lameller sammen på tvers av lengderetningen. Dette gjøres ved hjelp av spenntau eller spennstenger som forankres på hver side av dekket.



Figur 2.8: Tverrspent dekke fra Møllendammen bru [18]

Etter oppspenningen vil dekket i praksis fungere som en ortotropisk plate. Det vil si at dekkets egenskaper i lengderetning er ulik egenskapene i tverretningen. Dette kommer av limtreets ulike egenskaper i fiberretning, som går parallelt med dekkets lengderetning, og egenskapene vinkelrett på limtreets fiberretning. Elastisitetsmodul og skjærmodul for dekket, parallelt og på tvers av fiberretningen, noteres henholdsvis som E_0 , E_{90} , G_0 og G_{90} . Der 0 angir retning parallelt med fiberretningen, og 90 angir retning på tvers av fiberretningen. Ved beregning av systemstivheter i de to retningene nevner Håndbok N400 for Bruprosjektering at tabellen nedenfor fra Eurokode 5-2 skal benyttes [19]:

Tabell 2.2: Systemegenskaper til tverrspenne dekker i henhold til Eurokode 5-2 [20]

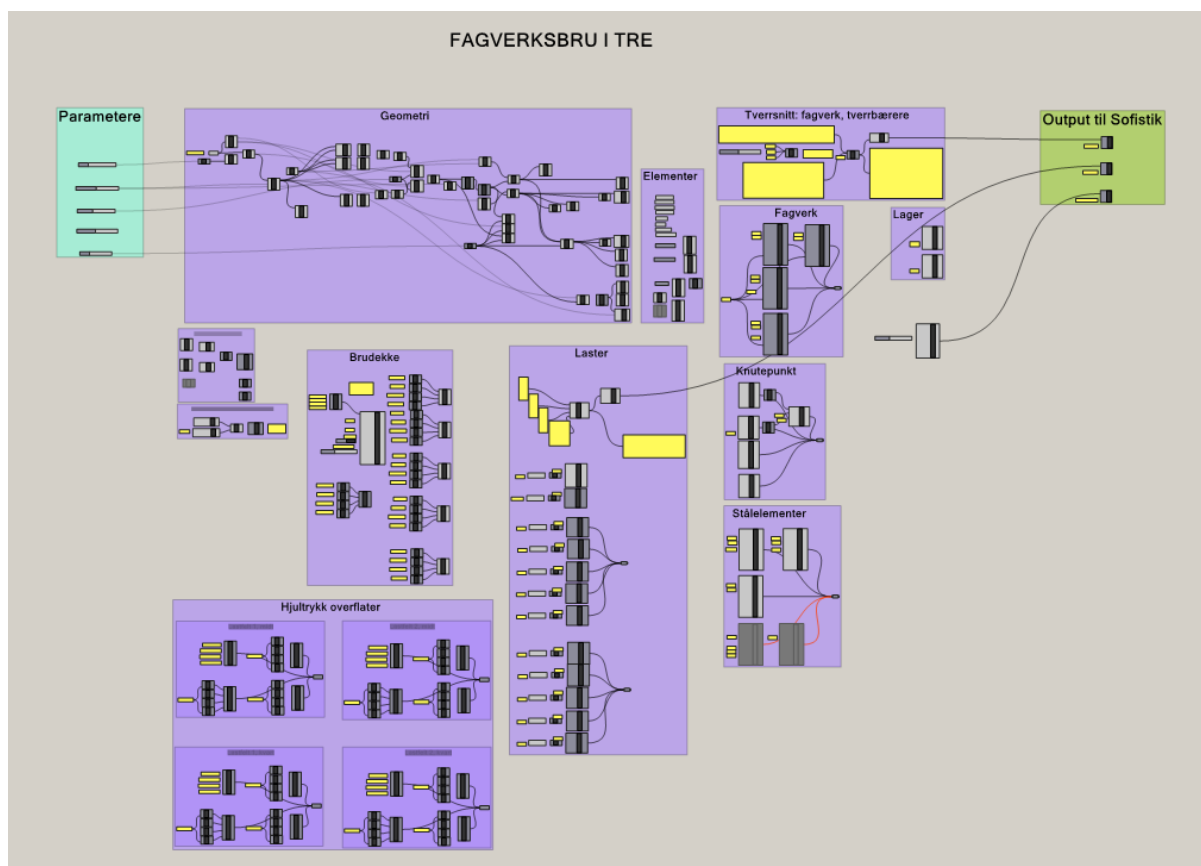
Type of deck plate	$E_{90,mean}/E_{0,mean}$	$G_{0,mean}/E_{0,mean}$	$G_{90,mean}/G_{0,mean}$
Nail-laminated	0	0,06	0,05
Stress-laminated			
– sawn	0,015	0,06	0,08
– planed	0,020	0,06	0,10
Glued-laminated	0,030	0,06	0,15

I tabell 2.2 ser en forholdene mellom de ulike elastisitets- og skjærmodulene for tverrspenne dekker. Det skiller videre mellom sagde og høvlede overflater. Notasjonen «mean» angir at det er den midlere stivhets- eller skjærmodulen som angis. E_0 for dekket har samme verdien som for limtrematerialet som brukes, mens resten av modulene beregnes ved hjelp av forholdstallene i tabellen.

3 Metode

3.1 Parametrisert brukskript og modell i Grasshopper og Sofistik

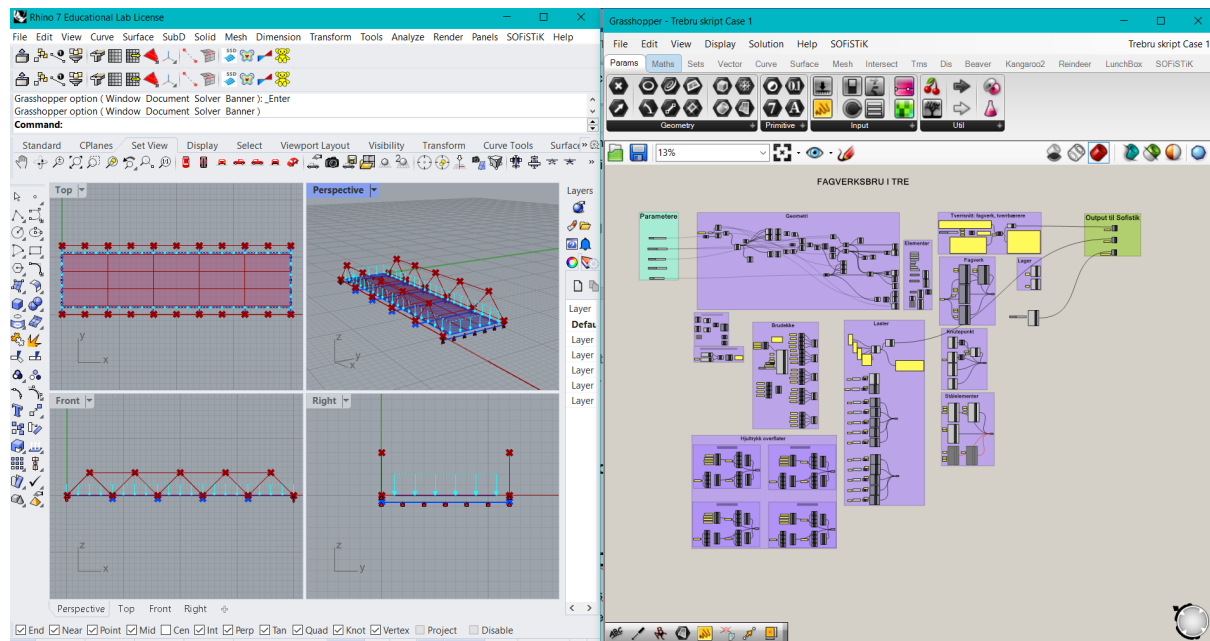
Selve metoden starter i det visuelle programmeringsverktøyet Grasshopper [21]. Det er et tilleggsprogram som kjører i DAK-programmet Rhino 7 [22], der DAK er kort for dataassistert konstruksjon. Grunnen til at Grasshopper brukes er for å lage en parametrisert trebrumodell. Det vil si at utformingen, egenskapene til trebrua og ulike bruparametere kan endres raskt ved noen tastetrykk. Dermed slipper en å modellere brua helt på nytt om en ønsker å endre noen parametere for å sammenlikne. Det endelige produktet som lages i Grasshopper kan gjerne overordnet kalles et visuelt skript for trebrua.



Figur 3.1: Egenprodusert brukskript i Grasshopper

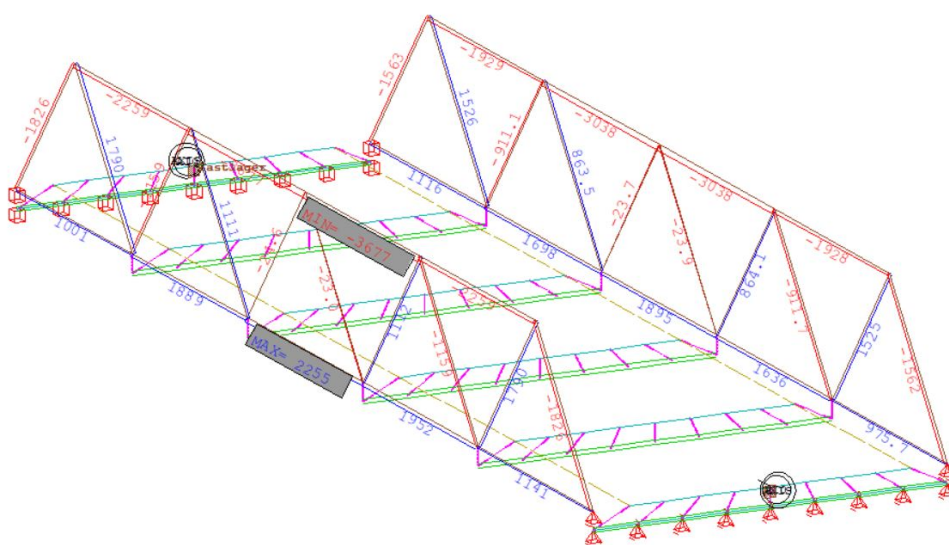
For gjennomførelsen av oppgaven er det i Grasshopper laget et brukskript fra bunnen av. Dette visuelle skriptet er grunnlaget for den geometriske modellen av trebrua,

med blant annet fagverk, tverrbærere og brudekke. Videre er de ulike elementene i den geometriske modellen tillagt relevante materialegenskaper. Tilleggsutvidelsen Sofistik Rhinoceros Interface tillater samarbeid mellom og overføring av data fra Grasshopper til analyseprogrammet Sofistik [23].



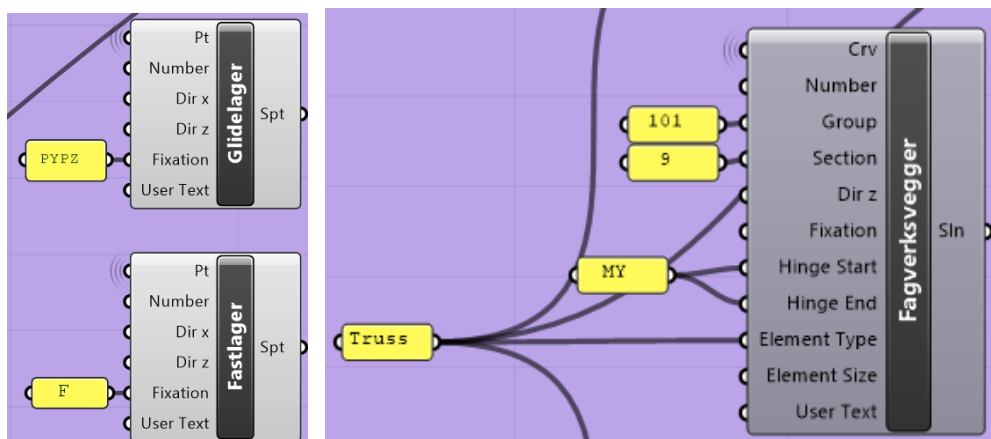
Figur 3.2: Den geometriske modellen av brua og endringer i skriptet visualiseres i Rhino 7 i det venstre vinduet

I det strukturelle analyseprogrammet Sofistik analyseres brua under lastkombinasjoner. Programmet gir en oversikt over resulterende krefter, momenter og spenninger i de ulike delene av brua. For resultatene som er gitt i kapittel 4 er verdiene av krefter, momenter og nedbøyning lest av i Sofistik.



Figur 3.3: Resulterende krefter i fagverk vist i Sofistik

Her vil brumodellen og randbetingelsene som er definert i Grasshopper beskrives. Fastlagene er fastholdt mot bevegelse og rotasjon i alle retninger. Glidelagene er fastholdt mot vertikal bevegelse og sideveis bevegelse på tvers av brua lengderetning. Fagverkselementene er definert som type «truss», og stavene er i endepunktene tillagt hengsler som tillater rotasjon i fagverksplanet, for å tilnærme et ideelt fagverk. Tverrbærerne er tilknyttet undergurten ved å lage en fast kobling («fixed connection») mellom endepunktet av tverrbæreren og det overliggende knutepunktet i undergurten. Det er også laget en fast kobling mellom tverrbærerne og undersiden av dekket.



Figur 3.4: Randbetingelser for lagre og fagverk

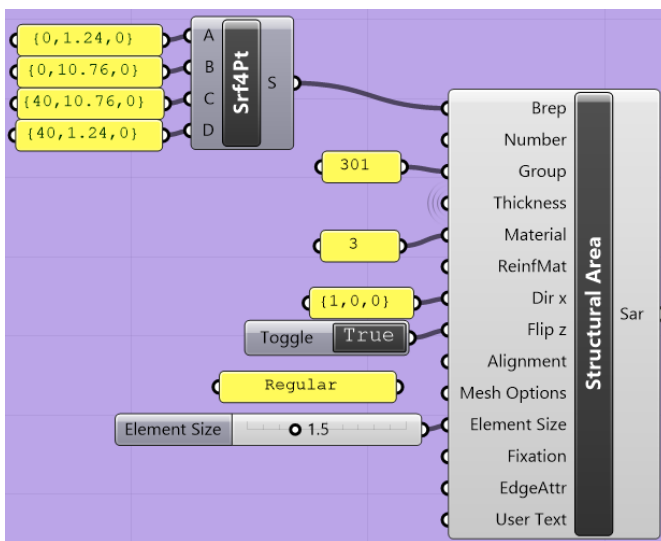
NORM	DC	NDC	CAT
EN	1995-2004	2	
TIMB	NO	TYPE	CLAS
1	GL	30c	5.2275
	SREC	1	0.633
	SREC	2	0.700
	SREC	9	0.433
			1.15
			0.750
			0.600

Figur 3.5: Material- og tverrsnittsinputt for fagverkselementer

I figur 3.5 vises materialinputen og tverrsnittsdimensjonene for fagverkselementene. I de første par linjene lastes den relevante Eurokoden inn. Deretter defineres material- og fasthetsklassen. Når disse er definert blir resten av de relevante materialverdiene automatisk definert i henhold til Eurokoden, fordi de ligger forhåndsregistrert i Grasshopper. Material og stivhetsverdiene er senere dobbeltsjekk og bekreftet at stemmer i Sofistik etter import av brumodellen. Dersom en vil endre på spesifikke materialverdier kan en spesifisere slik som er gjort

for tyngdetettheten (GAM) og partialfaktoren for materialer (SCM). SREC 1 angir høyden og så bredden av undergurtens tverrsnitt i meter. SREC 2 angir det samme for overgurtens og endestavenes tverrsnitt, mens SREC 9 angir det samme for stavenes tverrsnitt. Disse dimensjonene er som for Tveit bru.

Det tverrspente dekket er modellert som en ortotropisk plate. Dette er gjort ved å lage en strukturell overflate med en tykkelse lik dekket. Bredden av dekket er satt lik som for Tveit bru med 9.52 meter. Lengden er for enkelthets skyld satt lik 40 meter, som er ca. 2.5 meter lengre enn dekket i Tveit bru, men er lik spennvidden fra fastlager til glidelager. Den geometriske modellen av platen «meshes», som vil si at den deles opp i flere mindre elementer for å gi mer nøyaktige resultater. Samtidig fører en reduksjon av elementstørrelsen til mer tidkrevende beregningsprosesser for programvaren Sofistik. Her er elementstørrelsen satt lik 1.5 m x 1.5 m. Platen er videre gitt input som materialverdier og systemstivheter som stemmer overens for et tverrspent dekke, vist i figur 3.7.



Figur 3.6: Modellering av dekke

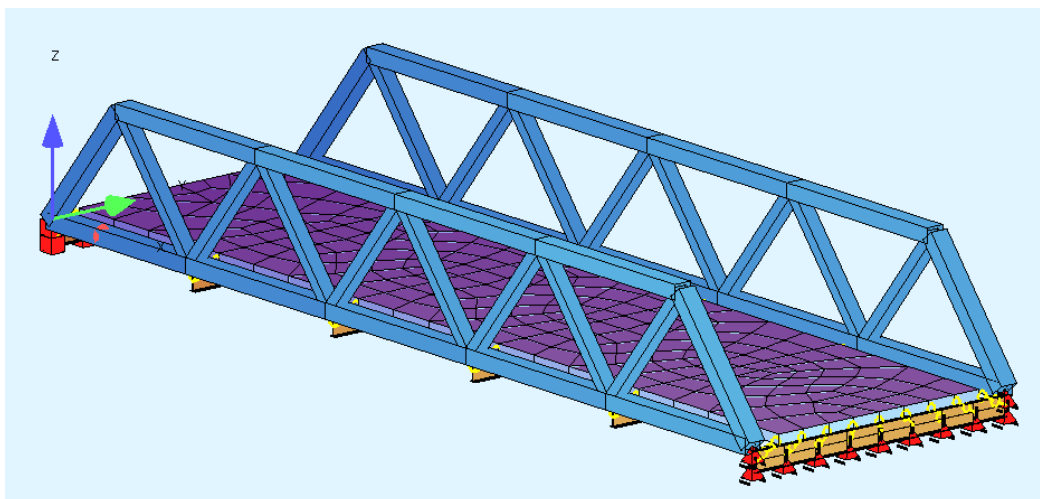
NORM	DC	NDC	CAT					SCM
EN	1995-2004	2						
TIMB	NO	TYPE	CLAS	GAM	EP/G	E90	G90	SCM
3	GL	30c	5.2275	13000	780	195	62.4	1.15

Figur 3.7: Material- og stivhetsinput for det tverrspente dekket

For tverrbærerne er materialinputen i figur 3.8 brukt. Tverrbærerne i Tveit bru har en varierende høyde i bjelkens lengderetning. Den største høyden er 800 mm og er konstant under hele dekket. Endestykkene av tverrbærerne er derimot 600 mm høye. I brumodellen er det gjort en forenkling og tverrbærerne har samme tverrsnittsdimensjoner over hele bjelkelengden. Tverrbærerne er satt til UB 838 x 292. Ettersom det kun er vertikale krefter som betraktes i analysen er utstikkerne av tverrbærerne fra undergurten og skråstagene utelatt fra brumodellen i konstruksjonsanalysen.

NORM EN 1993-2005									
STEE	NO	TYPE	CLAS	FY	FT	TMAX	SCM0	SCM1	SCM2
2	S	460N	460	540	40	1.10	1.10	1.25	
PROF 7 UB 838 292 176									

Figur 3.8: Material- og tverrsnittsinput for tverrbærerne



Figur 3.9: Visualisering av 3D-modell av trebrua i Sofistik

3.2 Laster

Her vil lasttilfeller og lastkombinasjoner som er benyttet i oppgaven diskuteres. Hvordan trafikklastene plasseres på brua har noe å si for hvordan brua vil reagere og hvordan krefter vil fordele seg. Trafikklaster kan etter Eurokode 1 del 2 deles inn i boggilaster og jevnt fordelte laster [24]. I teorien kan en plassere boggilastene og den fordelte lasten på utallig forskjellige måter. I et optimalt designscenario ville brumodellen gjerne blitt dynamisk testet for flere simulasjoner av kjøretøy som kjører fra en ende av brua til den andre. Dette er meget tidkrevende, og faller heller ikke

under hovedfokuset til oppgaven. Derfor er det gjort en forenkling, og det er dannet to lasttilfeller med ulik plasseringen av trafikklasterne.

Det skal sees på både lastkombinasjoner i bruddgrensetilstand og i bruksgrensetilstand ved analysen av brua. Disse defineres i *Eurokode 0* [25].

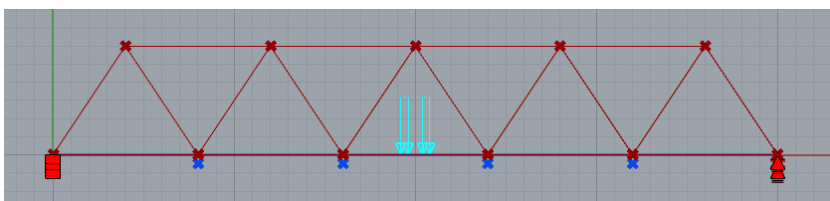
Bruddgrensetilstanden som vil undersøkes er brudd eller for store deformasjoner i konstruksjonen eller konstruksjonsdelene (STR). Bruksgrensetilstanden som skal undersøkes er nedbøyning av brua og der benyttes kun trafikklaster.

Bruddgrensetilstanden for statisk likevekt av konstruksjonen (EQU) er ikke i fokus i denne oppgaven. Den parametriske analysen tar til sikte å undersøke hvordan endring av bruparametere påvirker utnyttelsesgraden av de ulike konstruksjonsdelene. Bruddgrensen for statisk likevekt regnes med å være tilfredsstillt for sammenlikningsgrunnlaget for analysen, som er basert på Tveit bru. Fundamentering og opplagere forblir i teorien uendret i de ulike variasjonene av brua, lastene forblir de samme, og derfor anses EQU å være tilfredsstillt for de ulike bruvariantene.

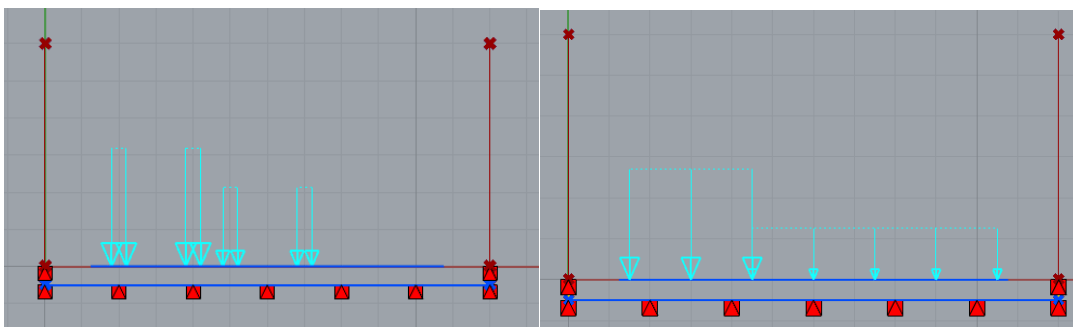
3.2.1 Lasttilfeller

Symmetrisk lasttilfelle: lasttilfelle 1

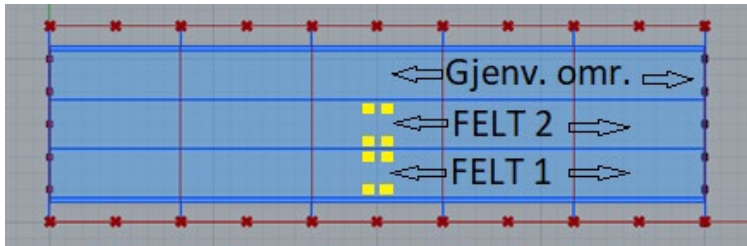
I lasttilfelle 1 er den jevnt fordelte lasten plassert over hele dekket, og boggilastene i felt 1 og 2 er plassert i midten av lengderetningen til brua. Plasseringen av trafikklasterne er i så måte symmetrisk i bruas lengderetning.



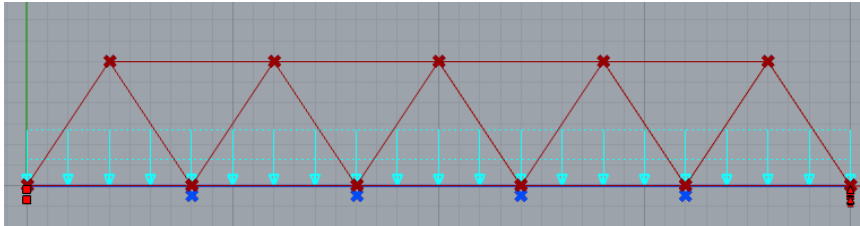
Figur 3.10: Plassering av boggilast i lengderetning



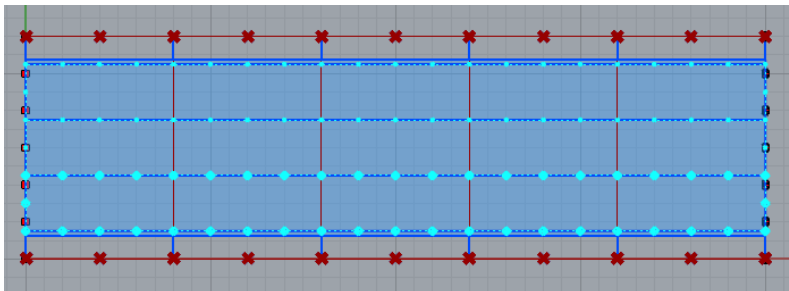
Figur 3.11: Plassering av boggilast (t.v.) og jevnt fordelt last (t.h.) i tverretning



Figur 3.12: Plassering av boggilast sett ovenfra og feltinndeling. Hvert gule kvadrat representerer en hjullast



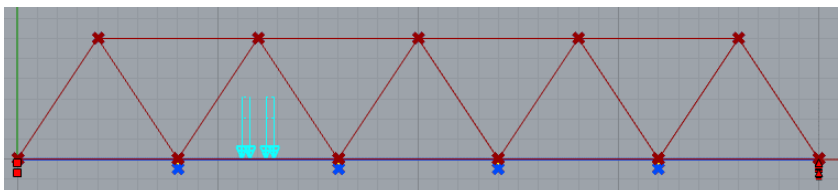
Figur 3.13: Plassering av jevnt fordelt last i lengderetning



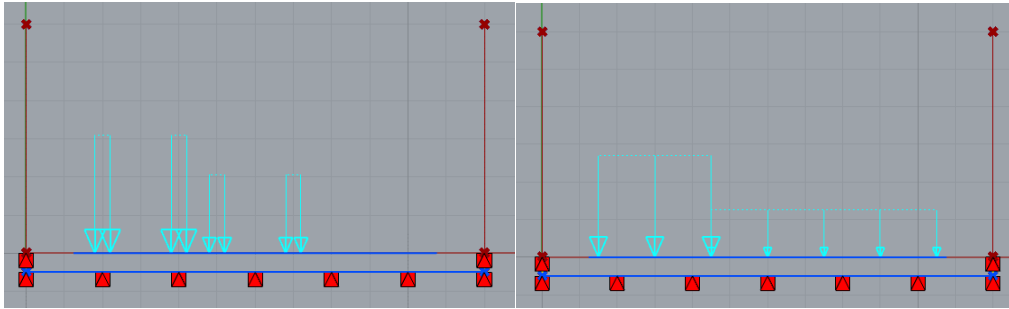
Figur 3.14: Plassering av jevnt fordelt last sett ovenfra

Usymmetrisk lasttilfelle: lasttilfelle 2

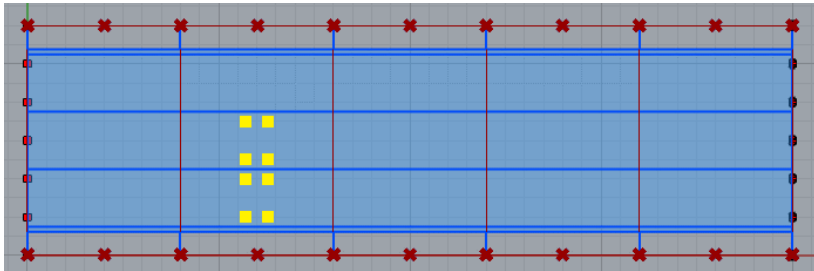
I lasttilfelle 2 er trafikklastene plassert slik at de er usymmetriske i bruas lengderetning. Feltinndelingen er som for lasttilfelle 1.



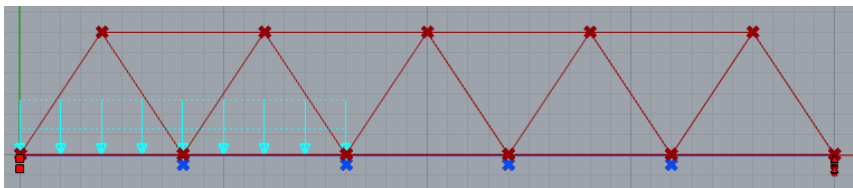
Figur 3.15: Plassering av boggilast i lengderetning



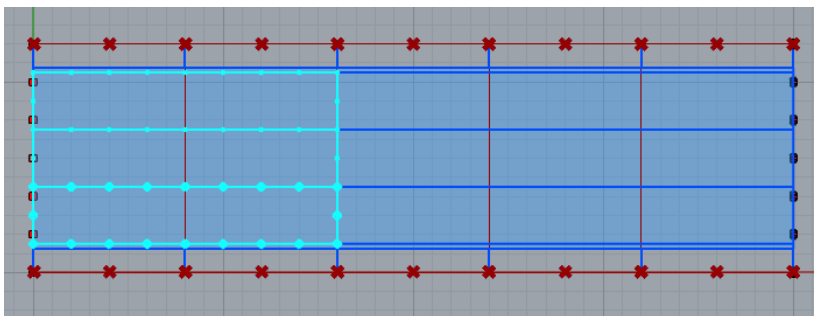
Figur 3.16: Plassering av boggilast (t.v.) og jevnt fordelt last (t.h.) i tverretning



Figur 3.17: Plassering av boggilast sett ovenfra



Figur 3.18: Plassering av jevnt fordelt last i lengderetning



Figur 3.19: Plassering av jevnt fordelt last sett ovenfra

3.2.2 Lastkombinasjoner

Ved prosjektering og sjekk av konstruksjonsdeler, uten geotekniske laster, brukes dimensjonerende laster fra tabell NA.A2.4(B) i Eurokode 0 [25]:

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

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

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

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

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

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

$\gamma_{G,inf}$ = 1,0 for permanent last ^{1) 2)}
 0 for irreversible deformasjonslaste ³⁾
 1,0 for vanntrykk

ξ = 0,89 for egenvekt ¹⁾

γ_p = verdier gitt i de aktuelle Eurokodene ⁴⁾

γ_{Q} = 1,35 for vegtrafikk fra kjøretøyer og fotgjengere, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)

Tabellen består av ett sett med to likninger, 6.10a og 6.10b, som angir hvordan de ulike type lastene kombineres. For trebrua i denne oppgaven er det to typer vertikale laster som skal brukes, egenvekten av brua og trafikklaste. Egenvekten av brua går inn under permanente laster som er ugunstige, mens trafikklastene på brua er den dominerende variable lasten.

Settet med likninger for kombinasjon av de dimensjonerende lastene blir da:

$$\text{Likning 6.10 a)} \quad \gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$$

$$\text{Likning 6.10 b)} \quad \xi \gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$$

Der:

$\gamma_{G,j,sup}$ - er partialfaktor for permanent påvirkning j ved beregning av øvre dimensjonerende verdi. Lik 1.35 for egenvekt

$\gamma_{Q,1}$ - er partialfaktor for dominerende variabel påvirkning 1, som også tar hensyn til modellusikkerhet og variasjon i dimensjonene. Lik 1.35 for trafikklast fra kjøretøyer

$\psi_{0,1}$ - er faktor for kombinasjonsverdi ψ_0 for dominerende variabel påvirkning 1

ξ - er reduksjonsfaktor lik 0.89 for egenvekt

$G_{k,j,sup}$ - er øvre karakteristiske verdi for permanent påvirkning j

$Q_{k,1}$ - er øvre karakteristiske verdi for dominerende variabel påvirkning 1

Den permanente påvirkningen j er her egenvekten, mens den dominerende variable påvirkningen 1 er trafikklasten.

3.2.3 Permanente laster

De permanente lastene som benyttes i brumodellen er egenvekten av fagverket, brudekket og tverrbærerne i tillegg til belegningsvekt fra slitelag og egenvekt av rekkverk.

Egenvekten av limtreet avhenger av både fukt og impregnering. Den nominelle tyngdetettheten γ_{mean} for limtre er gitt i tabell A.3 i Eurokode 1. Den er gitt for 12 % trefuktighet [19]. Limtreetypen som blir benyttet i fagverksbrua er GL30c. I tabellen er det ikke gitt noen verdi for GL30c, men derimot for nabostyrkeklassene GL28c ($\gamma_{mean} = 3.7 \text{ kN/m}^3$), og GL32c ($\gamma_{mean} = 4.0 \text{ kN/m}^3$). Tyngdetettheten for GL30c settes derfor lik verdien mellom disse to slik at $\gamma_{mean} = 3.85 \text{ kN/m}^3$.

Videre ganges den nominelle tyngdetettheten med en korreksjonsfaktor $\gamma_{sup,k}$ for å få den øvre karakteristiske tyngdetettheten. Korreksjonsfaktoren $\gamma_{sup,k} = 1.15$ for limtre som er beskyttet med beslag eller fuktisolasjon. Den øvre karakteristiske tyngdetettheten blir da lik 4.43 kN/m^3 . Videre spesifiserer Håndbok N400 et tillegg i tyngdetetthet på 0.8 kN/m^3 dersom treverket er kreosotimpregnert til klasse A [19]. Limtreet som benyttes i fagverksbrua er trykkimpregnert med kreosot i henhold til dette. Da blir den dimensjonerende tyngdetettheten for limtreet $\gamma = 5.23 \text{ kN/m}^3$.

Egenvekten av tverrbærerne settes lik 7800 kg/m^3 .

Den dimensjonerende belegningsvekten fra slitelaget er satt lik 4 kN/m^2 dekkeoverflate, som den er for Tveit bru.

For rekkverk benyttes en dimensjonerende vekt på 0.75 kN per løpemeter rekkverk.

3.2.4 Trafikklast: lastmodell 1

De vertikale trafikklastene fra kjøretøy representeres i *NS-EN 1991-2: Trafikklast på bruer* gjennom lastmodeller som dekker ulike typer effekter. Lastmodell 1 består av en konsentrert boggilast (TS, «Tandem system») og en jevnt fordelt last (UDL,

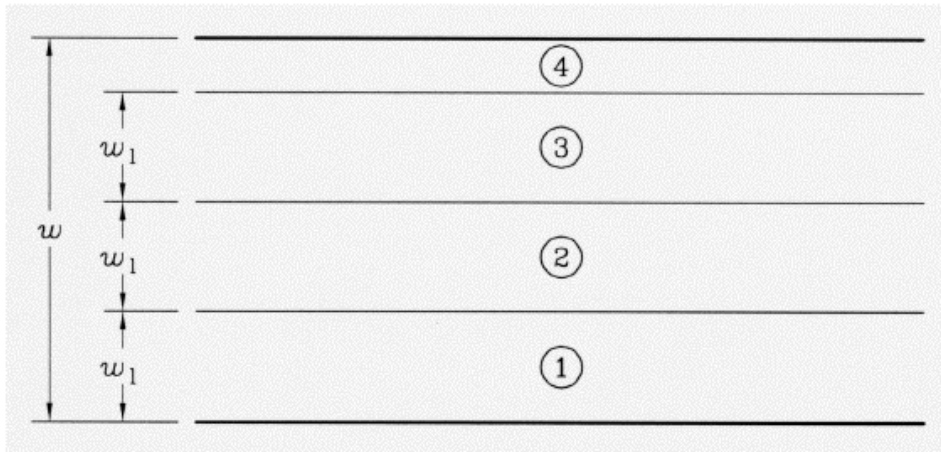
«Uniformly distributed load»). Denne lastmodellen dekker de fleste vertikale trafikkeffektene fra biler og større kjøretøy, og anbefales å bruke for generelle og lokale sjekker. Tveit bru var selv dimensjonert for lastmodell 3 som representerer aksellaster fra spesielle kjøretøy, f.eks. i forbindelse med industriell transport, som gir unormale laster. Lastmodell 1 velges i denne oppgaven da det gir et mer relevant og jevnbyrdig sammenlikningsgrunnlag opp mot andre overgangsbruer i betong med normal trafikk.

Før en kan gå dypere inn på trafikklastene må bruas kjørebane deles inn i felt. Kjørebane deles inn i flere felt for å kunne analysere effekten av ulike laster i feltene. I denne oppgaven er bruas effektive kjørebane 9 meter bred etter å ha tatt hensyn til rekkverk. Om en følger Eurokodens metode for å dele opp kjørebane får en tre felt med 3 meter bredde. I virkeligheten er det derimot ytterst sjeldent at bruer har et odde antall kjørefelt. Derfor er avgjørelsen tatt om å dele brua inn i 2 felt som er 3 meter brede hver, og et gjenstående område som er 3 meter bredt.

Carriageway width w	Number of notional lanes	Width of a notional lane w_l	Width of the remaining area
$w < 5,4$ m	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3$ m
$5,4$ m $\leq w < 6$ m	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
6 m $\leq w$	$n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_1$
NOTE For example, for a carriageway width equal to 11m, $n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = 3$, and the width of the remaining area is $11 - 3 \times 3 = 2$ m.			

Figur 3.20: Inndeling av felt etter EN 1991-2 [24]

Feltet som gir den mest ufordelaktige effekten nummereres felt 1, og feltet som gir den nest mest ufordelaktige effekten nummereres felt 2, osv. I praksis kan en generell inndeling se slik ut:



Figur 3.21: Generell inndeling av kjørefelt [24]

Der w er bredden til hele kjørebanelen og w_1 er bredden til feltene.

Boggilasten består av to aksellaster i et tandemsystem for å etterlikne lasten fra et kjøretøy. Hver aksel har lasten:

$$\alpha_Q Q_k \quad (3.1)$$

Der:

Q_k - er den karakteristiske aksellasten

α_Q - er en korreksjonsfaktor og $\alpha_Q = 1.0$ for felt 1, 2 og 3

Videre kan hver aksel deles opp i to overflater som representerer kjøretøyets dekkflate som er i kontakt med veibanen. Disse overflatene er lik $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$. Lasten på hver dekkoverflate, med andre ord hjullasten, er dermed $0.5 \alpha_Q Q_k$.

Den andre delen av lastmodell 1 består av en jevnt fordelt last:

$$\alpha_q q_k \quad (3.2)$$

Der:

q_k - er den karakteristiske jevnt fordelte lasten

α_q - er en korreksjonsfaktor

$\alpha_{q1} = 0.6$ for felt 1

$\alpha_{qi} = 1.0$ for $i > 1$ (dvs. for felt 2 og høyere)

$\alpha_{qr} = 1.0$ og er korreksjonsfaktor for jevnt fordelt last på gjenværende område (q_{rk})

De karakteristiske verdiene for aksellastene og de jevnt fordelte lastene har følgende verdier for de ulike feltene og gjenværende område:

Tabell 3.1: Karakteristiske trafikklaster i lastmodell 1 [24]

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

Med to felt og ett gjenværende område, og med hensyn til de tidligere nevnte korreksjonsfaktorene, blir de ulike dimensjonerende trafikklaster i lastmodell 1 som følger:

Tabell 3.2: Dimensjonerende trafikklaster i lastmodell 1 for trebrua

Plassering	TS	UDL
	Aksellaster (kN)	Fordelte laster (kN/m ²)
Felt 1	300	5.4
Felt 2	200	2.5
Gjenværende område	0	2.5

Den konsentrerte hjullasten for felt 1 er da 150 kN og tilsvarer en jevnt fordelt last over kontaktflaten mellom feltet og dekket lik:

$$\frac{150 \text{ kN}}{0.4 \text{ m} * 0.4 \text{ m}} = 937.5 \text{ kN/m}^2$$

Verdiene for kombinasjonsfaktorene ψ for trafikklaster i lastmodell 1 er definert som følger:

Tabell 3.3: Verdier av kombinasjonsfaktorer for vegbruer [24]

Påvirkning	Symbol	ψ_0	ψ_1	$\psi_2^{5)}$	$\psi_{1,infq}^{1)}$	
Trafikklaster (se NS-EN 1991-2, tabell 4.4)	gr1a	Boggilast (BL)	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
	(LM1 + horisontale laster + laster på gangbaner/fortau)	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)		-	-	-	-

I den tidligere nevnte lastkombinasjonen i likning 6.10a er det kombinasjonsfaktor ψ_0 som brukes for den dominerende variable lasten. Den er lik 0.7 både for boggilasten og den jevnt fordelte lasten fra lastmodell 1, og det er verdien som vil brukes. Ved å sette inn verdiene av de ulike faktorene i likning 6.10a og b får en:

$$\text{Likning 6.10 a)} \quad 1.35 G_{k,j,\text{sup}} + 0.945 Q_{k,1}$$

$$\text{Likning 6.10 b)} \quad 1.20 G_{k,j,\text{sup}} + 1.35 Q_{k,1}$$

3.3 Kapasitet

3.3.1 Kapasitet av fagverkselementer

Fagverkselementene består av overgurten, diagonale staver og undergurten. Overgurten utsettes for aksialt trykk, undergurten utsettes for aksialt strekk, mens stavene vekselvis utsettes for aksialt trykk og strekk. Overgurten og endestavene kan grupperes sammen da de i denne oppgaven har like tverrsnittsdimensjoner. Siden fagverket anses som et ideelt fagverk begrenses utnyttelsesgraden av strekk og trykk i fagverket til 70 % etter Eurokode 5 punkt 9.2.1(5). Dette er en anbefaling i Eurokoden for forenklete analyser av fagverk, og den er nok noe konservativ for fagverk i en bru, men velges å bruke i denne oppgaven.

I henhold til Eurokode 5 punkt 2.4.1(1) kalkuleres den dimensjonerende fastheten X_d etter følgende formel:

$$X_d = k_{\text{mod}} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (3.3)$$

Der:

X_k - er den karakteristiske verdien for en fasthetsegenskap

γ_M - er partialfaktoren for en materialegenskap

k_{mod} - er en fasthetsfaktor som tar hensyn til virkningen av lastvarigheten og fuktinnholdet

For limtre er partialfaktoren γ_M satt lik 1.15.

Tabell 3.4: Partialfaktorer for ulike trematerialer og -produkter [26]

Materialer og produkter	γ_M
Konstruksjonstre	1,25
Limtre	1,15
Parallellfiner (LVL), kryssfiner	1,15
OSB	1,3
Sponplater	1,3
Trefiberplater (alle typer)	1,3
Forbindelser	1,3
Spikerplater	tredelen 1,25
	ståldelen 1,0
Bruks- og ulykkeskombinasjoner	1,0

Fasthetsfaktoren k_{mod} avhenger av både lastvarighetsklassen og klimaklassen.

Klimaklassen settes vanligvis lik 3 for utendørskonstruksjoner [10]. Trebrua i denne oppgaven består av elementer som har beskyttelse mot fukt og omgivelsene. Både fagverket og det tverrspente dekket er trykkimpregnert med kreosot og Cu-salt. Toppiden av fagverkselementene er også beslaglagt med kobber. Trebrua kan derfor sies å være beskyttet mot påvirkning av fukt og kan dermed settes i klimaklasse 2. Lastkombinasjonen brua skal analyseres for består av egenvekten og trafikklasten. Egenvekten er en permanent last, mens trafikklasten regnes som en korttidslast. Ved kombinasjon av laster fra ulike lastvarighetsklasser velges fasthetsfaktoren for den korteste lastvarighetsklassen [26]. I dette tilfellet er dermed k_{mod} lik 0.90.

Tabell 3.5: Verdier av fasthetsfaktoren k_{mod} [26]

Materiale	Standard	Klima-klasse	Lastvarighetsklasse				
			Perma-nent last	Langtids-last	Mellom-langtids-last	Korttids-last	Øyeblikks-last
Konstruk-sjonstre	NS-EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Limtre	NS-EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

GL30c som er limtrematerialet som brukes i trebrua har følgende karakteristiske fastheter:

Karakteristisk strekkfasthet	$f_{t,0,k}$	19.5 MPa
Karakteristisk trykkfasthet	$f_{c,0,k}$	24.5 MPa

Ved å sette verdiene inn i formel 3.3 blir de dimensjonerende fasthetene:

Dimensjonerende strekkfasthet	$f_{t,0,d}$	15.26 MPa
Dimensjonerende trykkfasthet	$f_{c,0,d}$	19.17 MPa

Fagverkselementene har følgende tverrsnittsdimensjoner som holdes konstante igjennom den parametriske analysen:

- Overgurt og endestaver: 750 mm x 600 mm (B x H)
- Staver: 600 mm x 433 mm
- Undergurt: 700 mm x 633 mm

Ved å multiplisere de dimensjonerende fasthetene med fagverkselementenes tverrsnittsareal får en dimensjonerende kapasiteter for aksialt strekk og trykk som følger:

Endestaver trykkapasitet	$N_{c,Rd}$	8627 kN
Staver strekkapasitet	$N_{c,Rd}$	3965 kN
Staver trykkapasitet	$N_{t,Rd}$	4981 kN
Undergurt strekkapasitet	$N_{t,Rd}$	6762 kN

Der:

$$N_{t,Rd} = f_{t,0,d}A \text{ og } N_{c,Rd} = f_{c,0,d}A$$

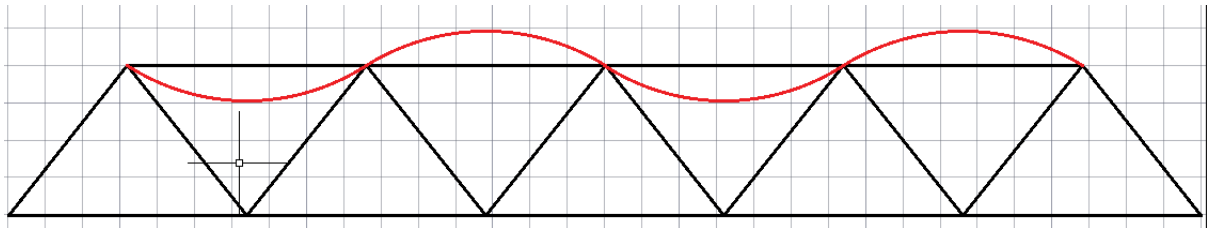
A - er det aktuelle fagverkselementets tverrsnittsareal

For overgurten er kapasiteten for aksialt trykk i utgangspunktet 8627 kN, men som det skal vises nedenfor vil knekking styre den dimensjonerende trykkapasiteten for overgurten.

Knekkning av overgurt

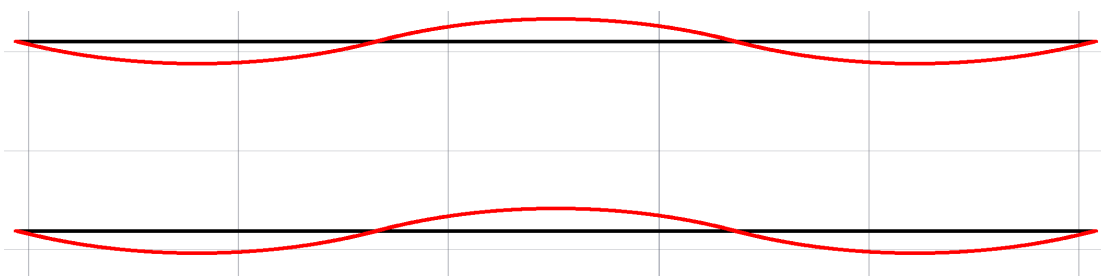
En mulig risiko for overgurten er knekking, enten i eller ut av fagverksplanet. I Tveit bru er det skråstag av stål som bidrar til å avstive fagverksveggene og overgurten i tverretning. I brumodellen som skal testes tas ikke skråstagene med i beregningen siden det kun gjennomføres en forenklet lineær analyse av krefter i vertikal retning. Det vil likevel gjennomføres en uavhengig sjekk for knekking av overgurten der

skråstagene er tatt hensyn til, for å sikre at kreftene i overgurtene ikke vil føre til knekking.

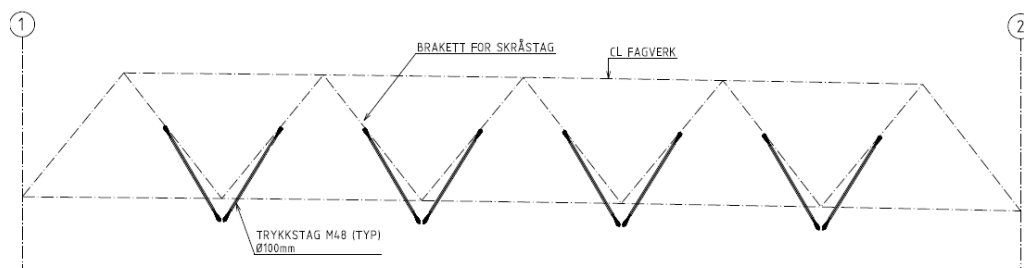


Figur 3.22: Knekkning av overgurt i planet

Knekk lengden for knekking av overgurtene i planet avhenger av avstanden mellom knutepunktene langs overgurtene. Knutepunktene til de diagonale stavnene fungerer som avstivningspunkter for knekking i planet. I brumodellen blir overgurtene modellert som en rekke staver knyttet til hverandre i disse knutepunktene. Knekk lengden for knekking i planet blir dermed lik lengden av en stav i overgurtene.



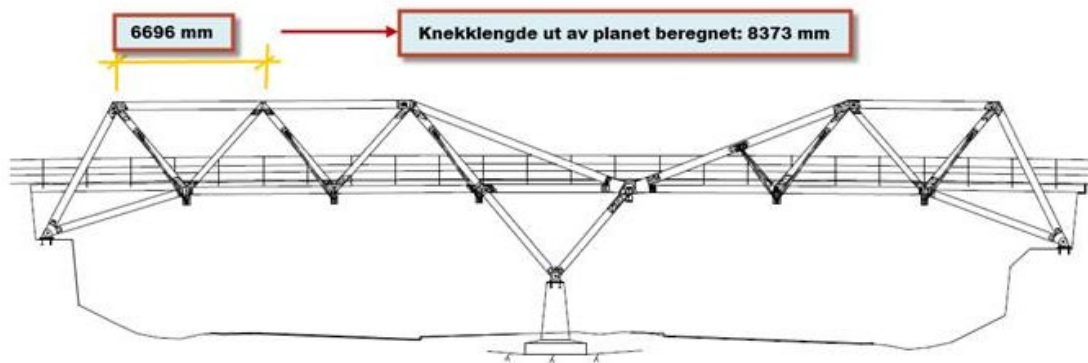
Figur 3.23: Knekkning av overgurt ut av planet. Fagverksvegger sett ovenfra.



Figur 3.24: Skråstag for Tveit bru [16]

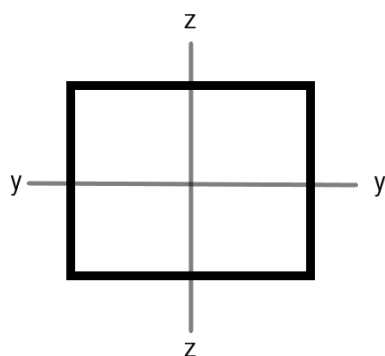
For knekking ut av planet er det noe mer komplisert å fastslå knekk lengden. Det er ingen direkte avstivningspunkter i tverretning på overgurtene. Avstivningspunktene i tverretning for fagverket ligger der festebrakettene for skråstagnene er plassert på de diagonale stavnene. Dersom festebrakettene hadde vært festet i knutepunktene langs overgurtene ville det vært tilnærmelig å sette knekk lengden lik stav lengden i overgurtene. I virkeligheten er festebrakettene festet litt over halvveis opp fra undergurtene mot overgurtene. Det er da fornuftig å anta at knekk lengden vil være noe

større enn stavlengden i overgurten. En kunne ha laget en mer komplett brumodell for å beregne seg fram til en knekkfaktor og knekk lengden for overgurten, men dette er utenfor hovedfokuset til oppgaven. Det vil derfor gjøres en forenkling i anslaget av knekk lengden ut av planet. Analyser gjort av rådgivende ingeniører på Sletta bru, en annen fagverksbru i tre, kom fram til at knekk lengden for overgurten der var 1.25 ganger stavlengden i overgurten [27].



Figur 3.25: Knekk lengde for Sletta bru [27]

Tveit bru og Sletta bru er ikke identiske, men de har likheter i fagverkstruktur om en fokuserer på det venstre segmentet av Sletta bru. Sletta bru har også skråstag for avstivning i tverretning som er festet et stykke ned fra overgurten. Knekk lengden ut av planet for trebrua i denne oppgaven baseres derfor på Sletta bru. Med hensyn på ulikheter mellom de to bruene og for å være på den sikre siden settes knekk lengden ut av planet lik 1.5 ganger stavlengden i overgurten.



Figur 3.26: Tverrsnitt av overgurt med akser

For å beregne kapasiteten til overgurten mot knekking må først de relative slankhetstallene beregnes for knekking om y-aksen (i planet) og knekking om z-aksen (ut av planet), i henhold til Eurokode 5 punkt 6.3.2:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad \text{og} \quad \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.4 \text{ og } 3.5)$$

Der:

$\lambda_{rel,y}$ og $\lambda_{rel,z}$ - er relative slankhetstall for knekking om y- og z-aksen

λ_y og λ_z - er slankhetstall for knekking y- og z-aksen

$f_{c,0,k}$ - er karakteristisk trykkfasthet i fiberretningen. Lik 24.5 MPa for GL30c

$E_{0,05}$ - er 5 % fraktilet for elastisitetsmodulen i fiberretningen. Lik 10 800 MPa for GL30c

Slankhetstallet λ beregnes som:

$$\lambda = L_k \sqrt{\frac{A}{I}} \quad (3.6)$$

Der:

L_k - er knekk lengden av staven i overgurten

A - er tverrsnittsarealet til overgurten. Lik 0.75 m x 0.60 m = 0.45 m²

I - er arealtrehetsmomentet. Lik $bh^3 / 12$

Med stavlengde lik 8 m i overgurten blir de relative slankhetstallene for knekking:

Knekking i planet		Knekking ut av planet	
$L_{k,y}$	8 m	$L_{k,z}$	1.5 x 8 m = 12 m
I_y	0.0135 m ⁴	I_z	0.0211 m ⁴
λ_y	46.19	λ_z	55.43
$\lambda_{rel,y}$	0.70	$\lambda_{rel,z}$	0.84

For relative slankhetstall over 0.3 og for staver under trykk gjelder følgende krav:

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_c f_{c,0,d} \quad (3.7)$$

Der:

$\sigma_{c,0,d}$ - er dimensjonerende trykkspenning i fiberretning

k_c - er en instabilitetsfaktor

$f_{c,0,d}$ - er dimensjonerende trykkfasthet i fiberretning

Instabilitetsfaktorene beregnes som:

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \quad (3.8)$$

Der:

$$k = 0.5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2 \right)$$

β_c - er en retthetsfaktor lik 0.1 for limtre

Instabilitetsfaktorene blir da:

Knekking i planet		Knekking ut av planet	
k_y	0.765	k_z	0.880
$k_{c,y}$	0.931	$k_{c,z}$	0.876

Ved å sette verdiene inn i uttrykk 3.7 får en følgende dimensjonerende kapasiteter for knekking av overgurten:

Knekking i planet		Knekking ut av planet	
$k_{c,y} f_{c,0,d}$	17.86 MPa	$k_{c,z} f_{c,0,d}$	16.80 MPa

Knekking ut av planet blir den dimensjonerende kapasiteten av de to typene knekking for overgurten. Kapasiteten for knekking ut av planet, 16.80 MPa, er i tillegg lavere enn trykkfastheten for overgurten, 19.17 MPa, og dermed er det førstnevnte som blir den dimensjonerende trykkapasiteten for overgurten:

Trykkapasitet overgurt	$N_{c,Rd}$	7560 kN
------------------------	------------	---------

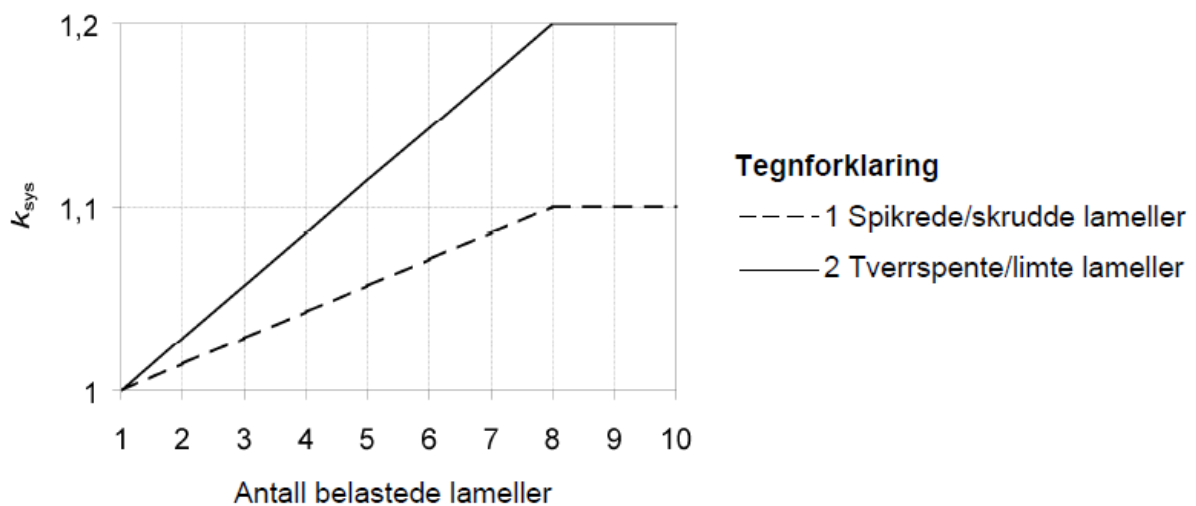
3.3.2 Kapasitet av dekke

Det tverrspenne dekket vil utsettes for bøyemoment og skjærkrefter i både lengderetning og tverretning. Kapasiteten til dekket i lengderetning er tett knyttet til

lamellens dimensjonerende fastheter, mens dekkets kapasitet i tverretning er forbundet med spennkraften.

Lengderetning

Dekkets fasthet for bøyning og skjær i lengderetning modifiseres av en rekke faktorer k_{sys} , k_{mod} og $k_{but} \cdot k_{sys}$ er en faktor for systemfasthet som benyttes når «flere like konstruksjonsdeler med innbyrdes lik avstand er forbundet i tverretning med et kontinuerlig lastfordelingssystem» [26]. Dette er tilfellet for et tverrspent dekke der flere identiske limtre lameller er tverrspent med jevnt fordelte spenntau som fungerer som det kontinuerlige lastfordelingssystemet. For laminerte gulvdekker benyttes verdiene i figur 3.27.



Figur 3.27: Systemfasthetsfaktor k_{sys} for laminert gulvdekker i massivt tre eller limtre [26]

Antallet belastede lameller n beregnes ved å dele den effektive bredden på bredden av en lamell.

$$n = \frac{b_{ef}}{b_{lam}} \quad (3.9)$$

Der:

b_{ef} - er den effektive bredden av belastningsområde

b_{lam} - er bredden av en lamell. Lik 119 mm for dekket

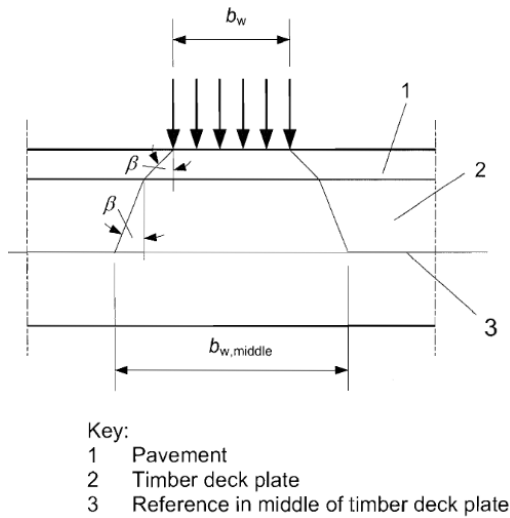
Den effektive bredden kan kalkuleres etter en forenklet metode i Eurokode 5 del 2 punkt 5.1.3:

$$b_{ef} = b_{w,middle} + a \quad (3.10)$$

Der:

$b_{w,middle}$ - er bredden til det belastede området i et referanseplan i midten av dekket

a - er lik 0.3 m for tverrspente dekker



Figur 3.28: Spredning av konsentrerte laster fra kontaktbredden b_w [20]

For en bru kan lasten fra ett hjul i denne sammenheng kalles en konsentrert last. Kontaktoverflaten mellom asfalten og kjøretøyets dekk er lik 0.4 m x 0.4 m, og b_w er derfor lik 400 mm. Fortauet som er nummerert 1 i figur 3.28 kan med rimelighet byttes ut med asfaltlaget som ligger over det tverrspente dekket. Den gjennomsnittlige tykkelsen til asfaltlaget er 113 mm, og tykkelsen til brudekket er 400 mm. Spredningsvinkelen β er lik 45° for asfaltlaget og lik 15° vinkelrett på fiberretningen for dekket.

Pavement (in accordance with EN 1991-2 clause 4.3.6)	45°
Boards and planks	45°
Laminated timber deck plates:	
– in the direction of the grain	45°
– perpendicular to the grain	15°

Figur 3.29: Spredningsvinkel β [20]

Litt trigonometriregning gir da at:

$$b_{w,middle} = b_w + 2\left(113 \tan(45^\circ)\right) + 2\left(\frac{400}{2} \tan(15^\circ)\right) = 733 \text{ mm}$$

Den effektive bredden blir:

$$b_{ef} = b_{w,middle} + a = 1033 \text{ mm}$$

Antall belastede lameller blir:

$$n = \frac{b_{ef}}{b_{lam}} = 8.7 \approx 9$$

Med over 7 belastede lameller er systemfasthetsfaktoren $k_{sys} = 1.2$.

Fasthetsfaktoren k_{mod} er som tidligere fastsatt lik 0.9.

Buttskjøtfaktoren k_{but} er en reduksjonsfaktor som tar hensyn til redusert systemstivhet i lengderetning på grunn av buttskjøter av limtrelamellene i dekket. I Håndbok N400 for Bruprosjektering er den definert lik [19]:

$$k_{but} = \frac{n}{1+n} \quad (3.11)$$

Der:

n - er antall limtrelameller per buttskjøt i samme tverrsnitt og det forutsettes at $n \geq 4$

Det er ingen klar oversikt over hvilken verdi n har for Tveit bru. For brumodellen settes n lik 10, slik at hver tiende lamell i samme tverrsnitt er buttskjøtt.

Det gir en buttskjøtfaktor $k_{but} = 0.91$.

Uttrykket for dekkets dimensjonerende bøyefasthet i lengderetning er [20]:

$$f_{m,d,x,deck} = k_{sys} k_{mod} k_{but} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (3.12)$$

Der:

$f_{m,k}$ - er den karakteristiske bøyefastheten for lamellen. Lik 30 MPa for GL30c

For dekkets dimensjonerende skjærfasthet i lengderetning er uttrykket [20]:

$$f_{v,d,x,deck} = k_{sys} k_{mod} k_{but} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (3.13)$$

Der:

$f_{v,k}$ - er den karakteristiske skjærfastheten for lamellen. Lik 3.5 MPa for GL30c

De dimensjonerende fasthetene for dekket i lengderetning blir dermed:

Bøyefasthet	$f_{m,d,x,deck}$	25.64 MPa
Skjærfasthet	$f_{v,d,x,deck}$	2.99 MPa

Kravene for spenninger i lengderetningen er :

$$\sigma_{m,x} \leq f_{m,d,x,deck} \quad (3.14)$$

og

$$\tau_x \leq f_{v,d,x,deck} \quad (3.15)$$

Der:

$\sigma_{m,x}$ - er dekkets dimensjonerende bøyespenning i lengderetning

τ_x - er dekkets dimensjonerende skjærspenning i lengderetning

De dimensjonerende bøye- og skjærspenningene i dekket beregnes som for en høy bjelke [26]:

$$\sigma_{m,x} = \frac{6M_{xx}}{t^2} \quad (3.16)$$

og

$$\tau_x = \frac{1.5V_{xx}}{k_{cr}t} \quad (3.17)$$

Der:

M_{xx} - er maksimalt bøyemoment i lengderetning per løpemeter bredde [kNm/m]

V_{xx} - er maksimal skjærkraft i lengderetning per løpemeter bredde [kN/m]

k_{cr} - er en faktor som tar hensyn til innflytelsen av sprekker på skjærmotstanden. Lik

0.67 for limtre

t - er tykkelsen av brudekket. Lik 400 mm for den originale brumodellen

I Sofistik avleses verdiene for M_{xx} og V_{xx} og deretter omregnes de til $\sigma_{m,x}$ og τ_x ved hjelp av formel 3.16 og 3.17.

Tverretning

Dekkets fasthet i tverretning avhenger av spennkraften, dekkets tykkelse og senteravstanden mellom spenntauene.

Fasthetene kan uttrykkes slik [19]:

$$f_{m,d,y,deck} = f_{v,d,y,deck} = \frac{P_{\min}}{S_{\tau} t} \quad (3.18)$$

Der:

$f_{m,d,y,deck}$ - er dimensjonerende bøyefasthet i tverretning

$f_{v,d,y,deck}$ - er dimensjonerende skjærfasthet i tverretning

P_{\min} - er minste tillatte restspenning i spenntau etter langtidstap

S_{τ} - er senteravstanden mellom spenntauene. Lik 660 mm

t - er dekketykkelsen

Produktet av senteravstanden og dekketykkelsen utgjør tverrarearealet som hvert spenntau fordeler kreftene sine utover.

For Tveit bru er det registrert følgende oppspenningskrefter, som benyttes i oppgaven:

Maksimal spennkraft før låsetap	P_{\max}	234 kN
Full oppspenningskraft etter låsing	P_0	220 kN
Minste tillatte restspenning etter langtidstap	P_{\min}	$0.5 * 220 = 110$ kN

De dimensjonerende fasthetene for dekket i tverretning blir dermed:

Bøyefasthet	$f_{m,d,y,deck}$	0.42 MPa
Skjærfasthet	$f_{v,d,y,deck}$	0.42 MPa

Ved kontroll av glidning mellom lamellene pga. skjærkrefter skal det i henhold til Håndbok N400 punkt 9.6.1.3 i utgangspunktet tas hensyn til kombinasjonen av plateskjær fra vertikale laster og skiveskjær fra samtidig virkende horisontale laster der det er relevant [19]. I dette tilfellet sees det bort ifra skiveskjær da horisontale krefter ikke betraktes i oppgaven.

Bøyemoment i tverretningen kan føre til uønsket oppsprekking mellom limtrelamellene på undersiden av dekket, og må derfor også sjekkes.

Kravet for bøyemoment og skjærspenning i tverretning er:

$$\sigma_{m,y} \leq f_{m,d,y,deck} \quad (3.19)$$

og

$$\tau_y \leq f_{v,d,y,deck} \quad (3.20)$$

Der:

$\sigma_{m,y}$ - er dimensjonerende bøyemoment i tverretning

τ_y - er dimensjonerende skjærspenning i tverretning

De dimensjonerende spenningene beregnes som følger [19]:

$$\sigma_{m,y} = \frac{6M_{yy}}{t^2} \quad (3.21)$$

og

$$\tau_y = \frac{V_{yy}}{\mu_{0,d}t} \quad (3.22)$$

Der:

M_{yy} - er maksimalt bøyemoment i tverretning per løpemeter lengde

V_{yy} - er maksimalt vertikalt plateskjær i tverretning per løpemeter lengde, regnet jevnt fordelt over høyden

$\mu_{0,d}$ - er dimensjonerende friksjonskoeffisient parallelt med fiberretningen. Lik 0.25 for limtrelameller siden de regnes som høvellast mot høvellast

Tabell 3.6: Dimensjonerende friksjonskoeffisienter [19]

Lamelloverflatens ruhet	Normalt på fibre $\mu_{0,d}$	Parallelt med fibre $\mu_{0,d}$
Skurlast mot skurlast	0,40	0,30
Høvellast mot høvellast	0,30	0,25
Skurlast mot høvellast	0,40	0,30

I Sofistik avleses verdiene for M_{yy} og V_{yy} og deretter omregnes de til $\sigma_{m,y}$ og τ_y ved hjelp av formel 3.21 og 3.22.

3.3.3 Kapasitet av tverrbærere

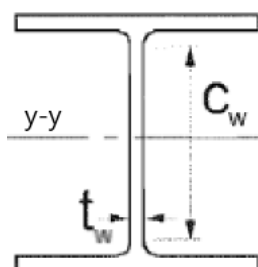
Tverrbærerne er valgt til typen UB 838 x 292 med stålqualität S460NL. Den har følgende spesifikasjoner og mål:

Flytespenning	f_y	460 MPa
Areal	A	22400 mm ²
Høyde	h	835 mm
Bredde	b	292 mm
Tykkelse flens	t_f	18.8 mm
Tykkelse steg	t_w	14 mm
-	r	17.8 mm
Steghøyde	$h_w = h - 2t_f - 2r$	761.8 mm

Klassifisering av tverrsnitt

Før kapasiteten til tverrbærerne kan beregnes må tverrsnittet klassifiseres i henhold til Eurokode 3.

Klassifisering av steg:



Figur 3.30: Tverrsnitt av stålbejelke for klassifisering av steg

Steget utsettes for bøyning, og grensene for de ulike klassene er da [28]:

$$\text{Klasse 1: } \frac{c_w}{t_w \varepsilon} \leq 72, \quad \text{Klasse 2: } \frac{c_w}{t_w \varepsilon} \leq 83, \quad \text{Klasse 3: } \frac{c_w}{t_w \varepsilon} \leq 124$$

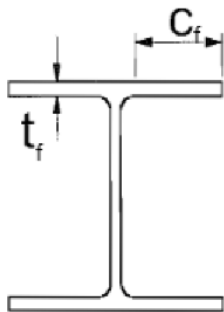
Der:

$$c_w = h_w = h - 2t_f - 2r = 761.8 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.7148$$

Dermed er $\frac{c_w}{t_w \varepsilon} = 76.1 < 83$, og steget er klasse 2.

Klassifisering av flens:



Figur 3.31: Tverrsnitt av stålbejelke for klassifisering av flens

Grensene for de ulike klassene er [28]:

$$\text{Klasse 1: } \frac{c_f}{t_f \varepsilon} \leq 9, \quad \text{Klasse 2: } \frac{c_f}{t_f \varepsilon} \leq 10, \quad \text{Klasse 3: } \frac{c_f}{t_f \varepsilon} \leq 14$$

Der:

$$c_f = \frac{b - t_w - 2r}{2} = 121.2 \text{ mm}$$

Dermed er $\frac{c_f}{t_f \varepsilon} = 9.02 < 10$, og flensen er også klasse 2.

Tverrsnittet av tverrbærerne kan derfor klassifiseres som klasse 2.

Bøyemoment

Tverrbærerne utsettes for bøyemoment, skjærkrefter og aksialkrefter.

Kravet for bøyemoment om hovedaksen er:

$$M_{y,Ed} \leq M_{y,Rd} \quad (3.23)$$

Der:

$M_{y,Ed}$ - er dimensjonerende bøyemoment

$M_{y,Rd}$ - er dimensjonerende kapasitet for bøyemoment

Kapasiteten for bøyemoment for et klasse 2 tverrsnitt er [28]:

$$M_{y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.24)$$

Der:

$W_{pl,y}$ - er plastisk motstandsmoment om y-aksen. Er lik $6.836 \times 10^6 \text{ mm}^3$

γ_{M0} - er partialfaktor for stål. Er lik 1.10 i henhold til NS-EN 1993-2 pkt. NA.6.1

Den dimensjonerende kapasiteten for bøyemoment er dermed:

$M_{y,Rd}$	2859 kNm
------------	----------

Skjærkrefter

Kravet for skjærkrefter er [28]:

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd} \quad (3.25)$$

Der:

V_{Ed} - er dimensjonerende skjærkraft

$V_{c,Rd}$ - er dimensjonerende kapasitet for skjærkrefter

Kapasiteten for skjærkrefter er [28]:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (3.26)$$

Der:

A_v - er skjærarealet

Skjærarealet for valsede I-tverrsnitt med last som er parallell med steget er [28]:

$$A_v = \max \left[A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f, h_w t_w \right] \quad (3.27)$$

$$A_v = \max [12\ 353, 10\ 655] = 12\ 353 \text{ mm}^2$$

Den dimensjonerende kapasiteten for skjærkrefter er dermed:

$V_{c,Rd}$	2983 kN
------------	---------

Aksialkrefter

Kravet for aksialkrefter er:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (3.28)$$

Der:

N_{Ed} - er dimensjonerende aksialkraft

N_{Rd} - er dimensjonerende kapasitet for aksialkrefter

Kapasiteten for aksialkrefter for et klasse 2 tverrsnitt er [28]:

$$N_{Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.29)$$

Den dimensjonerende kapasiteten for aksialkrefter er dermed:

N_{Rd}	9367 kN
----------	---------

Bøyemoment og skjærkrefter

Siden det er skjærkrefter til stedet, må det sjekkes om de har en reduserende effekt på kapasiteten for bøyemoment.

Dersom den dimensjonerende skjærkraften er mindre enn eller lik halvparten av den dimensjonerende kapasiteten for skjærkrefter, $V_{Ed} \leq 0.5V_{c,Rd}$, kan en se bort ifra skjærkreftenes effekt på momentkapasiteten [28].

Om derimot $V_{Ed} > 0.5V_{c,Rd}$ må en ta hensyn til skjærkraftens effekt på momentkapasiteten. Den reduserte momentkapasiteten beregnes da med en

reduisert flytespenning lik $(1 - \rho)f_y$, slik at den redusert momentkapasiteten $M_{V,y,Rd}$ blir [28]:

$$M_{V,y,Rd} = \frac{W_{pl,y}(1 - \rho)f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.30)$$

$$\text{Der: } \rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{c,Rd}} - 1 \right)^2$$

Bøyemoment og aksialkrefter

Det må også sjekkes for aksialkreftenes effekt på momentkapasiteten.

For dobbelt symmetriske tverrsnitt i klasse 2, slik tverrbærerne er, kan en se bort ifra aksialkreftenes effekt på bøyemomentkapasiteten om hovedaksen dersom begge disse kriteriene er oppfylt [28]:

$$N_{Ed} \leq 0.25N_{Rd} \quad (3.31)$$

og

$$N_{Ed} \leq \frac{0.5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.32)$$

Om minst en av disse kriteriene ikke er oppfylt må den reduserte momentkapasiteten $M_{N,y,Rd}$ kalkuleres:

$$M_{N,y,Rd} = M_{y,Rd} \frac{1 - n}{1 - 0.5a} \leq M_{y,Rd} \quad (3.33)$$

$$\text{Der: } n = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \text{ og } a = \frac{A - 2bt_f}{A} \leq 0.5$$

Bøyemoment, skjærkrefter og aksialkrefter

Til sist må det sjekkes om skjærkreftene har en effekt på momentkapasiteten for bøyemoment og aksialkrefter.

Dersom den dimensjonerende skjærkraften er mindre enn eller lik halvparten av den dimensjonerende kapasiteten for skjærkrefter, $V_{Ed} \leq 0.5V_{c,Rd}$, kan en se bort ifra

skjærkreftenes effekt på momentkapasiteten for kombinasjonen av bøyemoment og aksialkrefter [28].

Dersom $V_{Ed} > 0.5V_{c,Rd}$ må en redusere momentkapasiteten for bøyemoment og aksialkrefter med en redusert flytespenning for skjærarealet lik $(1 - \rho)f_y$.

$$\text{Der: } \rho = \left(2V_{Ed}/V_{c,Rd} - 1\right)^2$$

3.4 Utslippsanalyse av trebru

Det skal gjennomføres en utslippsanalyse av trebrua som vil basere seg på LCA. LCA står for «life-cycle assessment» og kan oversettes til livsløpsvurdering på norsk. Det er en metodikk for å vurdere miljøpåvirkningen av de ulike fasene i livsløpet til et produkt eller en prosess [29]. Livsløpet til et produkt kan generelt deles inn i 4 hovedfaser: produksjonsfasen, byggefase, bruksfasen og avhendingen. Disse fasene deles videre inn i moduler.

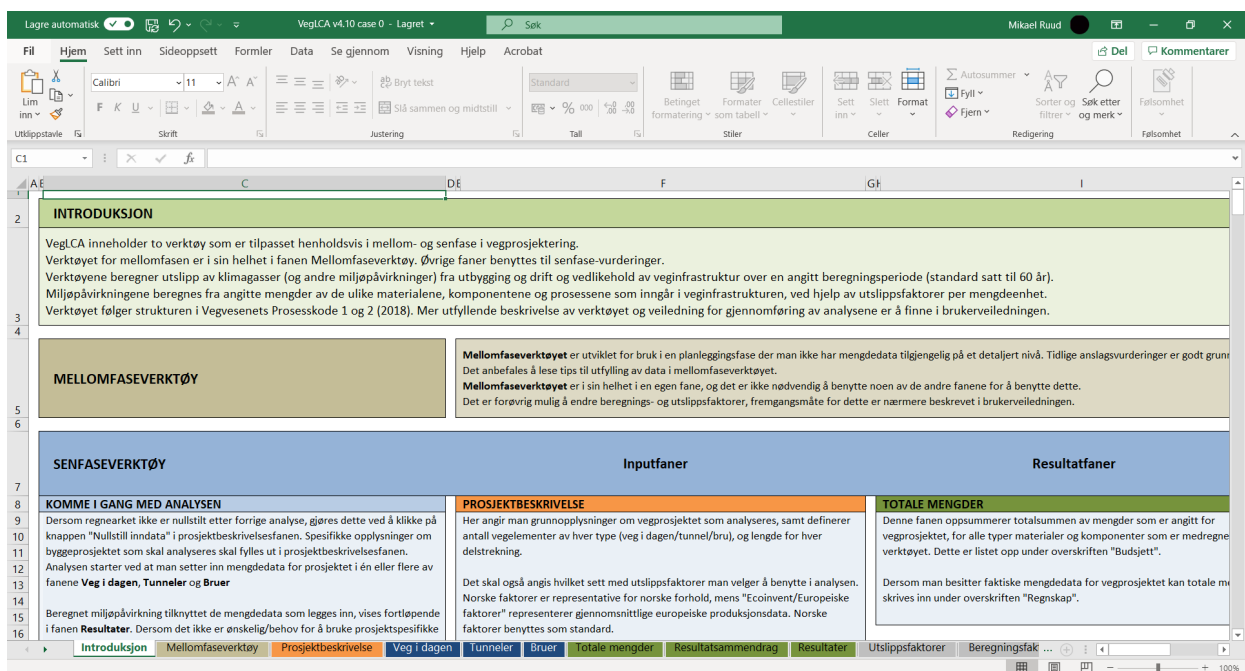
Produksjonsfase	A1	Råvarer – utvinning og bearbeiding
	A2	Transport av råvarer til byggeplass
	A3	Produksjon
Byggefase	A4	Transport til byggeplass
	A5	Bygging/installasjon
Bruksfase	B1	Bruk
	B2–B5	Vedlikehold
	B6–B7	Forbruk av energi og vann ved drift
Avhending	C1–C4	Riving, transport og avfallsbehandling

Figur 3.32: Hovedfaser og moduler i en livsløpsvurdering [30]

Målet med utslippsanalysen er å beregne og sammenlikne klimagassutslipp forbundet med de ulike variasjonene av trebrua og 3 betongbruer. Sammenlikningen vil først undersøke hvordan endring av bruparametere påvirker utslippene knyttet til trebrua. Videre vil den undersøke hvordan den originale trebrua kan måle seg med betongbruer med hensyn på klimagassutslipp. De tre betongbrueene som trebrua skal sammenliknes med er Skjerdingsstadbrua, Hofstadbrua og Stillingabrua [31]–[33]. Dette er henholdsvis to prosjekterte betongbruer og en nylig ferdigbygget betongbru

over norske motorveier, i regi av Nye Veier. Brumodellen (Trebru 0) som brukes som grunnlag for analysen av krefter og utnyttelsesgrad er en forenklet versjon av Tveit bru. For utslippsanalysen ekspanderes brumodellen til å inkludere blant annet landdkar og knutepunkter i stål slik at den blir tilnærmet lik Tveit bru.

Omfanget av livsløpsanalysen begrenser seg til materialproduksjon (A1-A3), materialtransport til byggeplass (A4) og drift og vedlikehold (B4-B5). En komplett livsløpsanalyse ville gjerne også inkludert flere av de andre aktivitetene som f.eks. avhending. Begrensningene her er gjort både med tanke på tilgjengelig regneverktøy, tilgjengelig informasjon om bruene og med et hovedfokus på materialene som benyttes i trebrua og deres tilknyttede utslipp. Det vil fokuseres på karbonavtrykket fra klimagasser som går innenfor samleheten CO_{2e}, karbondioksidekvivalenter. Resultatene vil gis i tonn CO_{2e} og kg CO_{2e} per m² effektivt dekkeareal. Sistnevnte enhet er spesielt nyttig i sammenlikning mellom bruer av ulik størrelse, da de totale utslippstallene ikke lenger gir en fornuftig sammenlikning.



Figur 3.33: Skjermbilde fra Excel-regnearket VegLCA v4.10

For å beregne utslippene tilknyttet brua benyttes et interaktivt Excel-regneark kalt «VegLCA v4.10», som benyttes i industrien for veg- og bru prosjekter [34]. Inputen til regnearket er hovedsakelig mengden av de ulike materialene som brukes i brua. Utslippsfaktorer som er tilknyttet materialene og ligger forhåndsdefinert i regnearket,

er basert på norske gjennomsnittsdata og følger med dokumentasjon. Disse utslippsfaktorene angir antall kg CO₂e-utslipp for en gitt mengde av materialet (f.eks. m³ eller tonn). Beregningsfaktorer er også forhåndsdefinert i regnearket og brukes til å beregne forbruk av materialer gjennom livsløpet til brua. For modul A4 som omfatter transport av materialer til byggeplass ligger forhåndsdefinerte transportavstander for ulike materialer til grunn. For limtre er denne avstanden satt lik 500 km og for betong (støpt) er den 20 km. Analyseperioden er satt til 60 år som standard. Med materialinput og disse faktorene beregnes den totale mengden CO₂e-utslipp. En full oversikt over beregnings- og utslippsfaktorene er gitt i Vedlegg C.

En problemstilling ved livsløpsanalyser som inkluderer biologiske materialer er hvordan en skal forholde seg til biogent karbon. Biogent karbon vil si karbondioksid som er bundet opp i trevirke. Den metoden som har blitt mest brukt hittil er å regne med at den mengden karbon som er lagret i trevirke «slippes ut» igjen ved hogst. Dersom en tar biogent karbon med i beregningen og ser på hele livsløpet vil karbonet som er bundet opp i trevirke slippes ut igjen ved forbrenning eller annen avhending av trevirke. Da går utslippsregnestykket for biogent karbon i null. I Excel-regnearket er utslippstallet for limtre beregnet som et gjennomsnitt av EPD-er for norske limtreprodukter. Disse EPD-ene tar hensyn til biogent karbon og beregner utslippene for limtre gjennom hele livsløpet fra vugge til grav. Dermed blir utslippstallet for limtre i praksis det samme som for den førstnevnte metoden der karbon regnes som sluppet fri ved hogst. Utslippsberegningene for limtre i denne oppgaven vil i utgangspunktet følge VegLCA v4.10 og i praksis ikke ta hensyn til biogent karbon.

For utslippsanalysen tas alle bruelementer og -materialer unntatt løs- og fyllmasser fra Tveit bru med i beregningen. Stålpelene for trebrua utelates også for å gi en mer jevnbyrdig sammenlikning med betongbrue som ikke har stålpeler. Beregningen av materialmengdene gjøres «for hånd» basert på mål og dimensjoner fra tilgjengelig tegningssett av Tveit bru. For beregning av armeringsmengden ved fundamentene er det gjort en antakelse om 130 kg armering per m³ betong. En sammenfattet oversikt over elementer og materialer som brukes i utslippsanalysen for trebrue er gitt i tabell 3.7.

Tabell 3.7: Material- og elementliste for utslippsanalyse av trebruer

Trebruer			
Material	Element	Materialklasse	Trykkimpregnering / behandling
Limtre	Fagverk	GL30c	Kreosot + Cu-salt
	Tverrspent dekke	GL30c	Kreosot + Cu-salt
	Tverrspent dekke endeplate	GL30c	Kreosot + Cu-salt
	Kantsvill	GL30c	Kreosot + Cu-salt
Stål	Tverrbærere	S460NL	Varmforsinket + pulverlakkert
	Skråstag	S355	Varmforsinket
	Rekkverk	Stål	
	Spenntau	1640/1860	
	Forankringsplater	Stål	
	Slisseplater	Stål	Varmforsinket + pulverlakkert
	Leddplater	Stål	Varmforsinket + pulverlakkert
	Anleggsplater	Stål	Varmforsinket + pulverlakkert
	Stavdybler	Rustfritt	
	Senterbolter	Rustfritt	
	Div. braketter, skruer, bolter	Stål	
	Armering	B500NC	
Betong	Landkar	B45 SV	
	Fundament	B45 SV	
Asfalt	Slitelag	AGB11	
	Bindlag	Støpeasfalt	
	(Fuktisolering)	Topeka 4S	
Kobber	Beslag	Kobber	

4 Parametrisk analyse av trebru

4.1 Bruparametere

Det er mange parametere som er mulig å analysere i en fagverksbru av tre. Spennvidde, bredde, fagverksgeometri, stavdimensjoner, dimensjoner av brudekke og valg av materialer for å nevne noen. En analyse som tar for seg flere parametere vil trolig gi et mer komplett bilde av hvordan de ulike bruparameterne henger sammen og påvirker bruas egenskaper og utslipp. Samtidig vil hver parameter som legges til i analysen øke omfanget betraktelig.

Denne parametriske analysen begrenser seg derfor til tre bruparametere. De tre parameterne som vil undersøkes er fagverkshøyden, antall fagverksledd og tykkelsen av brudekket.

Analysen vil undersøke hvordan endringer av de nevnte parameterne påvirker trebruas utnyttelsesgrad og klimagassutslippet tilknyttet brua. Først vil det undersøkes hvordan endring av hver enkelt parameter påvirker utnyttelsesgraden og klimagassutslippet. Deretter vil to kombinasjoner av parameterendringer undersøkes. Det vil si at en parameter reduseres samtidig som en annen parameter økes. Dette er av interesse for potensielle designsituasjoner der endring i en parameter ofte må kompenseres med endring i en annen parameter. Alle parameterendringene gjøres ut ifra sammenlikningsgrunnlaget Trebru 0.

Følgende vil analyseres:

- Sammenlikningsgrunnlag: Trebru 0
 - o Fagverkshøyde = 5 m
 - o Antall fagverksledd = 5
 - o Dekketykkelse = 400 mm
- Lavere fagverk: Trebru 1
 - o Fagverkshøyde redusert med 1 m (20 % reduksjon)
- Færre fagverksledd: Trebru 2
 - o Ett fagverksledd mindre
- Redusert dekketykkelse: Trebru 3

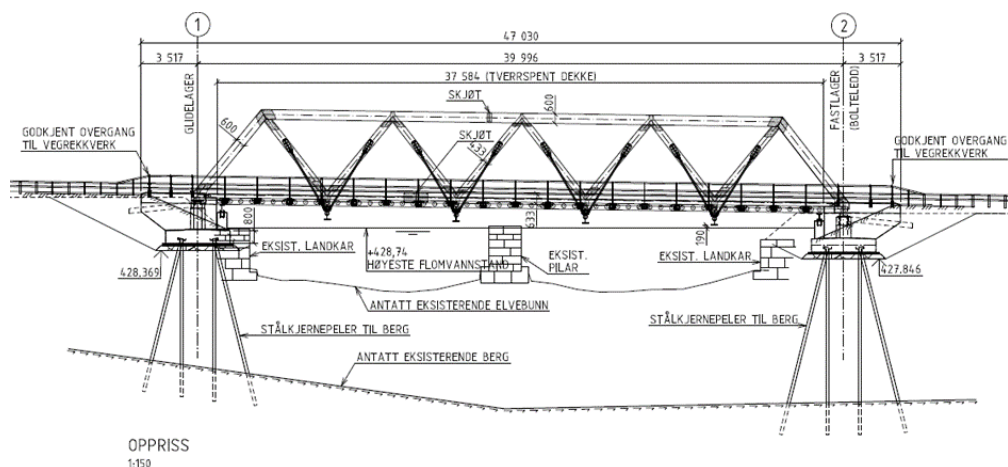
- Dekketykkelse redusert med 100 mm (25 % reduksjon)
- Færre fagverksledd + høyere fagverk: Trebru 4
 - Ett fagverksledd mindre + fagverkshøyde økt med 1 m
- Redusert dekketykkelse + høyere fagverk: Trebru 5
 - Dekketykkelse redusert med 100 mm + fagverkshøyde økt med 1 m

4.2 Sammenlikningsgrunnlag: Trebru 0

Hovedgrunnlaget for den parametriske analysen vil være Trebru 0, en brumodell basert på Tveit bru.

Trebru 0 har følgende dimensjoner og kvaliteter:

- Fagverk
 - Geometri
 - 40 meter langt
 - 5 meter høyt
 - 12 meter bredde mellom fagverksvegger
 - 5 fagverksledd → 10 diagonale fagverksstaver
 - Overgurt: 750 mm x 600 mm (B x H)
 - Undergurt: 700 mm x 633 mm
 - Diagonale staver: 600 mm x 433 mm
 - Endestaver: 750 mm x 600 mm
 - Materiale
 - GL30c for alle fagverkselementer



Figur 4.1: Fagverk i Tveit bru [16]

- Tverrspent dekke

○ Geometri

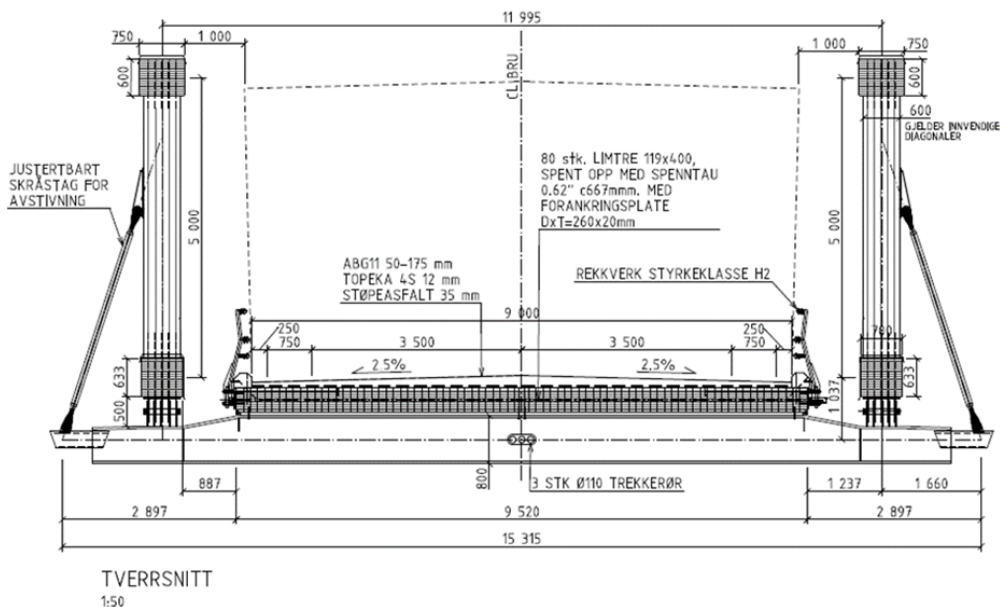
- 40 meter langt
- 9.52 meter bredt
 - 80 stk limtre lameller 119 mm x 400 mm
- 400 mm tykkelse
- 57 stk spenntau, senteravstand = 660 mm

○ Stivhetsegenskaper (kalkulert ihht. tabell 2.2 for sagt tømmer)

- Lengderetning: $E_0 = 13\ 000\ \text{MPa}$
 $G_0 = 0.06 \cdot E_0 = 780\ \text{MPa}$
- Tverretning: $E_{90} = 0.015 \cdot E_0 = 195\ \text{MPa}$
 $G_{90} = 0.08 \cdot G_0 = 62.4\ \text{MPa}$

○ Materiale

- GL30c
- Spenntau: $A_{sp} = 150\ \text{mm}^2$ og $f_{pk} = 1860\ \text{MPa}$



Figur 4.2: Tverrspent dekke i Tveit bru [16]

- Tverrbærere

○ Geometri

- UB 838 x 292
- 12 meter lange, lik bredden mellom fagverksveggene

○ Materiale

- S460NL

4.2.1 Utnyttelsesgrad

Utnyttelsesgraden av fagverket, tverrbærerne og dekket skal undersøkes i bruddgrensetilstanden STR, for de to lasttilfellene. Krefte og momentene i bruelementene leses av i Sofistik etter å ha kjørt en lineær analyse av brua for de to lasttilfellene og begge lastkombinasjonene i STR (6.10a og 6.10b). Skjermbilder av krefter og momenter i bruelementene i Sofistik for Trebru 0 er vedlagt i Vedlegg B.

For utnyttelsesgraden benyttes den flytende fargeskalaen nedenfor som går fra 0 til 1 for å gi en mer intuitiv grafisk framstilling av utnyttelsesgraden for de ulike bruelementene. Utnyttelsesgraden er kalkulert ved å dele den aktuelle dimensjonerende påkjenningen på den tilhørende dimensjonerende kapasiteten.



Figur 4.3: Fargeskala for utnyttelsesgrad

Fagverk

Tabell 4.2.1: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 1

Lasttilfelle 1				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	2255	1790
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	2539	1995
	Nc,Rd	7558	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	3677	-	1159
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	4179	-	1355
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.33	0.45
STR, likn. 6.10b		-	0.38	0.50
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.49	-	0.23
STR, likn. 6.10b		0.55	-	0.27

Tabell 4.2.1 og 4.2.2 presenterer resultatene for fagverket for lasttilfelle 1 og 2. Kolonne nummer 1 angir hvilken lastkombinasjon (STR 6.10a eller 6.10b) resultatene gjelder for. I kolonne 2 angir Nt,Rd og Nc,Rd den dimensjonerende kapasiteten for henholdsvis strekk og trykk. Nt,Ed og Nc,Ed angir henholdsvis den dimensjonerende strekkraften og trykkraften. Alle verdiene for krefter er oppgitt i kN.

Kolonne 3 til 5 angir hvilket fagverkselement resultatene gjelder for. Der det kun er oppgitt en strek er det fordi det ikke er noe resultat eller ikke er relevant, f.eks. strekkrefter i overgurt. Den dimensjonerende kraften for et gitt fagverkselement og lastkombinasjon er satt som den største kraften i elementet som er registrert ved testing under lastkombinasjonen. Utnyttelsesgraden er angitt i nedre halvdel av tabellen.

Tabell 4.2.2: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 2

Lasttilfelle 2				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	1856	1823
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	1969	2042
	Nc,Rd	7558	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	3186	-	869
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	3477	-	941
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.27	0.46
STR, likn. 6.10b		-	0.29	0.52
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.42	-	0.17
STR, likn. 6.10b		0.46	-	0.19

Tverrbærere

Tabell 4.2.3: Dimensjonerende krefter, momenter og utnyttelsesgrad i tverrbærerne

Lastkombinasjon	[kNm], [kN]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Krefter	Utnytt.grad	Krefter	Utnytt.grad
	My,Rd	2859		2859	
STR, likn. 6.10a	My,Ed	1709	0.60	1667	0.58
STR, likn. 6.10b	My,Ed	2022	0.71	1987	0.69
	Vc,Rd	2983		2983	
STR, likn. 6.10a	Ved	625	0.21	602	0.20
STR, likn. 6.10b	Ved	742	0.25	719	0.24
	N,Rd	9367		9367	
STR, likn. 6.10a	N,Ed	1454	0.16	1446	0.15
STR, likn. 6.10b	N,Ed	1727	0.18	1721	0.18

Tabell 4.2.3 presenterer resultatene for tverrbærerne for både lasttilfelle 1 og 2. Kolonne 1 angir lastkombinasjonen. I kolonne 2 angir *My,Rd*, *Vc,Rd* og *N,Rd* henholdsvis den dimensjonerende bøyemomentkapasiteten om hovedaksen,

skjærkraftkapasiteten og aksialkraftkapasiteten. $M_{y,Ed}$, V_{ed} , og N_{Ed} angir henholdsvis det dimensjonerende bøyemomentet om hovedaksen, skjærkraften og aksialkraften. Kolonne 3 og 5 angir verdiene for momentene [kNm] og kreftene [kN] for henholdsvis lasttilfelle 1 og 2. Kolonne 4 og 6 angir utnyttelsesgraden for moment, skjær og aksial for henholdsvis lasttilfelle 1 og 2.

Sjekker for potensielt redusert momentkapasitet:

$V_{Ed,max} / V_{c,Rd} = 0.25 < 0.50$. Ingen reduksjon pga. skjærkraft.

$N_{Ed,max} / N_{Rd} = 0.18 < 0.25$

$N_{Ed,max} = 1727 \text{ kN} < \frac{0.5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = 2230 \text{ kN}$. Ingen reduksjon pga. aksialkraft.

Dekke

Tabell 4.2.4: Dimensjonerende spenninger og utnyttelsesgrad i dekket

Lastkombinasjon	[MPa]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Spenninger	Utnytt.grad	Spenninger	Utnytt.grad
Lengdemoment	fmd,x,deck	25.64		25.64	
STR, likn. 6.10a	σ_x	10.69	0.42	11.06	0.43
STR, likn. 6.10b	σ_x	14.48	0.56	14.89	0.58
Lengdeskjær	fvd,x,deck	2.99		2.99	
STR, likn. 6.10a	τ_x	0.61	0.20	0.62	0.21
STR, likn. 6.10b	τ_x	0.81	0.27	0.81	0.27
Tverrmoment	fmd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	σ_y	0.22	0.52	0.21	0.51
STR, likn. 6.10b	σ_y	0.28	0.66	0.27	0.65
Tverrsjær	fvd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	τ_y	0.21	0.51	0.22	0.54
STR, likn. 6.10b	τ_y	0.29	0.68	0.30	0.71

Tabell 4.2.4 presenterer resultatene for dekket for både lasttilfelle 1 og 2. Kolonne 1 angir lastkombinasjonen. I kolonne 2 angir:

$fmd,x,deck$ og $fmd,y,deck$: dimensjonerende kapasitet for bøyemomentspenning i hhv. lengderetning og tverretning

σ_x og σ_y : dimensjonerende bøyemomentspenning i hhv. lengderetning og tverretning

$fvd,x,deck$ og $fvd,y,deck$: dimensjonerende kapasitet for skjærspenning i hhv.

lengderetning og tverretning

τ_x og τ_y : dimensjonerende skjærspenning i hhv. lengderetning og tverretning

Kolonne 3 og 5 angir verdiene for spenningene for hhv. lasttilfelle 1 og 2. Kolonne 4 og 6 angir utnyttelsesgraden for de ulike påkjenningene for hhv. lasttilfelle 1 og 2.

Nedbøyning

Tabell 4.2.5: Nedbøyning av Trebru 0

	Lasttilfelle 1	Lasttilfelle 2
	Nedbøyning (mm)	Nedbøyning (mm)
SLS, trafikklast	64	54
Krav (<L/350)	114	114

I tabell 4.2.5 angis den maksimale vertikale nedbøyningen av trebrua for lasttilfelle 1 og 2, når brua kun utsettes for trafikklast i henhold til bruksgrensetilstanden. Kravet for nedbøyning er at den skal være mindre enn $L/350$, som er lik $40\,000\text{ mm} / 350 = 114\text{ mm}$ for trebrua. Nedbøyningen av Trebru 0 oppfyller kravet for begge lasttilfellene.

Oppsummering

Tabell 4.2.6: Utnyttelsesgrader for Trebru 0

Trebru 0	
Bruerlement	Utnyttelsesgrad
Fagverk	
Overgurt	0.55
Staver	0.52
Undergurt	0.38
Tverrbærere	0.71
Dekke	
Lengderetning	0.58
Tverretning	0.71

I tabell 4.2.6 er den høyeste utnyttelsesgraden som forekommer for hvert bruelement listet opp. F.eks. overgurtens utnyttelsesgrad på 0.55 som kommer fra lasttilfelle 1 og lastkombinasjon STR 6.10b, da det er den høyeste utnyttelsesgraden av de to lasttilfellene og to lastkombinasjonene. Det samme er gjort for resten av bruelementene. For dekket er det naturlig å skille mellom kapasiteten i lengderetning og tverretning.

Utnyttelsesgraden i fagverket er et stykke innenfor den konservative grensen på 70 %. For tverrbærerne er utnyttelsesgraden 0.71, mens for dekket er den 0.58 i lengderetning og 0.71 i tverretning.

Samlet sett ser en at Trebru 0 har unødvendig lave utnyttelsesgrader og at det er rom for å optimalisere materialbruken.

4.2.2 Utslippsanalyse

Tabell 4.2.7: Materialmengder for Trebru 0

Trebru 0	
Material/element	Mengde
Limtre	251.7 m ³
Stål, rustfritt	1.51 tonn
Stål, ikke rustfritt	39.38 tonn
Betong	111.7 m ³
Armering	14.38 tonn
Asfalt	360 m ²
Rekkverk i stål	80 løpemeter
Spennetau	57 stk
Kobberbeslag	184.6 m ²
Kreosotimpregnering	251.7 m ³
Cu-salt impregnering	112.2 m ³
Varmforsinking	501.4 m ²
Pulverlakkering	443 m ²

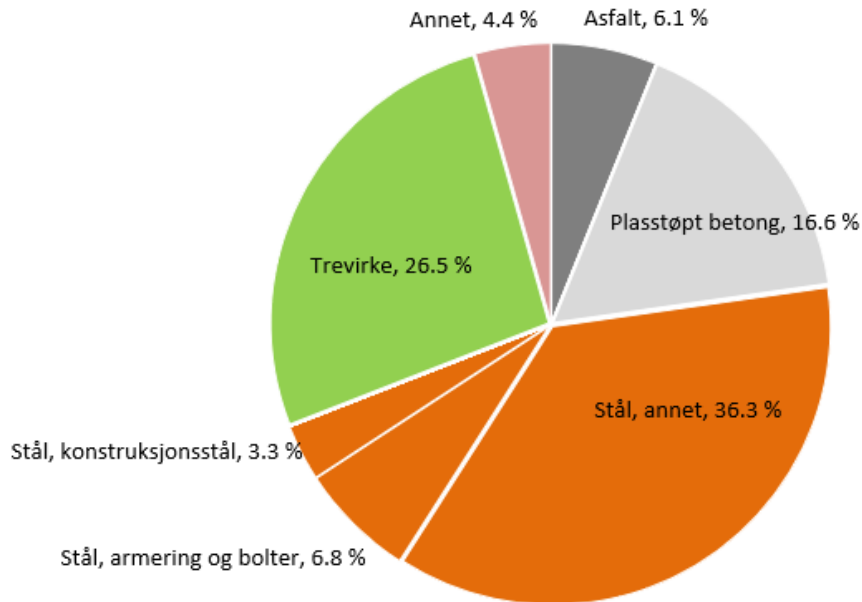
Tabell 4.2.7 angir de totale beregnede materialmengdene for Trebru 0.

Mengden kreosot- og Cu-salt impregnering er gitt i enheten m³, og angir hvor mange kubikkmeter limtre som skal impregneres. For varmforsinking og pulverlakkering angir antall kvadratmeter hvor stor total ståloverflate som skal behandles. Mengden kobberbeslag angir hvor stor overflate av limtre som skal beslaglegges med kobber.

Tabell 4.2.8: Klimagassutslipp for Trebru 0

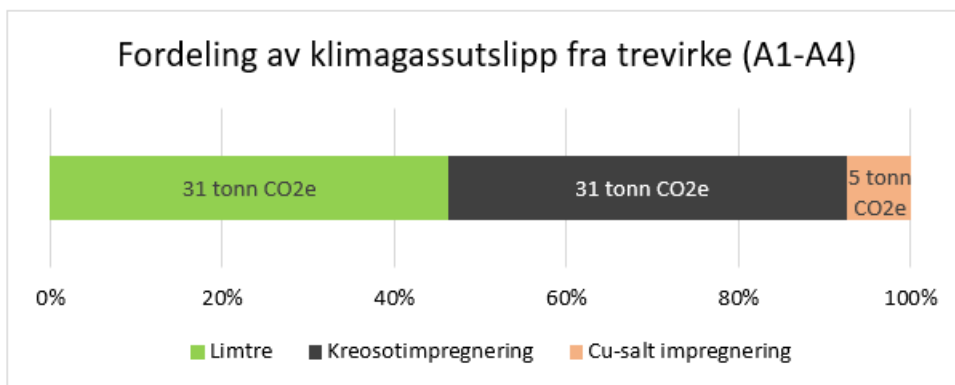
Trebru 0		
Klimagassutslipp fordelt på livsløpsfase		
Livsløpsfase	[CO ₂ e tonn]	[CO ₂ e kg/m ²]
Materialproduksjon (A1-A4)	251	
Drift og vedlikehold (B4-B5)	73	
Totalt	324	900

Tabell 4.2.8 viser de totale beregnede klimagassutslippene for Trebru 0, som er 324 tonn CO₂e, og fordelingen mellom livsløpsfasene. I kolonnen lengst til høyre er det totale utslippstallet omregnet til en mer sammenliknbar enhet i kg CO₂e per kvadratmeter effektivt brudekkeareal (lik 9 m x 40 m = 360 m² for trebrua). Her er totalen for CO₂e lik 900 kg/m².



Figur 4.4: Klimagassutslipp fra materialproduksjon og transport (A1-A4) fordelt etter materiale

Figur 4.4 viser fordelingen av hvilke materialer som står for klimagassutslippene fra materialproduksjon og transport (modul A1 til A4) for Trebru 0. Stål står for litt under halvparten av utslippene, mens trevirke står for omtrent en fjerdedel av utslippene. Her inkluderer kategoriene trevirke og stål utslippene fra impregnering og annen overflatebehandling. For trevirke utgjør faktisk utslippene fra limtre kun 46 %, mens impregneringen, med kreosot som største bidragsyter, står for 54 % av utslippene. Slik at utslippene knyttet til limtre alene kun utgjør rundt 12 % av bruas totale utslipp fra modul A1-A4.



Figur 4.5: Fordeling av klimagassutslipp fra trevirke

4.3 Lavere fagverk: Trebru 1

For Trebru 1 reduseres fagverkshøyden med 1 meter, fra 5 til 4 meter. Det er en 20 % reduksjon av fagverkshøyden.

4.3.1 Utnyttelsesgrad

Fagverk

Tabell 4.3.1: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 1

Lasttilfelle 1				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	2849	1964
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	3216	2192
	Nc,Rd	7558	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	4570	-	1273
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	5198	-	1489
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.42	0.50
STR, likn. 6.10b		-	0.48	0.55
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.60	-	0.26
STR, likn. 6.10b		0.69	-	0.30

Tabell 4.3.2: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 2

Lasttilfelle 2				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	2330	2001
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	2474	2244
	Nc,Rd	7558	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	3957	-	954
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	4322	-	1033
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.34	0.50
STR, likn. 6.10b		-	0.37	0.57
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.52	-	0.19
STR, likn. 6.10b		0.57	-	0.21

Tverrbærere

Tabell 4.3.3: Dimensjonerende krefter, momenter og utnyttelsesgrad i tverrbærerne

Lastkombinasjon	[kNm], [kN]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Krefter	Utnytt.grad	Krefter	Utnytt.grad
	My,Rd	2859		2859	
STR, likn. 6.10a	My,Ed	1692	0.59	1661	0.58
STR, likn. 6.10b	My,Ed	2003	0.70	1980	0.69
	Vc,Rd	2983		2983	
STR, likn. 6.10a	Ved	624	0.21	599	0.20
STR, likn. 6.10b	Ved	741	0.25	716	0.24
	N,Rd	9367		9367	
STR, likn. 6.10a	N,Ed	1480	0.16	1439	0.15
STR, likn. 6.10b	N,Ed	1755	0.19	1714	0.18

Sjekker for potensielt redusert momentkapasitet:

$V_{Ed,max} / V_{c,Rd} = 0.25 < 0.50$. Ingen reduksjon pga. skjærkraft.

$N_{Ed,max} / N_{Rd} = 0.19 < 0.25$

$N_{Ed,max} = 1755 \text{ kN} < 2230 \text{ kN}$. Ingen reduksjon pga. aksialkraft.

Dekke

Tabell 4.3.4: Dimensjonerende spenninger og utnyttelsesgrad i dekket

Lastkombinasjon	[MPa]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Spenninger	Utnytt.grad	Spenninger	Utnytt.grad
Lengdemoment	fmd,x,deck	25.64		25.64	
STR, likn. 6.10a	σ_x	10.99	0.43	11.29	0.44
STR, likn. 6.10b	σ_x	14.81	0.58	15.15	0.59
Lengdeskjær	fvd,x,deck	2.99		2.99	
STR, likn. 6.10a	τ_x	0.61	0.20	0.62	0.21
STR, likn. 6.10b	τ_x	0.81	0.27	0.81	0.27
Tverrmoment	fmd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	σ_y	0.21	0.52	0.21	0.51
STR, likn. 6.10b	σ_y	0.27	0.66	0.27	0.65
Tverrskjær	fvd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	τ_y	0.22	0.52	0.23	0.54
STR, likn. 6.10b	τ_y	0.29	0.69	0.30	0.72

Nedbøyning

Tabell 4.3.5: Nedbøyning av Trebru 1

	Lasttilfelle 1	Lasttilfelle 2
	Nedbøyning (mm)	Nedbøyning (mm)
SLS, trafikklast	72	59
Krav (<L/350)	114	114

Nedbøyningen av Trebru 1 oppfyller kravet for begge lasttilfellene.

Oppsummering

Tabell 4.3.6: Utnyttelsesgrader for Trebru 1

Trebru 1		
Bruelement	Utnyttelsesgrad	Endring fra trebru 0
Fagverk		
Overgurt	0.69	+25.5%
Staver	0.57	+9.6%
Undergurt	0.48	+26.3%
Tverrbærere	0.70	-1.4%
Dekke		
Lengderetning	0.59	+1.7%
Tverretning	0.72	+1.4%

I tabell 4.3.6 er utnyttelsesgraden for Trebru 1 listet på samme måte som den ble gjort for Trebru 0. Det er også lagt til en ny kolonne for den relative endringen av utnyttelsesgraden sammenliknet med Trebru 0.

En kan se at reduseringen av fagverkshøyden med 1 meter fører til størst økning av utnyttelsesgraden i fagverket, og spesielt over- og undergurten. Selve utnyttelsesgradene for fagverkselementene er fortsatt innenfor 70 %, så vidt for overgurten. For tverrbærerne og dekket er endringen minimal.

4.3.2 Utslippsanalyse

Tabell 4.3.7: Materialmengder for Trebru 1

Trebru 1			
Material/element	Mengde		Endring fra trebru 0
Limtre	248.6 m3		-3.1 m3
Stål, rustfritt	1.51 tonn		
Stål, ikke rustfritt	39.38 tonn		
Betong	111.7 m3		
Armering	14.38 tonn		
Asfalt	360 m2		
Rekkverk i stål	80 løpemeter		
Spenntau	57 stk		
Kobberbeslag	178.1 m2		-6.5 m2
Kreosotimpregnering	248.6 m3		-3.1 m3
Cu-salt impregnering	109.1 m3		-3.1 m3
Varmforsinking	501.4 m2		
Pulverlakkering	443 m2		

Reduksjonen av fagverkshøyden fører til en liten reduksjon i mengden limtre og den tilhørende impregneringen og kobberbeslaget.

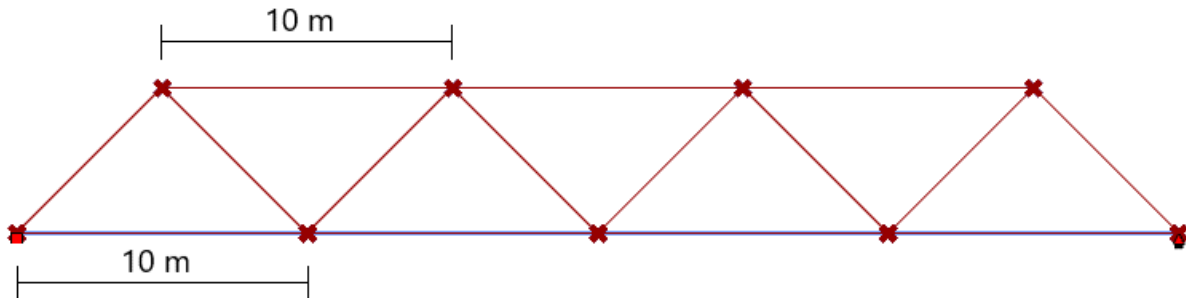
Tabell 4.3.8: Klimagassutslipp for Trebru 1

Trebru 1			
Klimagassutslipp fordelt på livsløpsfase			
Livsløpsfase	[CO2e tonn]	[CO2e kg/m2]	Endring fra trebru 0
Materialproduksjon (A1-A4)	250		
Drift og vedlikehold (B4-B5)	73		
Totalt	323	897	-0.3%

I tabell 4.3.8 vises oversikten av klimagassutslippene til Trebru 1, og det er i tillegg lagt til en kolonne som viser den relative endringen i utslipp sammenliknet med Trebru 0. Det følger kun en minimal reduksjon i utslippet på 0.3 % med 1 tonn CO2e.

4.4 Færre fagverksledd: Trebru 2

For Trebru 2 reduseres antall fagverksledd fra 5 til 4. Det blir dermed 3 færre knutepunkter og stavlengden i overgurtene øker fra 8 meter til 10 meter.



Figur 4.6: Fagverk med 4 ledd i Trebru 2

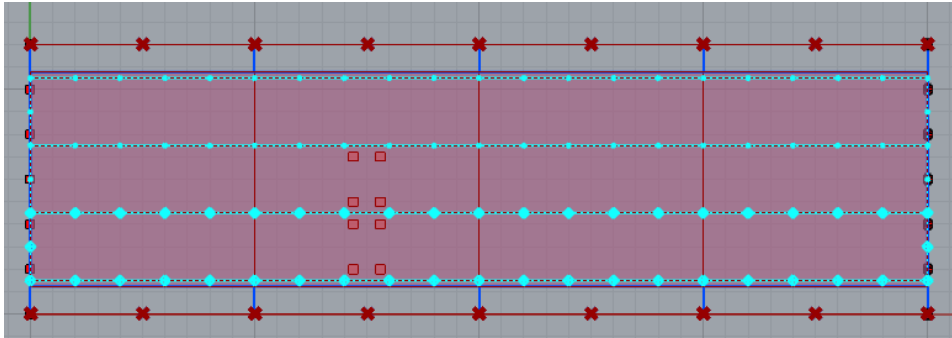
Overgurtens kapasitet for knekking vil reduseres med en økt stavlengde:

Knekking ut av planet	
$L_{k,z}$	1.5 x 10 m = 15 m
I_z	0.0211 m ⁴
λ_z	69.28
$\lambda_{rel,z}$	1.05
k_z	1.089
$k_{c,z}$	0.726
$k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}$	13.92 MPa
$N_{c,Rd}$	6265 kN

En annen nødvendig endring som kommer som følge av reduksjonen av antall fagverksledd er plasseringen av trafikklastene for lasttilfelle 1 og 2. Boggilastene skal plasseres sentrisk mellom tverrbærerne og derfor endres lastplasseringen i lengderetningen som følger:

Lasttilfelle 1

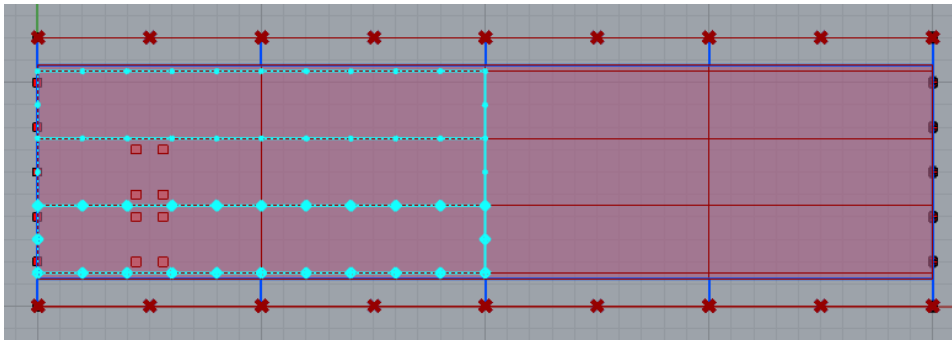
Boggilastene i felt 1 og 2 plasseres sentrisk mellom andre og tredje tverrbærer fra venstre, mens den jevnt fordelte lasten forblir uendret.



Figur 4.7: Plassering av boggilast og jevnt fordelt last i lasttilfelle 1, sett ovenfra

Lasttilfelle 2

Boggilastene i felt 1 og 2 plasseres sentrisk mellom første og andre tverrbærer fra venstre, og den jevnt fordelte lasten plasseres på dekket mellom første og tredje tverrbærer.



Figur 4.8: Plassering av boggilast og jevnt fordelt last i lasttilfelle 2, sett ovenfra

4.4.1 Utnyttelsesgrad

Fagverk

Tabell 4.4.1: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 1

Lasttilfelle 1				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	2361	2039
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	2656	2333
	Nc,Rd	6265	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	3749	-	890
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	4242	-	1059
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.35	0.51
STR, likn. 6.10b		-	0.39	0.59
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.60	-	0.18
STR, likn. 6.10b		0.68	-	0.21

Tabell 4.4.2: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 2

Lasttilfelle 2				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	1866	1710
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	1949	1862
	Nc,Rd	6265	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	2717	-	627
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	2768	-	683
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.28	0.43
STR, likn. 6.10b		-	0.29	0.47
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.43	-	0.13
STR, likn. 6.10b		0.44	-	0.14

Tverrbærere

Tabell 4.4.3: Dimensjonerende krefter, momenter og utnyttelsesgrad i tverrbærerne

Lastkombinasjon	[kNm], [kN]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Krefter	Utnytt.grad	Krefter	Utnytt.grad
	My,Rd	2859		2859	
STR, likn. 6.10a	My,Ed	1955	0.68	1971	0.69
STR, likn. 6.10b	My,Ed	2292	0.80	2316	0.81
	Vc,Rd	2983		2983	
STR, likn. 6.10a	Ved	784	0.26	781	0.26
STR, likn. 6.10b	Ved	928	0.31	923	0.31
	N,Rd	9367		9367	
STR, likn. 6.10a	N,Ed	1797	0.19	1906	0.20
STR, likn. 6.10b	N,Ed	2091	0.22	2247	0.24

Sjekker for potensielt redusert momentkapasitet:

$V_{Ed,max} / V_{c,Rd} = 0.31 < 0.50$. Ingen reduksjon pga. skjærkraft.

$N_{Ed,max} / N_{Rd} = 0.24 < 0.25$

$N_{Ed,max} = 2247 \text{ kN} > 2230 \text{ kN}$. Mulig reduksjon pga. aksialkraft:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = 0.24, \quad a = \frac{A - 2bt_f}{A} = 0.51 > 0.50 \rightarrow a = 0.50$$

$$M_{N,y,Rd} = M_{y,Rd} \frac{1-n}{1-0.5a} = 2897 \text{ kNm} > M_{y,Rd} \rightarrow M_{N,y,Rd} = M_{y,Rd} = 2859 \text{ kNm}$$

Ingen reduksjon pga. aksialkraft.

Dekke

Tabell 4.4.4: Dimensjonerende spenninger og utnyttelsesgrad i dekket

Lastkombinasjon	[MPa]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Spenninger	Utnytt.grad	Spenninger	Utnytt.grad
Lengdemoment	fmd,x,deck	25.64		25.64	
STR, likn. 6.10a	σ_x	12.49	0.49	15.45	0.60
STR, likn. 6.10b	σ_x	16.76	0.65	20.48	0.80
Lengdeskjær	fvd,x,deck	2.99		2.99	
STR, likn. 6.10a	τ_x	0.76	0.25	0.93	0.31
STR, likn. 6.10b	τ_x	0.97	0.33	1.20	0.40
Tverrmoment	fmd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	σ_y	0.31	0.75	0.25	0.61
STR, likn. 6.10b	σ_y	0.41	0.99	0.34	0.81
Tverrskjær	fvd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	τ_y	0.14	0.33	0.29	0.70
STR, likn. 6.10b	τ_y	0.16	0.37	0.38	0.90

Nedbøyning

Tabell 4.4.5: Nedbøyning av Trebru 2

	Lasttilfelle 1	Lasttilfelle 2
	Nedbøyning (mm)	Nedbøyning (mm)
SLS, trafikklast	79	63
Krav (<L/350)	114	114

Nedbøyningen av Trebru 2 oppfyller kravet for begge lasttilfellene.

Oppsummering

Tabell 4.4.6: Utnyttelsesgrader for Trebru 2

Trebru 2		
Bruelement	Utnyttelsesgrad	Endring fra trebru 0
Fagverk		
Overgurt	0.68	+23.6%
Staver	0.59	+13.5%
Undergurt	0.39	+2.6%
Tverrbærere	0.81	+14.1%
Dekke		
Lengderetning	0.80	+37.9%
Tverretning	0.99	+39.4%

Reduksjonen av antall fagverksledd fra 5 til 4 leder til en betraktelig økning av utnyttelsesgraden i dekket på nesten 40 %, både i lengde- og tverretning. Det dytter utnyttelsesgraden i dekkets tverretning helt opp til 0.99. For fagverkselementene og tverrbærerne er økningen mindre, men fortsatt nevneverdig. Utnyttelsesgraden for fagverket er innenfor 70 %. Et potensielt tiltak for å motvirke økningen av utnyttelsesgraden i dekket kunne vært å øke dekketykkelsen. Det ville derimot samtidig økt mengden limtre betraktelig og dermed dempet utslippskuttene en del.

4.4.2 Utslippsanalyse

Tabell 4.4.7: Materialmengder for Trebru 2

Trebru 2			
Material/element	Mengde		Endring fra trebru 0
Limtre	246.6 m3		-5.1 m3
Stål, rustfritt	1.33 tonn		-0.18 tonn
Stål, ikke rustfritt	31.77 tonn		-7.61 tonn
Betong	111.7 m3		
Armering	14.38 tonn		
Asfalt	360 m2		
Rekkverk i stål	80 løpemeter		
Spennetau	57 stk		
Kobberbeslag	173.1 m2		-11.5 m2
Kreosotimpregnering	246.6 m3		-5.1 m3
Cu-salt impregnering	107 m3		-5.2 m3
Varmforsinking	424 m2		-77.4 m2
Pulverlakkering	374.3 m2		-68.7 m2

Med reduksjonen av antall fagverksledd blir det en stor nedgang i mengden stål på nesten 8 tonn. Dette har sammenheng med at Trebru 2 har færre knutepunkt og tverrbærere. Mengden overflatebehandling av stål reduseres også som følge.

Tabell 4.4.8: Klimagassutslipp for Trebru 2

Trebru 2			
Klimagassutslipp fordelt på livsløpsfase			
Livsløpsfase	[CO2e tonn]	[CO2e kg/m2]	Endring fra trebru 0
Materialproduksjon (A1-A4)	231		
Drift og vedlikehold (B4-B5)	70		
Totalt	301	836	-7.1%

Klimagassutslippene for Trebru 2 er 7.1 % lavere enn for Trebru 0 med en reduksjon på 23 tonn CO2e. Reduksjonen av stålmengden er den store faktoren bak utslippsnedgangen.

4.5 Redusert dekketykkelse: Trebru 3

For Trebru 3 reduseres dekketykkelsen med 100 mm, fra 400 til 300 mm. Det er en 25 % reduksjon av dekketykkelsen.

Med den reduserte dekketykkelsen gjøres det en antakelse om at spennkraften også reduseres slik at de dimensjonerende fasthetene i dekkets tverretning forblir uendret.

4.5.1 Utnyttelsesgrad

Fagverk

Tabell 4.5.1: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 1

Lasttilfelle 1				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	2644	1728
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	3008	1939
	Nc,Rd	7558	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	3564	-	1130
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	4086	-	1336
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.39	0.44
STR, likn. 6.10b		-	0.44	0.49
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.47	-	0.23
STR, likn. 6.10b		0.54	-	0.27

Tabell 4.5.2: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 2

Lasttilfelle 2				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	2143	1778
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	2291	2011
	Nc,Rd	7558	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	3071	-	818
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	3382	-	890
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.32	0.45
STR, likn. 6.10b		-	0.34	0.51
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.41	-	0.16
STR, likn. 6.10b		0.45	-	0.18

Tverrbærere

Tabell 4.5.3: Dimensjonerende krefter, momenter og utnyttelsesgrad i tverrbærerne

Lastkombinasjon	[kNm], [kN]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Krefter	Utnytt.grad	Krefter	Utnytt.grad
	My,Rd	2859		2859	
STR, likn. 6.10a	My,Ed	1894	0.66	1913	0.67
STR, likn. 6.10b	My,Ed	2266	0.79	2302	0.81
	Vc,Rd	2983		2983	
STR, likn. 6.10a	Ved	610	0.20	614	0.21
STR, likn. 6.10b	Ved	734	0.25	739	0.25
	N,Rd	9367		9367	
STR, likn. 6.10a	N,Ed	1130	0.12	1206	0.13
STR, likn. 6.10b	N,Ed	1368	0.15	1446	0.15

Sjekker for potensielt redusert momentkapasitet:

$V_{Ed,max} / V_{c,Rd} = 0.25 < 0.50$. Ingen reduksjon pga. skjærkraft.

$N_{Ed,max} / N_{Rd} = 0.15 < 0.25$

$N_{Ed,max} = 1446 \text{ kN} < 2230 \text{ kN}$. Ingen reduksjon pga. aksialkraft.

Dekke

Tabell 4.5.4: Dimensjonerende spenninger og utnyttelsesgrad i dekket

		Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
Lastkombinasjon	[MPa]	Spenninger	Utnytt.grad	Spenninger	Utnytt.grad
Lengdemoment	fmd,x,deck	25.64		25.64	
STR, likn. 6.10a	σ_x	17.40	0.68	17.67	0.69
STR, likn. 6.10b	σ_x	23.67	0.92	24.07	0.94
Lengdeskjær	fvd,x,deck	2.99		2.99	
STR, likn. 6.10a	τ_x	0.83	0.28	0.82	0.27
STR, likn. 6.10b	τ_x	1.10	0.37	1.10	0.37
Tverrmoment	fmd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	σ_y	0.25	0.61	0.25	0.61
STR, likn. 6.10b	σ_y	0.33	0.80	0.33	0.80
Tverrskjær	fvd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	τ_y	0.29	0.69	0.30	0.73
STR, likn. 6.10b	τ_y	0.39	0.93	0.41	0.97

Nedbøyning

Tabell 4.5.5: Nedbøyning av Trebru 3

	Lasttilfelle 1	Lasttilfelle 2
	Nedbøyning (mm)	Nedbøyning (mm)
SLS, trafikklast	89	79
Krav (<L/350)	114	114

Nedbøyningen av Trebru 3 oppfyller kravet for begge lasttilfellene.

Oppsummering

Tabell 4.5.6: Utnyttelsesgrader for Trebru 3

Trebru 3		
Bruelement	Utnyttelsesgrad	Endring fra trebru 0
Fagverk		
Overgurt	0.54	-1.8%
Staver	0.51	-1.9%
Undergurt	0.44	+15.8%
Tverrbærere	0.81	+14.1%
Dekke		
Lengderetning	0.94	+62.1%
Tverretning	0.97	+36.6%

Reduksjonen av dekketykkelsen fra 400 til 300 mm har en stor effekt på utnyttelsesgraden i dekket. I dekkets lengderetning er det en meget stor økning på over 60 %. Utnyttelsesgraden i dekkets tverretning opplever også en stor økning på rundt 37 %. Både undergurtens og tverrbærernes utnyttelsesgrad øker med rundt 15 %, mens resten av fagverket er lite påvirket.

4.5.2 Utslippsanalyse

Tabell 4.5.7: Materialmengder for Trebru 3

Trebru 3			
Material/element	Mengde		Endring fra trebru 0
Limtre	215.9 m ³		-35.8 m ³
Stål, rustfritt	1.51 tonn		
Stål, ikke rustfritt	39.38 tonn		
Betong	111.7 m ³		
Armering	14.38 tonn		
Asfalt	360 m ²		
Rekkverk i stål	80 løpemeter		
Spennetau	57 stk		
Kobberbeslag	184.6 m ²		
Kreosotimpregnering	215.9 m ³		-35.8 m ³
Cu-salt impregnering	111.3 m ³		-0.9 m ³
Varmforsinking	501.4 m ²		
Pulverlakkering	443 m ²		

For Trebru 3 er det en temmelig stor nedgang i mengden limtre på rundt 36 m³ som følge av reduksjonen av dekketykkelsen.

Tabell 4.5.8: Klimagassutslipp for Trebru 3

Trebru 3			
Klimagassutslipp fordelt på livsløpsfase			
Livsløpsfase	[CO ₂ e tonn]	[CO ₂ e kg/m ²]	Endring fra trebru 0
Materialproduksjon (A1-A4)	242		
Drift og vedlikehold (B4-B5)	73		
Totalt	315	875	-2.8%

Klimagassutslippene reduseres med 2.8 % og 9 tonn CO₂e for Trebru 3.

4.6 Færre fagverksledd + høyere fagverk: Trebru 4

For Trebru 4 reduseres antall fagverksledd fra 5 til 4, samtidig som fagverkshøyden øker med 1 meter, fra 5 til 6 meter.

Overgurtens kapasitet for knekking vil reduseres med en økt stavlengde som for Trebru 2:

$N_{c,Rd}$	6265 kN
------------	----------------

Plasseringen av trafikklaster i lasttilfelle 1 og 2 blir samme som for Trebru 2.

4.6.1 Utnyttelsesgrad

Fagverk

Tabell 4.6.1: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 1

Lasttilfelle 1				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	1955	1884
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	2196	2154
	Nc,Rd	6265	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	3138	-	822
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	3548	-	978
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.29	0.48
STR, likn. 6.10b		-	0.32	0.54
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.50	-	0.17
STR, likn. 6.10b		0.57	-	0.20

Tabell 4.6.2: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 2

Lasttilfelle 2				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	1548	1581
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	1616	1721
	Nc,Rd	6265	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	2277	-	580
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	2318	-	632
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.23	0.40
STR, likn. 6.10b		-	0.24	0.43
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.36	-	0.12
STR, likn. 6.10b		0.37	-	0.13

Tverrbærere

Tabell 4.6.3: Dimensjonerende krefter, momenter og utnyttelsesgrad i tverrbærerne

Lastkombinasjon	[kNm], [kN]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Krefter	Utnytt.grad	Krefter	Utnytt.grad
	My,Rd	2859		2859	
STR, likn. 6.10a	My,Ed	1960	0.69	1976	0.69
STR, likn. 6.10b	My,Ed	2298	0.80	2322	0.81
	Vc,Rd	2983		2983	
STR, likn. 6.10a	Ved	786	0.26	782	0.26
STR, likn. 6.10b	Ved	930	0.31	924	0.31
	N,Rd	9367		9367	
STR, likn. 6.10a	N,Ed	1798	0.19	1908	0.20
STR, likn. 6.10b	N,Ed	2093	0.22	2250	0.24

Sjekker for potensielt redusert momentkapasitet:

$V_{Ed,max} / V_{c,Rd} = 0.31 < 0.50$. Ingen reduksjon pga. skjærkraft.

$N_{Ed,max} / N_{Rd} = 0.24 < 0.25$

$N_{Ed,max} = 2250 \text{ kN} > 2230 \text{ kN}$. Mulig reduksjon pga. aksialkraft:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = 0.24, \quad a = \frac{A - 2bt_f}{A} = 0.51 > 0.50 \rightarrow a = 0.50$$

$$M_{N,y,Rd} = M_{y,Rd} \frac{1-n}{1-0.5a} = 2897 \text{ kNm} > M_{y,Rd} \rightarrow M_{N,y,Rd} = M_{y,Rd} = 2859 \text{ kNm}$$

Ingen reduksjon pga. aksialkraft.

Dekke

Tabell 4.6.4: Dimensjonerende spenninger og utnyttelsesgrad i dekket

Lastkombinasjon	[MPa]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Spenninger	Utnytt.grad	Spenninger	Utnytt.grad
Lengdemoment	fmd,x,deck	25.64		25.64	
STR, likn. 6.10a	σ_x	12.30	0.48	15.38	0.60
STR, likn. 6.10b	σ_x	16.58	0.65	20.40	0.80
Lengdeskjær	fvd,x,deck	2.99		2.99	
STR, likn. 6.10a	τ_x	0.76	0.25	0.93	0.31
STR, likn. 6.10b	τ_x	0.97	0.33	1.20	0.40
Tverrmoment	fmd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	σ_y	0.31	0.76	0.25	0.61
STR, likn. 6.10b	σ_y	0.41	0.99	0.34	0.81
Tverrskjær	fvd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	τ_y	0.14	0.33	0.29	0.70
STR, likn. 6.10b	τ_y	0.16	0.38	0.38	0.91

Nedbøyning

Tabell 4.6.5: Nedbøyning av Trebru 4

	Lasttilfelle 1	Lasttilfelle 2
	Nedbøyning (mm)	Nedbøyning (mm)
SLS, trafikklast	74	61
Krav (<L/350)	114	114

Nedbøyningen av Trebru 4 oppfyller kravet for begge lasttilfellene.

Oppsummering

Tabell 4.6.6: Utnyttelsesgrader for Trebru 4

Trebru 4		
Bruelement	Utnyttelsesgrad	Endring fra trebru 0
Fagverk		
Overgurt	0.57	+3.6%
Staver	0.54	+3.8%
Undergurt	0.32	-15.8%
Tverrbærere	0.86	+21.1%
Dekke		
Lengderetning	0.80	+37.9%
Tverretning	0.99	+39.4%

Med reduksjonen av antall fagverksledd kombinert med 1 meter høyere fagverk er det fortsatt i dekket den største økningen av utnyttelsesgrad forekommer. Som for Trebru 2 er det en økning på oppunder 40 %. Tverrbærernes utnyttelsesgrad øker med rundt 20 %, mens undergurtens utnyttelsesgrad reduseres med 16 %.

Overgurtene og stavene har kun en liten økning.

4.6.2 Utslippsanalyse

Tabell 4.6.7: Materialmengder for Trebru 4

Trebru 4			
Material/element	Mengde		Endring fra trebru 0
Limtre	250.2 m ³		-1.5 m ³
Stål, rustfritt	1.33 tonn		-0.18 tonn
Stål, ikke rustfritt	31.77 tonn		-7.61 tonn
Betong	111.7 m ³		
Armering	14.38 tonn		
Asfalt	360 m ²		
Rekkverk i stål	80 løpemeter		
Spennetau	57 stk		
Kobberbeslag	180.7 m ²		-3.9 m ²
Kreosotimpregnering	250.2 m ³		-1.5 m ³
Cu-salt impregnering	110.7 m ³		-1.5 m ³
Varmforsinking	424 m ²		-77.4 m ²
Pulverlakkering	374.3 m ²		-68.7 m ²

Med ett fagverksledd mindre og 1 meter høyere fagverk blir mengden limtre marginalt mindre. Det er en stor nedgang i mengden stål på nesten 8 tonn, som for Trebru 2.

Tabell 4.6.8: Klimagassutslipp for Trebru 4

Trebru 4			
Klimagassutslipp fordelt på livsløpsfase			
Livsløpsfase	[CO ₂ e tonn]	[CO ₂ e kg/m ²]	Endring fra trebru 0
Materialproduksjon (A1-A4)	233		
Drift og vedlikehold (B4-B5)	71		
Totalt	304	844	-6.2%

Reduksjonen i klimagassutslipp er på litt over 6 % med et kutt på 20 tonn CO₂e for Trebru 4. Reduksjonen er noe mindre enn for Trebru 2 på grunn av den økte fagverkshøyden.

4.7 Redusert dekketykkelse + høyere fagverk: Trebru 5

For Trebru 5 reduseres dekketykkelsen med 100 mm, fra 400 til 300 mm, samtidig som fagverkshøyden øker med 1 meter, fra 5 til 6 meter.

Som for Trebru 3 er det gjort en antakelse om at spennkraften også reduseres slik at de dimensjonerende fasthetene i dekkets tverretning forblir uendret.

4.7.1 Utnyttelsesgrad

Fagverk

Tabell 4.7.1: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 1

Lasttilfelle 1				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	2192	1629
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	2489	1827
	Nc,Rd	7558	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	2984	-	1065
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	3418	-	1258
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.32	0.41
STR, likn. 6.10b		-	0.37	0.46
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.39	-	0.21
STR, likn. 6.10b		0.45	-	0.25

Tabell 4.7.2: Dimensjonerende krefter og utnyttelsesgrad i fagverket, lasttilfelle 2

Lasttilfelle 2				
Lastkombinasjon	[kN]	Overgurt + endestaver	Undergurt	Staver
	Nt,Rd	6867	6762	3965
STR, likn. 6.10a	Nt,Ed	-	1786	1676
STR, likn. 6.10b	Nt,Ed	-	1908	1894
	Nc,Rd	7558	8496	4981
STR, likn. 6.10a	Nc,Ed	2573	-	773
STR, likn. 6.10b	Nc,Ed	2831	-	840
	Aksial strekk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	-	0.26	0.42
STR, likn. 6.10b		-	0.28	0.48
	Aksial trykk			
STR, likn. 6.10a	Utnyttelsesgrad	0.34	-	0.16
STR, likn. 6.10b		0.37	-	0.17

Tverrbærere

Tabell 4.7.3: Dimensjonerende krefter, momenter og utnyttelsesgrad i tverrbærerne

Lastkombinasjon	[kNm], [kN]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Krefter	Utnytt.grad	Krefter	Utnytt.grad
	My,Rd	2859		2859	
STR, likn. 6.10a	My,Ed	1901	0.66	1915	0.67
STR, likn. 6.10b	My,Ed	2274	0.80	2304	0.81
	Vc,Rd	2983		2983	
STR, likn. 6.10a	Ved	610	0.20	615	0.21
STR, likn. 6.10b	Ved	734	0.25	740	0.25
	N,Rd	9367		9367	
STR, likn. 6.10a	N,Ed	1117	0.12	1208	0.13
STR, likn. 6.10b	N,Ed	1354	0.14	1448	0.15

Sjekker for potensielt redusert momentkapasitet:

$V_{Ed,max} / V_{c,Rd} = 0.25 < 0.50$. Ingen reduksjon pga. skjærkraft.

$N_{Ed,max} / N_{Rd} = 0.15 < 0.25$

$N_{Ed,max} = 1448 \text{ kN} < 2230 \text{ kN}$. Ingen reduksjon pga. aksialkraft.

Dekke

Tabell 4.7.4: Dimensjonerende spenninger og utnyttelsesgrad i dekket

Lastkombinasjon	[MPa]	Lasttilfelle 1		Lasttilfelle 2	
		Spenninger	Utnytt.grad	Spenninger	Utnytt.grad
Lengdemoment	fmd,x,deck	25.64		25.64	
STR, likn. 6.10a	σ_x	17.27	0.67	17.53	0.68
STR, likn. 6.10b	σ_x	23.53	0.92	23.93	0.93
Lengdeskjær	fvd,x,deck	2.99		2.99	
STR, likn. 6.10a	τ_x	0.82	0.27	0.82	0.27
STR, likn. 6.10b	τ_x	1.10	0.37	1.10	0.37
Tverrmoment	fmd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	σ_y	0.25	0.61	0.25	0.61
STR, likn. 6.10b	σ_y	0.33	0.80	0.33	0.80
Tverrskjær	fvd,y,deck	0.42		0.42	
STR, likn. 6.10a	τ_y	0.29	0.69	0.30	0.72
STR, likn. 6.10b	τ_y	0.39	0.93	0.40	0.97

Nedbøyning

Tabell 4.7.5: Nedbøyning av Trebru 5

	Lasttilfelle 1	Lasttilfelle 2
	Nedbøyning (mm)	Nedbøyning (mm)
SLS, trafikklast	84	77
Krav (<L/350)	114	114

Nedbøyningen av Trebru 5 oppfyller kravet for begge lasttilfellene.

Oppsummering

Tabell 4.7.6: Utnyttelsesgrader for Trebru 5

Trebru 5		
Bruelement	Utnyttelsesgrad	Endring fra trebru 0
Fagverk		
Overgurt	0.45	-18.2%
Staver	0.48	-7.7%
Undergurt	0.37	-2.6%
Tverrbærere	0.81	+14.1%
Dekke		
Lengderetning	0.93	+60.3%
Tverretning	0.97	+36.6%

For Trebru 5, med 100 mm reduksjon av dekketykkelsen kombinert med 1 meter økning av fagverkshøyden, er det en stor økning av utnyttelsesgraden i dekket, som for Trebru 3. Utnyttelsesgraden av de ulike fagverkselementene reduseres, mens den for tverrbærerne øker noe.

4.7.2 Utslippsanalyse

Tabell 4.7.7: Materialmengder for Trebru 5

Trebru 5			
Material/element	Mengde		Endring fra trebru 0
Limtre	220.8 m3		-30.9 m3
Stål, rustfritt	1.51 tonn		
Stål, ikke rustfritt	39.38 tonn		
Betong	111.7 m3		
Armering	14.38 tonn		
Asfalt	360 m2		
Rekkverk i stål	80 løpemeter		
Spennetau	57 stk		
Kobberbeslag	194.8 m2		+10 m2
Kreosotimpregnering	220.8 m3		-30.9 m3
Cu-salt impregnering	116.1 m3		+4 m3
Varmforsinking	501.4 m2		
Pulverlakkering	443 m2		

Med reduksjon av dekketykkelsen og økning av fagverkshøyden for Trebru 5 er det en nedgang i limtremengden og en økning i kobberbeslag.

Tabell 4.7.8: Klimagassutslipp for Trebru 5

Trebru 5			
Klimagassutslipp fordelt på livsløpsfase			
Livsløpsfase	[CO2e tonn]	[CO2e kg/m2]	Endring fra trebru 0
Materialproduksjon (A1-A4)	244		
Drift og vedlikehold (B4-B5)	74		
Totalt	318	883	-1.9%

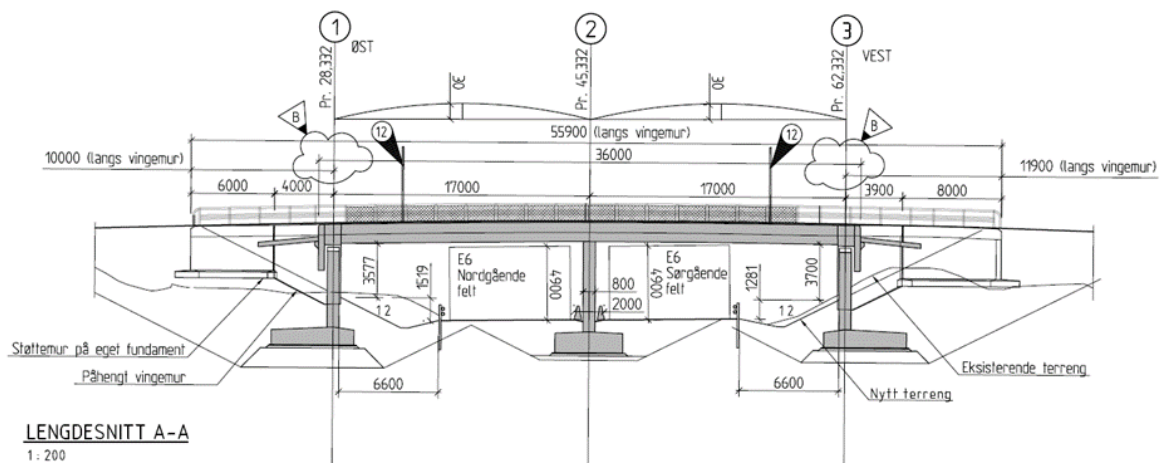
Reduksjonen i klimagassutslipp for Trebru 5 er på nesten 2 % med 7 tonn CO2e. Nedgangen er noe mindre enn for Trebru 3 siden fagverkshøyden er økt.

4.8 Sammenlikning med utslipp fra 3 betongbruer

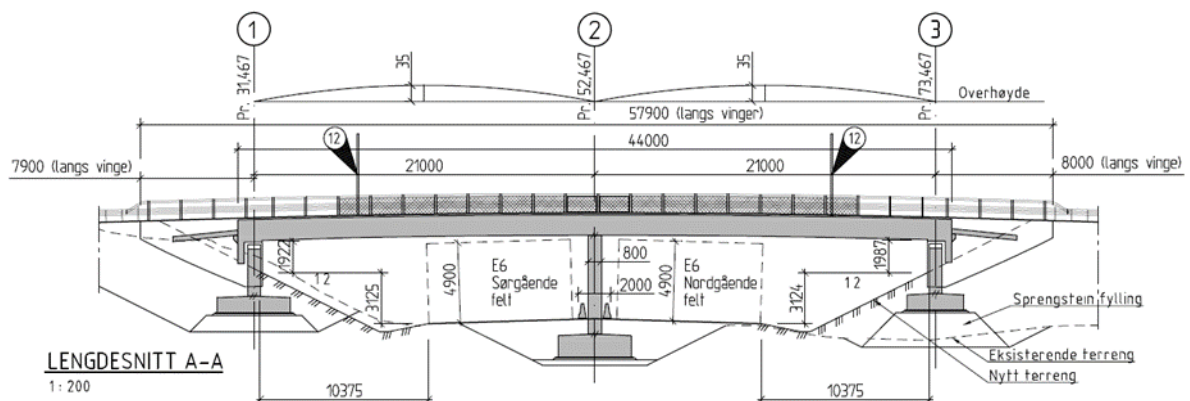
Klimagassutslippene til Trebru 0 skal sammenliknes med tre andre overgangsbruer i betong. De tre betongbrueene er Skjerdingsstadbrua, Hofstadbrua og Stillingabrua. Skjerdingsstadbrua og Hofstadbrua er begge prosjekterte tospenns slakkarmerte platebruer over E6 Kvål–Melhus. Stillingabrua er en tospenns slakkarmert bjelkebru over E18 Rugtvedt–Dørdal som ble ferdigstilt i 2019.

Tabell 4.8.1: Hovedinformasjon om betongbrueene

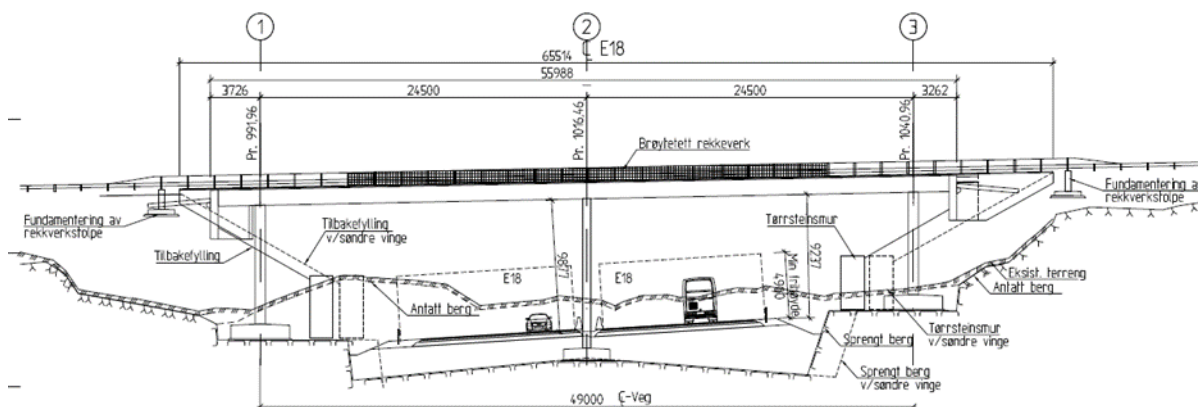
	Skjerdingsstadbrua	Hofstadbrua	Stillingabrua
Type	Platebru	Platebru	Bjelkebru
Effektivt dekkeareal	407 m ²	504 m ²	420 m ²
Antall spenn	2	2	2
Spennvidde	17 m	21 m	24.5 m
ADT	4300	800	<1500



Figur 4.9: Lengdesnitt av Skjerdingsstadbrua [31]



Figur 4.10: Lengdesnitt av Hofstadbrua [32]



Figur 4.11: Lengdesnitt av Stillingabrua [33]

Skjerdingsstadbrua og Hofstadbrua var nylig i prosjekteringsfasen, og der var det mulig å få tilgang til informative BIM-modeller som gjorde beregning av materialmengder enklere. For Stillingabrua har betongmengder blitt beregnet basert på mål og dimensjoner fra tegningssett av brua. For beregning av armering i Stillingabrua ble det gjort en antakelse om armeringsmengdene 190 kg per m³ betong i overbygningen og 150 kg per m³ betong i underbygningen.

For de tre betongbruene tas alle materialer og elementer bortsett fra løs- og fyllmasser med i utslippsberegningene, akkurat som for trebrua. Det samme Excelarket VegLCA v4.10 som ble brukt for trebrua blir også brukt for betongbruene. Tabell 4.8.2 viser de viktigste materialene og elementene som er med i beregningen av utslippene.

Tabell 4.8.2: Material- og elementliste for utslippsanalyse av betongbruene

Betongbruene		
Material	Element	Materialklasse
Betong	Fundament	B45/B30 SV
	Vegger	B45 SV
	Plater	B45 SV
	Søylar	B45 SV
	Kantdrager	B45 SV
	Vingemur	B45 SV
	Støttemur	B45 SV
Stål	Armering	B500NC
	Lager	Rustfritt
	Bolter	Rustfritt
	Rekkverk	Stål
Asfalt	Slitelag	AB16 pmb
	Bindlag	AB16 pmb
	Membran	Topeka 4S
	Membran	A3-2

De beregnede materialmengdene for de tre betongbruene er listet i tabell 4.8.3 til 4.8.5.

Tabell 4.8.3-4.8.5: Materialmengder for betongbruene

Skjerdingsstadbrua			Hofstadbrua		
Material/element	Mengde		Material/element	Mengde	
Betong, B45 SV	990.2	m3	Betong, B45 SV	883	m3
Betong, B30 SV	16	m3	Betong, B30 SV	14	m3
Armering	159.87	tonn	Armering	146.24	tonn
Stål, rustfritt	2.09	tonn	Stål, rustfritt	2.4	tonn
Rekkverk	108	løpemeter	Rekkverk	88	løpemeter
Asfalt	407	m2	Asfalt	504	m2

Stillingabrua		
Material/element	Mengde	
Betong, B45	596.1	m3
Betong, B30	0	m3
Armering	105.5	tonn
Stål, rustfritt	0.71	tonn
Rekkverk	112	løpemeter
Asfalt	420	m2

Det noteres at det er mer betong i Skjerdingsstadbrua enn Hofstadbrua, på tross av at spennvidden er mindre. Dette kommer av at det går mer betong til fundamentene og veggene i Skjerdingsstadbrua og at brua i tillegg har støttemurer på egne fundament i endene.

En av inputene i VegLCA v4.10 er ÅDT, som står for årsdøgnstrafikk. I regnearket ligger det et skille ved ÅDT = 3000. Alle ÅDT-verdier under 3000 gir samme påvirkning på utslippene fra Drift og vedlikehold (B4-B5). Dersom ÅDT er over 3000 øker utslippene fra modul B4-B5. Skjerdingsstadbrua har en ÅDT lik 4300, de to andre betongbruene har en ÅDT under 3000 og Trebru 0 (Tveit bru) har en ÅDT lik 1150. For å få en så jevnbyrdig sammenlikning som mulig er ÅDT for Skjerdingsstadbrua, som skiller seg ut, satt under 3000 i utslippsberegningene.

Tabell 4.8.6-4.8.8: Klimagassutslipp for betongbruene

Skjeringstadbrua			
Klimagassutslipp fordelt på livsløpsfase			
Livsløpsfase	[CO2e tonn]	[CO2e kg/m ²]	Endring fra trebru 0
Materialproduksjon (A1-A4)	598		
Drift og vedlikehold (B4-B5)	33		
Totalt	631	1550	+72.3%

Hofstadbrua			
Klimagassutslipp fordelt på livsløpsfase			
Livsløpsfase	[CO2e tonn]	[CO2e kg/m ²]	Endring fra trebru 0
Materialproduksjon (A1-A4)	546		
Drift og vedlikehold (B4-B5)	41		
Totalt	587	1165	+29.4%

Stillingabrua			
Klimagassutslipp fordelt på livsløpsfase			
Livsløpsfase	[CO2e tonn]	[CO2e kg/m ²]	Endring fra trebru 0
Materialproduksjon (A1-A4)	372		
Drift og vedlikehold (B4-B5)	40		
Totalt	412	981	+9.0%

I tabell 4.8.6 til 4.8.8 er klimagassutslipp for de tre betongbruene listet opp. Kolonnen lengst til høyre sammenlikner CO₂e kg/m² tallene for betongbruene med Trebru 0, og angir den relative endringen.

Av utslippstallene ser en at alle betongbruene har en høyere mengde CO₂e per kvadratmeter effektivt dekkeareal. Stillingabrua har klimagassutslipp på 981 CO₂e kg/m² og dermed 9 % større utslipp enn Trebru 0. Hofstadbrua har klimagassutslipp på 1165 CO₂e kg/m² og ca. 29 % større utslipp enn Trebru 0. Det er Skjeringstadbrua som skiller seg ut med klart størst utslipp. Den har klimagassutslipp på hele 1550 CO₂e kg/m² og ca. 72 % større utslipp enn Trebru 0.

5 Diskusjon og konklusjon

5.1 Diskusjon og konklusjon

Hovedmålet med denne oppgaven var å undersøke gjennom en parametrisert analyse hvordan tre ulike bruparametere påvirker karbonavtrykket og utnyttelsesgraden av en fagverksbru i tre. Ved å lage en parametrisert brumodell basert på Tveit bru og deretter teste den for laster og lastkombinasjoner i henhold til Eurokodene, ble de dimensjonerende kreftene i bruelementene funnet. Utnyttelsesgraden ble beregnet etter å ha kalkulert de dimensjonerende kapasitetene. Videre ble det gjort en utslippsanalyse av trebruene og tre betongbruer for sammenlikning.

Med tanke på utnyttelsesgrad viser den parametriserte analysen at hverken Trebru 4 eller Trebru 5, som er kombinasjoner av to parameterendringer, er helt optimale løsninger. Det er først og fremst på grunn av den store økningen av utnyttelsesgraden i det tverrspente dekke. Utnyttelsesgraden i fagverket er mer eller mindre beholdt eller redusert for både Trebru 4 og 5, og ligger også godt innenfor den konservative grensen på 70 % utnyttelsesgrad. Dette har sammenheng med at det høyere fagverket gir en bedre fordeling av kreftene. For fagverket i Trebru 4 kompenseres økningen av fagverkshøyden for reduksjonen av antall fagverksledd. Tverrbærerne opplever i Trebru 4 og 5 begge en oppgang i utnyttelsesgraden fra Trebru 0, men den er mer til å leve med og er langt ifra like stor som for dekket.

Tabell 5.1: Oversikt over utnyttelsesgrad for trebruene

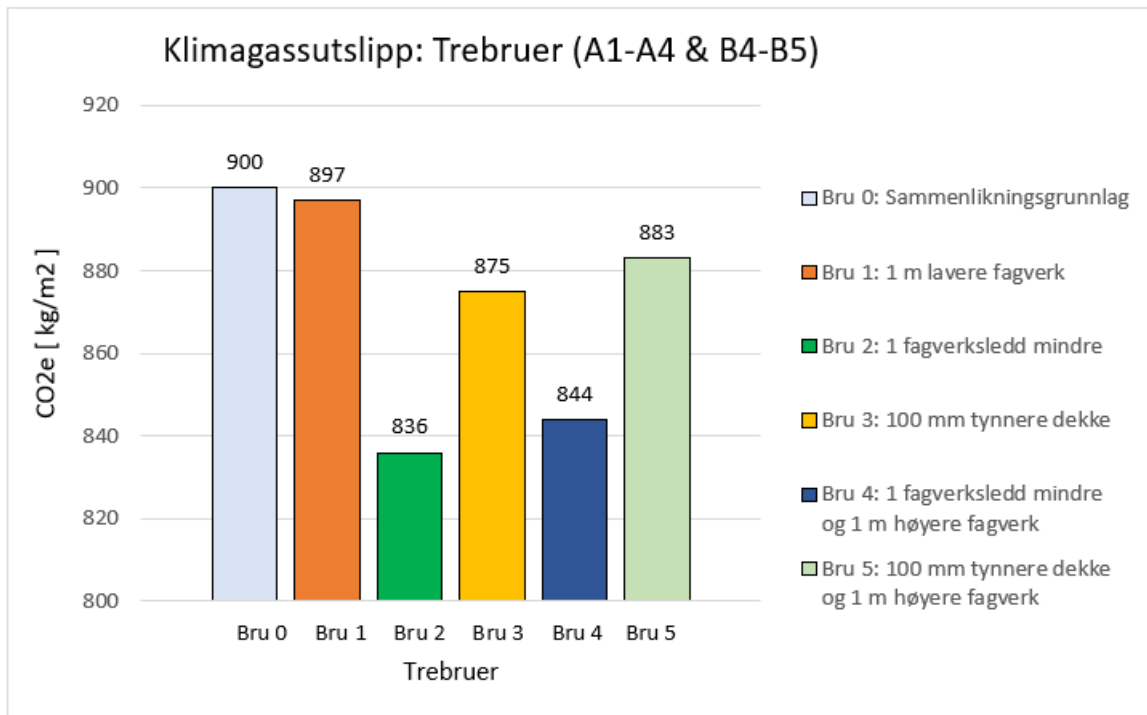
Trebru 0		Trebru 1		Trebru 2		Trebru 3		Trebru 4		Trebru 5	
		1 m lavere fagverk		1 fagverksledd mindre		100mm tynnere dekke		1 fagverksledd mindre & 1m høyere fagverk		100mm tynnere dekke & 1m høyere fagverk	
Bruelement	Utnytt.grad	Utnytt.grad	Endring	Utnytt.grad	Endring	Utnytt.grad	Endring	Utnytt.grad	Endring	Utnytt.grad	Endring
Fagverk											
Overgurt	0.55	0.69	+25.5%	0.68	+23.6%	0.54	-1.8%	0.57	+3.6%	0.45	-18.2%
Staver	0.52	0.57	+9.6%	0.59	+13.5%	0.51	-1.9%	0.54	+3.8%	0.48	-7.7%
Undergurt	0.38	0.48	+26.3%	0.39	+2.6%	0.44	+15.8%	0.32	-15.8%	0.37	-2.6%
Tverrbærere											
Dekke											
Lengderetning	0.58	0.59	+1.7%	0.80	+37.9%	0.94	+62.1%	0.80	+37.9%	0.93	+60.3%
Tverretning	0.71	0.72	+1.4%	0.99	+39.4%	0.97	+36.6%	0.99	+39.4%	0.97	+36.6%

For Trebru 4 er den relative økningen av utnyttelsesgrad stor både i lengderetningen og tverretningen av dekket, med nesten +40 % for begge. En utnyttelsesgrad på hele 0.99 for dekkets tverretning er for nære maksgrensen. Sammenhengen mellom den

store økningen av utnyttelsesgrad i dekket og parameterendringene kan en spore tilbake til Trebru 2. Der ble kun antall fagverksledd redusert, og den brua opplever en lik økning i dekkets utnyttelsesgrad. Økningen kommer mest sannsynligvis som en konsekvens av at det blir én mindre tverrbærer og at avstanden mellom tverrbærerne øker med 2 meter fra 8 til 10 meter. Med en større avstand mellom understøttelsespunkter for dekket blir spenningene i dekket større. For Trebru 5 er det en enda større økning av utnyttelsesgraden i dekkets lengderetning på +60 %, og en stor økning i tverretning på ca. +37 % som gir en høy utnyttelsesgrad på 0.97. Dersom en ser på Trebru 3 der kun dekketykkelsen ble redusert ser en den samme økningen. Kapasiteten i dekket for Trebru 5 (og Trebru 3) er uendret fra Trebru 0, men med en redusert dekketykkelse fordeler skjær og moment seg over en mindre overflate og gir høyere spenninger. En kan bedre forstå hvorfor reduksjonen av dekketykkelsen gir den meget store økningen av utnyttelsesgrad i lengderetningen dersom en ser på formelen for bøyespenning i lengderetning ($\sigma_{m,x} = 6M_{xx} / t^2$) som inneholder kvadratet av dekketykkelsen i nevneren.

Flytter en fokuset over på klimagassutslipp er det også flere interessante punkter å diskutere. Fra utslippsanalysen fremgår det at en endring av fagverkshøyden kun har en minimal påvirkning på utslippsmengden, som en kan se for Trebru 1 i figur 5.1. En 20 % reduksjon av fagverkshøyden gir kun 0.3 % reduksjon i utslipp. To grunner til det er at limtre i utgangspunktet har en lav utslippsfaktor og at endringen av mengden limtre i Trebru 1 er relativt liten. Ved en endring av fagverkshøyden er det egentlig bare lengre eller kortere diagonale staver som bidrar til endret limtremengde.

For Trebru 3 og 5 der dekketykkelsen er redusert med 25 % er fallet i utslipp større, med henholdsvis 2.9 % og 1.8 %. Dekketykkelsen påvirker også kun mengden limtre, men en endring av dekketykkelsen leder til mye større skifter i limtremengden enn det fagverkshøyden gjør, siden overflaten til brudekket er så stort.



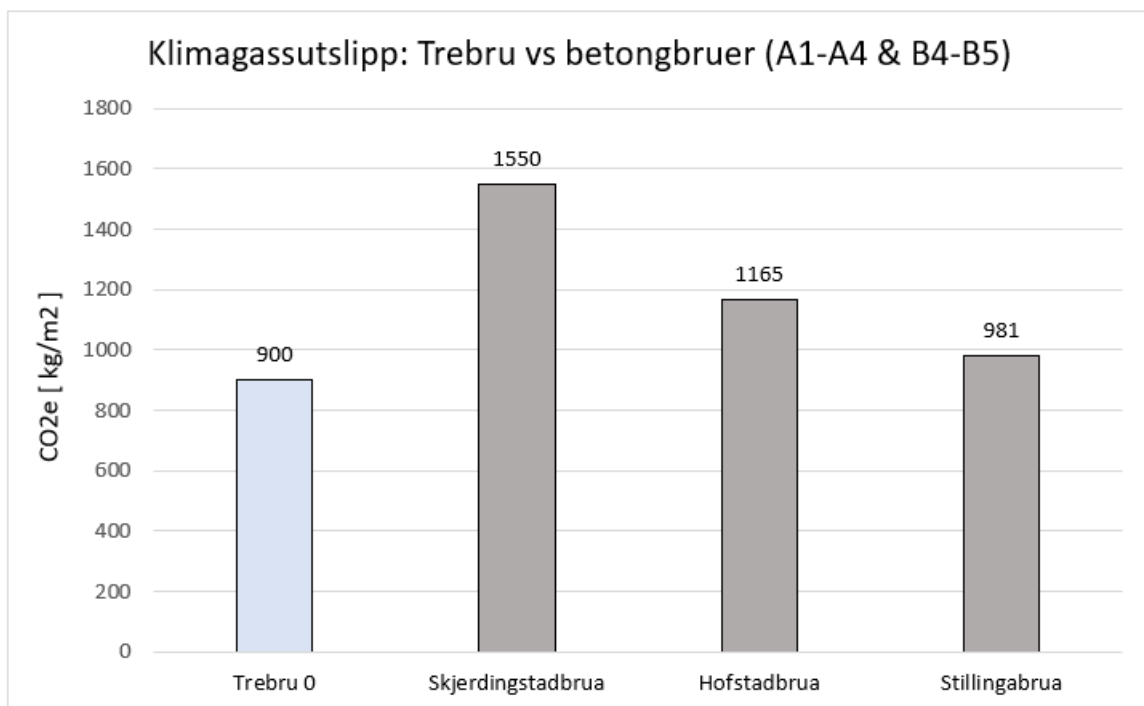
Figur 5.1: Sammenlikning av klimagassutslipp for trebruene

Det er videre tydelig at antall fagverksledd er den av de tre parameterne som har klart størst påvirkning på klimagassutslippene for trebrua. Antall fagverksledd har en merkbar effekt på mengden stål som brukes i trebrua. Det er i knutepunktene og tverrbærerne der mesteparten av stålet i brua brukes, om en ser bort fra mengden armering som er konstant. Utslippstallene for Trebru 2 og 4 tydeliggjør at utslippene tilknyttet stål er en god del større enn de for limtre. Ved å redusere antall fagverksledd med én ble utslippene henholdsvis 7.1 % og 6.2 % mindre for Trebru 2 og 4. Det kan tyde på at å redusere mengden stål er den mest optimale veien å gå for å minske karbonavtrykket for fagverksbruer i tre.

Det er likevel viktig å ikke se seg blind på utslippstallene. Det har lite for seg å redusere utslippene dersom det leder til en fagverksbru som ikke er trygg. Som en så for Trebru 2 og 4 ledet reduksjonen av antall fagverksledd til størst utslippskutt, men samtidig store økninger av utnyttelsesgraden i dekket. Hvordan en kan bevare utnyttelsesgraden i dekket, men samtidig oppnå et stort kutt i klimagassutslipp for fagverksbruer er et komplisert spørsmål. For Trebru 4 kunne en kanskje introdusert en tredje parameterendring med økt dekketykkelse. På den ene siden ville det ha redusert utnyttelsesgraden i lengderetning av dekket en god del. Det ville også redusert utnyttelsesgraden i tverretningen, gitt at oppspenningskraften hadde økt i

takt med dekketykkelsen. Men med en økt oppspenningskraft får en et nytt sett med utfordringer slik som økt anleggstrykk mot limtreet og ankerplatene og et behov for sterkere spenntau. Til sist ville den økte dekketykkelsen ledet til en betraktelig økning i limtremengde og motvirket en betydelig del av reduksjonen i klimagassutslipp for Trebru 4.

Videre er det mulig at det finnes andre bruparametere enn de tre som er undersøkt i denne oppgaven som kan ha en større effekt på karbonavtrykket til trebrua. Kanskje finnes det løsninger som ville vært mer passende med tanke på å opprettholde utnyttelsesgraden av trebrua. Det er også gjort noen forenklinger og begrensninger i denne oppgaven, slik som antakelsen om det ideelle fagverket og at kun vertikale laster ble benyttet i testingen av trebrua. Det gjør at resultatene fra den parametriske analysen ikke nødvendigvis kan ekstrapoleres til andre fagverksbruer i tre uten en betraktning av likheter og forskjeller i bruene og omstendighetene. Resultatene fra den parametriske analysen fungerer likevel som en pekepinn på at nøkkelen for å redusere karbonavtrykket for fagverksbruer i tre kan være å redusere mengden stål.



Figur 5.2: Sammenlikning av klimagassutslipp for trebrua og betongbruene

Sammenlikningen av Trebru 0 opp mot de tre betongbruene viser at den har lavere klimagassutslipp per effektivt dekkeareal enn samtlige av betongbruene. Trebrua har rundt 42 % lavere utslipp enn Skjerdingsstadbrua, rundt 23 % lavere utslipp enn

Hofstadbrua og 9 % lavere utslipp enn Stillingabrua. Nå er det åpenbart at en ikke kan trekke en generell konklusjon som at alle trebruer har lavere karbonavtrykk enn betongbruer baser på denne sammenlikningen. Til det er sammenlikningen for begrenset i omfang og antallet bruer som betraktes er for lite. Det er derimot tryggere kan slå fast er at dette er tre overgangsbruer i betong over norske motorveier som alle har større klimagassutslipp enn Trebru 0 (Tveit bru). I et klimaperspektiv hadde trolig trebrua vært en bedre løsning for en overgangsbru enn alle disse tre betongbrueene. Men selv om klima og utslipp har kommet sterkt på agendaen de siste årene er valg av brutype og -materiale for norske overgangsbruer også et spørsmål om økonomi og faglig erfaring. Det økonomiske aspektet ved trebruer kontra betongbruer er ikke vurdert i denne oppgaven, men det er liten tvil om at erfaringen med utføring av overgangsbruer i betong er større i industrien enn for overgangsbruer i tre. Klimautfordringen kommer nok ikke til å bli mindre i tiden som kommer, og fagverksbruer i tre har klimaaspektet gående for seg. Derfor kan det gjerne tenkes at det vil bygges flere fagverksbruer i tre over norske motorveier i årene som kommer.

5.2 Usikkerhetsmomenter

I kapittel 1.4 er det presentert de viktigste forenklingene og begrensninger som er gjort i oppgaven. På tross av det er det fortsatt noen usikkerhetsmomenter knyttet til de ulike resultatene både for utnyttelsesgraden av trebruelementene og utslippstallene til trebrua. For det første er verdiene for kreftene som oppstår i bruelementene avhengig av nøyaktigheten til brumodellen og programvarene, og her vil det ligge noe usikkerhet. Videre er det en viss usikkerhet knyttet til beregningen av materialmengdene for Trebru 0 og Stillingabrua da disse er gjort «for hånd» basert på tilgjengelige konstruksjonstegninger. Utslippsberegningene er i stor grad avhengig av Excel-regnearket VegLCA v4.10 og de forhåndsdefinerte beregnings- og utslippsfaktorene. Faktorene er dokumentert, men med relativt komplekse regneark er det ikke utenkelig at det kan forekomme noe unøyaktighet som en ikke får øye på.

5.3 Videre forskning

For videre forskning foreslås følgende muligheter:

- Utforske andre bruparametere som spennvidde, tverrsnittsdimensjoner og materialvalg
- Undersøke hvilken effekt horisontale krefter får for utnyttelsesgraden av fagverksbrua
- Undersøke hvordan knutepunktene utnyttelsesgrad påvirkes av ulike bruparametere
- Ekspandere utslippsanalysen av fagverksbrua til å inkludere alle faser i livsløpet fra vugge til grav
- Gjøre en kostnadssammenlikning av fagverksbruer kontra betongbruer som overgangsbruer

Referanser

- [1] 'Bridges', *Statens vegvesen*.
<https://www.vegvesen.no/en/roads/Roads+and+bridges/Bridges> (accessed Jan. 20, 2021).
- [2] NTB, 'Ni bruer har samme konstruksjon som kollapset bru', *Nationen*.
<https://www.nationen.no/article/ni-bruer-har-samme-konstruksjon-som-kollapset-bru/> (accessed Jan. 20, 2021).
- [3] 'Carbon footprint', *Nye Veier AS*. <http://www.nyeveier.no/en/about-us/carbon-footprint/> (accessed Jan. 18, 2021).
- [4] B. R. Lippke, J. Wilson, J. Perez-Garcia, J. Bowyer, and J. Meil, 'CORRIM: Life-Cycle Environmental Performance of Renewable Building Materials', *For. Prod. J.*, vol. 54, no. 6, pp. 8–19, 2004.
- [5] D. Partov, M. Maslak, R. Ivanov, M. Petkov, D. Sergeev, and A. Dimitrova, 'The Development of Wooden Bridges through the ages - A review of selected examples of heritage objects. Part 1 - The Milestones', *Tech. Trans.*, vol. 2-B, pp. 93–105, 2016.
- [6] 'Skog'. <https://www.artsdatabanken.no/Pages/258606/Skog> (accessed Feb. 17, 2021).
- [7] L. Sandved Dalen, 'Har vi avskoging i Norge?', *Nibio*, Jan. 29, 2018.
<https://www.nibio.no/nyheter/har-vi-avskoging-i-norge> (accessed Feb. 18, 2021).
- [8] H. Reid *et al.*, 'USING WOOD PRODUCTS TO MITIGATE CLIMATE CHANGE: A REVIEW OF EVIDENCE AND KEY ISSUES FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT', 2004. [Online]. Available:
http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/rome2007/docs/Using_wood_products_to_mitigate_climate_change.pdf
- [9] 'FIG. 1. Three principal axes of wood with respect to fiber direction...', *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Three-principal-axes-of-wood-with-respect-to-fiber-direction-and-growth-rings_fig1_298986387 (accessed Mar. 25, 2021).
- [10] T. Dyken, 'Rapport 422 Trebruer', Statens vegvesen, 2017.
- [11] Moelven, 'Standard limtre Moelven'.
<https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/produktbilder/1814-6055.jpg?w=750> (accessed Mar. 08, 2021).
- [12] 'Definition of TRUSS'. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/truss> (accessed Mar. 25, 2021).
- [13] 'bridge'. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/bridge> (accessed May 24, 2021).
- [14] 'Truss Maintenance Manual'. PennDOT, 2015. Accessed: Mar. 25, 2021. [Online]. Available:
<https://www.penndot.gov/ProjectAndPrograms/Cultural%20Resources/Documents/truss-maintenance-manual-rev-2015-01-09-incorporated-epds-bomo-bqad-comments.pdf>
- [15] 'Common types of truss bridges', *MSNBC.com*.
<https://www.msnbc.com/rachel-maddow-show/common-types-truss-bridges-msna199711> (accessed Mar. 25, 2021).
- [16] 'Tveit bru, Statens vegvesen, Brutus, byggverk 05-1914'. 2018.

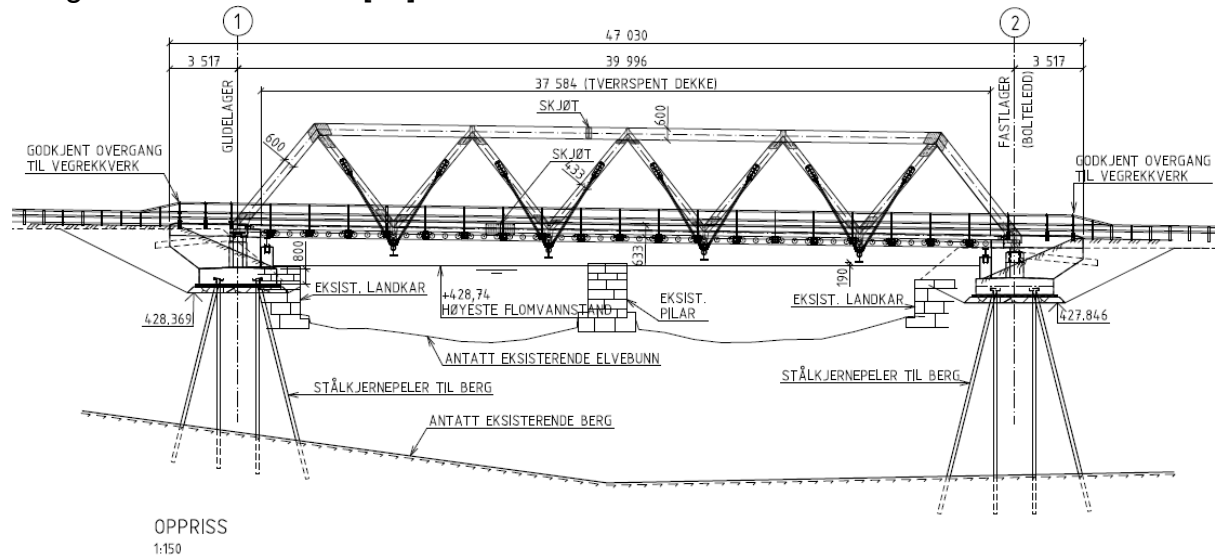
- [17] H. Pecker, 'Different Types of Trusses Advantages and Disadvantages', *Construction How*, Apr. 27, 2020. <https://constructionhow.com/different-types-of-trusses/> (accessed May 24, 2021).
- [18] O. Kleppe, 'Foto av tverrspent dekke på Mølledammen bru'. [Online]. Available: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2670309/Rapport%20422%20Trebruer.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [19] Statens vegvesen, 'Håndbok N400 - Bruprosjektering', Statens vegvesen, 2015.
- [20] 'EN 1995-2: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 2: Bridges'. Accessed: Apr. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1995.2.2004.pdf>
- [21] *Grasshopper*. Rhinoceros. [Online]. Available: <https://www.grasshopper3d.com/>
- [22] *Rhinoceros*. Rhinoceros. [Online]. Available: <https://www.rhino3d.com/7/>
- [23] *SOFiSTiK*. SOFiSTiK. [Online]. Available: <https://www.sofistik.com/products/finite-elements/sofistik-2020-highlights>
- [24] 'EN 1991-2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges'. Accessed: Apr. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.2.2003.pdf>
- [25] 'EN 1990: Eurocode - Basis of structural design'. Accessed: Apr. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf>
- [26] 'EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings'. Accessed: Apr. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1995.1.1.2004.pdf>
- [27] M. Cepelka and COWI, 'Knekk lengde overgurt', Apr. 28, 2021.
- [28] Norsk Standard, *NS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015, Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner. Del 1-1: Almene regler og regler for bygninger*. Standard Norge & Standard Online AS.
- [29] 'Life-cycle assessment', *Wikipedia*. Apr. 23, 2021. Accessed: May 17, 2021. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Life-cycle_assessment&oldid=1019549097
- [30] 'Hvordan prosjektere miljøvennlig med livsløpsvurdering (LCA)', *SINTEF*. [https://www.sintef.no/siste-nytt/2015/hvordan-prosjektere-miljøvennlig-med-livsløpsvurde/](https://www.sintef.no/siste-nytt/2015/hvordan-prosjektere-miljovennlig-med-livsløpsvurde/) (accessed May 17, 2021).
- [31] 'Skjerdingsstadbrua, Nye Veier, Brutus, byggverk 50-0028'. 2021.
- [32] 'Hofstadbrua, Nye Veier, Brutus, byggverk 50-0029'. 2020.
- [33] 'Stillingabrua, Nye Veier, Brutus, byggverk 08-3176'. 2018.
- [34] 'Klimagassreduksjoner i anlegg og drift', *Statens vegvesen*. [https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/miljø+og+omgivelser/klima/klimagassreduksjoner-i-anlegg-og-drift](https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/miljo+og+omgivelser/klima/klimagassreduksjoner-i-anlegg-og-drift) (accessed Jun. 01, 2021).

Vedlegg

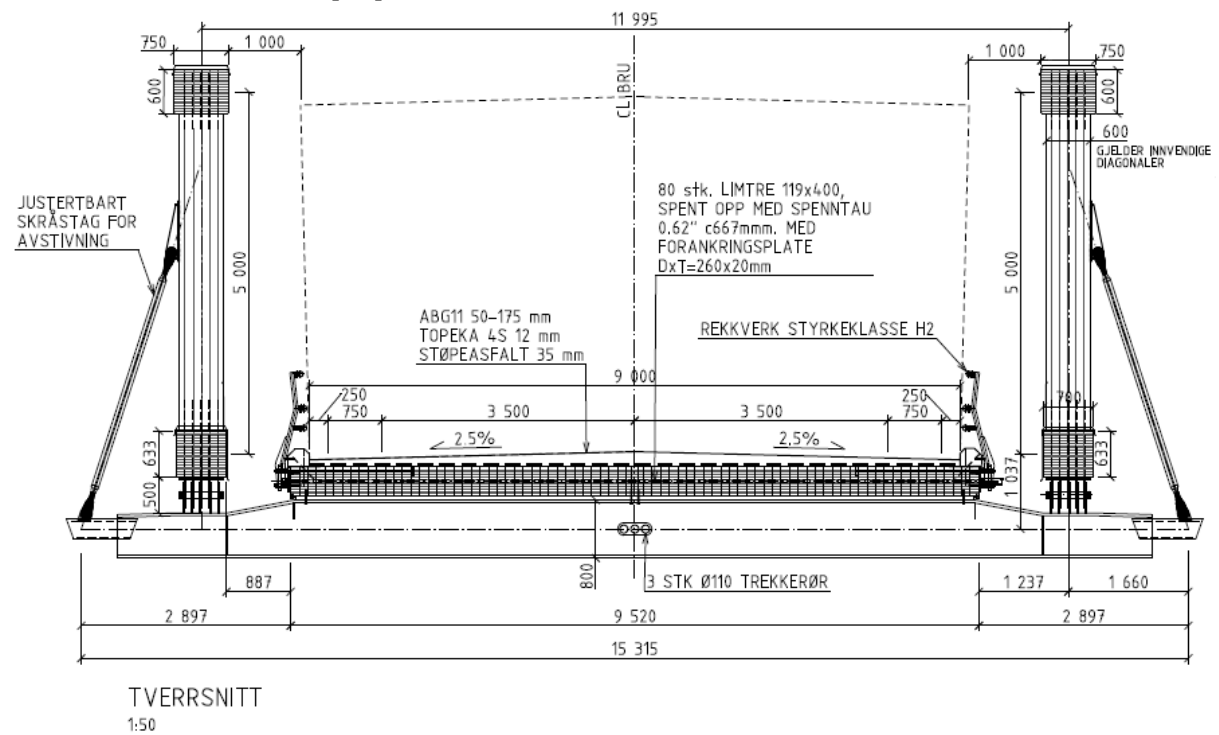
Vedlegg A: Tegninger av bruer

Tveit bru

Lengdesnitt av Tveit bru [16]:

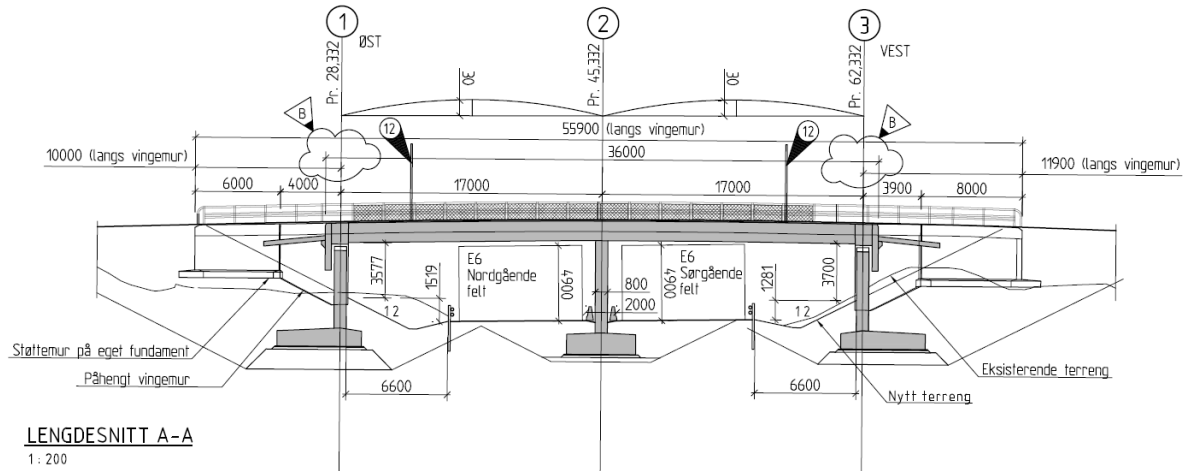


Tversnitt av Tveit bru [16]:

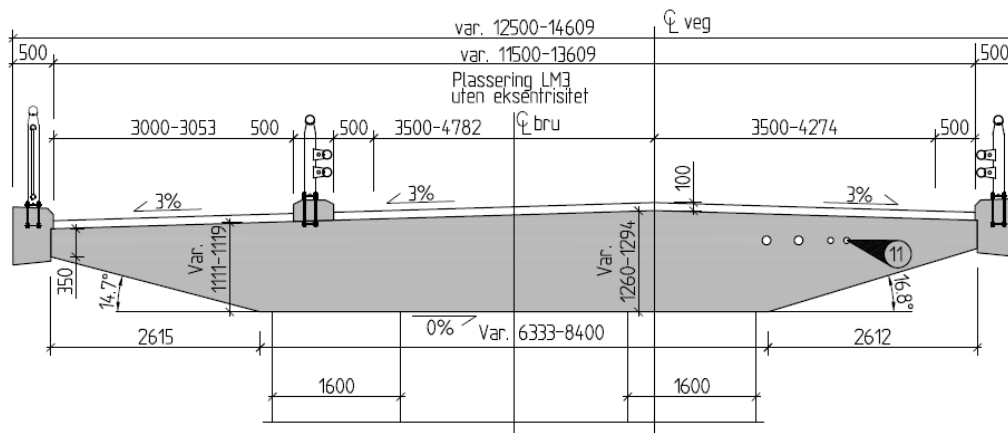


Skjeringstadbrua

Lengdesnitt av Skjeringstadbrua [31]:

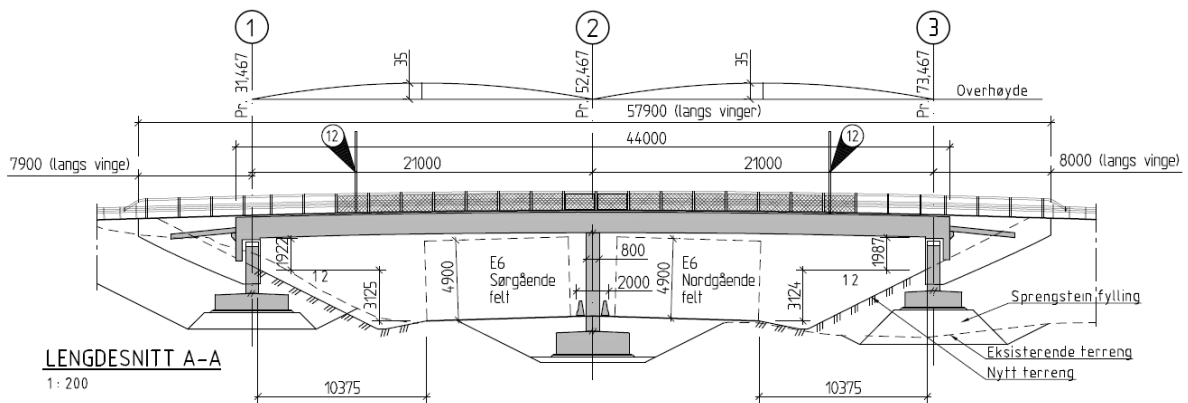


Tversnitt av Skjeringstadbrua [31]:

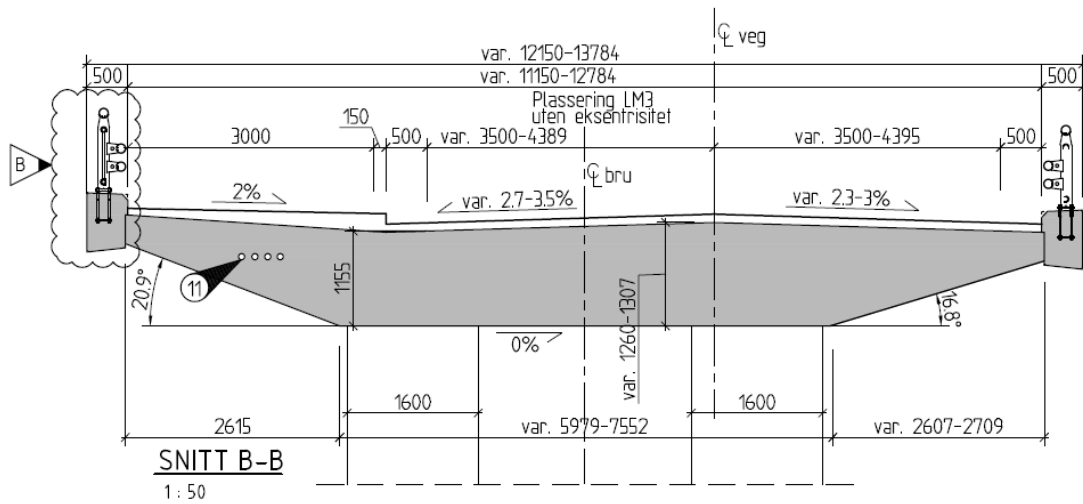


Hofstadbrua

Lengdesnitt av Hofstadbrua [32]:

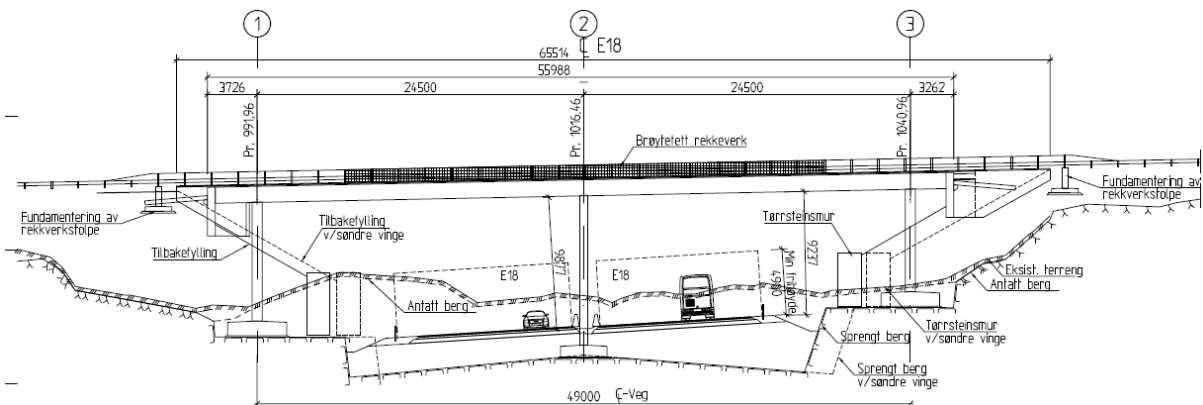


Tverrsnitt av Hofstadbrua [32]:

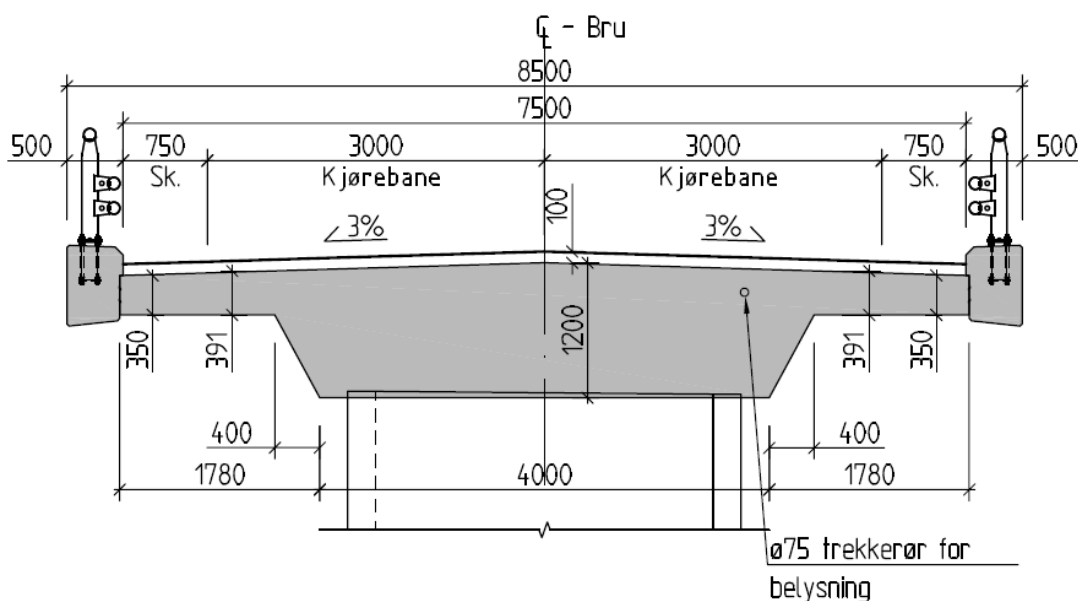


Stillingabrua

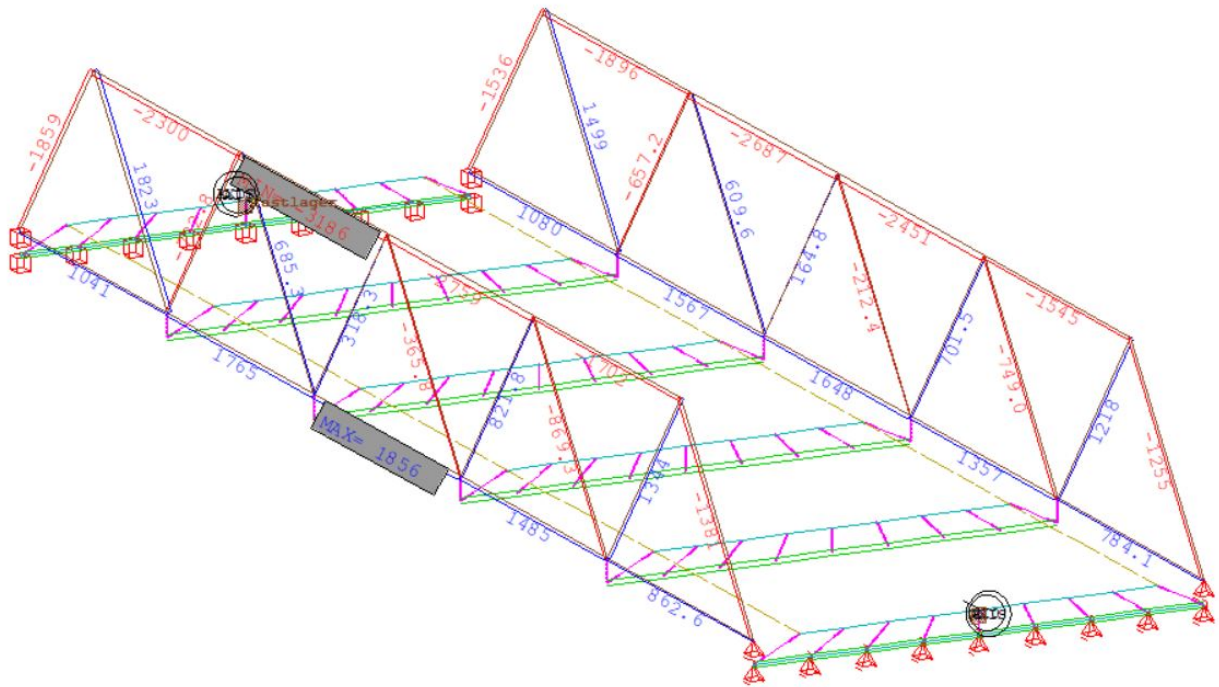
Lengdesnitt av Stillingabrua [33]:



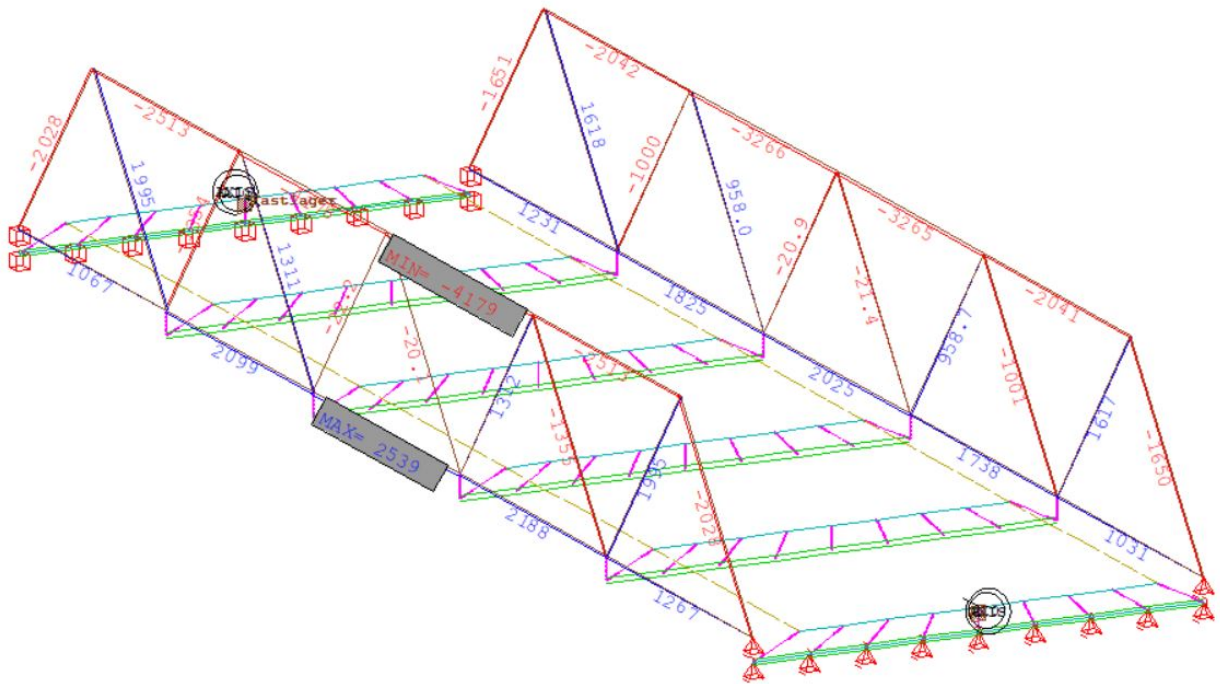
Tverrsnitt av Stillingabrua [33]:



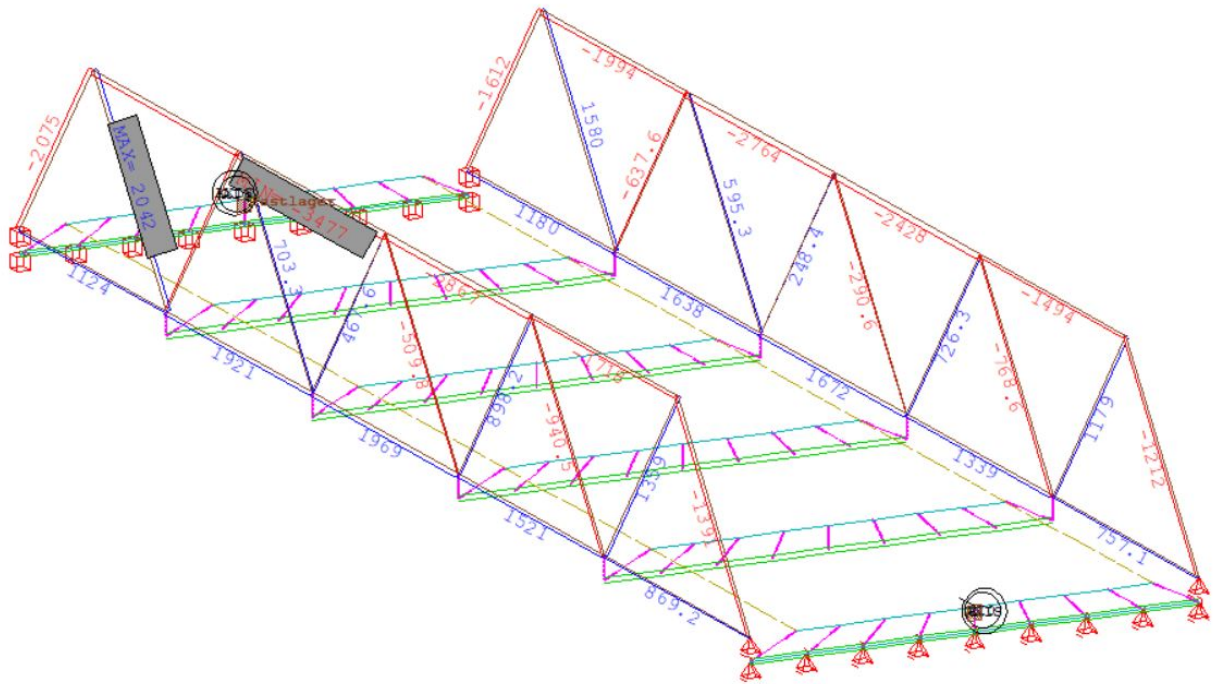
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 2:



Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 1:



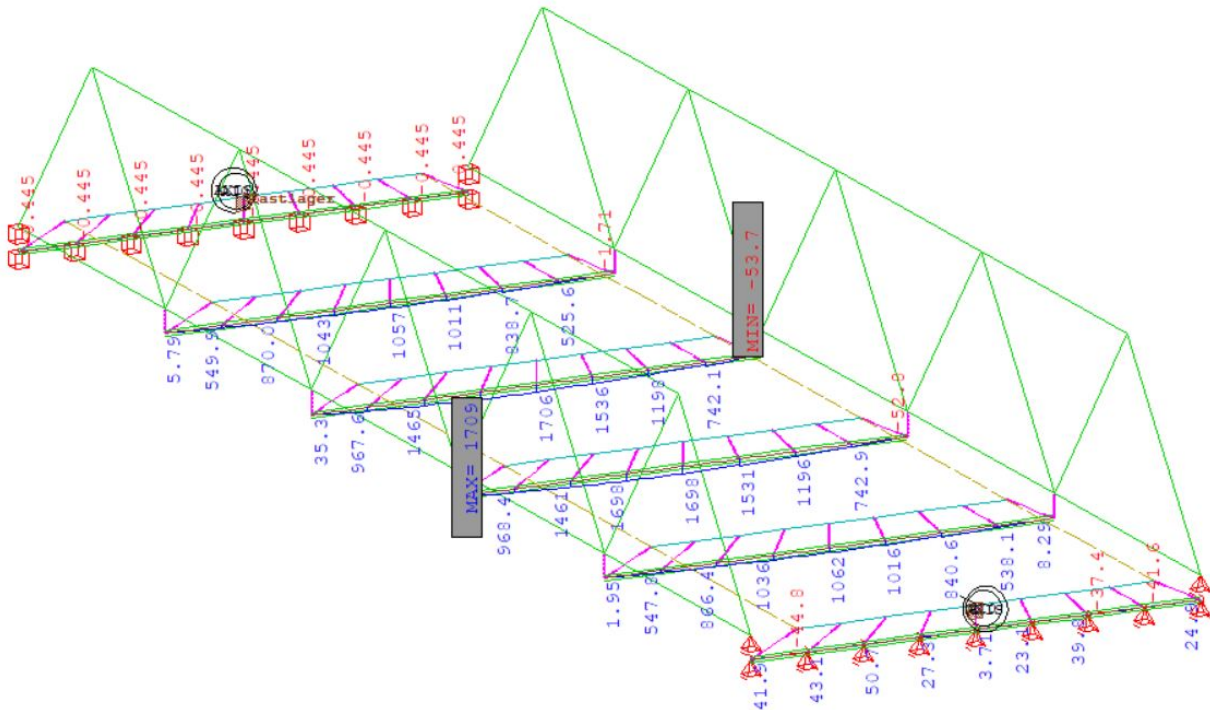
Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 2:



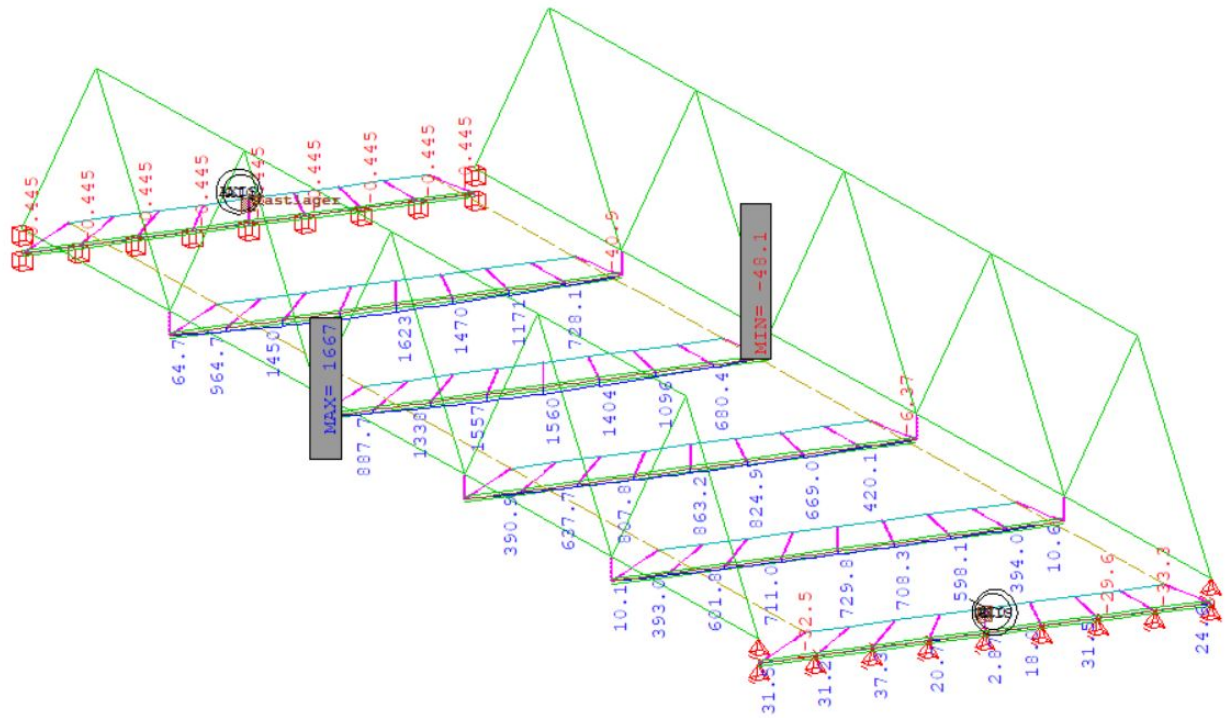
Krefter og momenter i tverrbærere

Bøyemomenter

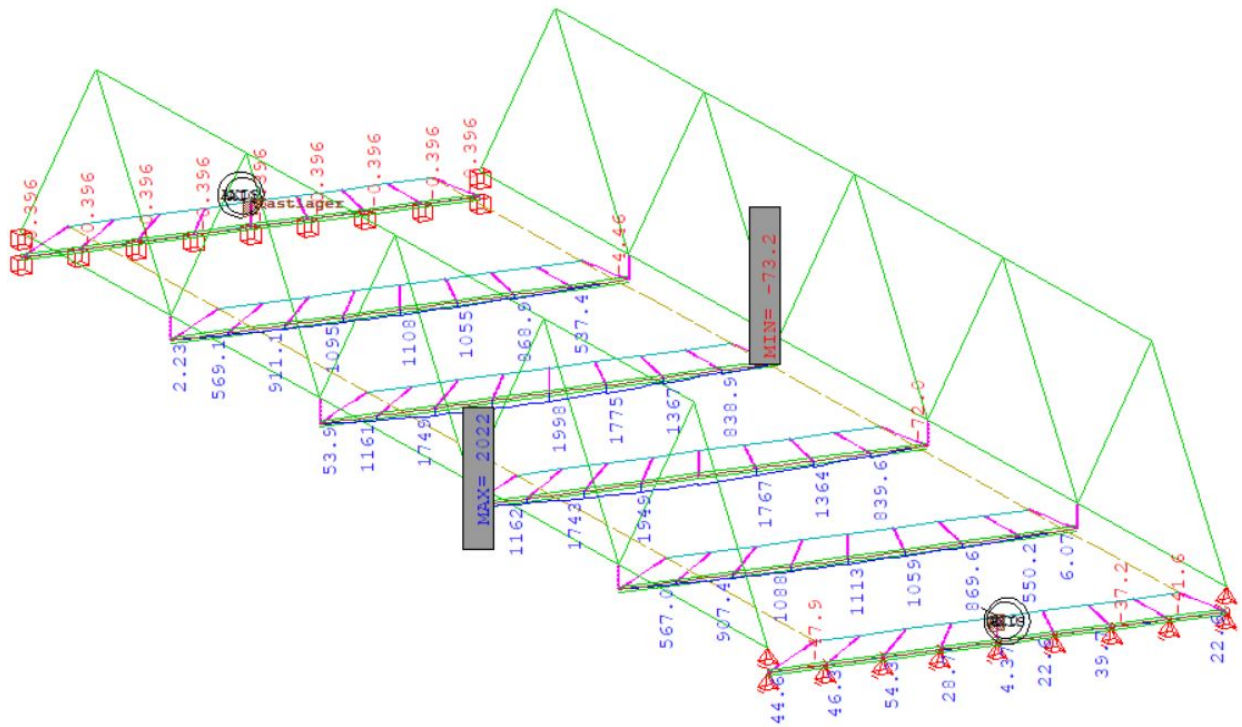
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 1:



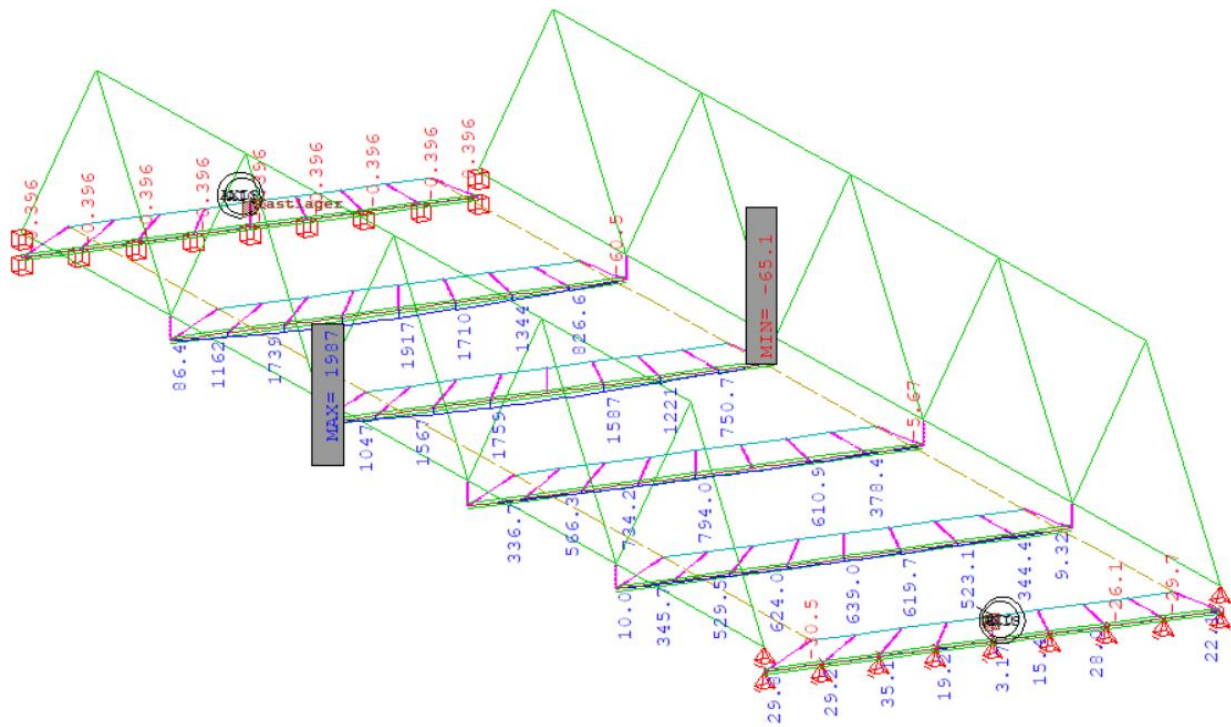
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 2:



Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 1:

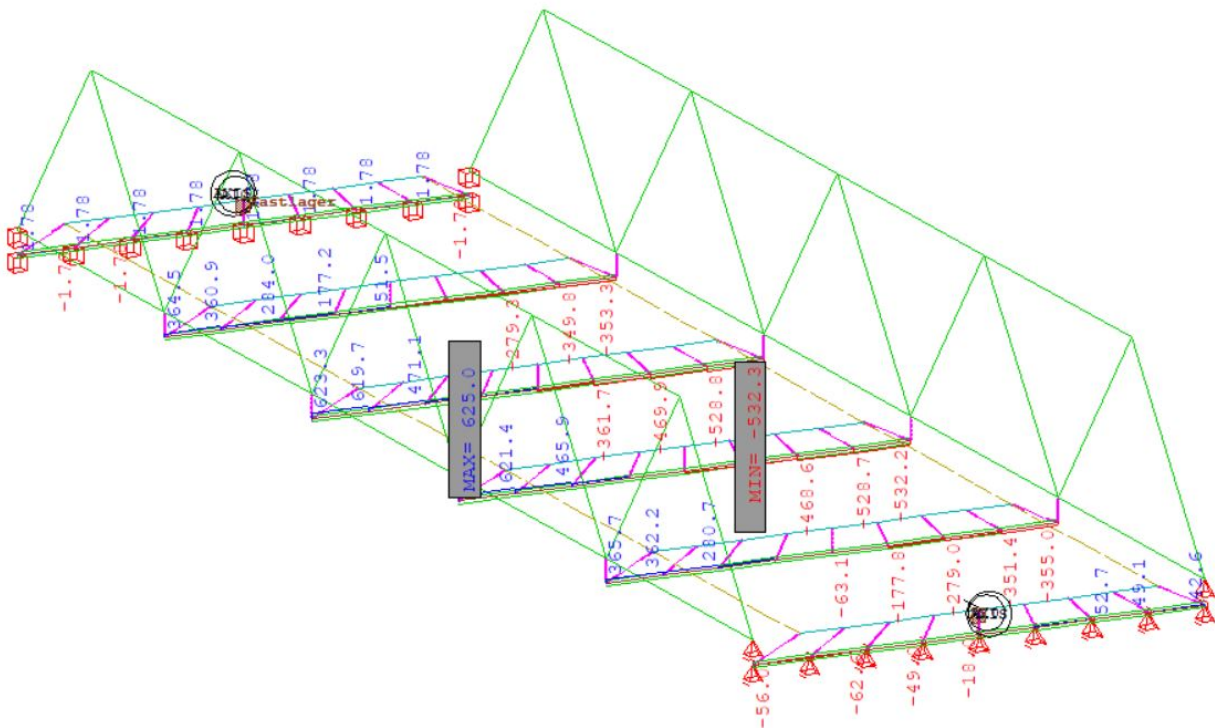


Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 2:

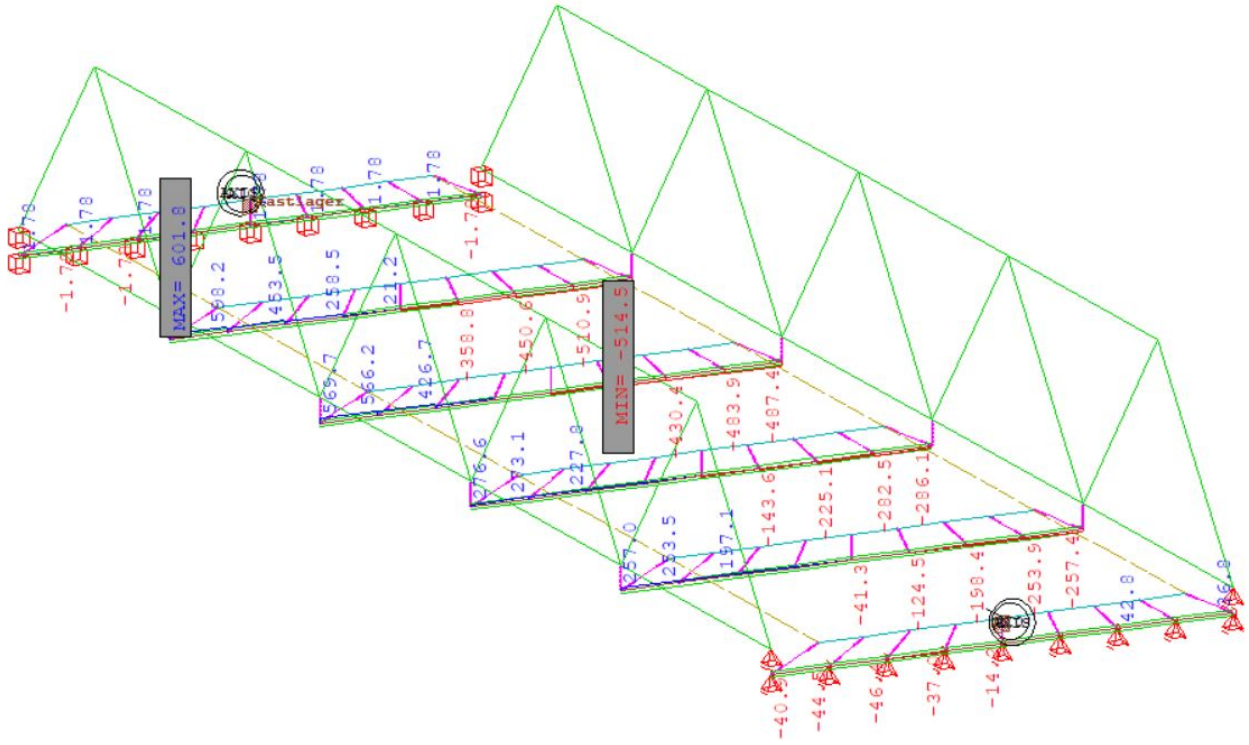


Skjærkrefter

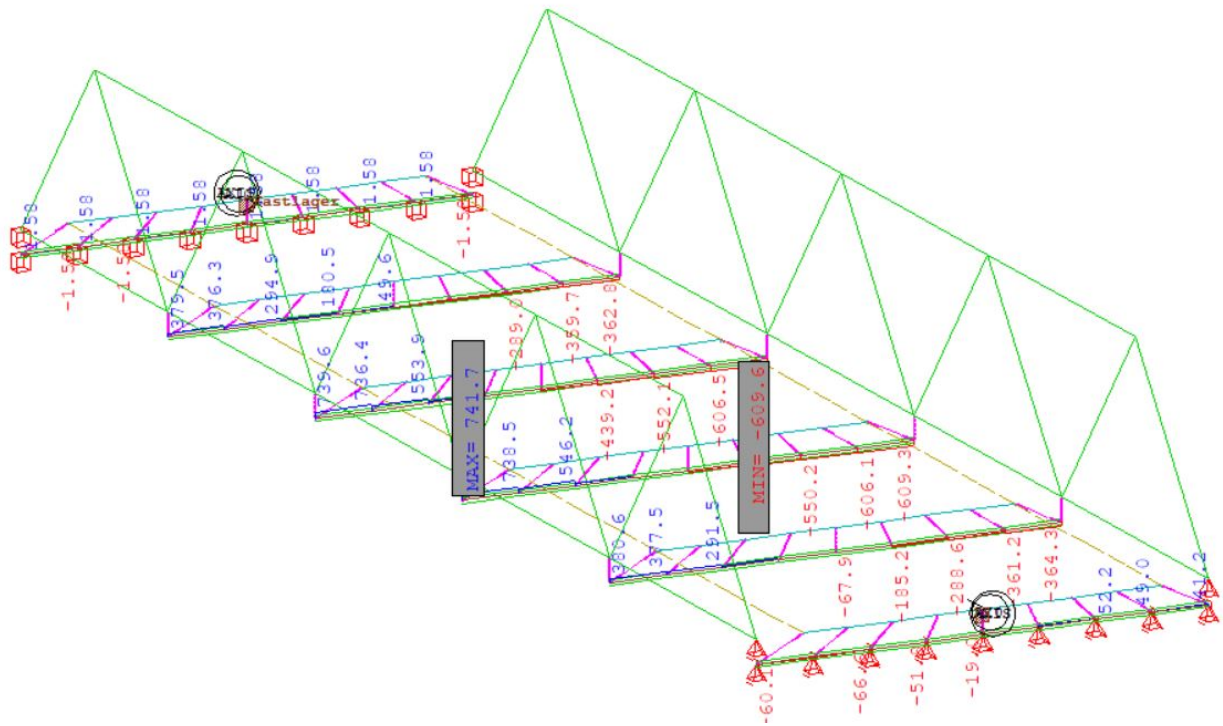
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 1:



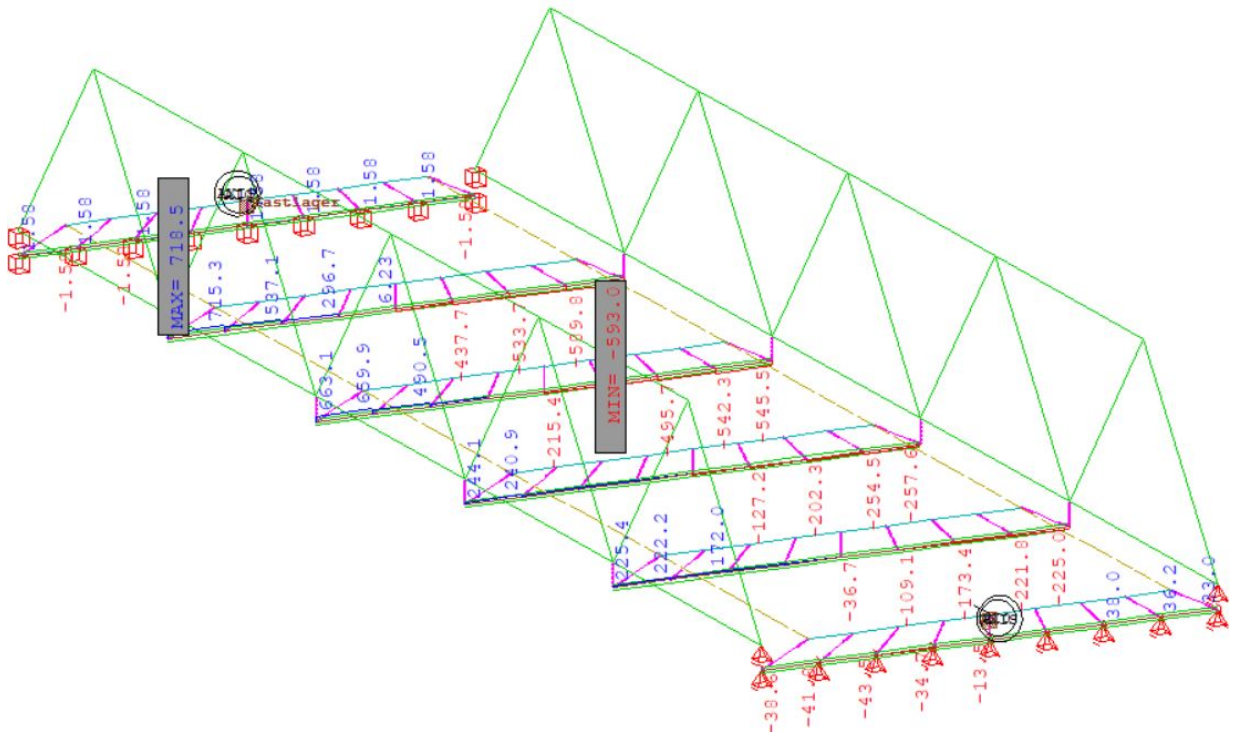
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 2:



Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 1:

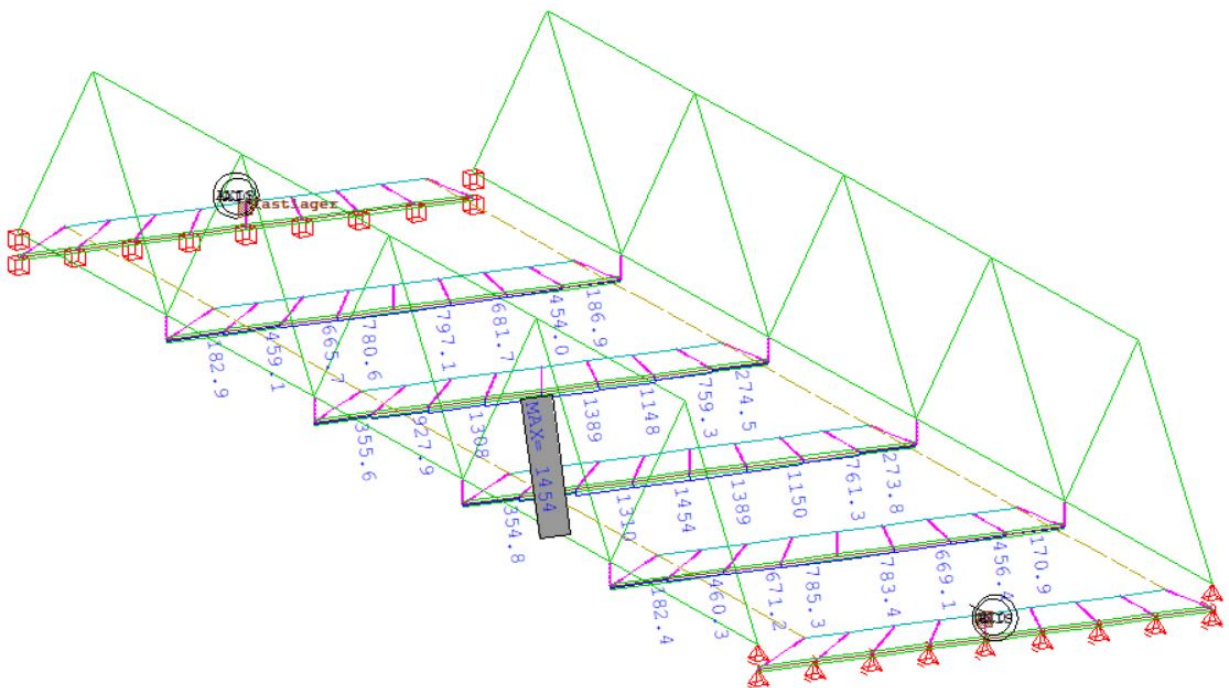


Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 2:

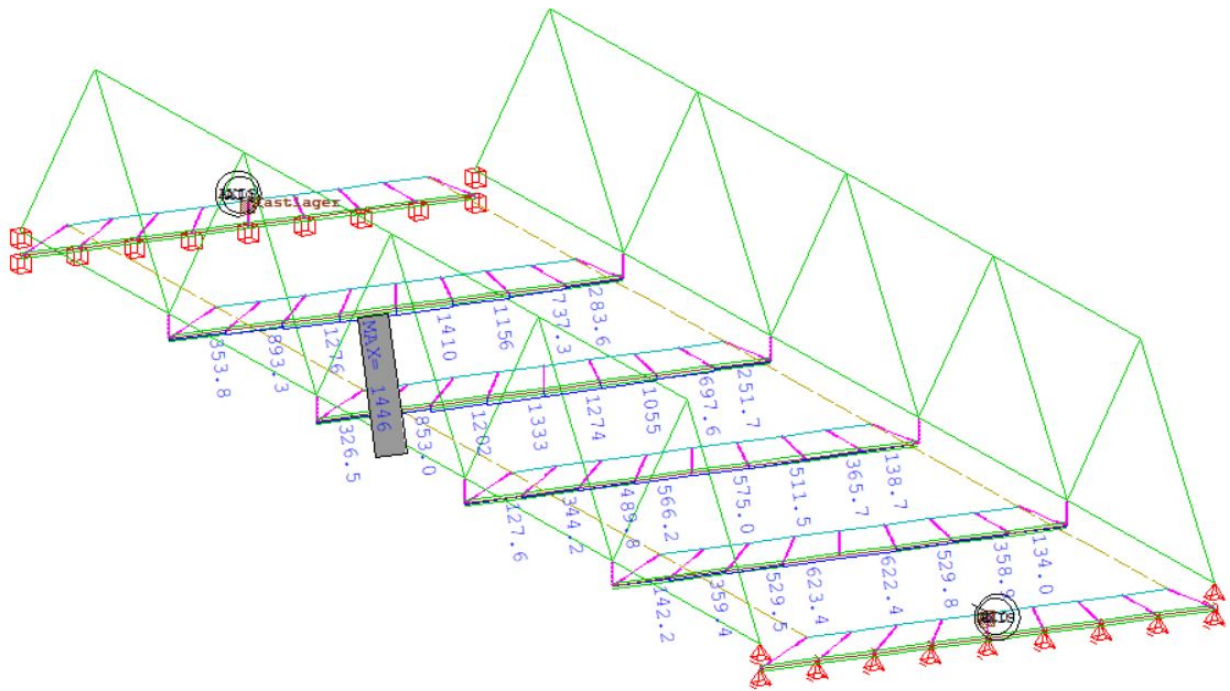


Aksialkrefter

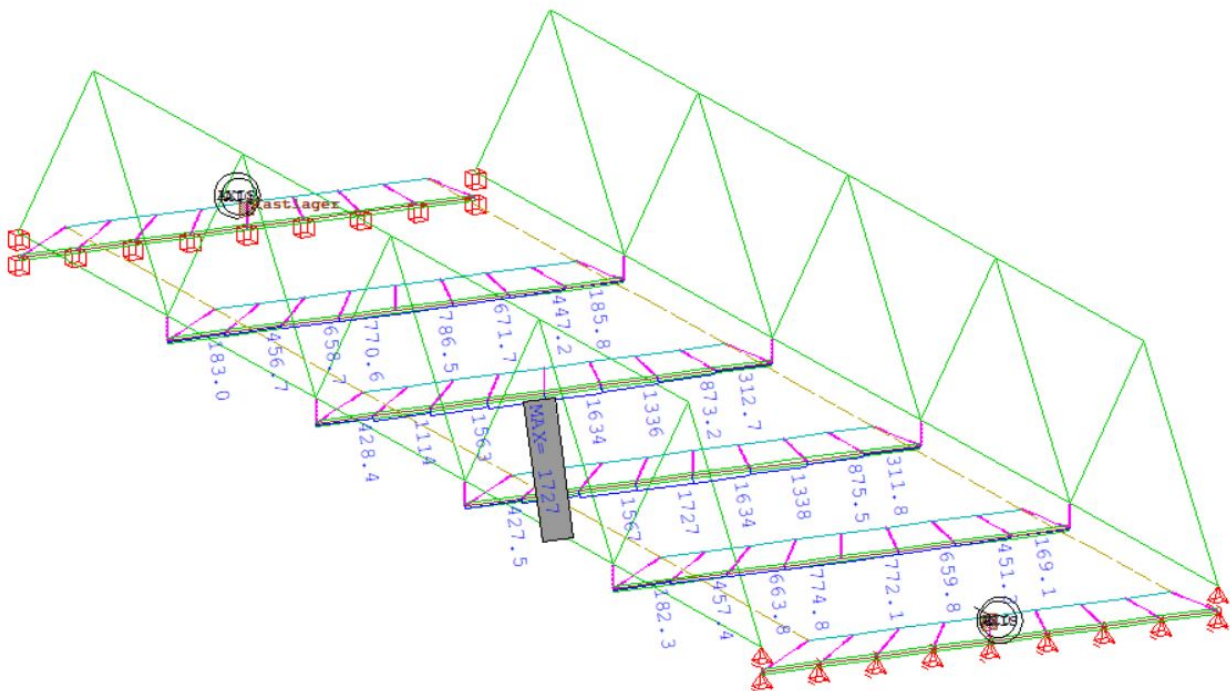
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 1:



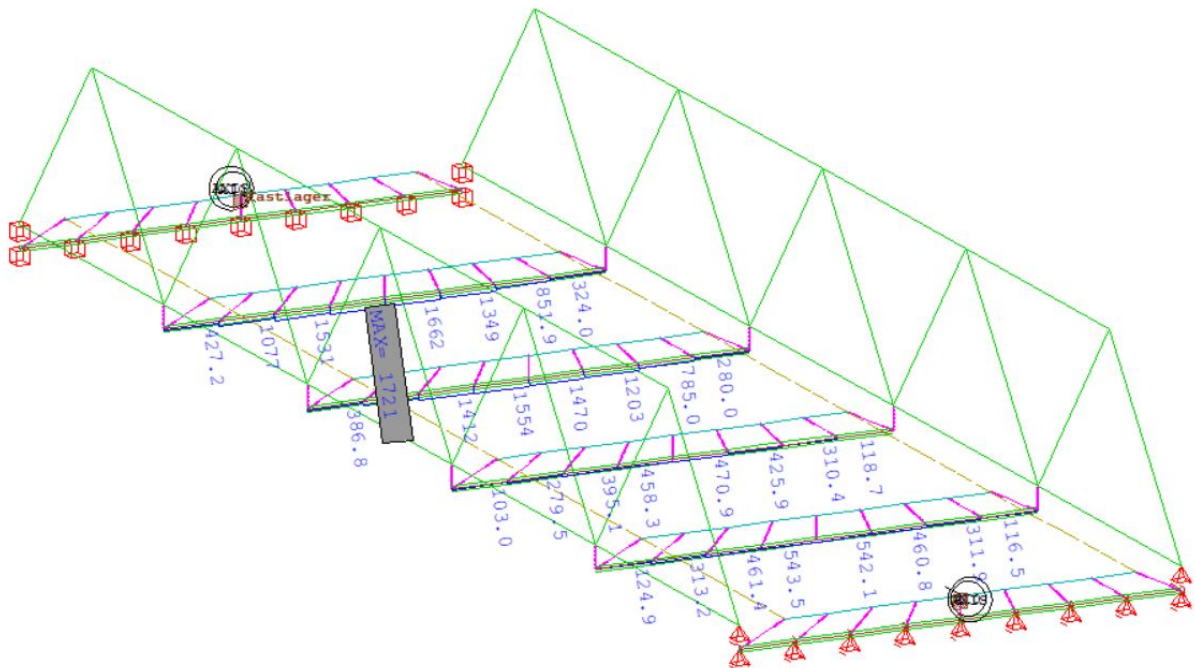
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 2:



Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 1:



Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 2:

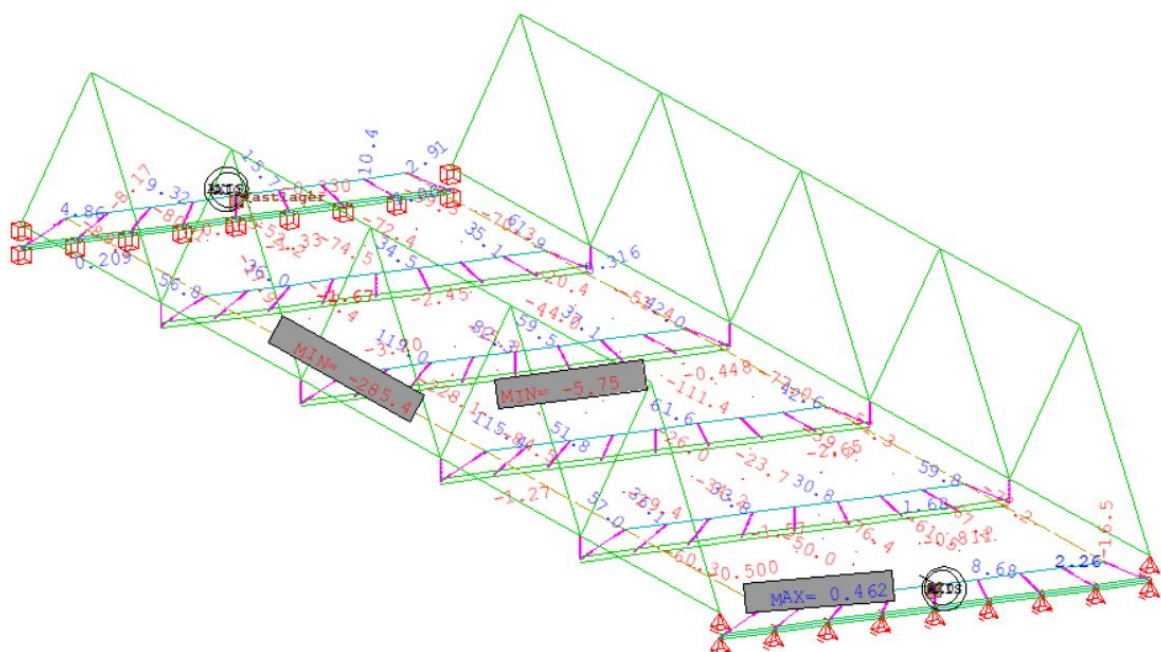


Krefter og momenter i dekket

Fargen rød angir at kraften eller momentet forekommer på strekksiden (undersiden) av dekket. Blått angir at kraften eller momentet forekommer på trykksiden (oversiden) av dekket.

Bøyemoment

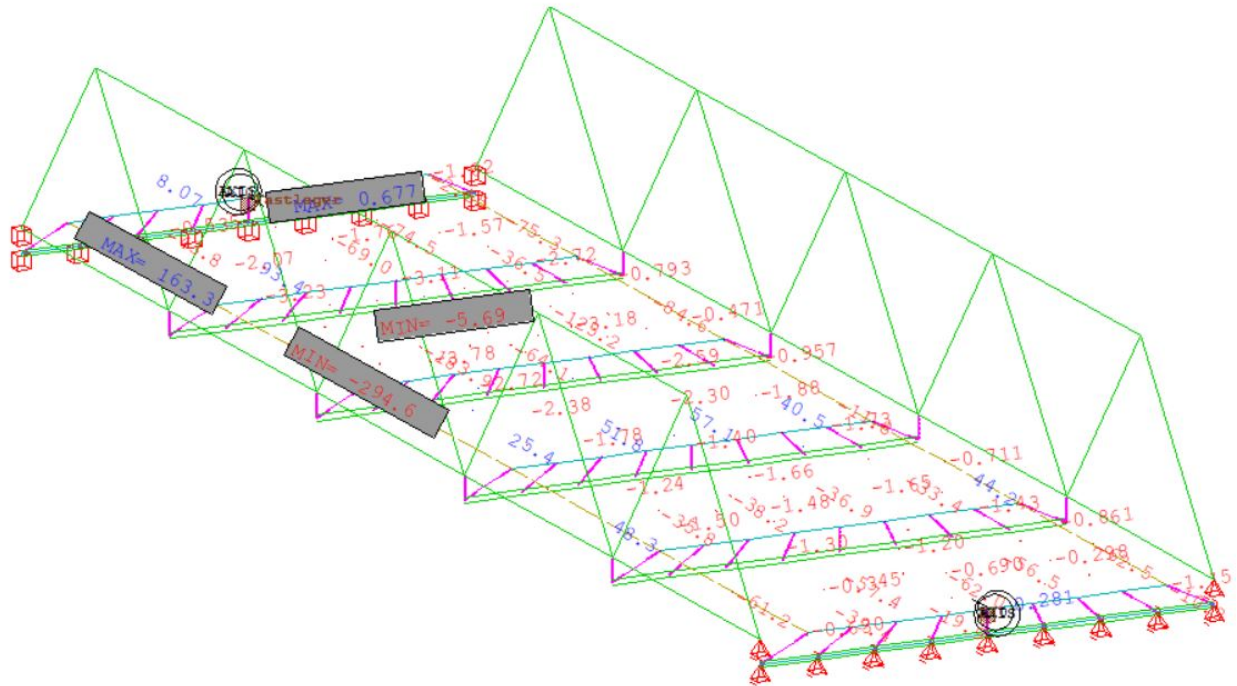
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 1:



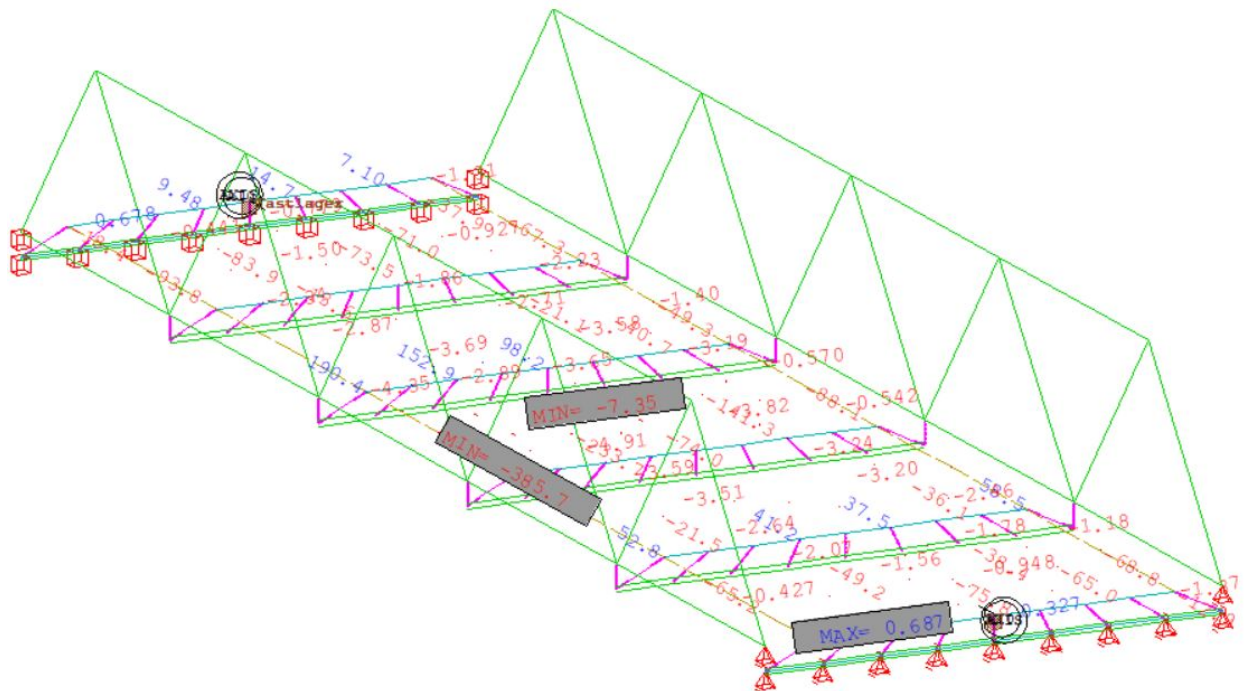
Her leses det dimensjonerende bøyemomentet i lengderetning som 285.4 kNm per meter

bredde. Det dimensjonerende bøyemomentet i tverretning leses som 5.75 kNm per meter lengde.

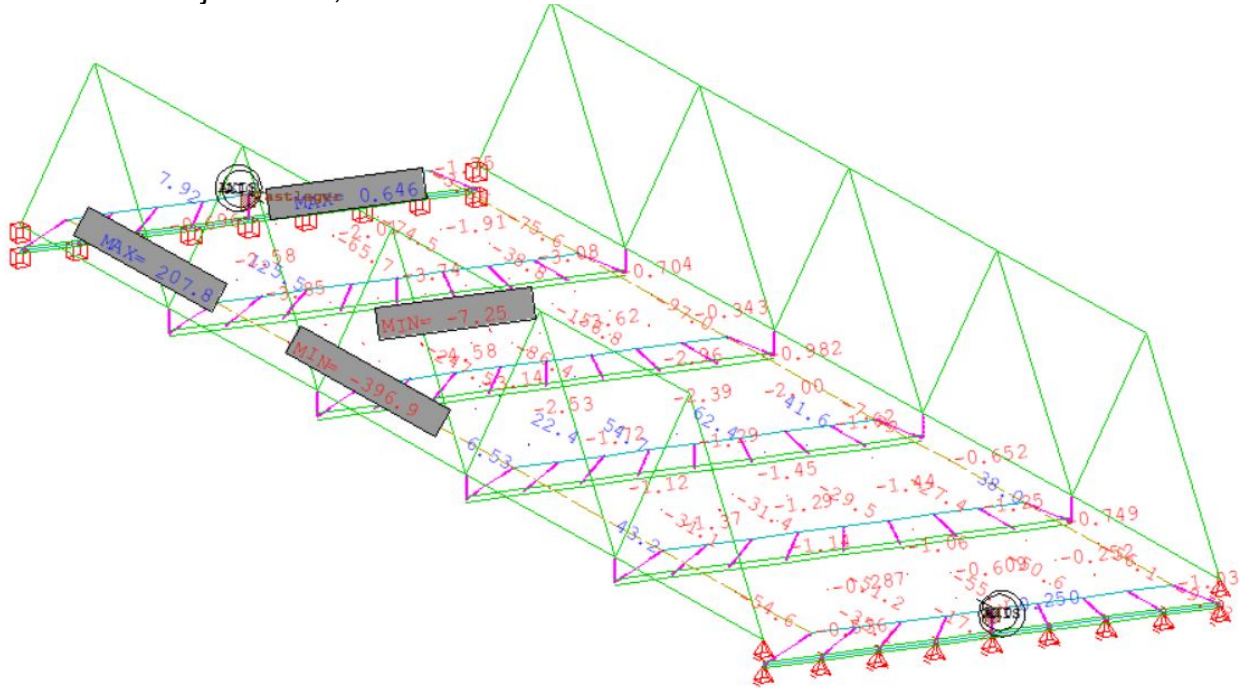
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 2:



Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 1:

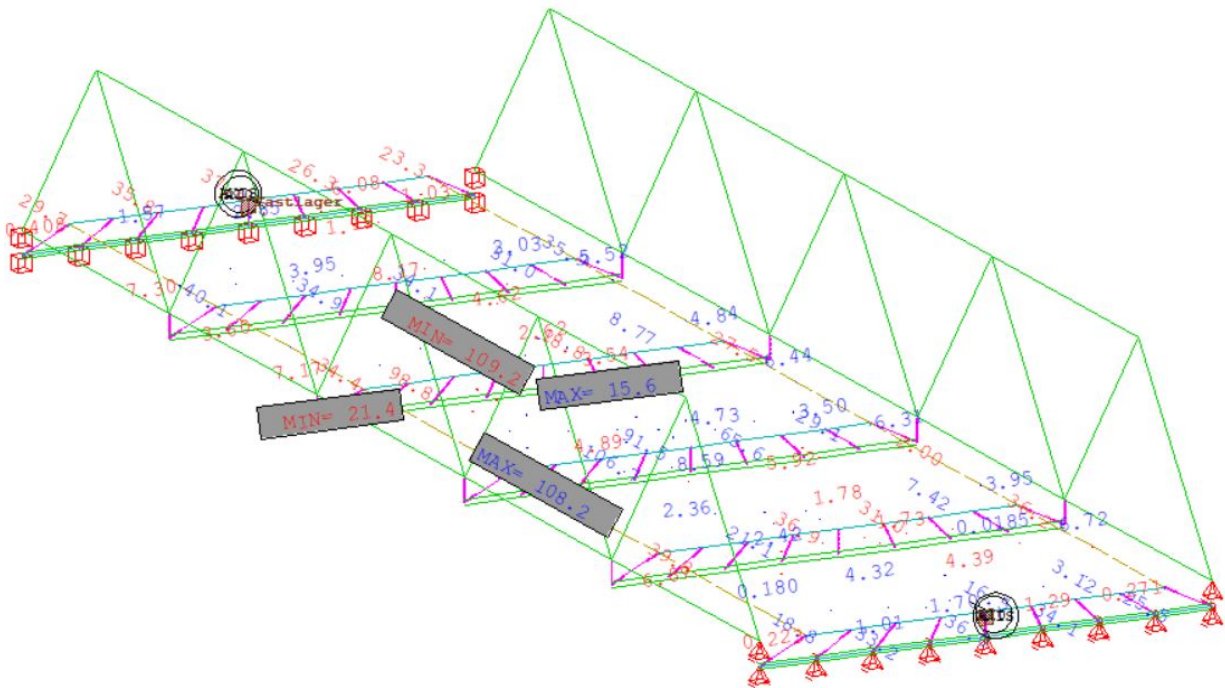


Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 2:



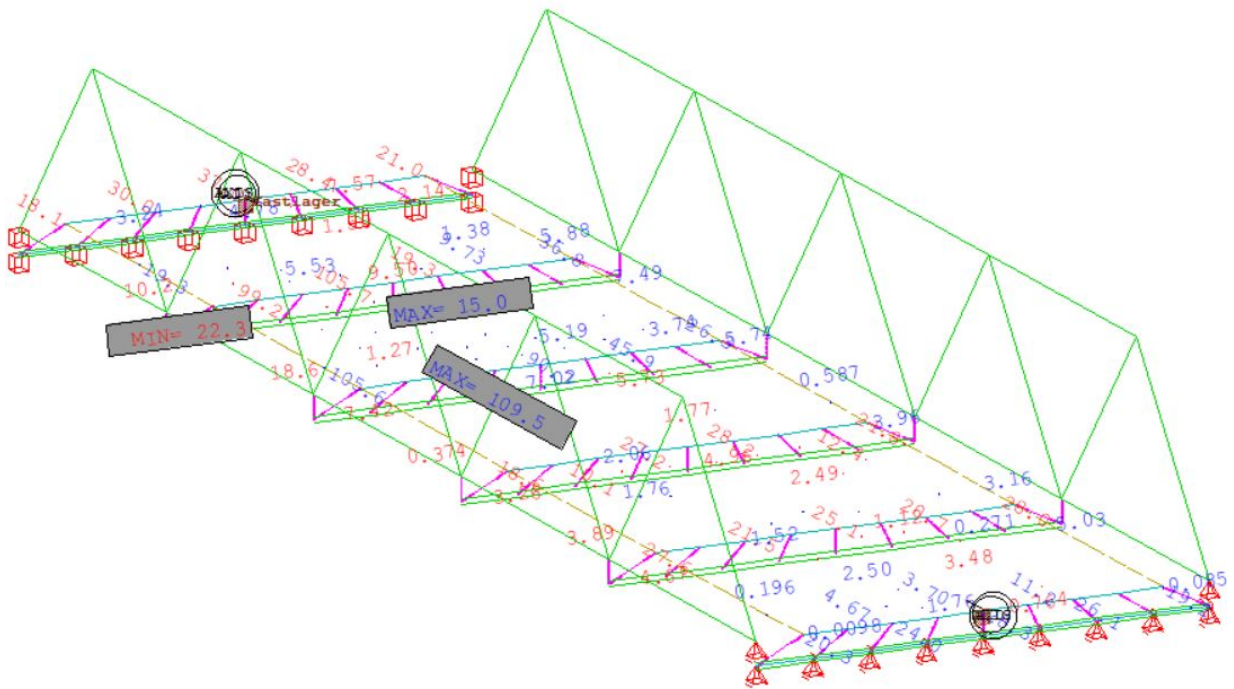
Skjærkrefter

Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 1:

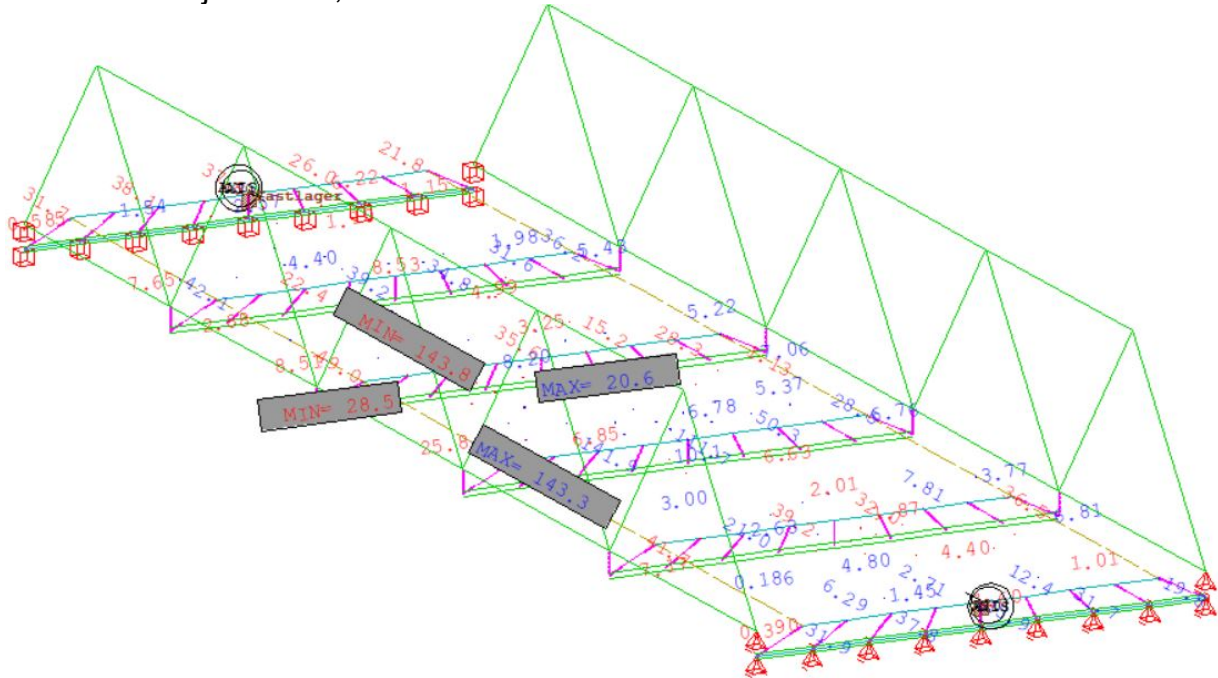


Her leses den dimensjonerende skjærkraften i lengderetning som 109.2 kN/m bredde. Den dimensjonerende skjærkraften i tverretning leses som 21.4 kN/m lengde.

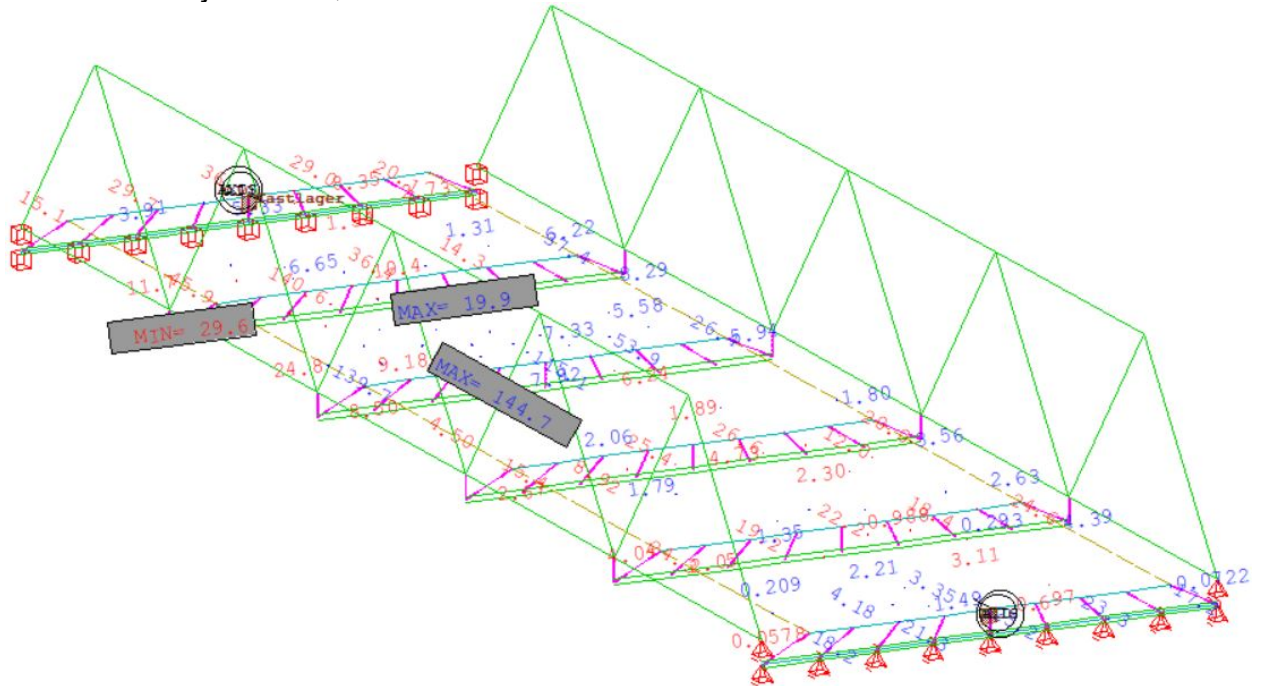
Lastkombinasjon 6.10a, lasttilfelle 2:



Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 1:

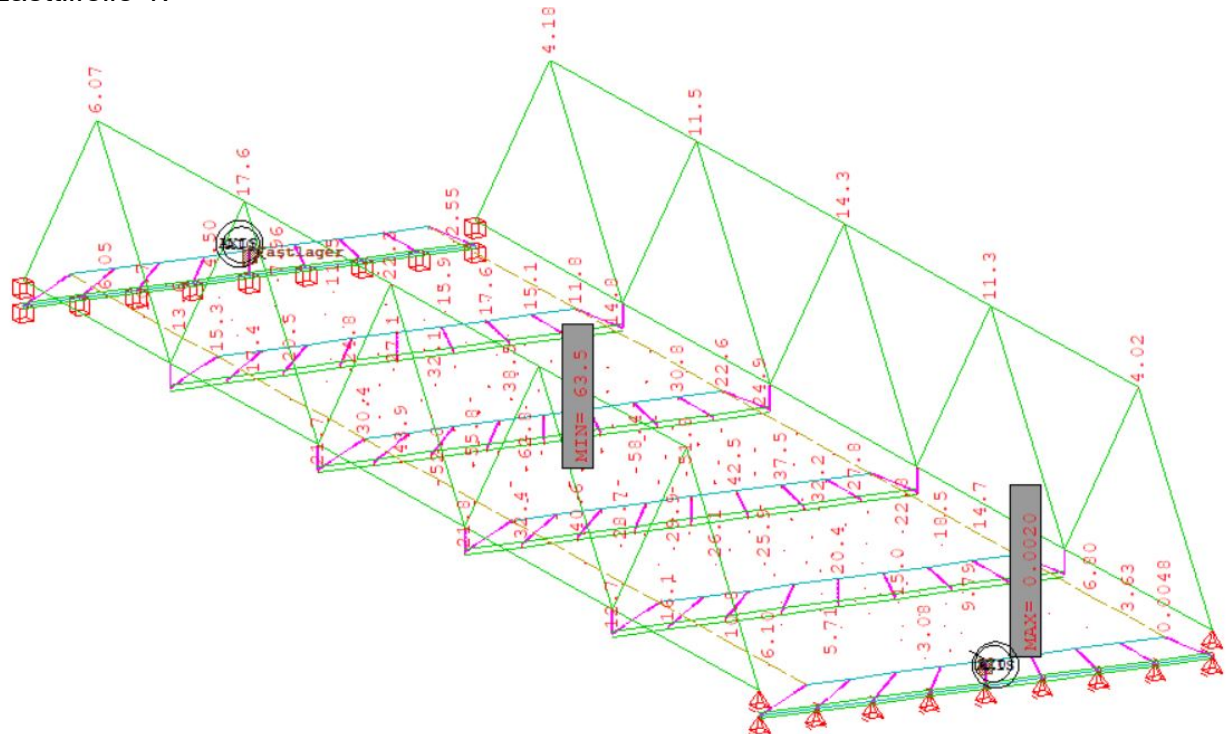


Lastkombinasjon 6.10b, lasttilfelle 2:



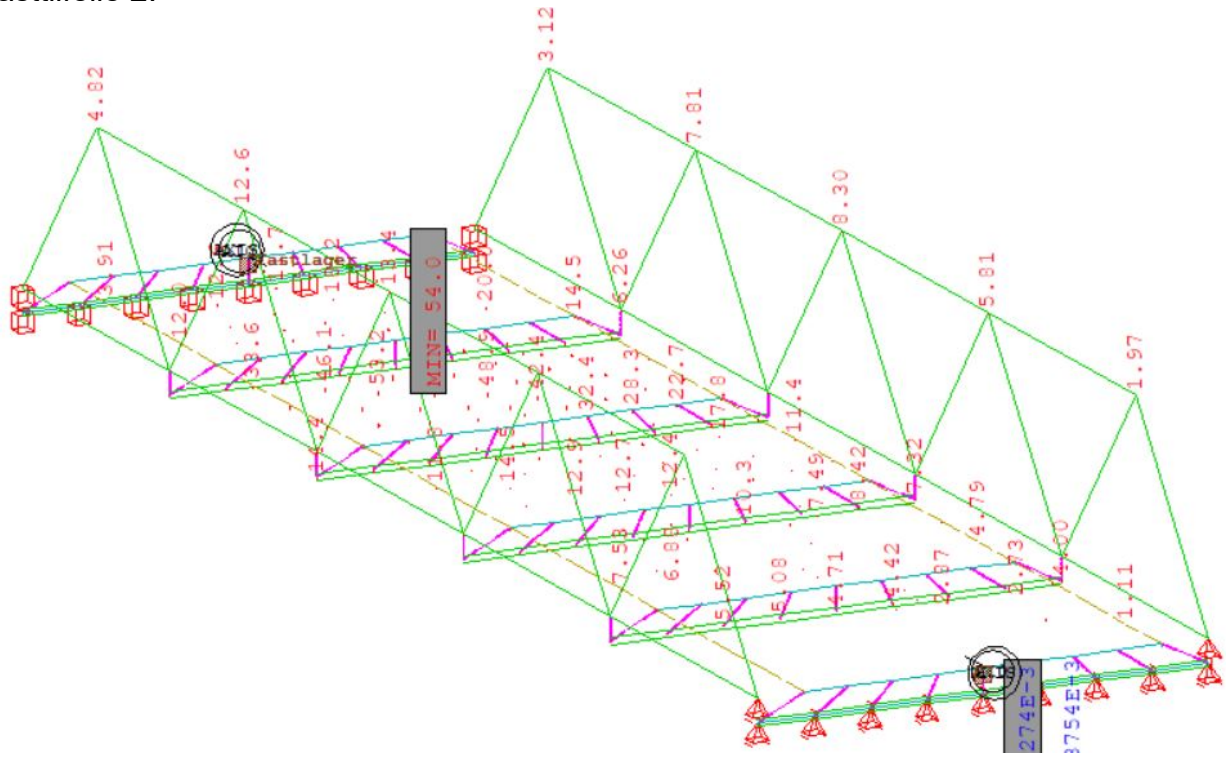
Nedbøyning

Lasttilfelle 1:



Her leses største vertikale nedbøyning som 63.5 mm.

Lasttilfelle 2:



Vedlegg C: Beregnings- og utslippsfaktorer

Her er beregnings- og utslippsfaktorer som er forhåndsdefinert i VegLCA v4.10 vedlagt [34].

Beregningsfaktorer

BEREGNINGSAKTORER					
MATERIALFORBRUK				Dokumentasjon for standardverdier	
Skjul dokumentasjon				Trykk for mer detaljert dokumentasjon for materialforbruk	
Skjul dokumentasjon					
	Brukt i beregninger	Standard	Prosjektspesifikke verdier		
Tykkelser, vegoppbygning					
11	Avrettingslag	0.150	0.150		m
12	Bærelag	0.130	0.130		m
13	Bindlag	0.035	0.035		m
14	Slitelag	0.113	0.045	0.113	m
15	Belegning på skulder, asfalt	0.080	0.080		m
16	Belegning på skulder, grus/knust asfalt	0.100	0.100		m
17	Betongslitelag	0.080	0.080		m
Vegutstyr					
20	Klebelag - veg i dagen	0.15	0.15		kg/m2
21	Klebelag - bru	0.35	0.35		kg/m2
22	Mur av naturstein, tykkelse	1.2	1.2		m
23	Mur av betongelement, tykkelse	1.4	1.40		m
24	Støyskjerm av tre, tykkelse	0.1	0.1		m
25	Høyde på støyskjerm	2.5	2.5		m
26	Ensidig rekkverk (standard vegrekkverk)	20	20		kg/m
27	Rekkverk av betong	0.3	0.3		m3/m
28	Rekkverk av tre	10	10		kg/m
29	Rekkverk i stål (bru)	40	40		kg/m
30	Kjørestert rekkverk i stål	-	Ikke i bruk i denne versjonen		kg/m
31	Ytterrekkverk i stål (bru)	-	Ikke i bruk i denne versjonen		kg/m

Den prosjektspesifikke verdien 0.113 m for slitelag er basert på slitelaget av AGB 11 på Tveit bru som er gjennomsnittlig 113 mm tykt.

BEREGNINGSAKTORER					
MATERIALFORBRUK				Dokumentasjon for standardverdier	
Skjul dokumentasjon				Trykk for mer detaljert dokumentasjon for materialforbruk	
Skjul dokumentasjon					
	Brukt i beregninger	Standard	Prosjektspesifikke verdier		
Armering					
131	Spennarmering	4.8	4.8		kg/mMN
132	Armeringsnett	3.0	3.0		kg/m2
133	Armeringsduk	0.4	0.4		kg/m2

BEREGNINGSAKTORER					
MATERIALFORBRUK				Dokumentasjon for standardverdier	
Skjul dokumentasjon				Trykk for mer detaljert dokumentasjon for materialforbruk	
Skjul dokumentasjon					
	Brukt i beregninger	Standard	Prosjektspesifikke verdier		
Peler					
157	Stålrørspel RD320/12,5	96	96	kg/m	Beregnet fra angitte dimensjoner
158	Massiv stålkjernepel Ø100	58	58	kg/m	Beregnet fra angitte dimensjoner
159	Betongpel, P270	190	190	kg/m	Beregnet fra angitte dimensjoner
160	Betongpel, P345	315	315	kg/m	Beregnet fra angitte dimensjoner
161	Foringsrør, Ø193,7/5	11	11	kg/m	Beregnet fra angitte dimensjoner
162	Stålsput L603	108	108	kg/m ²	Beregnet fra angitte dimensjoner
163	Stålrør kulvert Ø2600	121	121	kg/m	Beregnet fra angitte dimensjoner
164	Liming med epoxy	0.12	0.12	kg/m ²	Lagtykkelse antatt

BEREGNINGSAKTORER					
MATERIALFORBRUK				Dokumentasjon for standardverdier	
Skjul dokumentasjon				Trykk for mer detaljert dokumentasjon for materialforbruk	
Skjul dokumentasjon					
	Brukt i beregninger	Standard	Prosjektspesifikke verdier		
Tettheter/egenvekter					
166	Jord og leire	1.6	1.6	tonn/lm ³	Klimamodul EFFEKT 6.74
167	Sprengstein	1.7	1.7	tonn/lm ³	Klimamodul EFFEKT 6.74
168	Grus	1.5	1.5	tonn/lm ³	Klimamodul EFFEKT 6.74
169	Asfalt	2.5	2.5	tonn/m ³	Klimamodul EFFEKT 6.74
170	Asfaltert grus	2.4	2.4	tonn/m ³	Klimamodul EFFEKT 6.74
171	Tømmer	0.35	0.35	tonn/m ³	Treteknisk (2012)
172	Lettklinker	325	325	kg/m ³	HB N200
173	Skumglassgranulat, standard	205	205	kg/m ³	HB N200
174	EPS 200	30.0	30.0	kg/m ³	Informasjon fra produsent(er)
175	XPS 400	35.0	35.0	kg/m ³	Informasjon fra produsent(er)
176	PE-skum	35.0	35.0	kg/m ³	Informasjon fra produsent(er)
177	Bitumenemulsjon	1.0	1.0	kg/l	Informasjon fra produsent(er)
178	Trevirke	533	500	533.0 kg/m ³	Asplan Viak 2015
179	Betong	2.40	2.40	tonn/m ³	Norsk Betongforening (2015)
180	Lettbetong	1.35	1.35	tonn/m ³	HB R761
181	Naturstein	2,700	2,700	kg/m ³	Informasjon fra produsent(er)
182	Kobber	8,940	8,940	kg/m ³	The engineering toolbox
183	Stål	7,400	7,400	kg/m ³	The engineering toolbox
184	Sink	7,135	7,135	kg/m ³	The engineering toolbox
185	Betongelementer	2.51	2.51	tonn/m ³	Betong med 2 vol% armering

Den prosjektspesifikke verdien 533 kg/m³ for trevirke er basert på egenvekten for GL30c med hensyn til fukt og kreosotimpregnering.

$$\text{Egenvekt} = \text{Tynghet} / g = 5.23 \text{ kN/m}^3 / 9.81 \text{ m/s}^2 = 533 \text{ kg/m}^3$$

DOKUMENTASJON FOR BEREGNINGSAKTORER	
2	
4	
5	
6	+ Materialforbruk
7	Tykkelser vegoppbygning
8	Bærelag Statens vegvesens håndbok N200 Vegbygging, side 225, figur 512.2
9	Bindlag Statens vegvesens håndbok N200 Vegbygging, side 224, figur 512.1
10	Slitelag Statens vegvesens håndbok N200 Vegbygging, side 224, figur 512.1
11	Belegning på skulder, asfalt Antar samme tykkelse i vegbane som på skulder (bindlag + slitelag)
12	Belegning på skulder, grus/knust asfalt Antatt tykkelse lik bærelag
13	Betongslitelag Statens vegvesens håndbok N200 Vegbygging, side 231, figur 513.2
14	Vegutstyr
15	Klebelag Statens vegvesens håndbok R761, side 196: Prosesskode 65.4 angir min 0,10 kg bindemiddel per m2
16	Klebelag - bru Statens vegvesens håndbok R762, side 261: Prosesskode 87.1. Som materiale er det antatt bitumenemulsjon/topp
17	Mur av naturstein, tykkelse Tykkelsen er antatt. Informasjon fra Geir Slettemark (Asplan Viak)
18	Mur av betongelement, tykkelse Tykkelsen er antatt. Informasjon fra Geir Slettemark (AV): Murer <=1,5 m: 0,6 m tykk. Murer >1,5 m: 0,8 m tykke. B
19	Støyskjerm av tre, tykkelse Tykkelsen er antatt
20	Høyde på støyskjerm Høyden er antatt
21	Rekkverk av betong Vekt er basert på informasjon fra produsenter (NCC)
22	Rekkverk av stålwire Vekt er basert på informasjon fra produsenter
23	Rekkverk av tre Vekt er antatt
24	Rekkverk i stål (bru)
25	Kjøresterkt rekkverk i stål
26	Ytterrekkverk i stål (bru) Vekt per meter ensidig rekkverk er basert på klimamodulen i EFFEKT 6.6. (Statens vegvesen rapport nr. 358, 2015: brurekkverk å være to-sidig.
27	Mellomrekkverk i stål (bru)
28	Topprekkverk i stål (bru)
29	Gang-/sykkelvegarekkverk i stål Antatt likt ensidig rekkverk. Materiale: galvanisert stål
30	Brurekkverk betong Antatt lik 'Rekkverk av betong'
31	Brurekkverk aluminium Antatt halv vekt av brurekkverk i stål (i mangel på relevante data). I prosjekter der dette utgjør mengder av betydning
32	Brurekkverk tre Vekt er antatt (vil ha liten betydning i totalen)
33	Bybrurekkverk Vekt antatt lik som for Gang-/sykkelrekkverk i stål
34	Gjerde av stål Basert på Life Cycle Assessment of Road, A Pilot Study for Inventory Analysis (Stripple 2001). Materiale: Kamstål
35	Ensidig rekkverk (veg i dagen) Vekt på 20 kg stål per meter ensidig rekkverk er basert på klimamodulen i EFFEKT

DOKUMENTASJON FOR BEREGNINGSAKTORER	
74	Armering
75	Spennarmering Fra verktøyet BridgeLCA (ETSI-bru)
76	Armeringsnett Vekt er basert på produsent-data (Stene Stål)
77	Armeringsduk Vekt er basert på produsent-data, middelvei benyttet (Geosyntia)
96	Peler
97	Stålrørspel RD320/12,5
98	Massiv stålkjernepel Ø100
99	Foringsrør, Ø193,7/5
100	Stålsput L603
101	Stålrør kulvert Ø2600
102	Liming med epoxy Antagelser: lagtykkelse 100um og tetthet epoxy 1 200 kg/m3

DOKUMENTASJON FOR BEREGNINGSAKTORER	
103	Tettheter/egenvekter
104	Jord og leire
105	Sprengstein
106	Grus SVV-rapport nr. 2009/11, Metode for beregning av energibruk og klimagassutslipp for vegprosjekter (Hammervold, 2009)
107	Asfaltgrusbetong
108	Asfaltbetong
109	Tømmer Fokus på tre: Konstruksjonstrevirke. TreFokus, Treteknisk 2012
110	Lettklinker Statens vegvesens Håndbok N200, side 46. Materialkrav til ukomprimert klinker: usortert: 275 kg/m3, sortert 245 kg/m3. Vc
111	Skumglassgranulat, standard Statens vegvesens Håndbok N200, side 46. Materialkrav til ukomprimert skumglass: 180 kg/m3. Volumendring komprimert
112	EPS Antagelser basert på produsentdata (Foamular, PakBoard, Thermals)
113	XPS Antagelser basert på produsentdata (Foamular, PakBoard, Thermals)
114	PE-skum Antagelser basert på produsentdata (AsRubber, Dafa)
115	Bitumenemulsjon Sikkerhetsdatablad Bitumenemulsjon C 60 BP3 og C50 B3/B4
116	Trevirke Metode for beregning av CO2-utslipp knyttet til arealbeslag ved vegbygging (Asplan Viak og Bioforsk 2015, for SVV)
117	Betong Norsk betongforening Publikasjon 37: Lavkarbonbetong (2015)
118	Lettbetong Statens vegvesens håndbok R761, side 116 angir densitet på 1 300 - 1 400 kg/m3 for lettbetong brukt i tunnelhvelv. Antar
119	Naturstein SVV-rapport nr. 2009/11, Metode for beregning av energibruk og klimagassutslipp for vegprosjekter (Hammervold, 2009)
120	Kobber
121	Stål Densities of solids, The engineering toolbox
122	Sink
123	Betongelementer Betong (2,4 tonn/m3) med 2 vol% armering (tilsvare 160 kg armering per 0,98 m3 betong)

DOKUMENTASJON FOR BEREGNINGSAKTORER	
183	Levetider
184	Slitelag Håndbok N200 Vegbygging (2014) - se tabell s.297. Levetid avhenger av ÅDT (som også til en viss grad bestemmer asfalttype, som igjen påvirker levetid)
185	Betongdekke Dimensjonert for 20 år. Kilde: https://www.vareveger.no/artikler/betongvegene-lever-videre/194793
186	Vegrekkverk Håndbok N101 - Rekkverk og vegens sideområder. Beregnet levetid på minst 30 år. 40 år brukt i EFFEKT 6.6.
187	Brurekkverk Håndbok N101 - Rekkverk og vegens sideområder. Beregnet levetid på minst 50 år.
188	Gjerder Håndbok 231 - Rekkverk og vegens sideområder. MERK: N101 har erstattet 231. Referanse ikke funnet i N101.
189	Støyskjerm BaneNOR Teknisk regelverk angir min. 50 år. https://trv.jbv.no/wiki/Underbygning/Prosjektering_og_bygging/51%C3%85yskjerner#Levetid
190	Viftr Korsmo, A. R., Bergsdal, H. (2010), Miljøbudsjett for Follobanen - Infrastruktur.
191	Belysning, veg i dagen Statens Vegvesen (2014), Energibesparende vegbelysning, rapport 646. Basert på min. levetid på 24 000 brenntimer og 4 100 brenntimer/år. Merk at d
192	Belysning, tunnel Statens Vegvesen (2014), Energibesparende vegbelysning, rapport 646. Basert på min. levetid på 24 000 brenntimer og 4 100 brenntimer/år. Merk at d
193	Vegskilt Antar samme levetid som rekkverk. Begge er stålkomponenter.
194	Hvelv av betongelement, tunnel Korsmo, A. R., Bergsdal, H. (2010), Miljøbudsjett for Follobanen - Infrastruktur.
195	Elektrisk utstyr tunnel Korsmo, A. R., Bergsdal, H. (2010), Miljøbudsjett for Follobanen - Infrastruktur.
196	Renseanlegg tunnel Brukes ikke i verktøyet.
197	Overflatebehandling stålbru Knudsen, O. Ø. (2015), Korrosjonsbeskyttelse av stålbruer - hvordan oppnå lang levetid.
198	Maling/bets av trebru Bane Nor har hovedinspeksjon av bruer etter seks år. Dette inkluderer malingskontroll. Antar noe lengre intervall på malingsoperasjon enn inspeksjon.
199	Beslag trebru Antar som maling.
200	Brulagre og Fugekonstruksjoner Brukes ikke i verktøyet.
201	Reasfaltering
202	Asfaltforbruk til reasfaltering Klimamodul EFFEKT 6.6 (2014)
203	Andel av slitelag som freses bort Antatt lik som reasfaltering

Utslippsfaktorer

6	Norske gjennomsnittsdatab (standard)	Klima	Dokumentasjon Norske gjennomsnittsdatab
7		kg CO2-eq	
8			
9	ASFALTMATERIALER		
10	Asfaltert grus (Ag)	kg	5.84E-02 NIRAS verdi.
11	Asfaltert pukk (Ap)	kg	4.38E-02 Antatt 3% bitumen, Nordisk el-mix 2012-2016 ved produksjon.
12	Asfaltgrusbetong og asfaltbetong	kg	7.47E-02 Energi- og materialbruk basert på EPD AbG 11 Asfalt (slitelag), 2017, bransjesnitt (http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Bygg)
13	Lavtemperatur-asfalt	kg	5.45E-02 5,5 % bitumen. Energibruk i produksjon er fra Zauanis et.al. (2012) Development of Calculation Tool for Assessing the Energy Demand
14	Kaldprodusert asfalt	kg	4.79E-02 5,5 % bitumenemulsjon. Energibruk i produksjonen antatt 70 % av forbruk i produksjon av Asfaltgrusbetong (andel energibruk iht oppgi
15	Mykasfalt (Ma)	kg	5.39E-02 4,5 % bitumen. Energiforbruk antatt som for Asfaltert grus
16	Asfaltkumgrus (Asg)	kg	4.79E-02 Antatt lik som "Kaldprodusert asfalt"
17	Skjelettasfalt (Ska)	kg	6.56E-02 6 % bitumen. Energibruk produksjon satt lik som for Asfaltgrusbetong og asfaltbetong
18	Støpeasfalt (Sta)	kg	1.84E-01 Basert på 'Mastic asphalt', Ecoinvent v3 prosess. Nordisk el-mix 2012-2016 ved produksjon.
19	Topeka (Top)	kg	1.84E-01 Antatt lik som "Støpeasfalt"
20	Emulsjonsgrus (Esg)	kg	4.44E-02 3,5% bitumenemulsjon. Energiforbruk som for Asfaltert grus
21	Gjenbruksasfalt (Gja)	kg	4.81E-02 Utslipp basert på Tenold Vannebo, T. <i>Bærekraftig gjenbruk av returafalt som inneholder polymermodifisert bitumen med hovedfokus p</i>
22	Drensasfalt (Da)	kg	7.47E-02 Antar lik asfaltgrusbetong pga mangel på gode data. Dette er vurdert til godt nok basert på antagelse om små mengder relativt til totalt
23	Tynndekke (Tt)	kg	1.84E-01 Antar lik Topeka pga mangel på gode data. Dette er vurdert til godt nok basert på antagelse om små mengder relativt til totalt for vegp
24	Slamasfalt (Sla)	kg	4.81E-02 Antar lik gjenbruksasfalt pga mangel på gode data. Dette er vurdert til godt nok basert på antagelse om små mengder relativt til totalt f
25	BETONG OG SEMENT		

6	Norske gjennomsnittsdatab (standard)	Klima	Dokumentasjon Norske gjennor
7		kg CO2-eq	
8			
25	BETONG OG SEMENT		
26	Betongstøp, B25, CEM I	m3	2.60E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for bransjereferanse. /
27	Betongstøp, B25, CEM II/A	m3	2.10E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for Lavkarbon B. Andre
28	Betongstøp, B25, CEM II/B	m3	1.80E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for Lavkarbon A. Andre
29	Betongstøp, B35, CEM I	m3	3.30E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for bransjereferanse. /
30	Betongstøp, B35, CEM II/A	m3	2.80E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for Lavkarbon B. Andre
31	Betongstøp, B35, CEM II/B	m3	2.10E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for Lavkarbon A. Andre
32	Betongstøp, B45, CEM I	m3	3.60E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for bransjereferanse. /
33	Betongstøp, B45, CEM II/A	m3	2.90E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for Lavkarbon B. Andre
34	Betongstøp, B45, CEM II/B	m3	2.20E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for Lavkarbon A. Andre
35	Betongstøp, B55, CEM I	m3	3.70E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for bransjereferanse. /
36	Betongstøp, B55, CEM II/A	m3	3.00E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for Lavkarbon B. Andre
37	Betongstøp, B55, CEM II/B	m3	2.30E+02 Klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for Lavkarbon A. Andre
38	Lettbetong	m3	1.63E+02 Basert på klimafaktor fra Norsk Betongforening Publikasjon 37, høst 2019, grenseverdi for bransjere
39	Sement, CEM I	kg	8.60E-01 Iht. EPD for SVV-godkjent CEM I-sement (Aalborg Rapidsement)
40	Sement, CEM II/A	kg	6.37E-01 Iht. EPD for SVV-godkjent CEM II/A-sement (Norcem Anleggsement FA)
41	Sement, CEM II/B	kg	6.04E-01 Iht. EPD for SVV-godkjent CEM II/B-sement (Norcem Standardsement FA)

6	Norske gjennomsnittsdatab (standard)	Klima	Dokumentasjon Norske gjennomsnittsdatab
7		kg CO2-eq	
8			
91	STÅLMATERIALER		
92	Stål, konstruksjon m/resirk	kg	1.72E+00 Samme som europeiske data. Alt stål er produsert i Europa
93	Stål, konstruksjon u/resirk	kg	2.72E+00 Samme som europeiske data. Alt stål er produsert i Europa
94	Stål, rustfritt/høykvalitet	kg	5.22E+00 Samme som europeiske data. Alt stål er produsert i Europa
95	Stål, varmforsinket	kg	1.90E+00 Som 'konstruksjonsstål m/resirk', med galvanisering lagt til
96	Stål, peler	kg	2.72E+00 Antatt stål uten resirk
97	Stål, spunt	kg	9.40E-01 Antar likt som kamstål
98	Stål, spennarmering	kg	2.72E+00 Antar likt som stål uten resikulert
99	Stål, kamstål armering	kg	9.40E-01 Miks, 70% Norge, 30% Europa
100	Stål, kamstål armering, rustfritt	kg	5.22E+00 Antatt lik 'Stål, rustfritt'
101	Stål, kamstål armering, galvanisert	kg	1.12E+00 Utslippsfaktorer beregnet ut fra utslippsfaktorer for Kamstål (antatt diameter for overflateberegning 20 mm) og Sinkbelegg
102	Stål, kamstål armering, epoxymalt	kg	1.03E+00 Utslippsfaktorer beregnet ut fra utslippsfaktorer for Kamstål (antatt diameter for overflateberegning 20 mm) og Epoxymaling
103	Stål, bolter av kamstål	kg	1.14E+00 Antar likt som kamstål, pluss varmforsinking (85um) og pulverlakkering med epoxy (85um)
104	Støpejern	kg	2.19E+00 Samme som europeiske data. Alt stål er produsert i Europa
105	PLASTMATERIALER		
117	DIESEL OG ELEKTRISITET		
130	ANNET		

Norske gjennomsnittsdata (standard)		Klima	Dokumentasjon Norske gjennomsnittsdata
		kg CO2-ekv	
141	Kalksementpølse (50% K/50% S)	kg	9.26E-01
142	Kobber	kg	1.92E+00
143	Konstruksjonstrevirke	m ³	5.30E+01
144	LED Vegbelysning	stk	4.27E+01
145	Lettklinker/Ekspandert leire	m ³	7.19E+01
147	NaH Vegbelysning	stk	4.27E+01
148	Naturstein	kg	1.28E-01
149	Oljemaling	kg	5.85E+00
150	Pulverlakkering, 60um	m ²	3.81E+00
151	Salt, for vinterdrift	kg	1.85E-01
152	Sementstabilisert grus	kg	6.31E-02
153	Sinkbelegg, stål, 130um	m ²	7.41E+00
154	Skumglassgranulat	m ³	2.39E+01
155	Slissevegg	m ²	4.70E+02
156	Sprengstoff	kg	2.65E+00
157	Sprengning (detonasjon, A5)	kg	1.54E-01
158	Standard vegbelysning	stk	4.27E+01
159	Topprekkverk	m	2.26E+01
160	Trykkimpregnet tre	m ³	9.52E+01
161	Trykkimpregning med kreosot	m ³	1.25E+02
162	Trykkimpregning med salt	m ³	4.22E+01
163	Vegskilt	stk	6.97E+01
164	Vifte/ventilator	stk	1.04E+03

Antatt materialsammensetning: 50 % kalt og 50 % sement
Ecoinvent v3 Copper, at regional storage/RER U
Fra EPD NEPD-308-179-NO
Antatt materialsammensetning: 12 kg stål, 2 kg glass og 2 kg aluminium (basert på produsentdata) (likt som standard belysning, antar at lyskilde er ubel)
Basert på EPD EN. NEPD-1742-715-EN (Leca 0-32) Antatt tetthet 325 kg/m3
Antatt materialsammensetning: 12 kg stål, 2 kg glass og 2 kg aluminium (basert på produsentdata) (likt som standard belysning, antar at lyskilde er ubel)
Snitt av EPD NEPD-315-192-NO, NEPD-1585-609-NO, NEPD-1584-609-NO
Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state (RER) alkyd paint production, white, solvent-based, product in 60% solution state
Basert på ecoinvent v3 prosess 'powder coating, steel'.
ecoinvent Sodium chloride, powder (RER) production
Består av grus og sement. Sementmengde 7 % av tørrvekt.
Basert på ecoinvent Zinc coat, pieces (RER) zinc coating, pieces
Snitt av EPD NEPD-1243-396-EN, NEPD00280E, justert for 205 kg/m3
Materialsammensetning 117 kg Kamstål og 1 m3 Betongstøp (beregnet fra typiske dimensjoner for slissevegg), typisk tykkelse 1 m
Tall basert på EPD NEPD-1591-615-EN
Tall basert på EPD NEPD-1591-615-EN
Antatt materialsammensetning: 12 kg stål, 2 kg glass og 2 kg aluminium (basert på produsentdata)(likt som LED belysning, antar at lyskilde er ubetydel)
Betongrekkverk (0,3 m3/m) + galvanisert stål (20 kg/m)
Utslippsfaktorer er summen av utslippsfaktorer for trevirke (m3) og trykkimpregning med salt (m3)
Basert på ecoinvent v3 prosess Wood preservation, pressure vessel, creosote, outdoor use, ground contact, representativ for Sentraleuropeisk lokasjon.
Basert på ecoinvent v3 prosess 'Wood preservation, vacuum pressure method, organic salts, Cr-free, outdoor use, ground contact', representativ for Se
Antagelser: 30 kg varmforsinket stål, 20 kg betong og 5 kg stål (lavkvalitet)
Antar 200 ke or stk. Høvkvalitetsstål. Denne er usikker.

Mellomfaseverktøy Prosjektbeskrivelse Veg i dagen Tunneler Bruer Totale mengder Resultatsammendrag Resultater Utslippsfaktorer Beregnings

Transportavstander

Fyll inn: Dokumentasjon prosjektspesifikke verdier			
	Brukt i beregninger	Standard	Prosjektspesifikke verdier
BETONG OG SEMENT			
Betongstøp, B25, CEM I	20	20	km
Betongstøp, B25, CEM II/A	20	20	km
Betongstøp, B25, CEM II/B	20	20	km
Betongstøp, B35, CEM I	20	20	km
Betongstøp, B35, CEM II/A	20	20	km
Betongstøp, B35, CEM II/B	20	20	km
Betongstøp, B45, CEM I	20	20	km
Betongstøp, B45, CEM II/A	20	20	km
Betongstøp, B45, CEM II/B	20	20	km
Betongstøp, B55, CEM I	20	20	km
Betongstøp, B55, CEM II/A	20	20	km
Betongstøp, B55, CEM II/B	20	20	km

Fyll inn: Dokumentasjon prosjektspesifikke verdier			
	Brukt i beregninger	Standard	Prosjektspesifikke verdier
STÅLMATERIALER			
Stål, konstruksjon m/resirk	1,500	1,500	km
Stål, konstruksjon u/resirk	1,500	1,500	km
Stål, rustfritt/høykvalitet	1,500	1,500	km
Stål, varmforsinket	1,500	1,500	km
Stål, peler	1,500	1,500	km
Stål, spunt	1,500	1,500	km
Stål, spennarmering	1,500	1,500	km
Stål, kamstål armering	1,500	1,500	km
Stål, kamstål armering, rustfritt	1,500	1,500	km
Stål, kamstål armering, galvanisert	1,500	1,500	km
Stål, kamstål armering, epoxy malt	1,500	1,500	km
Stål, bolter av kamstål	1,500	1,500	km
Støpejern	1,500	1,500	km

Fyll inn: Dokumentasjon
prosjektspesifikke verdier

	Brukt i beregninger	Standard	Prosjektspesifikke verdier	
ANNET				
Aluminium	1,500	1,500		km
Bitumenemulsjon	500	500		km
Ekspandert polystyren (EPS 200)	1,500	1,500		km
Ekstrudert polystyren (XPS 400)	1,500	1,500		km
Epoxy	500	500		km
Epoxymalning, 100um	<i>Transport regnes ikke her</i>			
Forbrenning av bioavfall	<i>Transport regnes ikke her</i>			
Glass	1,500	1,500		km
Grus/pukk	20	20		km
Kalk	500	500		km
Kalksementpel (50% K/50% S)	500	500		km
Kobber	1,500	1,500		km
Konstruksjonstrevirke	500	500		km
LED Vegbelysning	500	500		km
Lettklinker/Ekspandert leire	500	500		km
Limtre	500	500		km