

# **Anvendelse av innovative knutepunkt i limtrefagverk for å øke konkurransedyktigheten mot fagverk i stål**

Application of innovative connections in glulam truss  
to increase the competitiveness against trusses of  
steel

**Trondheim Mai 2019**

Navn studenter:

Stine Stamnes Rennan

Guttorm Kollbotn Selnes

Henriette Sofie Høgstedt Strehl

Intern veileder:

Per Otto Yttervoll

Ekstern veileder:

Øyvind Bones

Prosjektnr:

09 - 2019

Rapporten er ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk





## Problemdefinering, prosjektbeskrivelse og resultatmål

Det er en stadig økende interesse for å ta i bruk trevirke i bæresystemene til større konstruksjoner. Dermed utarbeides det løsninger som kan erstatte bruken av betong og stål. Utfordringen ved bruk av trevirke er blant annet at det krever store dimensjoner og dermed også medfører et høyere materialforbruk og krever mer plass i konstruksjonen. I tillegg er forbindelsene kompliserte siden tre er et anisotrop materiale, noe som resulterer i at de blir ofte dyre. Problemstillingen som skal drøftes i påfølgende bacheloroppgave er derfor om fagverk av limtre kan utformes slik at det blir konkurransedyktig mot massive bjelker av limtre og/eller fagverk av stål.

Bachelorgruppen skal drøfte aspekter som styrke, miljø og pris, da disse har stor innvirkning på sammenligningen. Styrken i fagverket skal settes opp mot det respektive forbruket av trevirke og andre materialer. Som nevnt vil en av utfordringene bli at et fagverk i limtre, med sammenlignbar styrke som et i stål, krever større dimensjoner. I den økonomiske undersøkelsen inngår produksjon som en faktor da fagverk av limtre vil variere mye i produksjonstid og vanskelighetsgrad avhengig av valgt løsning for knutepunktene. I tillegg skal også pris i forbindelse med materialmengde tas med som en viktig faktor.

Den økende interessen for bruk av trevirke i konstruksjoner kommer av et ønske fra bransjen om å ta større hensyn til miljøet ved valg av byggemateriale. Det skal derfor utføres en vurdering på de ulike løsningenes miljøpåvirkninger. Slik ivaretas ønsket om at oppgaven til slutt skal være et positivt bidrag til byggenæringen med tanke på tiltak for miljøet.

En helhetlig vurdering av fagverket i limtre vil bli gjennomført og satt opp mot de to andre alternativene. Slik kan man avgjøre på best mulig grunnlag hvorvidt fagverk i limtre er konkurransedyktig.

Stikkord:	Keywords:
Limtre, stål, fagverk, knutepunkt, miljø, økonomi, selvborende skruer, nedbøyning, Martinsons, skråstilte skruer	Glulam, steel, truss, connection, environment, economy, self-tapping screws, deflection, Martinsons, incline screws



## Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet i forbindelse med avsluttende utdanning for studieretningen Byggingeniør ved NTNU i Trondheim. Oppgaven baserer seg på kunnskaper og ferdigheter tilegnet i løpet av studiet, samt selvstendige fordypninger der det blir nødvendig. Arbeidsomfanget tilsvarer 20 studiepoeng og utgjør ca. 500 timer per student.

Vi ønsket å skrive om trevirke da det er et innovativt materiale med mye potensiale i byggebransjen. I de siste årene har det blitt en økende interesse og etterspørsel etter kunnskap innenfor materialet på grunn av dens gode egenskaper. Ved å skrive om fagverk i limtre sammenlignet med fagverk i stål ønsket vi å undersøke muligheten for å øke konkurransedyktigheten og forhåpentligvis bidra til økende bruk av limtre i bransjen. Moelven Limtre AS inspirerte oss til å skrive om de innovative knutepunktene som kan hjelpe oss med nettopp dette.

Vi vil takke vår interne veileder Per Otto Yttervoll og ekstern veileder Øyvind Bones for god veiledning og høy tilgjengelighet under oppgaveskrivingen. Vi vil også takke Moelven Limtre AS for inspirasjon til oppgaven.

Trondheim, 20. mai 2019



---

Stine Stamnes Rennan



---

Henriette Sofie H. Strehl



---

Guttorm Kollbotn Selnes



## Sammendrag

Den økende bevisstheten vedrørende miljø og klima i byggenæringen har gjort det mer ettertraktet å erstatte de tradisjonelle materialvalgene, stål og betong, med tre. Det er bruk av tre i større bærende konstruksjoner som skaper utfordringene med å oppnå tilstrekkelig bæring ved store spenn. I disse konstruksjonene kan fagverk i limtre benyttes.

Fagverksmodellen tar opp store krefter i forhold til materialforbruket, men de massive limtreværnsnittene skaper allikevel et høyt materialforbruk. Kravene til knutepunktenes kapasitet og stivhet resulterer i kompliserte, kostbare løsninger og i kombinasjon med materialbehovet gjør det konkurransedyktigheten til limtrefagverk mer tvilsom.

I forprosjektet ble det beskrevet at fagverket i limtre skulle sammenlignes med fagverk i stål og massivbjelke i limtre. Den massive bjelken i limtre oppfylte ikke krav for det lange spennet på 30 meter, selv med det største mulige tverrsnittet, og ble derfor sløffet fra oppgaven. Et annet avvik fra forprosjektet er beskrivelse av en økonomisk undersøkelse som skal inneholde faktoren produksjonstid og vanskelighetsgrad av valgt løsning for knutepunktene. Den økonomiske undersøkelsen ble forenklet til å kun inneholde kostnader ved produksjon av materialer og forbindelser.

En felles fagverksmodell for et spenn på 30,0 m er blitt utviklet for henholdsvis bruk av limtre og stål. For begge materialvalgene har fagverket flere geometriske likhetstrekk for å sikre et godt sammenligningsgrunnlag. Det ble gjennomført en optimaliseringsprosess ved hjelp av FEM-design som sikrer lavest mulig materialforbruk ved maksimal utnyttelsesgrad på 80 %. Videre ble hvert tverrsnitt kontrollert i henhold til Norsk Standard og ved bruk av egenkomponerte regneark i beregningsprogrammet Mathcad.

For å øke konkurransedyktigheten til fagverk i limtre ytterligere, er det i arbeidet også satt fokus på forenkling av knutepunktene. I Sverige har Martinsonskonsernet utviklet og tatt patent på knutepunkt i limtrefagverk med kun bruk av skråstilte skruer. Denne løsningen skal redusere produksjonskostnadene med 40 %. Egne kapasitetsberegninger på en tilsvarende variant av knutepunkt er gjennomført i henhold til Norsk Standard, alternativ beregningsmetode basert på forsøk og ved bruk av Mathcad. Trevirkets varierende fastheter og materialeegenskaper i de ulike fiberretningene gjør det vanskelig å oppnå tilstrekkelig

kapasitet og stivhet i knutepunktene. Vanligvis blir det benyttet løsninger som er kompliserte, og derav svært tidkrevende og kostbart.

Konklusjonen for beregninger av knutepunktene er at skruene ikke vil oppfylle krav for kapasitet etter Eurokode 5 i samtlige knutepunkt, men med den alternative metoden er det sannsynlig at en klarer å realisere en slik konstruksjon. Grunnet mangel på beregninger av nødvendig antall dybler og innslissede stålplater, kan man ikke konkludere med at de innovative knutepunkt gir en kostnadsreduksjon på 40 %. Likevel kan man observere en kostnadsreduksjon siden det omtrent er samme pris for dybler og skruer, og at man dermed sparer på å ikke betale for stålplatene.

Samling av resultatene for klimagassverdiene viser at limtre har vesentlig lavere totalutslipp. Produksjonen av limtre kommer til dets fordel ved at det er miljømessig mye gunstigere fremfor stål. Dette vil si at selv om materialbehovet for limtre i et fagverk er flere ganger større enn for stål er det fortsatt et bedre valg med tanke på miljø. Kostnadene øker derimot kraftig med volumdifferansen mellom de to materialene. Byggenæringen har et behov for mer kostnadseffektiv produksjonen av limtre. Da ville valg av limtre som byggematerialet i større konstruksjoner kunne lønne seg både fra et miljømessig- og økonomisk perspektiv.

## Abstract

The increasing focus on climate impacts in the building industry has made timber a desirable substitute for the more common choices such as steel and concrete. The introduction to timber as a building material for use in larger structures has brought attention to new challenges concerning design and expenses. In terms of evaluating the competitiveness of timber against steel a common truss model was designed for both materials. Seen as the strength of glulam is different depending on the various grains it usually results in complicated and expensive connections. To enhance timbers ability to compete with steel a new simplified design of the connections in the truss has been investigated. This thesis will then compare glulam and steel with focus on costs, environmental impact and production.

The trusses shall both have a span of 30 meters which is ideal for using glued laminated timber (glulam). By the use of FEM design have the structural component been optimized with a fixed maximum degree of utilization at 80 %. This brings the required amount of glulam and steel down to a minimum which affects the expenses and environmental impact. Subsequently are the cross sections, recommended by FEM design, controlled by hand with directions following the Norwegian Standard in the engineering math software Mathcad. The massive cross sections of glulam compared to the thin cross sections of steel resulted in a great difference in the total volume.

It was chosen to investigate the connections in the glulam truss to simplify todays assemblage which makes production complicated, time consuming and also expensive. The innovative and simplified solution is based on Swedish patent developed by Martinsons. It substitutes complex connections with the use of inclined self-tapping screws as the only component. The screws great capacity against axial loading gets utilized by aligning them with the diagonal truss members.

The calculations conclude that the new innovative connections do not meet the requirements set in Eurocode 5. Therefore, a new method of design has been used to accieve sufficient capacity to resist different load combinations. The lack of resourses and calculations on the connections composed of steel plates and dowels makes it hard to support the theory of a 40 % cost reduction with the new innovative connections. Nevertheless, we can observe a cost reduction by the removal of steel plates, since dowels and screws are equal in price.

The results regarding environmental impacts conclude that glulam has a considerably lower total emission of greenhouse gasses compared to steel. This, considering the difference in required material, confirms the environmental benefits of glulam production versus steel. However, the costs in the production phase will not gain the competitiveness of glulam. The building industry depends upon developing a better, cost efficient way of manufacturing glulam. Then it will become a good choice, for use in larger constructions, both from an environmental and economic perspective.



# Innhold

<b>Forord</b> .....	<b>i</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Innhold</b> .....	<b>vii</b>
<b>1. Innledning</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Figurliste</b> .....	<b>2</b>
<b>3. Tabelliste</b> .....	<b>4</b>
<b>4. Innovasjon og forskning</b> .....	<b>5</b>
4.1 Knutepunkt utført med skråstilte skruer .....	5
4.2 Studier på området.....	6
4.2.1 Roberto Tomasi .....	6
4.2.2 I. Bejtka og H. J. Bläß .....	6
4.2.3 Andre viktige studier .....	6
<b>5. Materialer og forbindere</b> .....	<b>7</b>
5.1 Tre .....	7
5.1.1 Historikk.....	7
5.1.2 Miljø .....	7
5.1.3 Oppbygging .....	8
5.1.4 Egenskaper .....	9
5.2 Limtre .....	11
5.2.1 Generelt .....	11
5.2.2 Historikk.....	11
5.2.3 Egenskaper .....	11
5.3 Stål.....	13
5.3.1 Historikk.....	13
5.3.2 Fremstilling .....	13
5.3.3 Egenskaper .....	14
5.3.4 Miljø .....	15
5.4 Forbindelser .....	16
5.4.1 Mekaniske stav-type-forbindelser .....	16
<b>6. Teori og bakgrunnsstoff</b> .....	<b>19</b>
6.1 Enhetslastmetoden for nedbøyning .....	19
6.2 Beregning av knutepunkt.....	20
6.2.1 Dimensjonering av stav-type forbindere .....	20
6.2.2 Kapasitet etter Eurokode .....	22
6.2.3 Stivhet etter Eurokode .....	23
6.2.4 Beregning av kapasitet og stivhet etter alternativ metode.....	24
<b>7. Dimensjoneringsgrunnlag</b> .....	<b>28</b>
7.1 Generelt .....	28
7.1.1 Spennvidde .....	29
7.1.2 Utnyttelsesgrad .....	29
7.1.3 Vinkler .....	29
7.1.4 Laster .....	30
7.2 Statisk modell .....	31

7.3	Fagverk i limtre .....	32
7.4	Fagverk i stål .....	33
7.5	Knutepunktsberegninger .....	35
7.5.1	Valg av forbinder .....	36
7.5.2	Effektiv diameter .....	37
7.5.3	Beregning av hullkantfasthet og avstander .....	38
7.5.4	Effektivt antall forbindere, $n_{ef}$ .....	39
7.5.5	Inntrengningsdybder og effektive lengder .....	40
7.5.6	Innskruvingsvinkel .....	40
7.5.7	Kapasiteter .....	42
7.6	FEM-Design .....	44
7.7	PTC Mathcad .....	45
<b>8.</b>	<b>Klimagassberegninger .....</b>	<b>46</b>
8.1	Generelt .....	46
8.2	Norge og miljø .....	47
8.3	Valg av faktorer .....	48
<b>9.</b>	<b>Økonomisk grunnlag .....</b>	<b>49</b>
9.1	Faktorer .....	49
<b>10.</b>	<b>Resultat .....</b>	<b>50</b>
10.1	Vinkel .....	50
10.2	Opptredende krefter .....	50
10.3	Tverrsnitt limtre .....	51
10.4	Tverrsnitt stål .....	52
10.5	Knutepunkt .....	53
10.5.1	Kapasiteter .....	53
10.5.2	Stivheter .....	56
10.6	Klimagassutslipp .....	57
10.7	Kostnader .....	57
<b>11.</b>	<b>Diskusjon .....</b>	<b>58</b>
11.1	Statisk modell .....	58
11.2	Optimalisering av fagverk i limtre .....	58
11.2.1	Valg av vinkel .....	58
11.2.2	Tverrsnitt .....	59
11.3	Optimalisering av fagverk i stål .....	60
11.3.1	Valg av vinkel .....	60
11.3.2	Tverrsnitt .....	61
11.4	Knutepunkt .....	62
11.4	Klimagassutslipp .....	64
11.5	Kostnader .....	64
11.6	Mulige feilkilder .....	65
<b>12.</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>66</b>
<b>13.</b>	<b>Videre studier .....</b>	<b>67</b>
<b>14.</b>	<b>Kilder .....</b>	<b>68</b>
<b>15.</b>	<b>Vedleggsliste .....</b>	<b>71</b>



# **1. Innledning**

Formålet med oppgaven er å se på muligheten for å bedre konkurransedyktigheten til fagverk i limtre mot fagverk i stål spesielt med fokus på faktorene økonomi og miljøpåvirkning. I stedet for å benytte tradisjonelle metoder for sammenføyning av knutepunkt som for eksempel anvendelse av dybler og innslissede stålplater, vil det bli brukt og beregnet på skråstilte skruer. Det er ønskelig at oppgaven skal bidra til å benytte både eksisterende og tilføre ny kunnskap spesielt innenfor trevirke og knutepunktsmetoder.

I dagens samfunn er det et voksende fokus på miljø. Et økende bruk av trevirke som materiale, i stedet for andre konkurrerende materialer som stål og betong, kan bidra til å minke klimagassutslippene. Det finnes også mange andre fordeler med trevirke som for eksempel godt inneklime og god estetikk.

Fagverkene, både i stål og limtre, dimensjoneres etter kapasitetskrav og brukskrav etter Norsk Standard. Beregninger fra både FEM-design og egne håndberegninger blir benyttet og kontrollert. Ved optimaliseringen av de to fagverkene vil volum, høyde, opptredende krefter og nedbøyning bli sammenlignet og vektlagt. De to fagverkene vil deretter bli vurdert etter pris og miljøpåvirkning.

Grunnet liten tid og ingen midler har det blitt satt avgrensninger til oppgaven. Dersom tiden hadde strukket til, hadde det vært mulig å optimalisere fagverket med enda mer med flere variabler. Med midler hadde det vært muligheter for å undersøke knutepunktene selv i et laboratorium siden det fortsatt er i forskningsprosessen.

Oppgaven er en todelt rapport som består av en hoveddel og en vedleggsdel. Hoveddelen består av relevant teori, forskning, dimensjoneringsgrunnlag, og til slutt en drøfting av resultater og en konklusjon. Forslag til videre arbeid er presentert avslutningsvis.

Vedleggsdelen inneholder beregninger ved dimensjoner, relevant dokumentasjon samt andre grunnlagsdokumenter

## 2. Figurliste

Figur 5-1 Forenklet CO <sub>2</sub> kretsløp.....	7
Figur 5-2 Skjematisk oppbygning av fiberstrukturen i bartre med langstrakte celler. ....	8
Figur 5-3 Fibermetningspunkt. ....	9
Figur 5-4 Limtrebjelke .....	11
Figur 5-5 Livssyklus av limtre .....	12
Figur 5-6 Fremstillingsprosess for stål.....	13
Figur 5-7 Arbeidsdiagram, stål.....	14
Figur 5-8 Illustrasjon av korrodert stål.....	15
Figur 5-9 Treskrue for utendørsbruk. Hentet fra nettbutikk.wuerth.no .....	17
Figur 5-10 Selvborende skrue av typen WT-T. ....	17
Figur 6-1 Enhetslast .....	19
Figur 6-2 Illustrasjon av krefter påkjent skråstilt forbinder .....	22
Figur 6-3 Skisse for konfigurasjon av knutepunkt .....	24
Figur 6-4 Geometriske egenskaper for innskruing.....	24
Figur 6-5 Kraft - forskyvelseskurve fra forsøk .....	25
Figur 6-6 Teoretiske- og forsøkskapasiteter.....	25
Figur 6-7 Stivheter fra forsøk og teoretiske beregninger .....	26
Figur 7-1 Statisk modell med beskrivelse av elementer .....	31
Figur 7-2 Knutepunktslaster.....	31
Figur 7-3 Stålprofiler: HE-A, kvadratisk HFRHS og rektangulært HFRHS .....	33
Figur 7-4 Illustrasjon fagverk limtre .....	35
Figur 7-5 Illustrasjon av betraktninger og verdier ved knutepunktsberegninger .....	35
Figur 7-6 Knutepunkt uten eksentrisitet.....	36
Figur 7-7 Geometri for valgt skrue .....	36
Figur 7-8 Illustrasjon innbyrdes- og kant-/endeavstand.....	38
Figur 7-9 Innbyrdes avstander for aksialbelastede skruer.....	39
Figur 7-10 Illustrasjon av relevante dybder og lengder .....	40
Figur 7-11 Illustrasjon vinkel skrue xy-planet .....	40
Figur 7-12 Illustrasjon variable vinkler skrue .....	41
Figur 7-13 Illustrasjon, konstant uttrekkskapasitet .....	42
Figur 7-14 Illustrasjon av gjennomtrekking.....	43
Figur 8-1 Sammenligning av CO <sub>2</sub> -ekv per kg .....	48

Figur 10-1 Aksialdiagram .....	50
Figur 10-2 Skjærdiagram .....	50
Figur 10-3 Momentdiagram .....	50
Figur 10-4 Fagverksmodell i limtre .....	51
Figur 10-5 Fagverksmodell i stål .....	52
Figur 10-6 Sammenheng innskruingsvinkel og kapasitet for én enkelt forbinder .....	53
Figur 10-7 Nummerering av knutepunkt, diagonalstaver og gurter .....	54
Figur 10-8 Skisse av endeknutepunkt 1 og 13 .....	55
Figur 10-9 Sammenhengen mellom stivhet per forbinder og vinkel.....	56
Figur 11-1 Illustrasjon av knutepunktsløsninger a) og b) .....	62
Figur 11-2 Illustrasjon eksentrisitet knutepunkt.....	63

### 3. Tabelliste

Tabell 7-1 Geometriske verdier for skruer (Figur 7-7) .....	37
Tabell 7-2 Minste avstander mellom bolter innbyrdes og fra bolt til kant og ende .....	38
Tabell 8-1 CO <sub>2</sub> -utslipp for de ulike komponentene.....	48
Tabell 9-1 Priser for de ulike komponentene .....	49
Tabell 10-1 Valgte tverrsnitt for limtrefagverk.....	51
Tabell 10-2 Valgte tverrsnitt for stålfagverk.....	52
Tabell 10-3: Sammenheng vinkel og skruelengder .....	53
Tabell 10-4 Kapasiteter for endeknutepunkt.....	54
Tabell 10-5 Kapasiteter for knutepunkt 2 og 11.....	55
Tabell 10-6 Kapasitet til knutepunkt 2 og 11 .....	56
Tabell 10-7 Totalt utslippsmengde fra produksjon .....	57
Tabell 10-8 Kostnader .....	57

## **4. Innovasjon og forskning**

*I dette kapittelet presenteres en ny innovativ løsning for knutepunkt i limtre, samt et utvalg av relevante studier som er benyttet i denne oppgaven.*

### **4.1 Knutepunkt utført med skråstilte skruer**

Forbindelsene utført i fagverk og andre større konstruksjoner av limtre har tradisjonelt blitt utført ved hjelp av innslissede stålplater, i kombinasjon med stavdybler. Teknikken ble videreutviklet av Moelven Limtre AS for å kunne bygge større idrettshaller i limtre til OL i Lillehammer (1, s. 353). Utførelsen av knutepunkt etter denne teknikken er en kostbar prosess. Forarbeid, som utfresing av spor til stålplater og utboring av hull til dybler, kan være tidkrevende og dermed dyrt. På bakgrunn av informasjon fra Trond Egil Nyløkken, konstruksjonssjef i Moelven Limtre AS, kreves det 100 – 120 kg stål per m<sup>3</sup> limtre i et slikt fagverk. Dette medfører en betraktelig mengde stål som kan bli kostbart.

For å øke konkurransedyktigheten til fagverk i limtre er det blitt sett på en ny innovativ metode å løse fagverket på. Fagverket består av standardiserte limtrebjelker, skrudd sammen ved hjelp av knutepunkt utført med skråstilte, selvborende treskruer. Knutepunktsløsningen er basert på et patent utviklet av Martinsonskonsernet(2). Patentet har blitt anvendt på både Voss og Vinstra skole(3). Begrenset tilgjengelig litteratur om dimensjonering av denne typen forbindelser, medførte bruk av innhentet informasjon fra nyere forskning på temaet. Standarden for prosjektering av trekonstruksjoner, Eurokode 5 (4), har tydelige begrensninger for beregning av slike knutepunkt, noe som dokumenteres gjennom denne oppgaven.

Selvborende skruer, beskrevet nærmere i 5.4.1, representerer de siste utviklingene innen skrueteknologi. Etter at de entret markedet har de økt kraftig i popularitet. I nyere tid har det blitt utført flere forsøk og studier hvor man har ønsket å avdekke potensielle bruksområder for skruene, samt beregningsmetoder for kapasitet.

For beregning, modellering og utforming av knutepunktene var det nødvendig å benytte forskning. Dette har resultert i bruk av formler og uttrykk som ikke står i standarder, pensum eller annen norskspråklig litteratur som man for eksempel finner på universitetsbibliotekene. Resultater fra forskningen og beregningsmetoder blir presentert i 0. En kort forklaring av studiene er gitt i kapitlene som følger.



## **4.2 Studier på området**

### **4.2.1 Roberto Tomasi**

#### **“Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws” (5)**

Studiet baserer seg på tre-mot-tre knutepunkt sammenføyd ved hjelp av selvborende skruer, med formål om å utvikle en metode for kalkulering av kapasiteten og stivheten til slike forbindelser. Kalkuleringsmetodene baserte seg i stor grad på arbeidet utført av Bejtka og Blaß (6). Metodene ble verifisert ved praktiske forsøk. Forfatterne ønsket også å belyse hvorfor nåværende metode, etter Eurokode 5, var delvis ugunstig for å beskrive resultat for kapasitet og stivhet funnet gjennom eksperimenter. Knutepunktene ble valgt konstruert med WT-T skruer.

### **4.2.2 I. Bejtka og H. J. Blaß**

#### **«Joints with inclined screws» (6)**

Dette studiet hadde som formål å sammenlikne forsøksresultater for forbindelser med skruer anvendt skrått og vinkelrett i forhold til treets fiberretning. Deretter kom forslaget til dimensjoneringsmetode for enkeltsnittede forbindelser med skråstilte skruer. Ved å utnytte uttrekkskapasiteten til lange skruer kunne man øke kapasiteten og dermed oppnå mer økonomiske forbindelser.

### **4.2.3 Andre viktige studier**

For denne oppgaven har det blitt benyttet en rekke andre viktigste studie som omhandler skråstilte skruer. Hans Joachim Blaß og Ireneusz Bejtka har begge vært pionerer på forskningsområdet, og i en studie fra 2001 påviste de ved forsøk at skråstilte selvborende skruer med vinkel 60 grader på fiberretningen i en enkeltsnittet treforbindelse hadde 1,5 ganger kapasiteten til skruer 90 grader på (7). I 2002 presenterte de oppgaven forklart i 4.2.2, og samme år hadde Kevarinmäki (8) en studie hvor det ble foreslått dimensjoneringsformler for uttrekkskapasitet og stivhet for treforbindelser med selvborende skruer. Opazo og Bustos verifiserte metoden under 4.2.2 (9) i 2008 med egne forsøk, og etter dette har flere studier blitt utført for å undersøke hvilke kapasiteter, stivheter og andre fordeler man kan oppnå ved å benytte skråstilte, selvborende skruer. (5, 10, 11, 12, 13, 14)

## 5. Materialer og forbindere

*I dette kapittelet blir de materialene som er benyttet i oppgaven presentert: historikk, miljøperspektiv og egenskaper.*

### 5.1 Tre

#### 5.1.1 Historikk

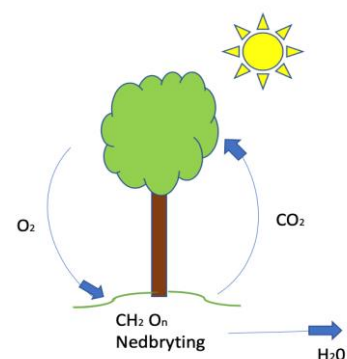
Trær har vært viktig for mennesker i mange tusen år. Materialet har sørget for oksygen og absorbering av karbondioksid som har gjort det mulig for mennesker å overleve på jorden. Av det totale landarealet i verden dekkes ca. 27 % av skog (1999), men på verdensbasis reduseres denne prosentandelen årlig. I Europa og Norge vokser derimot skogarealet for hvert år grunnet større tilvekst enn hogst. På grunn av lokal tilgang, store mengder og enkelproduksjon av råstoffet, har materialet blitt benyttet særdeles mye i Norge, til blant annet våpen under jakt, hus, møbler og brensel for oppvarming. Det typiske norske huset er benytter bindingsverk av tre, og både ytre og indre kledning er gjerne laget av ulike treprodukter. (15)

#### 5.1.2 Miljø

Trevirke er basert på et fornybart råstoff, karbon, som inngår i naturens eget karbonkretsløp med prosesser som fotosyntese, respirasjon, nedbrytning og forbrenning. Et av de viktigste egenskapene til tre er evnen til å ta opp  $\text{CO}_2$  i fotosyntesen. Karbondioksid,  $\text{CO}_2$ , er en av klimagassene som bidrar mest til økt drivhuseffekt og global oppvarming. Det er derfor viktig å ha store skogsareal, hvor trær kan bryte ned noe av karbondioksidet som er i lufta. Etter endt levetid går treet tilbake i naturens store kretsløp.

Produkter av tre krever lite fossil energi i fremstillingsprosessen.

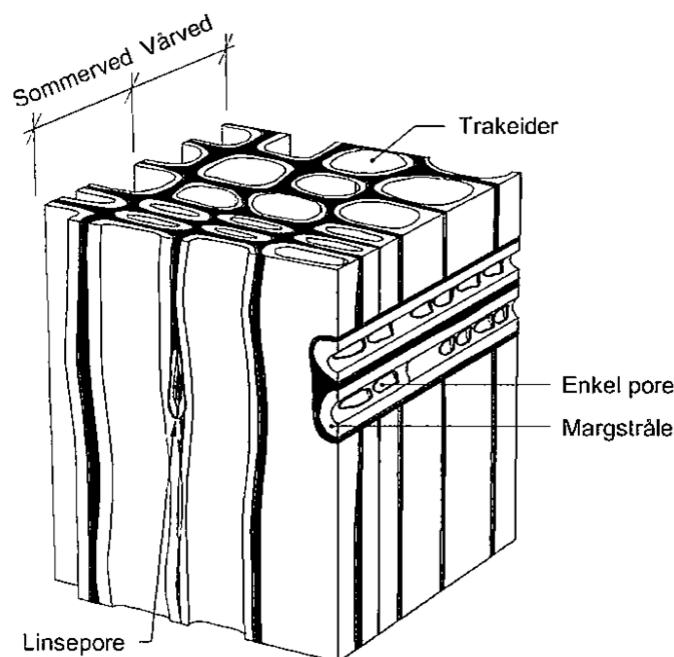
Tre er et av de aller mest miljøvennlige byggematerialene som er tilgjengelig i Norge og dette er en av grunnene til økt interesse for tre i store boligprosjekter og næringsbygg. Tre gir også et godt innemiljø på grunn av dets evne til å regulere luftfuktighet og temperatur, gode holdbarhet, gjenvinning og gjenbruksmuligheter. Godt innemiljø og god holdbarhet er avhenger av riktig overflatebehandling. Kjemikalier som maling, lim og impregnering bidrar til forverring av miljøet, men er vesentlig for å oppnå de gode, tekniske egenskapene (16)



Figur 5-1 Forenklet  $\text{CO}_2$  kretsløp

### 5.1.3 Oppbygging

Trevirke har en meget komplisert oppbygging som gir unike egenskaper. Oppbyggingen for hvert enkelt tre er forskjellig selv om det er av samme treslag. Trevirkets byggesteiner er celler med sterkt varierende form. De fleste cellene er orientert tilnærmet vertikalt i treet's lengderetning, mens en del celler også kan være orientert i horisontal retning. Trakeider er de cellene som løper parallelt i trevirkets lengderetning, og utgjør største del av vedmassen. Margstråler er de cellene som går på tvers av trestammen. Væske blir transportert mellom ventiler eller porer mellom de enkelte cellene. Celleveggene består hovedsakelig av cellulose og ligning, og gir trevirkets dets styrke.



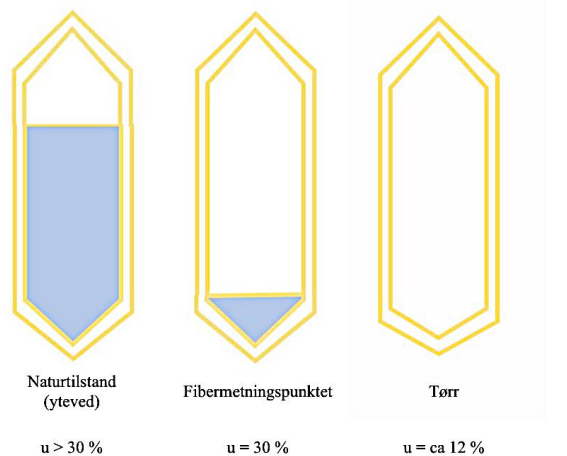
Figur 5-2 Skjematisk oppbygning av fiberstrukturen i bartre med langstrakte celler. (17)

For at treet skal kunne vokse, er det avhengig av næringstilgang, CO<sub>2</sub>, lys, varme og fuktighet. Disse betingelsene varierer i de ulike vekstforholdene, og gir derfor unike egenskaper og oppbygging til hvert tre. (15, 16)

Enkelte treslag har visse bestanddeler i de innleirede harpiksstoffene i kjerneveden som gjør dem svært motstandsdyktige mot angrep fra sopp- og insekter. Kjerneveden i furu er for eksempel spesielt varig.

### 5.1.4 Egenskaper

Tre er et anisotropisk materiale, egenskapene varierer med retningene, hvilket igjen gjør at tre kan være vanskelig å håndtere som et byggemateriale. Fuktighet og fibermetningspunkt er ett eksempel. Fibermetningspunktet er en betegnelse på når celleveggene er fylt med bundet vann, og det ikke er noe fritt vann i cellehulrommene. Fibermetningspunktet ligger rundt 30%, avhengig av treslag. Endringer i fuktighetsinnholdet i området under fibermetningspunktet vil forårsake volumendring i trevirket. Ved oppfuktning vil trevirket swelle, mens det vil krympe ved uttørking. Volumendringene vil variere ut ifra hovedretningene, og er størst i tangentiell retning (8 %). I radiell retning er det ca. halvparten (4 %) og i lengderetning er det vesentlig mindre (0.3 %). Dersom volumendringene blir hindret vil det skape sprekker og skader i materialet som gjør at de gode egenskapene, blant annet styrke, vil svekkes betraktelig. Ved fuktinnhold over 20 % kan mugg- og råtesopp utvikle seg og bryte ned materiale. Dersom det skjer en langvarig fuktpåvirkning, kan trevirke råtne. Det er derfor viktig med trykkimpregnering, bortledning av vann og rask uttørking. Når trevirket tørker under fibermetningspunktet, vil fastheten øke på grunn av at vannet i celleveggene forsvinner. Dette gjør at celleveggen blir «tettere» og dermed sterkere. (15)



Figur 5-3 Fibermetningspunkt. Kilde: (17)

Tre har gode, varmeisolerende egenskaper hvilket gjør det lettere å unngå problemer med alvorlige kuldebroer i trekonstruksjoner enn tilfeller med betong-, mur- eller metallkonstruksjoner.

Per definisjon er tre brennbar, men det brenner forutsigbart og det finnes god kunnskap om hvordan tre brenner. Tre brenner med tilnærmet konstant hastighet og ved brann vil overflaten forkulles og minske inntrenging av oksygen. Det forkullede laget vil bidra til at konstruksjon opprettholder bæring og stabilitet samt at treet vil beholde sine stivhets- og styrkeegenskaper. Ved å vurdere resttverrsnittet til de belastede trekonstruksjonsdelene, kan man beregne tiden treet vil holde på bæreevnen og stabiliteten. På grunn av lav varmeledningsevne, vil det ikke gi en betraktelig temperaturøkning på motsatt side.

I en trekonstruksjon med forbindelser med stål, vil stålet være den begrensende faktoren i et brannforløp. Stålet mister fort sin bæreevne og stabilitet ved høye temperaturer.

I en bærekonstruksjon egner treverk seg godt på grunn av dets styrke og lave vekt. Samtidig vil nettopp trets lave vekt skape problemer med tanke på svingninger for høyhus, grunnet vind. Den lave egenvekten reduserer transport- og montasjekostander og har en positiv innvirkning på både pris og utførelse av fundamenter. Trets styrke og stivhet varierer mye for de ulike retningene. Det er blant annet betraktelig mye bedre styrke *med* fiberretningen enn på tvers av den. Kvist er den faktoren som har størst betydning for trevirkets styrke. Både kvistmengde, kviststørrelse og kvistens plassering har stor betydning for stivhet og styrke.

Tennar er en annen faktor som naturlig dannes for å stabilisere trær som er utsatt for ekstraordinære påkjenninger. Det kan for eksempel være trær i bratt terreng, trær med toppbrudd, trær som er tvunget ut av vind. Tennarveden har mye dårligere styrkeegenskaper, og langt større krymping i lengderetningen. Det kan gi deformasjoner som vindskjevhet, kantkrok og flatbøy. Andre faktorer som kan minke styrken i en trekonstruksjon er høyt fuktinnhold, sprekker, langvarige belastninger, toppbrudd og sterk fiberhelning i forhold til lengderetning. (17)

## 5.2 Limtre

### 5.2.1 Generelt

Limtre er et byggemateriale som er sammensatt av mange trelameller med tilnærmet parallell fiberretning og ved hjelp av lim brakt til fullt, statisk samvirke. I Norge er standard lamelltykkelse 45 mm, men det benyttes også mindre tykkelser.

### 5.2.2 Historikk

Historisk sett ble limtre brukt allerede på slutten av 1800-tallet i Russland og Tyskland på grunn av mangel på stål under siste verdenskrig. Landene benyttet limtre til diverse krigsmateriell blant annet torpedobåter med laminerte spant, kledd med kryssfinér. For å unngå å utløse magnetiske miner, ble limtre også benyttet i minesveipere. I Norge kom limtreindustri først i gang rundt ca. 1960, og Norsk Limtrekontroll ble formelt stiftet i 1962. I dag er det rundt 10 limtrefabrikker i de nordiske landene. Det meste av limtreet som brukes i de nordiske landene går til industribygg, skoler, barnehager og bolighus. (15, 16)

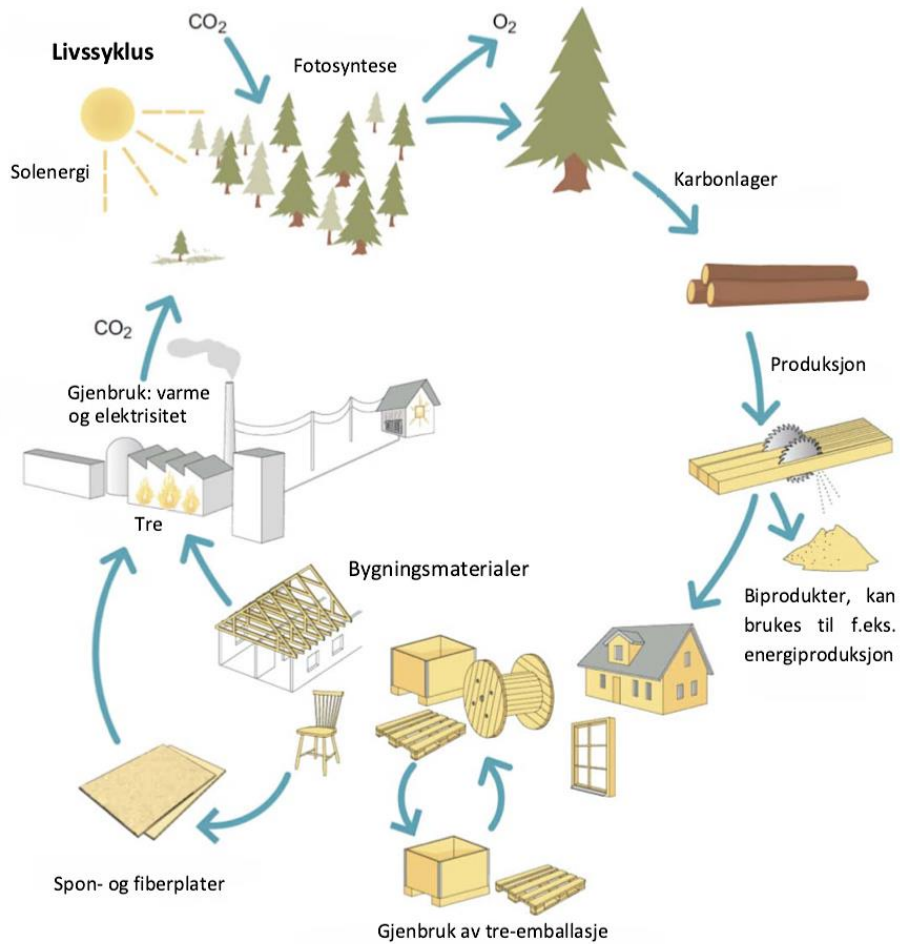
### 5.2.3 Egenskaper

Sammenlignet med konstruksjonsvirke har limtrekomponenter høyere styrke og mindre spredning i styrkeegenskaper. Dette er på grunn av lamellenes varierende styrke, og sannsynligheten for grove feil i flere lameller skal havne i samme snitt er liten. Limtre vil også være mindre tilbøyelig for endringer i fuktinnhold som det vil i vanlig konstruksjonsvirke. Dette gjør limtre mer dimensjonsstabilt.



*Figur 5-4 Limtrebjelke (18)*

Limtre slipper ut lite klimagasser ved produksjon, og biproduktene som dannes ved produksjon av limtre kan benyttes til å lage pellets som kan for eksempel benyttes til oppvarming av hus.



Figur 5-5 Livssyklus av limtre (18)

## 5.3 Stål

### 5.3.1 Historikk

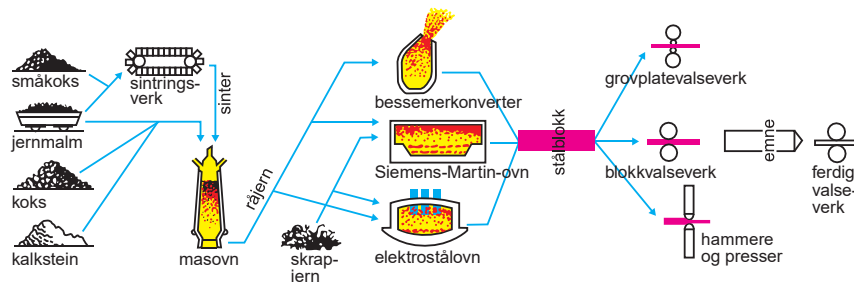
Metaller i generell forstand har vært en sentral konstruksjonskomponent for forsterkning av bygninger i flere tusen år. Med den industrielle revolusjonen på 1700-tallet dukket de første store støpejernsbroene opp. Siden har stål av ulike legeringer utviklet seg til å bli et av de viktigste byggematerialene i verden. I dag benyttes konstruksjonsstål både i hovedelementer som bjelker, søyler og fagverk, så vel som i armeringsjern til forsterkning av betongkonstruksjoner. (15)

### 5.3.2 Fremstilling

Hovedbestanddelen i stål og legeringer av stål er grunnstoffet jern (Fe). Vanligvis vil andelen jern i stål ligge på rundt 98-99%. De resterende komponentene som brukes kan være karbon, mangan og silisium i tillegg til en delbruk av krom og nikkel. I industrien ønsker man å kvitte seg med stoffene svovel, fosfor og karbon av miljømessige årsaker. Det er karbonandelen i de ulike legeringene som har størst påvirkning på stålets egenskaper.

Stål og jern fremstilles ved omsmelting av råmaterialet jernmalm, som finnes i naturen. Det kreves høye temperaturer, noe som en oppnår ved hjelp av en masovn, i tillegg til tilsetning av kalk og koks. Koksen kommer av kull og reduserer jernmalmen i prosessen hvor karbonet i koksen reagerer med oksygenet i varmluften og danner CO<sub>2</sub>. Slik produksjon av nytt stålmateriale gjør direkte stålforming mulig, da kan det støpes ut i ønskede former og størrelser. Dersom det ønskes sammensatte profiler, kan en benytte seg av valsing.

En alternativ fremstilling av stål og jern, er resirkulering av stål. Reststålet omsmeltes sammen med fast råjern, som igjen danner stål med lavt karboninnhold. (15) (19)



Figur 5-6 Fremstillingsprosess for stål. Kilde (19)



### 5.3.3 Egenskaper

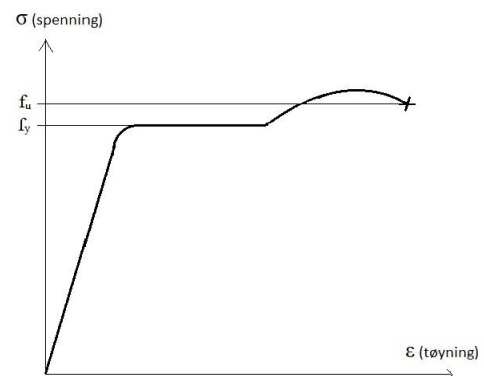
Metaller er grunnstoffer som kan settes sammen til ulike legeringer, en kombinasjon av to eller flere metalliske- eller ikke metalliske stoffer. Ved vanlige temperaturer har metallene høy fasthet, med unntak av kvikksølv.

Det alminnelige konstruksjonsstålet er ulegert stål også kalt karbonstål med et karboninnhold på rundt 0,2 %. I legerte ståltyper kan det benyttes mangan, krom eller nikkel for å øke fastheten eller kobber for bedre korrosjonsmotstand. Det som avgjør om et stål er legert eller ulegert er legeringsmengden, noe som varierer mellom hvert legeringselement. Ved tillaging av forskjellige legeringer kan en tilpasse stålets mekaniske egenskaper spesifikt til bruksområdet.

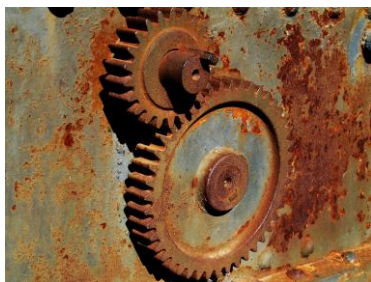
Enkelte av de mekaniske egenskapene som stål innehar er fasthet, elastisitet, duktilitet og seighet. Stålets duktilitet beskriver hvilken evne stålet har til å deformere seg uten å gå i brudd. Varig deformering er også kalt plastisk deformering. Mengden energi materialet klarer å oppta før det går til brudd beskrives som seighet og omfatter både duktilitet og fasthet. Elastisiteten varierer lite mellom de ulike fasthetsklassene, derfor er det utarbeidet en felles elastisitetsmodul, E-modul, tilsvarende  $210000 \text{ N/mm}^2$ . Med økende fasthet vil evnen til å motstå slitasje også øke, dette betraktes som hardheten til stålet.

Gode utmattingsegenskaper hos stålet er viktig dersom konstruksjonselementet skal tåle vekslende lastsituasjoner. Sveisbarheten avhenger vanligvis av karboninnholdet som ikke bør være høyere enn 0.5 % dersom vanlige sveisemetoder skal tas i bruk.

En strekkprøve er med å avgjøre stålqualiteten. Som et resultat av en slik prøve vil et arbeidsdiagram bli utarbeidet. For alminnelige konstruksjonsstål vil den første fasten være lineær elastisk frem til det når flytespenningen,  $f_y$ . Deretter følger en fase med plastisk deformering som ved ytterligere påføring av spenninger ender opp i stålets maksimumsverdi kalt bruddspenningen eller strekkfasthet,  $f_u$ .



Figur 5-7 Arbeidsdiagram, stål



*Figur 5-8 Illustrasjon av korrodert stål*

Korrosjon er en elektrokjemisk prosess som ved tilgang til vann og oksygen sakte bryter ned stålet. I vanlige omgivelser med relativ fuktighet på rundt 60%, forekommer det minimal korrosjonsfare. Om konstruksjonens omgivelser derimot har relativ fuktig på mer enn 70 % eller er i områder nært sjøvann, vil faren for at rust oppstår være betraktelig høyere. I slike situasjoner er det nødvendig å beskytte stålets overflate. Dette kan gjennomføres med ulike metoder, mest vanlig er bruk av maling. Malingen danner et tynt lag på overflaten og blir en barriere som hindrer kontakt med vann og oksygen.

Stålkomponentenes tynne tverrsnitt og høye varmeledningsevne gjør stålkonstruksjoner svært utsatt om brann oppstår. Ved 300 °C begynner stålet å miste sin stivhet og fasthet. Dersom konstruksjonen oppnår en indre temperatur på 500 °C, antas det at stålet blir redusert ned til halvparten av dets opprinnelige styrke. Dette medfører at bæreevnen kan avta dramatisk om ikke tilstrekkelig brannbeskyttelse er benyttet. Hvilken brannbeskyttelse som benyttes avhenger av de spesifikke kravene til brannmotstandsevne i konstruksjonen. (15, 20)

#### **5.3.4 Miljø**

Stål er ansett som en miljøversting i byggenæringen. Byggenæringen står samlet for over 30% av klimagassutslippene på verdensbasis. Dette kommer av at stål har et stort energibehov i produksjonsfasen. De største utslippene av klimagasser forekommer ved fremstillingen av råjernet og en stor andel koks som kommer fra kull. Jernmalmen i prosessen reduseres ved at karbonet i koksen reagerer med oksygenet i luften og som en konsekvens dannes det CO<sub>2</sub>.

Derimot har stål lang levetid, samt høy styrke og resirkuleringsmuligheter. Dersom stål blir vedlikeholdt riktig og beskyttet tilstrekkelig mot korrosjon i bruksfasen, kan det resirkuleres i slutten av sin levetid. Reststålet smeltes da om sammen med fast råjern og danner nytt stål med lavt karboninnhold. På den måte vil ny produksjon av stål og nye klimagassutslipp unngås. Forholdet mellom vekt og styrke til stål reduserer materialbehovet i konstruksjoner med høyt kapasitetsbehov.

Disse egenskapene gjør at stål ender opp med et bedre energiregnskap sammenlagt enn det en får inntrykk av fra produksjonsfasen. (15)

## **5.4 Forbindelser**

### **5.4.1 Mekaniske stav-type-forbindelser**

Forbindelser i trekonstruksjoner er vanligvis basert på kraftoverføring via tverrbelastede forbindere i stål, også kalt stav-type-forbindere. Stav er et fellesbegrep for forbindere som dybler, bolter, skruer og spikere. Disse stavene har som funksjon å overføre kraft mellom to eller flere trestykker langs et skjærplan eller snitt. Overføringen av kraft skjer via et normaltrykk mellom stav og trevirke, og fordelingen av dette trykket avhenger både av staven og treets tykkelse, samt materialegenskapene til de respektive elementene i forbindelsen. (1, s. 247)

En stav kan gå gjennom et eller flere trestykker som overfører kraft. Avhengig av hvor mange slike elementer som er involvert, og hvor mange snitt som oppstår dem imellom, kan vi snakke om enkeltsnittet, dobbeltsnittet eller flersnittede forbindelse.

### **Tømmerforbindelser**

Tømmerforbindelse er en fellesbetegnelse for forskjellige typer av forbindelser som er utviklet for å øke kapasiteten til de mekaniske stav-typene. Man kan dele inn disse tømmerforbindelsene i to hovedgrupper, spordybler og innpressingsdybler, men innenfor de to hovedgruppene finnes det også forskjellige varianter. For alle tømmerforbindere gir «slakke» forbindelser både dårligere kapasitet enn forutsatt og langt større deformasjoner enn ønskelig. Det er derfor viktig at boltene etterstrammes. (1, s 249)

### **Spikerforbindelser**

Denne type forbindelse består gjerne av en spikerplate og benyttes mest til konstruksjoner av vanlig konstruksjonsvirke, som takstoler og andre typer mindre fagverk. Platen overfører primært aksialkrefter eller både aksialkrefter, skjærkrefter og moment. Kapasiteten og deformasjonen av forbindelsen er ganske uavhengige av vinkel mellom kraft og fiberretning. Egenskapene vil derimot variere med platens hovedretning, tredelens fiberretning og kraftretning. Brudd i en spikerplate vil forekomme enten av et forankringsbrudd, ved at spikerfestet løsner, eller et platebrudd altså et strekk-, trykk- eller skjærbrudd i selve platen. (1, s. 251)

## Limte forbindelser

Forbindelsene kobles sammen ved ulike teknikker for påføring av lim, sammentrykking og herding i en fabrikk. Denne metoden benyttes ved produksjonen av limtre, men kan også benyttes for større komponenter dersom det skjøtes med såkalt store «fingerskjøter». Dette medfører at rammehjørner oppnår momentstivhet som har både god styrke og stivhet. Limet blir gjerne benyttet i en kombinasjon av innlimte bolter, armeringsjern, skruer eller spikre. Utfordringene med limte forbindelser er at de setter store krav til utførelse og vanskelig å kontrollere siden de er skjult. En limt forbindelse kan derfor oppnå sprøbrudd. (1, s. 255)

## Skruer

Det finnes utallige typer treskruer på markedet, men for denne oppgavens formål kan man skille ut to hovedkategorier for tre mot tre forbindelser. Tradisjonelle treskruer er vanligvis utformet med et glatt skaft med en stamme som bestemmer diameteren. Den ytre delen av gjengene har generelt like stor diameter som det glatte skaftet. Typisk for denne skruen er at den gjengede kun er på omkring 60 % av den totale lengden. Disse to delene av skruen har ofte forskjellige flytemomenter. (7)



Figur 5-9 Treskrue for utendørsbruk. Hentet fra [nettbutikk.wuerth.no](http://nettbutikk.wuerth.no)

## Selvborende skruer

Som et alternativ til tradisjonelle treskruer har det blitt utviklet selvborende skruer. Disse skruene har høyere stivhet og styrke sammenliknet med tradisjonelle skruer da de er laget av sterkere stål, hardere gjenger og forholdet mellom gjenge- og skaftdiameter er større. De høye kapasitetene, i tillegg til høy motstand mot uttrekking og gjennomtrekking, gjør at selvborende skruer er godt egnet som forbindere i konstruksjoner av tre. (21)



Figur 5-10 Selvborende skrue av typen WT-T. Kilde: (22)

I de senere årene har bruken av selvborende skruer økt betraktelig, og under byggingen av verdens høyeste trehus, Mjøstårnet i Brumunddal, ble det brukt over 85 000 selvborende skruer av typen WT-T fra leverandør SFS. (22) Populariteten til disse skruene er mye grunnet utviklingen av borspissen. Den gjør at skruen raskt oppnår god heft til treverket, og muliggjør rask og enkel innskruvning med lite moment. Dette gjør at skruen karakteriseres som selvborende. Sammenlignet med tradisjonelle treskruer er hullene for selvborende skruer generelt ikke forboret. Med store dimensjoner, og i tilfeller hvor nøyaktigheten på innskruvningsretningen er av stor viktighet, vil det nok likevel lønne seg å benytte seg av forboring. Skruene kan produseres med lengder og diametere på henholdsvis 1000 mm og 14 mm, og det finnes håndholdt utstyr som uten problemer kan dra inn slike skruer med lengder på 600 mm og diameter på 12 mm i mjukved, uten forboring. (1, s. 257)

Et problematisk aspekt ved dimensjonering av disse skruene er at nåværende versjon av EK5 ikke har regler for beregning av kapasitet til skruer som har vinkel mindre enn  $30^\circ$  med treets fiberretning. Som det fremkommer i boken *Dimensjonering av Trekonstruksjoner*, som siteres ofte i denne oppgaven, er det «i det hele tatt litt sparsomt med standardiserte beregningsregler for disse forbinderne», men «det foregår mye forskning og testing som nok vil påvirke kommende versjoner av standarden». (1)

Skruene har et bredt bruksområde, men blir hovedsakelig benyttet i trekonstruksjoner til blant annet festing og forsterkning. Skruene kan også anvendes slik at de forsterker treet vinkelrett på fiberretningen hvor treet har lav styrke.

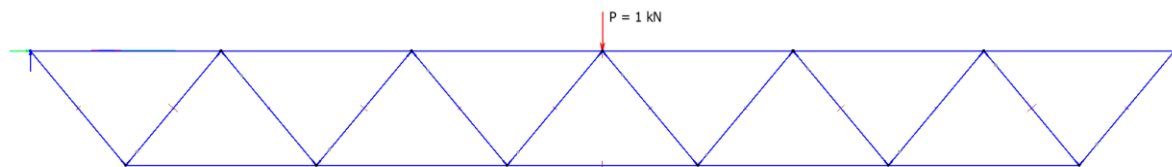
## 6. Teori og bakgrunnsstoff

I dette kapittelet vil det bli redegjort for sentral teori som er benyttet til beregning av fagverkene. For knutepunktene vil det bli presentert forskjellen på beregninger med Eurokode og alternativ metode.

### 6.1 Enhetslastmetoden for nedbøyning

Enhetslastmetoden benyttes til enkel beregning av forskyvninger for en konstruksjon. Metoden baserer seg på et arbeidsteorem for deformerbare konstruksjoner, som er en utvidelse av arbeidsteoremet for stive legemer. Med arbeidsteoremet menes at det totale arbeidet, som kreftene på et system i likevekt utfører under en virtuell forskyvning, er null. Metoden kan benyttes til å beregne forskyvninger på både bjelker og fagverk. (23)

Etter omgjøringer fra jevnt fordelt last til punktlaster blir fagverket belastet med 7 knutepunktlaster. På grunn av disse lastene vil det oppstå en deformasjon av fagverket. Ved å plassere en virtuell vertikal enhetslast i midten av overgurten kan man beregne på den maksimale deformasjonen som oppstår i midten av fagverket. Lasten blir plassert i samme retning som man antar at nedbøyningen virker, i dette tilfelle nedover. Figuren under viser plasseringen til enhetslasten.



Figur 6-1 Enhetslast

Ved hjelp av de opptredende kreftene og enhetslast kan nedbøyningen beregnes. I beregningene kan en enkel formel benyttes:

$$1 \cdot \delta = \sum \frac{\tilde{N}_i N_i L_i}{EA_i}$$

Hvor  $\tilde{N}_i$  er de virtuelle aksialkreftene som oppstår i enkeltelementene ved påføring av enhetslast i fagverket.  $L_i$  er stavlengde,  $A_i$  er tverrsnittsareal og  $N_i$  er opptredende aksialkrefter til stav nr. (i).  $N_i$  oppstår grunnet de påførte lastene.  $E$  er elastitetsmodulen til stavmaterialet.

## 6.2 Beregning av knutepunkt

### 6.2.1 Dimensjonering av stav-type forbindere

Kapasiteten til knutepunkt med stavforbindere i en enkeltsnittet forbindelse bestemmes ved hjelp av likningene etter Eurokode 5. Standarden benytter seg av de teoretiske kapasitetene basert på Johansens Flyteteori (24). Formelverket er meget omfattende, og utforming, modellering og dimensjonering av knutepunkter i trekonstruksjoner er blant de største utfordringene ved prosjektering. (1, s. 309)

Eurokode 5 fokuserer på forbindernes egenskaper mot tverrbelastning, og det legges liten vekt på forbindernes evne til å ta opp krefter i lengderetning. Det blir nevnt, men ikke utdypet i særlig stor grad.

Karakteristisk kapasitet for forbindere i knutepunktene bestemmes per forbinder for en enkel rad i ett skjærplan. Parameterne som bidrar til denne kapasiteten er forbinderens flytespenning og uttrekksstyrke, samt trevirkets hullkantfasthet. I tillegg har stavens størrelse, lengde og diameter, og tykkelsen på tredelene i forbindelsen innvirkning på resultatet.

For å finne kapasiteten beregnes den minste verdien som oppstår etter beregninger av bruddformer i EK 5, kap. 8.6. Figur 8.2 i EK 5 beskriver bruddformene,  $a-f$ , som kan oppstå i tre- og plateforbindelser.

- Bruddform  $a$  og  $b$  antar at trevirkets hullkantfasthet nås i et av trestykkene, treverket som omslutter staven knuses. Staven får ingen deformasjon da største momentpåkjenning er lavere enn flytemomentet.
- Bruddform  $c$  gir heller ikke noe deformering av staven, da flytemomentet ikke nås. Trevirket får her knusing langs hele staven, i motsetning til i bare én av tredelene.
- Bruddform  $d$  og  $e$  oppstår ved at det utvikles ett flyteledd i staven hvor den har størst moment. Her vil også treverket oppnå flyt langs den ene sidene av stavens flyteledd.
- I siste bruddform,  $f$ , antas det to flyteledd i de punktene hvor staven får størst moment. Treverket vil få flyt langs hele den skråstilte delen av staven som ligger mellom flyteleddene.

For å kunne bestemme kapasiteten i en treforbindelse med skråstilte skruer må man utvide teorien bak bruddformene. Skruen (staven) er ikke plassert vinkelrett på skjærflaten mellom de respektive delene, men er skrudd inn i en vinkel mellom skruens lengdeakse og fiberretningen. Dette resulterer i belastninger både aksialt og på tvers. Det innebærer at tilleggsparemetere som uttrekkskapasitet, vinkel mellom skruens akse-kraftretning og friksjon får økt betydning. Alle paremetere har betydelig innvirkning på kapasiteten til forbindelsen.

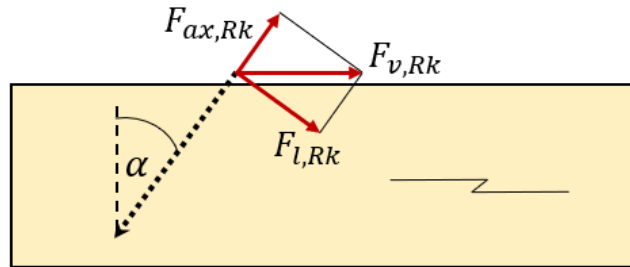
Flere eksperimentelle og numeriske studier har belyst hvordan en økning i innskruingsvinkel mellom skruens lengdeakse og fiberretning kan gi en betydelig økning av motstand og stivhet til en forbindelse (5, 6). Den europeiske standarden for prosjektering av trekonstruksjoner (EK 5) foreslår bruken av en kvadratisk kombinasjonsformel, 8.28, for å bestemme kapasiteten til skruer belastet både aksialt og på tvers.

Denne kalkuleringsformelen, basert på forsøk etter nevnte studier, har vist seg å undervurdere styrken til en slik forbindelse. Den anses dermed som ikke tilstrekkelig for å påvise ytelsen til ovennevnte forbindelser. Dette vil bli belyst ytterligere senere i oppgaven. Når det gjelder stivhet til knutepunkt med aksial- og tverrbelastede forbindere, sier standarden ikke noe om fremgangsmåte for beregning. Man har da kun glidemodul for tverrbelastede forbindere fra tabell 7.1 å gå etter.



### 6.2.2 Kapasitet etter Eurokode

Ved bestemmelse av kapasiteten til skruer påkjent både av tverr- og aksialbelastning må formel 8.28 godkjennes. (4) Karakteristiske verdier for uttrekkskapasitet, også kalt penetrerings- og aksialkapasitet, bestemmes under 8.7.2 i EK 5. Tverrkapasiteten bestemmes etter likningene for bruddformene, 8.6, som er gjennomgått ovenfor.



Figur 6-2 Illustrasjon av krefter påkjent skråstilt forbinde

Siden skruen står skråstilt må man innføre følgende endringer for å kunne beregne disse kapasitetene i samsvar med hverandre etter den kvadratiske kombinasjonsformelen:

- Endrer  $F_{v,Rk}$  til  $F_{l,Rk}$ , da kapasiteten til en skråstilt forbindelse, Figur 6-2, langs skjærplanet ikke er den samme som tverrkapasiteten til forbinde.
- Tykkelsen på tredelene eller forankringslengdene  $t_1$  og  $t_2$  i treelementene måles parallelt med skruens lengdeakse.
- Leddet på høyre side i formelen 8.6, «taueffekten», tar i betraktning at friksjon mellom tredelene settes til 100% av Johansen-delen.
- Karakteristisk kapasitet parallelt med skjærplanet kan omskrives til karakteristiske verdier for aksial- og tverrlast.

$$F_{ax.Ek} = F_{v,Rk} \cdot \sin \alpha$$

$$F_{l.Ek} = F_{v,Rk} \cdot \cos \alpha$$

Setter man dette inn i kombinasjonsformelen 8.28, får man følgende omskrivning:

$$F_{v,Rk} = \frac{1}{\left[ \left( \frac{\sin \alpha}{F_{ax,Rk}} \right)^2 + \left( \frac{\cos \alpha}{F_{l,Rk}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

Formelen kan benyttes for å finne kapasitet parallelt med skjærplanet. Men som dokumentert i påfølgende avsnitt har metoden sine mangler.

### 6.2.3 Stivhet etter Eurokode

Forbindelsen som blir vurdert i denne oppgaven, med skruer belastet både aksialt og på tvers, er ikke spesifikt nevnt i Eurokode 5. I tabell 7.1 – *Verdier av  $K_{ser}$  for forbindere i tre mot tre* finner man følgende formel:

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \cdot d / 23$$

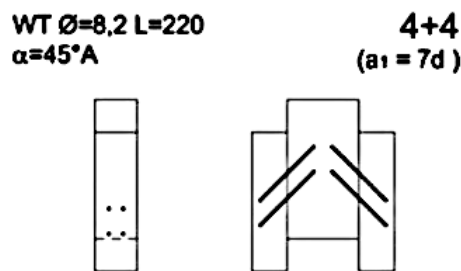
Det antas derfor at stivhetsmodulen for en forbindelse med skråstilte skruer, etter EK 5, vil være lik stivhetsmodulen for  $K_{ser}$  for forbindelser med skruer plassert vinkelrett på skjærplanet.

#### 6.2.4 Beregning av kapasitet og stivhet etter alternativ metode

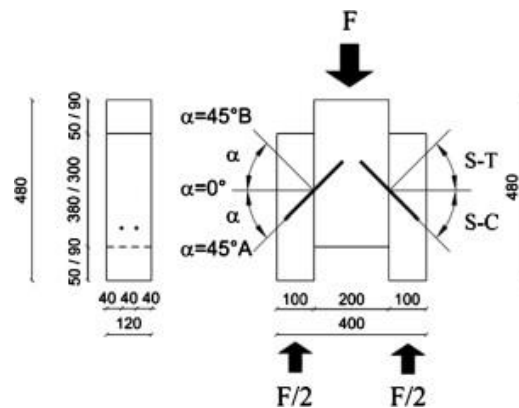
En alternativ metode for beregning av kapasitet i en forbindelse med skråstilte skruer ble først utviklet av Bejtka og Blaß (6). Den ble gjengitt av Roberto Tomasi (5), hvor det i samme oppgave ble presentert en metode for stivhet. For å validere beregningsmetodene ble resultatene for disse sammenliknet med forsøksresultater og resultater for beregninger basert på Eurokode 5. I utregningene for denne oppgaven er det benyttet metoder fra ovennevnte forskningsoppgaver, det fremlegges derfor en liten innføring i kildematerialet som er benyttet.

Hele likningsverket og utledningen av formlene vil ikke bli presentert i denne oppgaven da det er meget omfattende og kan finnes i de respektive studiene som er benyttet. De mest relevante delene fra oppgaven av Tomasi (5) vil bli delt, da den oppsummerer teorien godt og har gode informative figurer.

Forsøkene og beregningene ble gjennomført på flere ulike knutepunktskonfigurasjoner. For denne oppgavens formål ser man kun på resultater fra én av konfigurasjonene (Figur 6-3). Den bestod av 4 skruer gjennom hvert snitt (skjærplan), «4+4», med kantavstand  $7d$  og innskruingsvinkelen  $\alpha$  hvor de testet 4 ulike skråstillinger ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  og  $45^\circ$ ). Bare B-verdiene til vinklene er relevant da disse resulterer i at skruene utsettes for skjær-strekk (Figur 6-4).



Figur 6-3 Skisse for konfigurasjon av knutepunkt



Figur 6-4 Geometriske egenskaper for innskruing

I studiene ble det gjennomført 64 forsøk hvor det ble lagt et empirisk grunnlag for hvilke kapasiteter de ulike konfigurasjonene hadde.

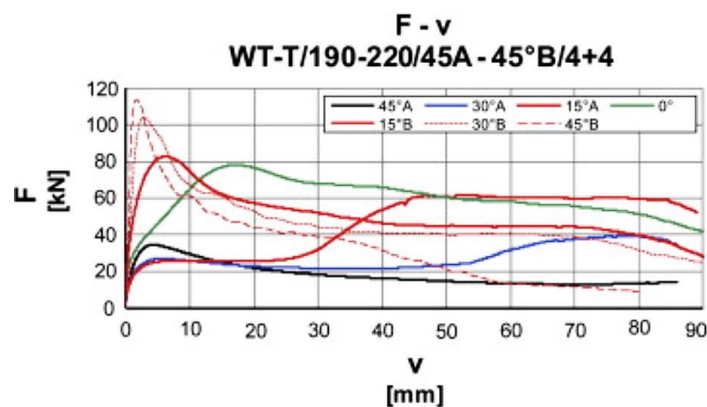
## Materialer

Skruetypeen som ble benyttet i forsøk og utregninger er selvborende dobbeltgjengede skruer av typen WT-T i to forskjellige lengder: 190 mm for 0° og 15° og 220 mm for 30° og 45°.

Konstruksjonsvirket var limtre av kvaliteten GL24h.

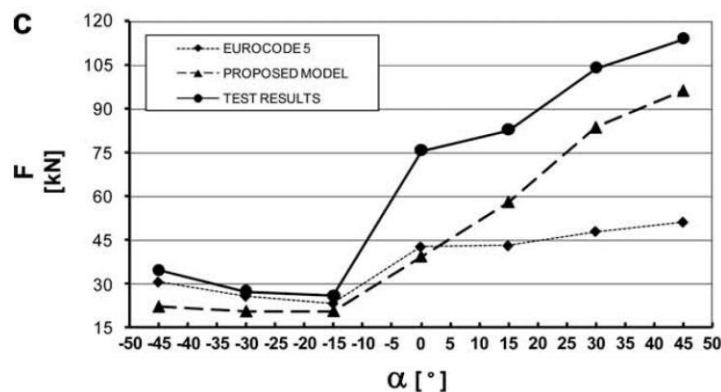
## Funn

Grafen i Figur 6-5 viser gjennomsnittlig påkjent kraft i forhold til forskyvning. Ser bort fra verdiene til A-vinklene. Det tydeliggjøres i forsøkene at en økning i innskruingsvinkel har positive innvirkninger på knutepunktets kapasitet før flytelast er oppnådd. Flytelast er lastverdien hvor man går inn i det plastiske feltet med varig deformasjon.



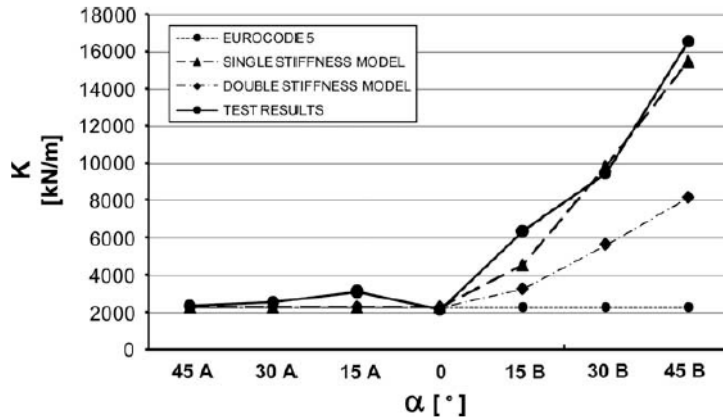
Figur 6-5 Kraft - forskyvelseskurve fra forsøk

For de forskjellige skråstillingene til skruene, viser Figur 6-6 den gjennomsnittlige forsøkskapasiteten samt teoretiske kapasiteter fra standarden og alternativ metode. Aktuelle vinkler er de positive til høyre på grafen. Dette gir et tydelig bilde av hvor konservativ Eurokode er i sine vurderinger av skråstilte skruer.



Figur 6-6 Teoretiske- og forsøkskapasiteter

Figur 6-7 viser teoretiske stivheter sammenliknet med forsøksresultater. Verdier i graf er karakteristiske verdier for en enkelt forbinder i et skjærplan. Beregningsmetoden benyttet av Eurokode.



Figur 6-7 Stivheter fra forsøk og teoretiske beregninger

Basert på forsøksresultatene og de teoretiske verdiene kan man konkludere med at kapasitet og stivhet for forbindelser med skråstilte skruer øker med økning av innskruingvinkelen,  $\alpha$ . Det er lite som indikerer at styrken reduseres på bakgrunn av flere skruer i fiberretningen. Noe som betyr at uttrykket 8.34 under 8.5.1.1 4) i EK 5 er upassende for å beskrive data gitt fra forsøkene. Kalkuleringsmetodene i Eurokode 5 diskrediterer styrken i forbindelser hvor  $\alpha$  øker. Dette kommer av at sikkerhetsfaktoren, marginen, for vinklene  $30^\circ B$  og  $45^\circ B$  ligger på henholdsvis 1.82 og 2.23. Kalkuleringsmetodene foreslått i oppgaven har ikke like store sikkerhetsfaktorer, og beregner dermed mer reelle kapasiteter.

Forskningsoppgaven kommer også med en antakelse om at EK 5 gir et godt estimat for forsøksresultatene kun når skruene er plassert vinkelrett på fiberretningen og kun tar tverrlast. Når skruene er belastet både aksialt og på tvers er metodene helt upassende da de grovt underestimerer kapasiteten og stivheten. Foreslått kalkuleringsmetode gir en god tilnærming til forsøksverdiene og kapasiteten.

På bakgrunn av dette har det blitt valgt å benytte seg av alternativ teori og likningsverk for å avgjøre kapasitet og glidemodul. Dette gjøres for å få bedre grunnlag til å kunne avgjøre hvilke belastninger knutepunkt i fagverk med skråstilte skruer tåler.

## Kapasitet

Formelen for kapasitet er en utvidelse av Johansens flyteteori (24). Skruens aksialkapasitet, vinkelen mellom skruens lengdeakse og kraftretning og friksjon har i større grad blitt tatt med i denne alternative metoden.

## Stivhet

Under vises formelen for stivhet etter alternativ publisert av Tomasi. Den omfattende utledningen er ikke med, men formelen for skruer belastet med skjær-strekk er slik: (5)

$$K_{ser} = K_{90} \cdot \cos(\alpha) \cdot (\cos(\alpha) - \mu \cdot \sin(\alpha)) + K_0 \cdot \sin(\alpha) \cdot (\sin(\alpha) + \mu \cdot \cos(\alpha))$$

Ved beregning av  $K_{90}$ , forbinderens stivhet for tverrlast, benyttes likning i EK 5 tabell 7.1:

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \cdot d / 23$$

For  $K_0$ , forbinderens stivhet for uttrekkslast, er tilfellet litt mer komplekst.

De to ulike teoretiske mulighetene for hvordan en forbindelse kan oppføre seg under belastning fører til følgende formler:

Formel 1: Samtidig uttrekning av begge gjengede deler av skruen fra begge treelementene.

Denne situasjonen kan sammenliknes med å ha to fjærer plassert i serier, hver med stivhet  $K_{ser,ax,i}$ . Hvor  $K_{ser,ax,i}$  er den aksielle glidemodulen for den gjengede delen forankret med en lengde  $l_i$  i treelement  $i$ .

$$K_0 = \frac{1}{1/K_{ser,ax,1} + 1/K_{ser,ax,2}}$$

Formel 2: Uttrekning av bare én av de to gjengede delene i treelementene.

$$K_0 = K_{ser,ax,i}$$

Ingen nåværende standarder har retningslinjer for hvordan en kalkulerer verdier for den aksielle glidemodulen, men skruens ETA (25) har en formel som kan benyttes. Under A.2.3.1 *Axial slip modulus*, oppgis det følgende formel:

$$K_{ser} = 25 \cdot l_{ef} \cdot d$$

## 7. Dimensjoneringsgrunnlag

*I dette kapitlet vil det bli redegjort for krav og forutsetninger som må tas i betraktning ved dimensjonering av fagverkene og knutepunktene.*

### 7.1 Generelt

Ettersom begge fagverkene skal kunne være konkurransedyktige er det satt fokus på optimalisering av fagverket i henholdsvis stål og limtre. Gjennomførelse av en optimaliseringsprosess krever at en rekke variabler må bestemmes og undersøkes for å oppnå mest mulig nøyaktig resultat. Anvendelsen av fagverkene er tiltenkt å være i takkonstruksjoner på idrettshaller og konstruksjoner innendørs med stor takhøyde og som krever større spenn. Dette gjør det mulig å utforme de to fagverksvariantene med flere geometriske likheter uten å redusere nøyaktigheten til resultatet. Det er miljøklasse, lastsituasjon og spennvidde som blant annet er satt til å være de faste verdiene. Fagverkene er utformet på samme måte slik at det oppnås et godt sammenligningsgrunnlag.

For å unngå for store avvik som kan redusere sammenligningsgrunnlaget ble det tidlig i arbeidet bestemt at fagverkene skal ha 12 diagonalstaver med lik spredning. Dette medfører en horisontal senteravstand mellom knutepunktene på 5 meter både for over- og undergurtene. I tillegg vil det gi samme vinkler mellom diagonalstavene og gurtene langs hele fagverket. De gjenstående variable verdiene som må fastsettes ved optimalisering er vinklene mellom gurtene, samt tverrsnittene til de ulike konstruksjonskomponentene.

Resultat av kontroller, gjennomført etter stålstandard NS-EN 1993 og trestandard NS-EN 1995, er markert med svak gulfarge i regnearkene.

### **7.1.1 Spennvidde**

Spennvidden for et fagverk i en idrettshall må være rundt 30 meter da for eksempel en håndballbane er 20 m x 40 m. Man må også tenke på at det skal være plass til trenerapparat, innbytterbenk, tilskuere og annet. I følge limtreboka er det også mest gunstig, økonomisk og statisk, å anvende fagverk av limtre for spenn som er minst 30 meter. (18)

### **7.1.2 Utnyttelsesgrad**

På grunnlag av anbefalinger fra ekstern veileder er beregningene, både håndberegninger og FEM-design, basert på en maksimal utnyttelsesgrad på 80 % da det kan oppstå uventede krefter. Det er forsøkt å oppnå høyest mulig utnyttelsesgrad opp mot 80 %. Et optimalisert tverrsnitt medfører mindre materialforbruk fremfor et standardisert. Grunnet sentralt fokus på miljø var det viktig å få lavest mulig materialforbruk.

### **7.1.3 Vinkler**

I denne oppgaven er vinkelen mellom gurtene og diagonalstavene en sentral variabel siden det har stor innvirkning på fagverkets totale høyde, diagonalstavenes lengde og kapasitetsbehovet til tverrsnittene. De ulike faktorene skal veies opp mot hverandre ved fastsettelse av den optimale vinkelen for fagverket. Sentralt i vekting av de ulike faktorenes innvirkning på resultatet ligger fokusområdene miljøpåvirkning og økonomi.

Mindre vinkler vil redusere den totale høyden til fagverket og tillater dermed større takhøyde på steder der krav til maksimal høyde er satt i reguleringsplanene. Lavere fagverk vil også gi kortere diagonalstaver og reduserer materialforbruket. Moment-, skjær- og aksialkrefter som oppstår i fagverket kan derimot føre til høyre materialforbruk da de ved lavere vinkler generelt blir større, og medfører større tverrsnitt.

Dersom vinkelen økes, selv i liten grad, vil fagverkets ekstra høyde kreve utvendig tildekning som fører med seg høye kostnader. Ellers vil det være den tilsvarende motsatte effekt som ved lavere vinkler.



#### 7.1.4 Laster

Eurokode 1 angir henvisninger og reglement som legges til grunn for beregninger av laster.

Laster klassifiseres over tid på følgende måte (26):

- Bruddgrense
- Bruksgrense
- Ulykkegrense

I denne oppgaven har det ikke blitt tatt hensyn til vindlast, jordskjelv, midlertidige laster under byggetiden og taklast. Lasten er forenklet og satt til  $q = 10 \text{ kN/m}$ . Denne verdien er gitt i bruddgrensetilstand. Det er ikke tatt hensyn til karakteristiske laster og dimensjonerende laster. De beregnede verdiene fra bruksgrensetilstanden, nedbøyning, vil derfor være høyere enn den i realiteten vil bli.

Hovedfokuset i denne oppgaven har ikke vært undersøkelse av lastkombinasjoner.

Lastsystemene og beregningene har derfor blitt forenklet ved å velge langtidslast som dimensjoneringsgrunnlag. Dette på grunn av at store deler av lastene kommer av egenlast og snølast. Siden egenlast er permanent last og snølast er halvårs/korttidslast har det blitt valgt langtidslast som er mellomverdien mellom de to. På grunnlag av dette og at konstruksjonen er tiltenkt en innendørshall har det blitt valgt klimaklasse 1.

## 7.2 Statisk modell

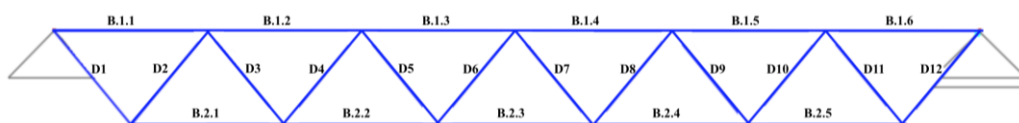
Fagverket er konstruert med en kombinasjon av triangler som gjør fagverket stabilt.

Triangelene er gitt i en kombinasjon med tre leddede staver. Høyden av fagverket er basert på gitte anbefalinger og burde etter disse anbefalingene ligge i området mellom  $L/5$  til  $L/10$ . Med valg av spennvidde på 30 meter burde høyden ligge mellom 3 – 6 meter i dette tilfelle. (27)

For beregningene av fagverket har det blitt benyttet FEM-design og egne håndberegninger for å kontrollere verdiene. *Limtreboka – Beregningseksempler* oppgir tre beregningsmetoder. I FEM-Design beregningene er det benyttet en blandet fagverksmodell hvor diagonalene modelleres som leddede staver til gurtene, mens gurtene modelleres som kontinuerlige bjelker (28, s. 125). Diagonalene vil dermed kun få overføring av aksialkrefter, samt at påføring av jevnt fordelt last gjøres mulig. Boken anser også denne modellen som den klart beste.

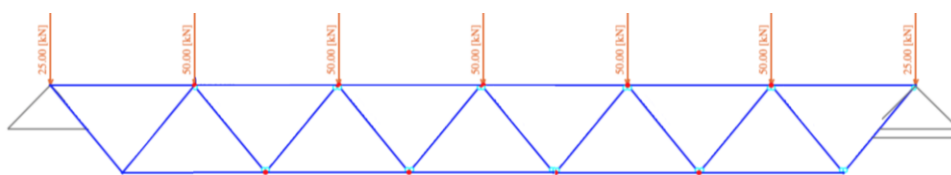
Den virkelige fagverkmodellen, med flere skruer, vil få noe overføring av momenter og skjærkrefter på grunn av noe stivhet i knutepunktene. Håndberegningene vil derfor ha en liten feilprosent, men i dette tilfelle er det aksialkreftene som er dominerende og de andre kreftene som oppstår vil være av underordnet betydning. Denne forenklingen av beregningsmodellen gjør det lettere å analysere fagverket.

Figurene under viser statisk modell med beskrivelse av elementene. Elementene har blitt navngitt med tallverdier i stigende rekkefølge sett fra venstre til høyre side. Betegnelsene blir benyttet i håndberegningene.



Figur 7-1 Statisk modell med beskrivelse av elementer

For å forenkle beregningene på den statiske modellen er den jevnt fordelte lasten omgjort til punktlaster over hvert knutepunkt (se bildet under). Knutepunktene blir regnet på som leddede. Beregningene er vist i vedlegg.



Figur 7-2 Knutepunktlaster

### 7.3 Fagverk i limtre

De statiske beregningene av konstruksjonen varierer i FEM-design og Mathcad. Fagverket vil få dobbel overgurt og undergurt for å få festet gurtene og diagonalene sammen med skruer. FEM-design tar utgangspunkt i at den statiske modellen har én kontinuerlig overgurt og undergurt, mens Mathcad har beregninger som tar hensyn til at det opprinnelig er to bjelker for både overgurt og undergurt. For gurtene vil det være ønskelig med et rektangulært tverrsnitt siden det gir størst flate for knutepunktene.

Tverrsnittene, i strekk, vil bli redusert på grunn av skruene. Dette gjelder undergurten og diagonalstavene i strekk. Alle diagonalstavene har lik bredde grunnet dobbel over- og undergurt. Ulike bredder av diagonalstavene gjør at det uansett må føres med materiale for å utjevne forskjellene, det vil derfor ikke vær hensiktsmessig å variere tverrsnittsbreddene. Tverrsnittshøyden på diagonalene varierer for å oppnå best mulig utnyttelse og minske materialforbruket. I håndberegningene ligger det kun inn to tverrsnitt av diagonalstavene, den ytterste og den midterste trykkdiagonalen. Dette er på grunn av at den ytterste trykkdiagonale er den som blir mest påkjent, mens den i midten kan få problemer med knekking. Man må huske å kontrollere kravene for de andre stavene. Det enkleste vil være å sjekke dette i FEM-design.

Dimensjonering av limtrekonstruksjoner etter Eurokode 5 er basert på karakteristiske verdier. Verdiene er bestemt på grunnlag av testing av et stort antall prøvestykker. Resultatene har blitt presentert i et frekvensdiagram, og verdiene er tatt ut av middelveiden. De karakteristiske verdiene for valgt limtrekvalitet, GL30C, er hentet fra NS 1194. Limtrekvaliteten er basert på grunnlag av leverandøren, Moelven Limtre AS, sine preferanser. Dimensjonene på tverrsnittene er også hentet fra Moelven Limtre AS. (4, 29)

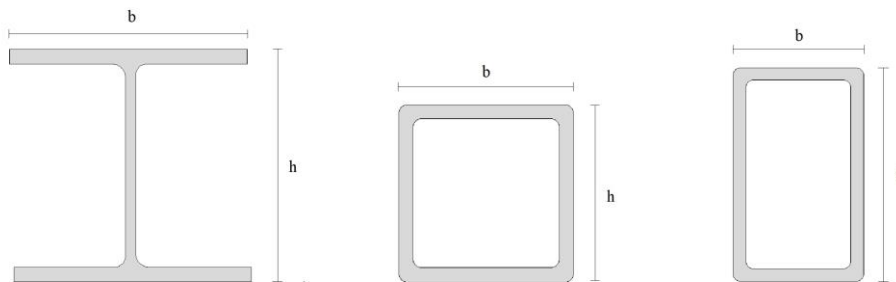
Etter bruksgrensetilstand har det blitt tatt hensyn til nedbøyningskrav etter EK 5. Kravet for trekonstruksjoner er beskrevet i NA 7.2 i EK 5. For denne oppgaven har det blitt valgt å kun å se på den totale nedbøyningen,  $w_{fin}$ , som oppstår. Det har ikke blitt tatt hensyn til umiddelbar nedbøyning som følge av kryp. Grenseverdien for total nedbøyning for et fagverk med to opplegg og ett spenn, etter NA 7.2, er gitt til å være  $L/300$ . I dette tilfelle tilsvarer det en maksimal utbøyning på 100 mm. Dersom fagverkene overstiger maksimal nedbøyning må man øke tverrsnittene i modellen.

## 7.4 Fagverk i stål

Fagverket i stål er designet til å ha samme geometriske utgangspunkt som det tilsvarende fagverket konstruert i limtre. De ytre forutsetningene, klimaklasse og lastsituasjon, er også i samsvar med de som er satt for fagverket i limtre. Det er gjort felles statiske beregninger for begge fagverkene. Også her vil verdier beregnet i Mathcad ha noe avvik fra de funnet ved bruk av FEM design.

Stålet i fagverket har stålqualität S355 med flytegrense  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$  og er tiltenkt levert av Norsk Stål AS. Basert på Norsk Stål AS sine tilgjengelige produktbrosjyrer og informasjon er denne stålqualität benyttet i større grad i deres produkter. Ved bruk av stålqualität S355 oppnås det et godt sammenligningsgrunnlag for de ulike fagverkstypene da denne stålqualität produseres i store kvantum og dermed vil gi best økonomisk utgangspunkt.

For overgurt og undergurt i fagverket er det brukt HE-A bjelker i ulike tverrsnitt. Det er lette, tynne profiler med god stabilitet som tar opp trykk- og bøyningkrefter godt, noe som er svært gunstig i et fagverk med stort spenn. Diagonalstavene er alle HFRHS profiler også med ulike tverrsnitt til de respektive kreftene for hver stav. HFRHS er vanlig å bruke i fagverk da de har god kapasitet for aksialkrefter, samt at det lukkede tverrsnittet sørger for høy torsjonsstivhet.



Figur 7-3 Stålprofiler: HE-A, kvadratisk HFRHS og rektangulært HFRHS

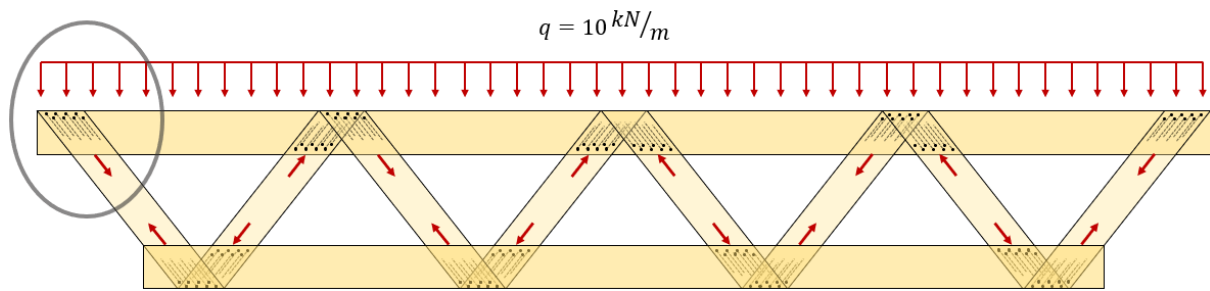
Tverrsnittene i fagverket er valgt med utgangspunkt i FEM-design sine statiske kalkulasjoner og optimalisering i henhold til opptredende indre krefter på grunn av ytre belastning. Deretter er hver konstruksjonskomponent med sitt respektive tverrsnitt kontrollert for hånd ved hjelp av egenproduserte regneark. Verdier for tverrsnittene blir hovedsakelig hentet fra tabellene 1.2, 1.4 og 1.5 i Stålkonstruksjoner (30). Der tabellene ikke har tilstrekkelig med data er resterende verdier hentet fra FEM design.

Knutepunktene i stålfagverket skal sveises. Det er valgt ikke å fokusere på disse knutepunktene i vesentlig grad. En overordnet kontroll er foretatt for overgurten i knutepunktet med ugunstigst lastkombinasjon for å sikre tilstrekkelig elastisk kapasitet. I selve knutepunktene vil det være akseptabelt å oppnå flyt og de kan derfor dimensjoneres plastisk. For bøy i overgurten benyttes elastisk dimensjonering så en slik kontroll er derfor innenfor de satte kravene.

For å sikre tilstrekkelig kapasitet mot knekking i overgurt, er knekk lengden satt til å være lik senteravstanden mellom knutepunktene etter anbefaling fra intern veileder. Dette er en konservativ antagelse da de sveisede knutepunktene har en viss momentstivhet som vil redusere knekk lengden til hvert segment i overgurten. For diagonalstavene er knekk lengden satt til  $0.75 \cdot \text{lengden av hver stav}$ , etter anbefaling fra ekstern veileder. Tilsvarende som for overgurten er det et realistisk valg grunnet vridningen som oppstår i knutepunktene og reduserer knekk lengden.

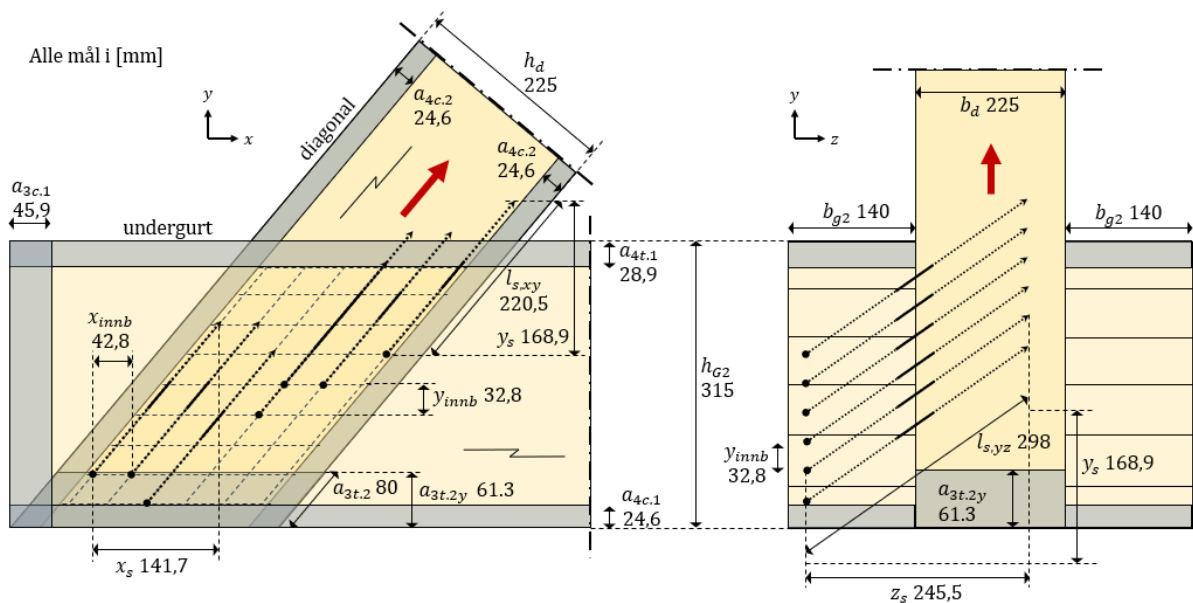
I bruksgrensetilstand er det tatt hensyn til nedbøyningskrav etter produktkatalog for Norsk Stål. For denne oppgaven er det valgt å kun se på den totale nedbøyningen,  $w_{fin}$ , som oppstår. Nedbøyningskravet for HEA-bjelkene fra leverandør er satt til å være  $L/400$ . Dette tilsvarer et krav på 75 mm og er strengere enn kravene for limtre. Vanligvis vil et krav på  $L/250$  være tilstrekkelig, men da stålet er tiltenkt levert av Norsk Stål AS dimensjoneres det etter deres krav til bæreevne.

## 7.5 Knutepunktsberegninger



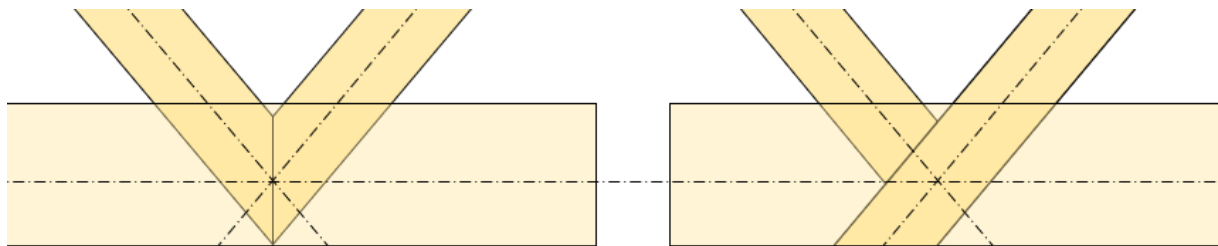
Figur 7-4 Illustrasjon fagverk limtre

Det skal beregnes på knutepunkt mellom gurt og én diagonalstav i et fagverk av limtre. Inspirasjonen til knutepunktet er hentet fra en patentert knutepunktsløsning fra Sverige, utviklet av Martinsonskonsernet(2). Grunnet den omfattende prosessen som inngår ved å dimensjonere knutepunkt med skråstilte skruer, er det besluttet å fokusere på knutepunktene i enden av fagverket, da de får størst belastning. Beregninger er ikke utført for sammenføyningen mellom to diagonalstaver, henholdsvis trykk og strekk, og gurt. I disse knutepunktene blir forbindelsen dobbeltsnittet for enkelte av skruene. Geometrien gjør det meget innviklet å lage en generell beregningsmetode for ulike tverrsnitt, innskruingsvinkler og skruelengder. Disse forbindelsene vil likevel omtales mer under diskusjon i 11.4 Knutepunkt.



Figur 7-5 Illustrasjon av betraktninger og verdier ved knutepunktsberegninger

I denne oppgaven er det ikke tatt høyde for momentbelastninger i knutepunktene. Det vil oppstå noe moment som følger av at det er benyttet flere forbindere, men knutepunktene i fagverket er tenkt konstruert uten eksentrisiteter (Figur 7-6), da stavenes senterlinjer skjærer hverandre i samme punkt. Dette vil begrense mye av momentet, som da gjør det forsvarlig å utelate beregninger av dette.

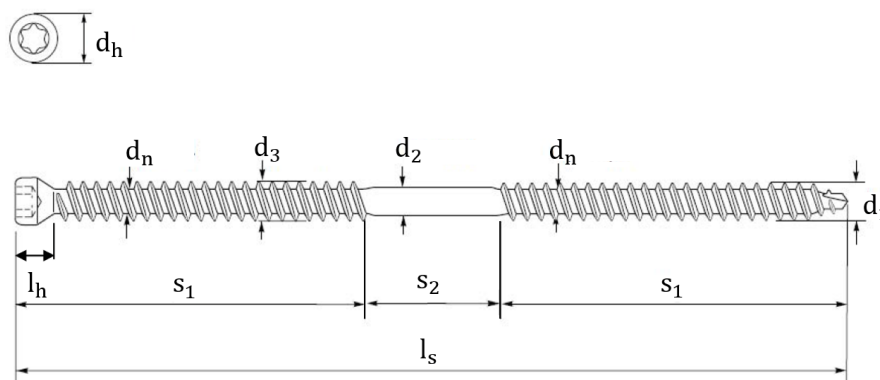


Figur 7-6 Knutepunkt uten eksentrisitet

Verdiene som er lagt til grunn for beregninger av knutepunkt er opptredende aksialkrefter, funnet etter beregninger med FEM-Design, og dimensjoner på tredelene. Selve dimensjoneringen er basert på Eurokode 5, skruens ETA (25) og litteratur fra forskning gjennomgått i tidligere kapitler (5).

### 7.5.1 Valg av forbinder

I knutepunktsberegningene er det valgt en selvborende dobbeltgjenget skruer levert av SFS av typen WT-T 8,2xL. Skruen er godkjent av EOTA (European Organisation for Technical Assessment) gjennom en European Technical Assessment, på norsk kalt for europeisk teknisk bedømmelse (25), forkortet ETA. ETA utarbeides av et teknisk bedømmelsesorgan, tilsvarende SINTEF i Norge. Den tekniske bedømmelsen inneholder ytelser og andre parametere spesifikt for denne type skruer. I utregningene blir ETA tatt i bruk og referert til.



Figur 7-7 Geometri for valgt skruer (25)

Avgjørende faktorer som spilte inn ved valg av skrue ble ytelse og egnethet til knutepunktet som skulle utføres. Den valgte skruen er utformet med et glatt midtparti som er tiltenkt å ligge mellom konstruksjonsdelene. Gjengene er utformet forskjellig på hver side av det glatte partiet for å generere et «drag» slik at tredelene klemmes mot hverandre ved montering. Dette gjør den ideell i kompliserte knutepunkt. I tillegg har den reduserte innbyrdes- og kantavstander ved aksielle belastninger, noe som er svært fordelaktig om man skal oppnå tilstrekkelig kapasitet (31). Identisk skrue var også benyttet i flere relevante studier for å løse knutepunktene, blant annet den av Tomasi (5).

Følgende varianter av skruen ble benyttet i utregningene:

Tabell 7-1 Geometriske verdier for skruer, se (Figur 7-7)

Skrue	$l_s$	$s_1 = s_3$	$s_2$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_n$	$d_h$
WT – T 8,2 × L – 330	330	135	60	8,2	6,3	8,9	5,4	10
WT – T 8,2 × L – 300	300	130	31	8,2	6,3	8,9	5,4	10
WT – T 8,2 × L – 275	275	122	31	8,2	6,3	8,9	5,4	10

### 7.5.2 Effektiv diameter

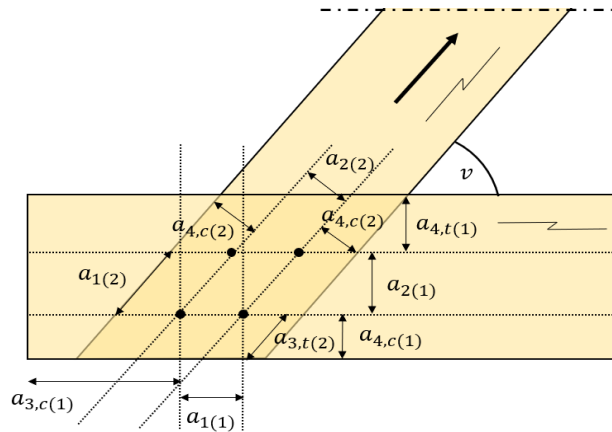
Ved beregning av effektiv diameter oppstår det motsigelser mellom Eurokode 5, ETA og beregninger fra forskning (5). Under er derfor en klargjøring av hvilke verdier for effektiv diameter og diameter som brukes i følgende situasjoner:

- Ved beregning av tverrbelastede skruer skal det tas hensyn til den gjengede delen når kapasiteter skal beregnes. Her følger vi skruens ETA punkt A.2.2 og benytter den ytre gjengediameteren  $d_1$  som  $d_{ef}$ . (25)
- Uttrekkskapasiteten etter 8.7.2 pkt. 4 beregnes med  $d = d_1$  (utvendig gjengediameter).
- Ved beregning etter 8.5.1 av bl.a. kantavstander og hullkantfasthet brukes  $d = d_1$ . Enkelte rapporter(5) har benyttet seg av andre verdier ved beregning av kantavstand og effektivt antall skruer som f.eks.  $d = d_3$  uten videre klargjøring.
- For standardens beregning av glidemodul  $K_{ser}$  skal diameter  $d$  settes til  $d_{ef} = 1.1d_n$  hvor  $d_n$  er gjengenes indre diameter etter EK 5 8.7.1 pkt. 3
- I den alternative metoden for beregning av forbindelsens glidemodul(5), ved beregning av  $K_{ser.ax.i}$  brukes  $d = d_1$



### 7.5.3 Beregning av hullkantfasthet og avstander

I Eurokode 5 står det at for skruer med glatt skaft med en diameter  $d > 6 \text{ mm}$  gjelder reglene for 8.5.1 *Tverrbelastede bolter*. Det forstås slik at man kan da beregne hullkantfasthet og kantavstander etter føringene i dette kapitlet. Derimot står det spesifisert i skruens Europeiske tekniske evaluering at for skruer i forborede- og ikke forborede hull skal minste avstander til kant, ende og innbyrdes avstander hentes i 8.3.1.2, tabell 8.2.



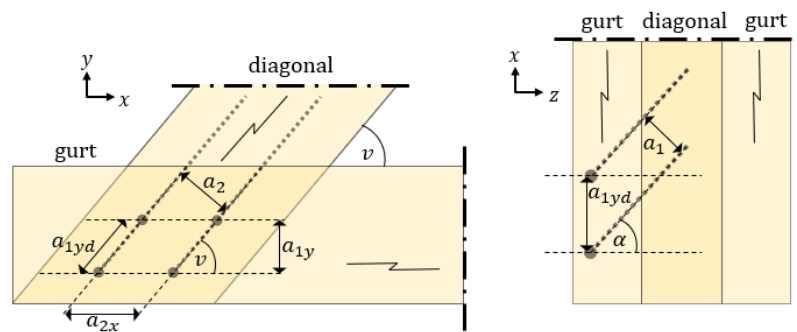
Figur 7-8 Illustrasjon innbyrdes- og kant-/endeavstand

Kapittel 8.3.1.2 har ingen metode for beregning av hullkantfasthet i trevirke i en vinkel på fiberretningen, noe som er av stor viktighet for videre beregninger. Siden tre er et anisotrop materiale, er det blitt vurdert at det vil være unøyaktig å bruke en formel som gir lik hullkantfasthet for en forbinder påkjent av en kraft langs og vinkelrett på fiberretningen. Forskningsrapporten (5) som mye av beregningene baseres på, har valgt å ta utgangspunkt i avstandsberegningene under *Tverrbelastede bolter*, selv om det påpekes at den tekniske evalueringen anbefaler verdiene under 8.3.1.2. Det er ikke tatt stilling til hvorvidt forboring skal benyttes i denne oppgaven. På bakgrunn av dette har man valgt å benytte seg av avstandsberegningene under 8.5.1 tabell 8.2 (4).

Tabell 7-2 Minste avstander mellom bolter innbyrdes og fra bolt til kant og ende

Innbyrdes avstand og kant-endeavstander (fig 8.7)	Vinkel $\alpha$	Minste innbyrdes avstand og kant-/endeavstand
a1 (i fiberretningen)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 +  \cos \alpha ) d$
a2 (vinkelrett på fiberretningen)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4 d$
a3,t (belastet ende)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max [7 d; 80 \text{ mm}]$
a3,c (ubelastet ende)	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	$(1 + 6 \sin \alpha) d$
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$4 d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$(1 + 6  \sin \alpha ) d$
a4,t (belastet kant)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max [(2 + 2 \sin \alpha) d; 3 d]$
a4,c (ubelastet kant)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3 d$

Det er også et eget krav for innbyrdes avstander ved aksialbelastede skruer etter EK 5 8.7.2, tabell 8.6. Kravet kan øke dimensjonerende verdier for innbyrdes avstander, hvor de dimensjonerende minsteavstandene i regnearkene er betegnet som  $x_{innb}$  og  $y_{innb}$ , i forhold til kravene i 8.5.1. Økning i innbyrdes avstander reduserer potensialet for antall tillatte skruer og dermed kapasitet. Valgt skruetype har etter ETA (25) og teknisk brosjyre (31) reduserte avstander for aksialbelastede skruer;  $a_1 = 40 \text{ mm}$  og  $a_2 = 40 \text{ mm}$ . Disse vil bli benyttet i utregningene. Omgjøring av avstander i regneark gjøres ved betraktninger etter Figur 7-9.



Figur 7-9 Innbyrdes avstander for aksialbelastede skruer

#### 7.5.4 Effektivt antall forbindere, $n_{ef}$

Beregninger av effektivt antall forbindere avhenger av om man ser på tverr- og/eller aksialbelastede skruer. For å finne aksiale kapasiteter til en gruppe skruer  $n$ , beregner man effektivt antall skruer ved å sette  $n_{ef} = n^{0,9}$ .

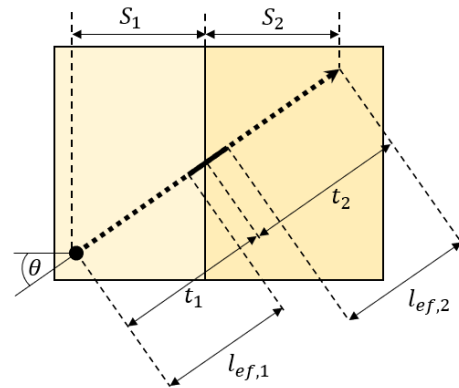
Bestemmelse av effektivt antall forbindere,  $n_{ef}$ , for en gruppe skruer belastet på tvers er derimot ikke like simpelt. Etter EK 5 8.5.1.1 bør kapasiteten  $F_{v,Rk}$  til en rad med  $n$  forbindere beregnes med det effektive antallet etter likningene 8.34 eller 8.35 avhengig av om lasten går langs eller vinkelrett på fiberretningen. Om lasten er i en vinkel er  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , skal  $n_{ef}$  bestemmes ved lineær interpolasjon mellom uttrykkene. Samme  $n_{ef}$  nyttes ved beregninger etter 8.1.2.

Knutepunktet i fagverket som undersøkes i denne oppgaven har en aksiell kraft ( $F$ ) som går langs diagonalen og resulterer i en horisontal kraftkomponent ( $F_x$ ) langs gurt. Det må derfor beregnes effektivt antall skruer for både diagonalstaver og gurt, for deretter å sjekke deres kapasiteter mot de respektive kreftene.

### 7.5.5 Inntrengningsdybder og effektive lengder

Noen viktige spesifiseringer angående hvilke inntrengings- og forankringsdybder, samt effektive lengder man benytter ved kalkulering av verdier.

- I den alternative metoden presentert for dimensjonering av kapasiteter skal forankringslengden  $S_1$  og  $S_2$  i det første og andre treelementet måles vinkelrett på skjærplanet.
- 8.2.2 lign. 8.6, tykkelsen eller forankringslengden  $t_i$  med  $i$  lik enten 1 eller 2 måles parallelt med skruens lengdeakse.
- 8.7.2 pkt. 4, skruens effektive lengde, altså den gjengede delens inntrengningsdybde  $l_{ef}$ , måles som lengden av gjengene i hvert av treelementene, parallelt med skruens akse.

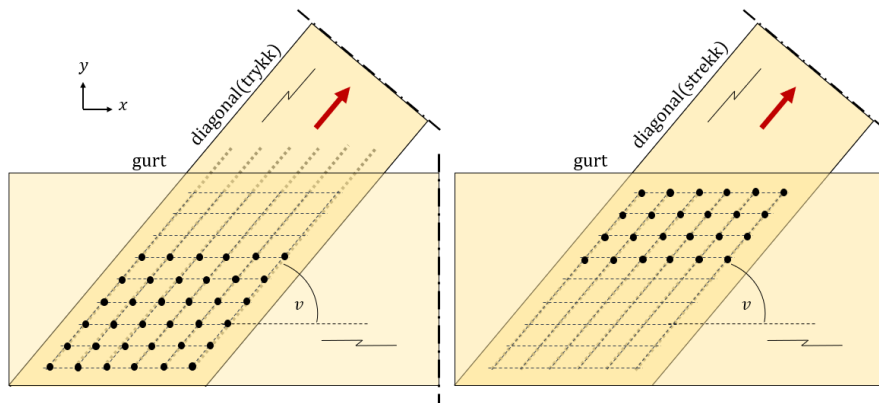


Figur 7-10 Illustrasjon av relevante dybder og lengder

### 7.5.6 Innskruvingsvinkel

Valg av vinkler på forbindere i knutepunktet er et meget sentralt aspekt av dimensjoneringen. Empiriske data tilsier at ved å vinkle skruens lengdeakse i kraftretningen så vil man kunne utnytte skruens høye aksialkapasitet, og dermed øke kapasiteten per forbinder.

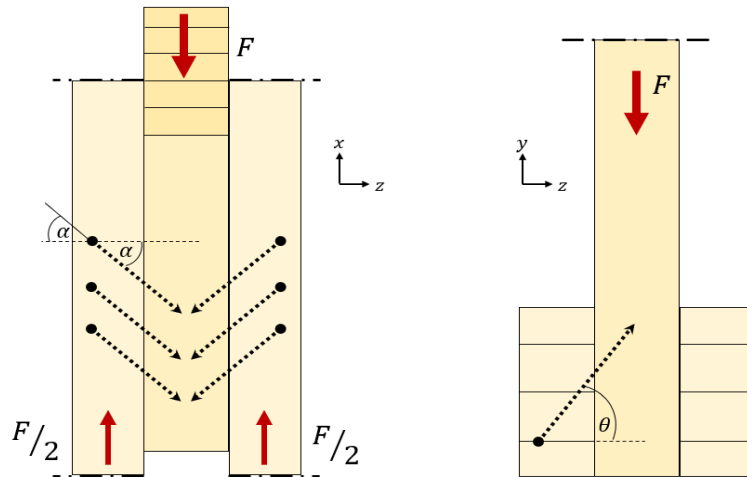
Før man velger vinkler på skruene i knutepunktet må man geometrien til fagverket etableres med bl.a. tykkelser av konstruksjonselementene og vinkel mellom diagonalstaver og gurtene. Disse er fastsatt, og vurderinger ligger under 11.2.1.



Figur 7-11 Illustrasjon vinkel skruer xy-planet

Alle skruer er vinklet slik at de følger stavenes kraftretning, og dermed diagonalstavens lengderetning, i en vinkel  $\nu$  på fiberretningen til gurten sett fra xy-planet (Figur 7-11).

Siden vinkelen i xy-planet er fastsatt av fagverkets geometri, er vinklene i xz- og yz-planet variable vinkler som kan endres. Denne oppgaven benytter vinkelen  $\alpha$ , fagverket sett ovenfra (xz-planet), som variabel i kapasitetsberegningene i vedlegg E.



Figur 7-12 Illustrasjon variable vinkler skrue

## 7.5.7 Kapasiteter

### Uttrekkskapasitet

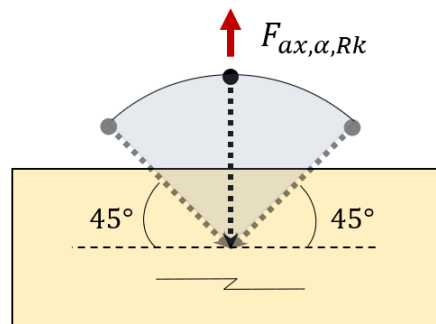
Karakteristisk uttrekkskapasitet beregnes vanligvis etter EK 5 8.7.2 likn. 8.38, men skruens ETA har presisert en annen metode, punkt A.2.3.2:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \cdot k_{ax} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{0,8}$$

Hvor  $F_{ax,\alpha,Rk}$  er den karakteristiske uttrekkskapasiteten for en gruppe skruer i en vinkel  $\alpha$  på fiberretningen,  $n_{ef}$  er antallet effektive skruer etter EK 5 8.7.2 pkt. 8,  $d$  er skruens diameter.  $f_{ax,k}$  er karakteristisk uttrekksparameter vinkelrett på fiberretningen. Faktoren  $k_{ax}$  tar i betraktning vinkelen mellom skruens akse og fiberretningen, og beregnes slik:

$$k_{ax} = 1.0 \quad \text{for } 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

$$k_{ax} = 0,3 + \frac{0,7 \cdot \alpha}{45^\circ} \quad \text{for } 15^\circ \leq \alpha < 45^\circ$$



Figur 7-13 Illustrasjon, konstant uttrekkskapasitet

Likningen kan også brukes for vinkler mellom  $0^\circ \leq \alpha < 15^\circ$  dersom skruen brukes i limtre. Dette skiller seg fra standarden hvor uttrekkskapasiteten ikke er konstant for vinkler  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , og skruer med vinkler  $\alpha < 30^\circ$  ikke har beregningsmessig uttrekkskapasitet. En omfattende studie utført av Institute of Timber Engineering and Wood Technology ved universitetet i Graz, viste også bare små forskjeller i uttrekkskapasiteter i vinkler mellom fiberretningen på  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  og  $90^\circ$  (32). Nyere forskning hvor man har undersøkt uttrekkskapasiteter for vinkler under  $30^\circ$  viser at skruer har betydelig kapasiteter også her. Dette er informasjon som mest sannsynlig vil føre til endringer i senere versjoner av Eurokode (1, s. 363).

Her har man fått oppgitt en parameter fra produsent, basert på densitet  $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ .

Dette er noe lavere densitet enn hva valgt trekvalitet GL30C innehar basert på opplysninger fra Eurokode og Moelven Limtre. Likevel ser en at formelen i ETA tar høyde for lavere densitet i uttrykket for uttrekkskapasitet, dermed brukes dette.

## Gjennomtrekkingsmotstand

EK 5 kalkulerer skruens karakteristiske gjennomtrekkingsmotstand etter formel (8.40b):

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \cdot f_{head,k} \cdot d_h^2 \cdot (\rho_k / \rho_a)^{0,8}$$

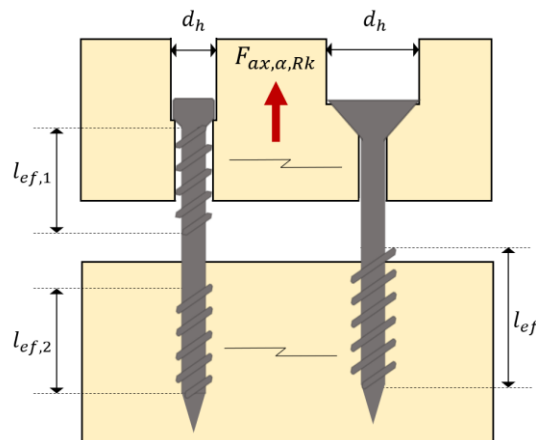
Den karakteristiske verdien for skruehodets gjennomtrekkingsparameter

$f_{head,k} = 10 \text{ N/mm}^2$  finner man i skruens ETA. Denne verdien baserer seg på en tilhørende densitet  $\rho_a = 350 \text{ kg/m}^3$  og kan kun benyttes om tredelene har en tykkelse over 20 mm.

Formelen antas å basere seg på tradisjonelle treskruer sin utforming, da den ikke tar høyde for gjengene fra hodet og til midten av skruen (fig. 16). Gjennomtrekkingsmotstand til skruer med liten diameter på hodet, etter (8.40b) blir svært lav. Det er rimelig å anta at gjennomtrekkingsmotstanden, forutsatt at  $l_{ef,1} = l_{ef,2}$  vil være lik uttrekkskapasiteten addert med skruehodets motstand. Omskriver derfor standardens formel for gjennomtrekkingsmotstand til:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \cdot \left( \frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} (k_{ax} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} + f_{head,k} \cdot d_h^2)$$

Dimensjonerende kapasitet for aksial belastning er lik minste verdi av uttrekkskapasitet og gjennomtrekkingskapasitet. Uttrekkskapasiteten må derfor bli dimensjonerende.



Figur 7-14 Illustrasjon av gjennomtrekking

## 7.6 FEM-Design

FEM-Design er et avansert modelleringsprogram for elementanalyse og dimensjonering av bæresystemer i betong, stål, tre og fundament i henhold til Eurokoder med nasjonalt tillegg (NA). Programmet er basert på andre kjente CAD-verktøy som gjør det enkelt å opprette modeller og redigere strukturer. Modellene blir representert via rendering, animasjoner, 3D og 2D.

Ved analyse kan man kombinere og benytte seg av punkt-, linje-, flate-, temperatur-, støttebevegelse og stresslaster. Vind og snølast kan genereres automatisk ved geografisk plassering. Det tatt hensyn til om lastene er permanente-, variable- eller ulykkeslaster i beregningene. Analyseresultatene inkluderer statiske, dynamiske, stabilitet og jordskjelv analyser. Resultatene kan bli presentert ved grafer, konturlinjer, fargekoder og formler.

I denne oppgaven er FEM-design blitt benyttet for å analysere fagverk i stål og limtre. Man kan benytte seg av en funksjon som automatisk velger ut det mest optimale tverrsnittet ut ifra et utvalg tverrsnitt og med en valgt maksimal utnyttelsesgrad. Fagverket blir dimensjonert i henhold til Eurokode 5 for limtre og tilsvarende med Eurokode 3 for stål, begge med NA. Programmet kontrollerer etter krav for blant annet strekk, trykk, torsjon, bøyning og nedbøyning, og ugunstigste kombinasjoner av disse. I tillegg kontrolleres flens og steg i stålprofilene.

## 7.7 PTC Mathcad

Mathcad er et elektronisk regneark som automatisk beregner og kontrollerer tekniske enheter gjennom hele sett av beregninger. Det benyttes av ingeniører og forskere i ulike fagområder.

Regnearket kan bestå av matematikk, beskrivende tekst og støttende bilde i samme skjemabilde. Programmet administrer enheter automatisk, forhindrer feil operasjoner og utfører automatisk reduksjon av enheter. Det benyttes til å løse systemer av ligninger, lage parametriske plottetyper (både i 2D og 3D), utføre vektor- og matriseoperasjoner, samt regresjonsanalyse og mye mer.

Mathcad kan også importere og eksportere til andre applikasjoner og filtyper som Microsoft Excel. Programmet fungerer også med andre tekniske applikasjoner, for eksempel CAD, FEM og BIM.

I denne oppgaven blir Mathcad benyttet til enkel beregning av matematiske likninger med beskrivende tekst. Programmet sørger for sammenhengende regneoperasjoner, hvor endring av verdier enkelt kan foretas underveis. Dette er optimalt da en dimensjoneringskontroll ofte medfører endring av tverrsnittsverdier.



## 8. Klimagassberegninger

*I dette kapittelet vil det bli presentert faktorer for beregninger av CO<sub>2</sub>-utslipp og forklaringer på hvorfor dette er viktig å ta i betraktning ved byggeprosjekter.*

### 8.1 Generelt

Klimagasser er en fellesbetegnelse for gasser som påvirker klimaet og bidrar til drivhuseffekten, deriblant karbondioksid (CO<sub>2</sub>), nitrogenoksider (NO<sub>x</sub>) og svoveldioksid (SO<sub>2</sub>). Ved økte konsentrasjoner kan disse gassene bidra til økt global oppvarming. Det er menneskene selv som bidrar mest til oppvarmingen med høye CO<sub>2</sub>-utslipp. Karbondioksid, CO<sub>2</sub>, er en nødvendig del av atmosfæren. Gassen sørger for en levelig temperatur på jorda og gir karbon til livgivende prosesser gjennom karbonkretsløpet. I løpet av tiden har konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> blitt for høy slik at den også gir negative konsekvenser for miljøet med økt oppvarming av jorda. Det er derfor ønskelig å redusere utslippene der det er mulig. For å se på mulighetene for reduisering av utslippene kan man sette opp et klimagassregnskap som gir en oversikt over utslipp av CO<sub>2</sub> som medfølger ved materialenes livsløp. Et livsløp inneholder prosessen fra produktstadiet hvor materialene går fra å være råvarer til produksjon videre til gjennomføringsfasen med transport og montering av bygg eller anlegg. Deretter kommer bruksstadiet som innebærer vedlikehold, reparasjon, utskifting, ombygging, energibruk og transport. Materialene gå så over i sluttstadiet som omfatter riving, transport, avfallsbehandling og avhenting. I denne oppgaven vil det kun fokuseres på utslipp fra CO<sub>2</sub> som følge av produksjon og transport av fagverkene.

I løpet av året har det blitt utarbeidet en ny standard, NS 3720, for klimagassberegninger. Standarden kan anvendes for analyser av nye bygninger samt ombygging og vedlikehold av eksisterende bygninger. Metodikken kan benyttes for beregning av tidligere, framtidige og aktuelle klimagassutslipp. Det vil da bli enklere å indentifisere korttidstiltak og langtidstiltak. Oppsettet for klimagassberegningene i denne oppgaven vil være forenklet i forhold til standarden. (33)

Det viktigste grepet for reduisering av klimagassutslipp er optimalisering av materialbruk, da CO<sub>2</sub> utslippene oftest baseres på vekt. Stort sett vil det være slik at de materialene som det benyttes mest av i bygget vil gi de største klimagassutslippene. Dette er som regel konstruksjonsstål, armeringsstål, betong, glass og gips. Ved økt bruk av trevirke i bæresystemene kan klimagassutslippene dermed minskes.

## **8.2 Norge og miljø**

Norge har deltatt og deltar fortsatt aktivt i flere samarbeid på verdensbasis for å redusere miljøutslipp. Blant annet et samarbeid med EU, Paris-avtalen, som går ut på å redusere utslippene med 40 prosent i kvotepliktig sektor innen 2030. Dette er i hovedsak utslipp fra transport, jordbruk, bygg og avfall, men også ikke-kvotepliktig utslipp fra industrien og petroleumsvirksomheten. Siden treproduksjon bidrar til mindre CO<sub>2</sub>-utslipp enn produksjon av annet materiale, vil valg av materialet være viktig på veien mot målet om å minske utslipp innen 2030. Høyere bruk av trevirke kan også bidra til mindre utslipp for transport grunnet mer lokal produksjon. I Norge består transportsektoren for om lag 60 prosent av de ikke-kvotepliktige utslippene i Norge. Utslippene kan dermed bli redusert ved å benytte kortreist materiale fra norske trefabrikker. (34)

Norge har også inngått et samarbeid på verdensbasis med 191 land om redusering av klimautslipp kalt Kyotoprotokollen. Kyotoprotokollen skal redusere utslipp på de seks viktigste klimagassene: Karbondioksid CO<sub>2</sub>, metan CH<sub>4</sub>, lystgass N<sub>2</sub>O, hydrofluorkarboner HFK, perfluorkarboner PFK og svovelheksafluorid SF<sub>6</sub>. (35)

### 8.3 Valg av faktorer

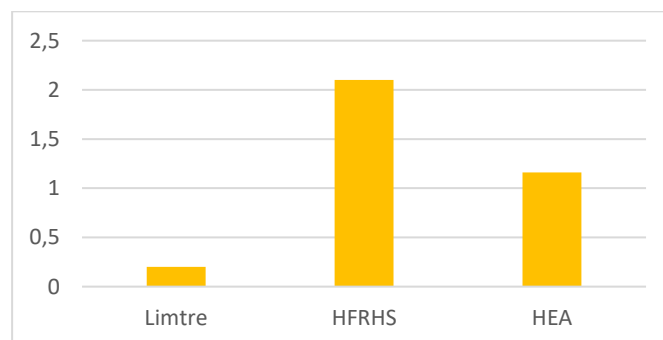
Verdiene på utslipp for materialene er hentet fra Norsk Prisbok år 2017. Utslippsfaktoren, også kalt CO<sub>2</sub> -ekvivalenten, baserer seg hovedsakelig på vekt. Klimagassberegningene er derfor avhengig av andel materialforbruk. Stål krever mindre materiale for å oppnå styrke, men har generelt en høyere tyngdetetthet. Det gir derfor tyngre materiale kilogram per kubikkmeter. Limtre er derimot et lett materiale, men krever betraktelig mye større tverrsnitt for å oppnå samme styrke. Som en konsekvens til økningen i materialforbruk kan utslippene øke ved transport som baserer seg på antall kjøreturer med en bestemt kapasitet i en lastebil. Det vil derfor antas å være viktig å ha med i beregningene.

Tabellen under viser CO<sub>2</sub>-ekvivalenten for de ulike komponentene. Verdiene for bjelker av limtre og stål er tatt fra godkjente produktblad og er hentet fra Epd-norge.no (36). Verdien for skruer baserer seg på utslippsverdi av stål hentet fra Den Norske Prisbok (37).

Tabell 8-1 CO<sub>2</sub>-utslipp for de ulike komponentene

Miljøindikatorer	Produsent	Utslipp per enhet
Limtre	Moelven Limtre As	79 kg CO <sub>2</sub> -ekv per m <sup>3</sup>
Stål HFRHS	Norsk Stålforbund	2.18 kg CO <sub>2</sub> -ekv per kg
Stål HEA	Norsk Stålforbund	1.24 kg CO <sub>2</sub> -ekv per kg
Skruer	SFS	1.7 kg CO <sub>2</sub> -ekv per kg

Ved å beregne om utslippsenheten til limtre, og erstatte m<sup>3</sup> til kg, får man et utslipp på 0.2 CO<sub>2</sub>-ekv per kg. Omregningene gir et godt sammenligningsgrunnlag, og man kan se at utslippene for limtre er betraktelig lavere enn stål. Grafen under viser de store forskjellene. HFRHS-bjelker sammenlignet med limtre slipper ut syv ganger så mye CO<sub>2</sub>-ekv per kg.



Figur 8-1 Sammenligning av CO<sub>2</sub>-ekv per kg

## 9. Økonomisk grunnlag

*I dette kapittelet vil det bli presentert faktorer som benyttes ved beregninger av kostnadene for de to fagverkene.*

### 9.1 Faktorer

Tabellen under viser prisene for de ulike komponentene fra valgte produsenter. Vedlagt i beregningene har det blitt forenklet til å kun benytte den største skruelengden som gir et overslag for sluttkostnaden.

*Tabell 9-1 Priser for de ulike komponentene*

	<b>Produsent</b>	<b>Kostnad</b>
Limtre	Moelven Limtre As	40 kr per kg
Stål	Norsk Stål AS	37 kr per kg
WT-T 8.2 275	SFS	48 kr per stk
WT-T 8.2 300	SFS	55 kr per stk
WT-T 8.2 330	SFS	65 kr per stk

Som nevnt tidligere i oppgaven, krever konstruksjoner i limtre mer materiale for å oppnå samme styrke som i stål. Selv om det ikke er store forskjeller på kostnadene per kilogram for limtre og stål vil limtre likevel få en høyere pris enn sin konkurrent. Dette er en faktor som gjør at byggherre ofte velger å benytte konstruksjoner i stål i stedet for tre.

Etter anbefalinger fra ekstern veileder er det ønskelig at fagverket får så mange like tverrsnitt som mulig med tanke på den endelige kostnaden. Bestillingskostnaden fra leverandør kan minke dersom det er flere bestillinger av samme type materiale og tverrsnittsstørrelse.

Dersom fagverkene skal masseproduseres kan det allikevel lønne seg å optimalisere hvert enkelt element i konstruksjonen. Oppgaven er ikke spesifisert på om det er masseprodusert eller tilpasset et prosjekt. Det vil derfor ikke blitt tatt hensyn til.

Martinsons hevder at deres patent om ny løsning på knutepunkt, med skråstilte selvborende skruer, skal gjøre fagverk i limtre 40 % billigere (3). Det vil ikke bli undersøkt og sammenlignet med gamle, tradisjonelle metoder grunnet mangel på beregning av antall nødvendige forbindelser for eksisterende knutepunktsløsninger. For å sammenligne den nye løsningen mot de som brukes i dag, burde man også tatt hensyn til monterings tid og kostnader knyttet til dette, noe som heller ikke blir undersøkt.

## 10. Resultat

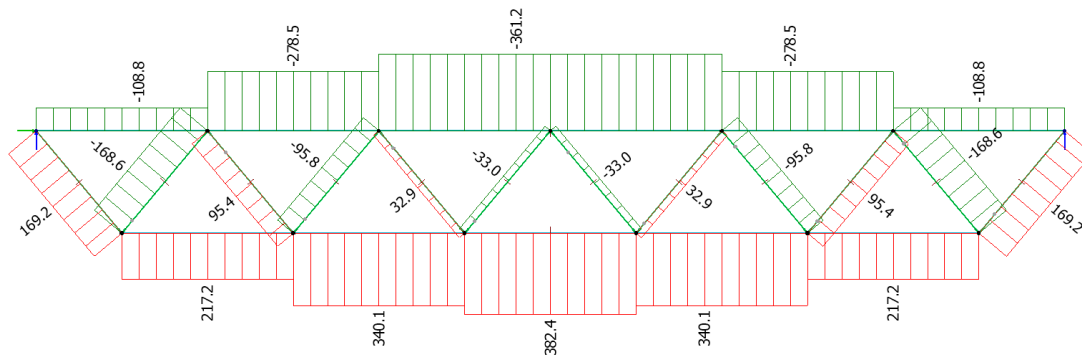
I dette kapittelet blir resultatene fra FEM-design og egne regneark presentert.

### 10.1 Vinkel

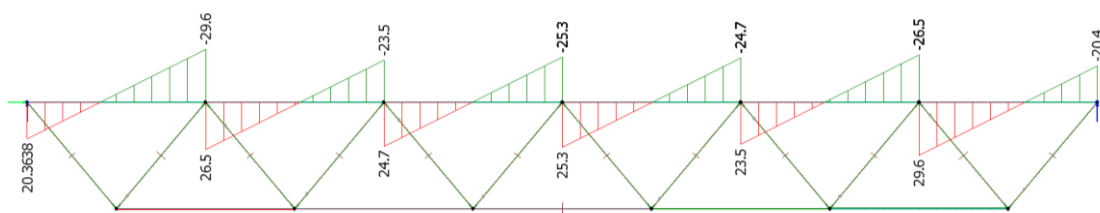
Etter beregninger fra FEM-design og håndberegninger ble vinkelen mellom gurt og diagonaler valgt til å være 50 grader. Denne vinkelen gir en lengde på diagonalstavene på 3.889 meter, og høyde av midtdelen på 2.9793 meter.

### 10.2 Opptredende krefter

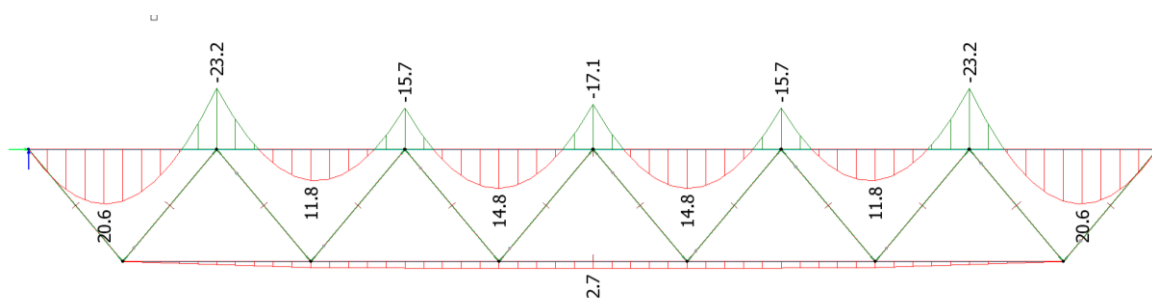
Figuren under viser de opptredende kreftene som virker i fagverket, med vinkel 50 grader mellom gurter og diagonalstaver. Figurene er hentet fra FEM-design og viser de indre kreftene som faktisk oppstår i fagverket, ikke forenklingene.



Figur 10-1 Aksialdiagram



Figur 10-2 Skjærtdiagram



Figur 10-3 Momentdiagram

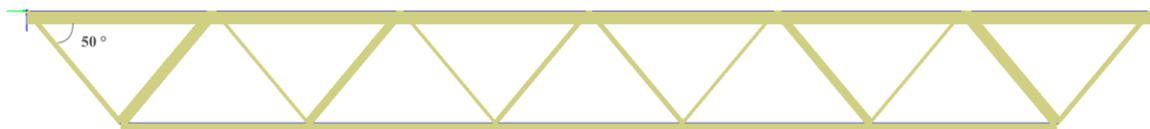
### 10.3 Tverrsnitt limtre

Tabellen under viser de valgte tverrsnittene, med doble gurter, og utnyttelsesgraden til de ulike konstruksjonselementene for fagverket i limtre. Det vil oppstå et større profil i undergurten som følge av en redusering av tverrsnitt på grunn av skruer. Verdiene for utnyttelsesgrad er rundet opp til et heltall. Symmetrisk modell gir samme tverrsnitt på speilte diagonaler. Alle tverrsnittene er kontrollert i både FEM-Design og Mathcad.

Tabell 10-1 Valgte tverrsnitt for limrefagverk

	Profil	Utnyttelsesgrad
Overgurt x2	140 mm x 315 mm	76 %
Undergurt x2	140 mm x 405 mm	76 %
Diagonalstav D1 og D12	140 mm x 135 mm	80 %
Diagonalstav D2 og D11	140 mm x 270 mm	80 %
Diagonalstav D3 og D10	140 mm x 90 mm	68 %
Diagonalstav D4 og D9	140 mm x 225 mm	56 %
Diagonalstav D5 og D8	140 mm x 90 mm	23 %
Diagonalstav D6 og D7	140 mm x 135 mm	34 %

Figuren under viser fagverket i 3D med valgte tverrsnitt. Man kan observere at størrelsen på tverrsnittene minker inn mot midten, samt at trykkstavene får noe større tverrsnitt enn strekkstavene.



Figur 10-4 Fagverksmodell i limtre

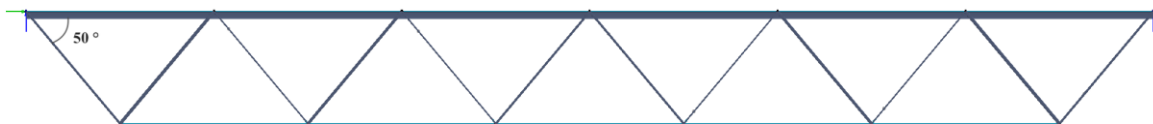
## 10.4 Tverrsnitt stål

Tabellen under viser de valgte tverrsnittene og utnyttelsesgraden for de ulike elementene i fagverket i stål. Verdiene for utnyttelsesgrad er rundet opp til et heltall, og tatt fra FEM-Design samt kontrollert etter egne håndberegninger i Mathcad. Symmetrisk modell gir samme tverrsnitt på speilte diagonaler.

Tabell 10-2 Valgte tverrsnitt for stålfagverk

	Profil	Utnyttelsesgrad
Overgurt	HEA-200	66 %
Undergurt	HEA-100	68 %
Diagonalstav D1 og D12	HFRHS 60x40x4	77 %
Diagonalstav D2 og D11	HFRHS 90x90x4	76 %
Diagonalstav D3 og D10	HFRHS 40x40x3.2	69 %
Diagonalstav D4 og D9	HFRHS 80x80x3	68 %
Diagonalstav D5 og D8	HFRHS 40x40x3.2	27 %
Diagonalstav D6 og D7	HFRHS 60x60x3	57 %

Figuren under viser fagverket i 3D med valgte tverrsnitt. Observerer at det er relative tynne staver kontra for limtre, og at tverrsnittene også her minker inn mot midten.



Figur 10-5 Fagverksmodell i stål

## 10.5 Knutepunkt

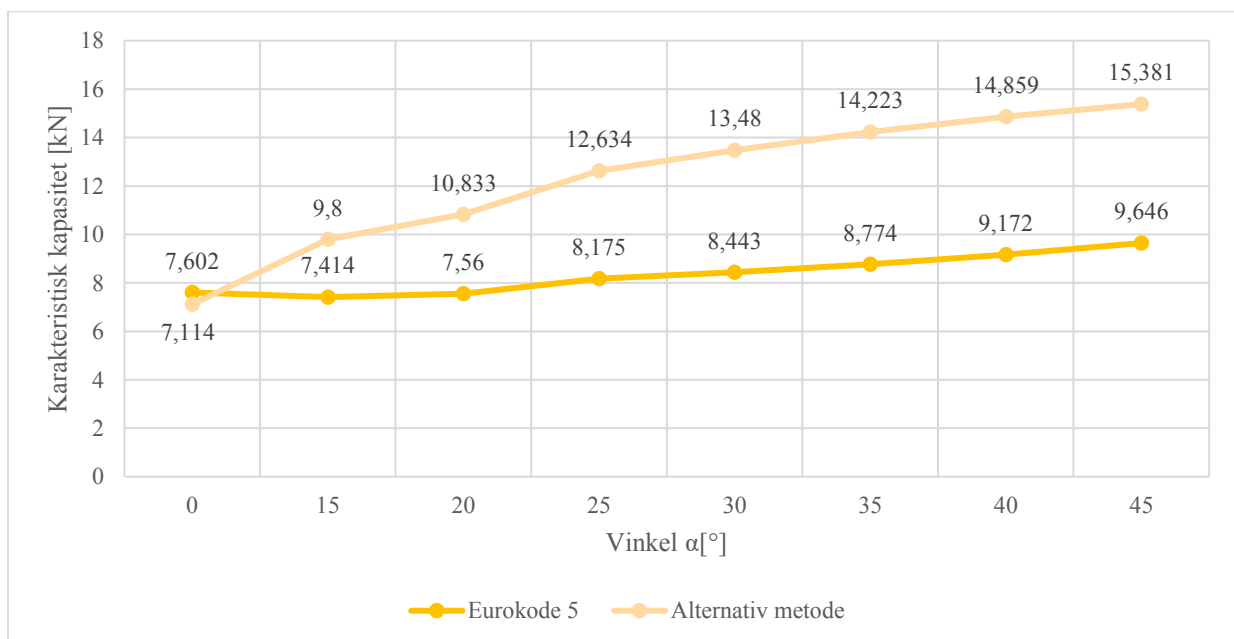
Verdier er beregnet i Mathcad Prime, vedlegg E og F. I utregningene ble forskjellige skruer benyttet avhengig av innskruingsvinkel. Større vinkel gir behov for lengre skruer på grunn av geometri.

Tabell 10-3: Sammenheng vinkel og skruelengder

$\alpha[^\circ]$	45	40	35	30	25	20	15	0
$l_s[mm]$	330	330	330	300	300	275	275	275

### 10.5.1 Kapasiteter

Figur 10-6 viser sammenhengen mellom karakteristisk kapasitet per enkelt forbinder  $F_{v,Rk}$  for både den alternative metoden og etter Eurokode, avhengig av hvilken vinkel skruene er skrudd inn med. Parameterne som inngår i beregningene baserer seg på lengden til skruen, forutsatt at kravene til tykkelse på tredelene er tilfredsstilt. Verdiene gjelder for alle tverrsnitt og knutepunkt.



Figur 10-6 Sammenheng innskruingsvinkel og kapasitet for én enkelt forbinder



## Kontroll av kapasiteten til knutepunkt

Resultater fra kontrollering av kapasiteter til knutepunkt blir presentert under. Følgende benevnninger blir benyttet:

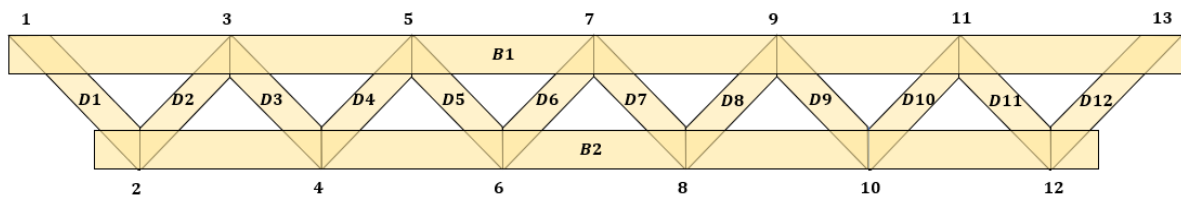
$F_{v.Rd.EK5}$  kapasitet etter Eurokode 5

$F_{v.Rd.ALT}$  kapasitet etter alternativ beregningsmetode

$F_{Rd}$  kapasiteten for stavkrefter med tanke på splitting av gurt

$n_x, n_y$  antall forbindere i x- og y-retning

$F_{Ed}$  opptredende kraft i staver fra FEM-Design



Figur 10-7 Nummerering av knutepunkt, diagonalstaver og gurter

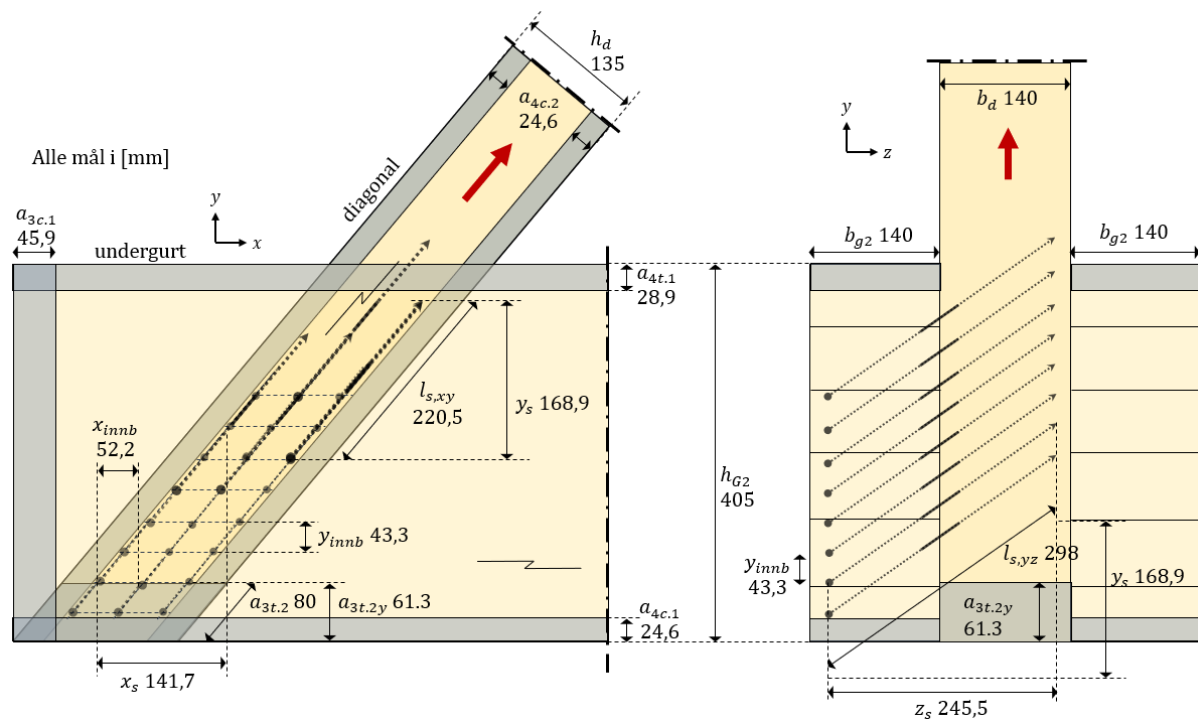
## Kontroll endeknutepunkt 1 og 13:

Diagonalstaver D1/D12 og overgurt B1

Strekraft st  $F_{Ed} = 169,2 \text{ kN}$

Tabell 10-4 Kapasiteter for endeknutepunkt

$\alpha \text{ [deg]}$	$n_x$	$n_y$	Antall skruer	$F_{v.Rd.EK5} \text{ [kN]}$	$F_{v.Rd.ALT} \text{ [kN]}$	$F_{Rd} \text{ [kN]}$
45	3	6	36	139,15	221,89	226,98
40	3	7	42	152,01	246,25	226,98
35	3	7	42	145,41	235,72	226,98
30	3	8	48	157,80	251,93	226,98
25	3	9	54	169,87	262,51	226,98
20	3	10	60	172,73	247,49	142,86
15	3	10	60	169,37	223,88	142,86
0	3	10	60	173,63	162,52	142,86



Figur 10-8 Skisse av endeknutepunkt 1 og 13

### Kontroll knutepunkt 2 og 12:

Diagonalstaver D1/D12 og undergurt B2

Strekraft  $F_{Ed} = 169,2 \text{ kN}$

Tabell 10-5 Kapasiteter for knutepunkt 2 og 11

$\alpha$ [deg]	$n_x$	$n_y$	Antall skruer	$F_{v.Rd.EK5}$ [kN]	$F_{v.Rd.ALT}$ [kN]	$F_{Rd}$ [kN]
45	3	4	24	96,607	154,045	174,61
40	3	5	30	112,294	181,913	174,61
35	3	5	30	107,415	174,135	174,61
30	3	6	36	121,805	194,46	174,61
25	3	6	36	117,932	182,253	174,61
20	3	7	42	125,298	179,533	108,02
15	3	7	42	122,864	162,408	108,02
0	3	7	42	125,98	117,90	108,02

### Kontroll knutepunkt 2 og 12:

Diagonalstaver D2/D11 og undergurt B2

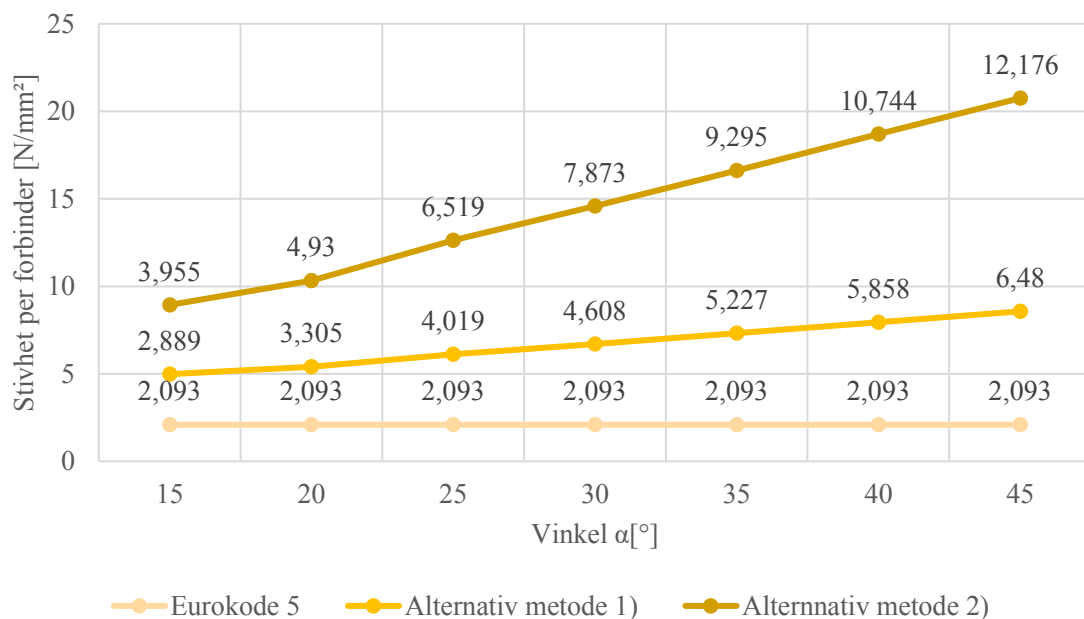
Trykkraft  $F_{Ed} = 168,6 \text{ kN}$

Tabell 10-6 Kapasitet til knutepunkt 2 og 11

$\alpha$ [deg]	$n_x$	$n_y$	Antall skruer	$F_{v,Rd,EK5}$ [kN]	$F_{v,Rd,ALT}$ [kN]	$F_{Rd}$ [kN]
45	3	4	24	96,61	154,05	174,61
40	3	5	30	112,29	181,91	174,61
35	3	5	30	107,42	174,14	174,61
30	3	6	36	121,81	194,46	174,61
25	3	6	36	117,93	182,25	174,61
20	3	7	42	125,30	179,53	174,61
15	3	7	42	122,86	162,41	174,61
0	3	7	42	125,98	117,89	174,61

### 10.5.2 Stivheter

Figuren under viser hvordan stivheten, per forbinder, varierer med hensyn til vinkel, Eurokode 5 og de to alternative metodene.



Figur 10-9 Sammenhengen mellom stivhet per forbinder og vinkel

## 10.6 Klimagassutslipp

Tabellen under viser utslippsmengden for produksjon av de to type fagverk i henholdsvis limtre og stål. Montering og transport fra produksjonssted er ikke tatt med i beregningene. Det antas at det kun benyttes nytt materiale fra skogen og jernmalmgruver.

*Tabell 10-7 Totalt utslippsmengde fra produksjon*

<b>Materiale</b>	<b>Utslippsmengde i kg CO<sub>2</sub>-eq</b>
Limtre	589
Stål	2537

## 10.7 Kostnader

Tabellen under viser kostnadene for de to fagverkene i henholdsvis limtre og stål. Kostnadene for montasje og transport er ikke tatt med i beregningene.

*Tabell 10-8 Kostnader*

<b>Materiale</b>	<b>Kostnad i kr</b>
Limtre	125 927
Stål	69 894

## 11. Diskusjon

*I dette kapittelet blir det redegjort for resultater i forhold til etablert teori og praksis.*

### 11.1 Statisk modell

Sammenligning av håndberegningene og FEM-Design sine beregninger viser at det utgjør liten forskjell på beregning med/uten momenter og skjærkrefter overført i stavene. Vedlagt ligger en tabell som viser denne differansen. Alle sluttsvarene for beregningene har blitt kontrollert opp mot hverandre.

### 11.2 Optimalisering av fagverk i limtre

#### 11.2.1 Valg av vinkel

Vedlagt ligger sammenligningene for de ulike vinklene som baserer seg på optimalisering fra FEM-Design. Gurtene har derfor ikke blitt omgjort til to bjelker og det totale sluttvolumet vil ikke være det samme som det valgte tverrsnitt. På grunn av doble gurter vil det oppstå større volum for alle vinklene enn det som er oppført i tabellen. Nedbøyning, høyde, utslipp og pris vil også dermed variere.

Etter anbefalinger, høyde av fagverket mellom 3 – 6 meter, kan vinkel 40 grader strykes da høyden av fagverket blir under 3 meter ved optimalisering. Det hadde vært mulig og valgt en større høyde på tverrsnittet i undergurt, men den valgte høyden er allerede relativ høy. En negativ faktor for store vinkler er høyden av fagverket, som ved økning kan gi større kostnader.

Det totale volumet synker med økende vinkel. Dette har en sammenheng med at de opptredende indre kreftene som virker i gurtene og diagonalstavene vil minke med økende vinkel. Fagverket må derfor ta opp mindre krefter. På grunn av synkende volum vil også utslippene og prisene bli mindre ved større vinkler siden disse faktorene baserer seg på tyngdeverdier. Vedlagt ligger en oversikt over endringene i krefter ved forskjellige vinkler.

Ved valg av vinkel ble det til slutt lagt mest vekt på total høyde av fagverket og utnyttelsesgrad til hvert enkelt tverrsnitt. Den valgte vinkelen på 50 grader, ga god utnyttelse av overgurt, diagonalstaver og undergurt. Nedbøyning og høyde er godt innenfor gitte krav og anbefalinger.

### 11.2.2 Tverrsnitt

FEM-design gir en anbefaling til én bjelke i overgurt med bredde 215 mm og høyde 360 mm. Omgjøringer og kontroller utført ved hjelp av Mathcad gir et utvalg av dimensjoner. Som nevnt tidligere i oppgaven så var det ønskelig med et rektangulært tverrsnitt fordi dette gir større flate for knutepunktene. Redusering av tverrsnitt på grunn av skruer medfører behovet for et større tverrsnitt i undergurten enn hva FEM-design og enkle omgjøringer gir. Vedlagt ligger et utvalg av tverrsnitt.

Diagonalene er valgt til å ha en fast bredde på 140 mm med varierende høyde. Ved maksimal utnyttelse på 80 % er dette minste mulige bredde. En bredde på 115 mm oppfyller ikke kravene, og ved 165 mm vil enkelte av tverrsnittene bli veldig overdimensjonert. Den valgte bredden oppfylte også alle krav til knutepunkt og avstander. En større bredde, eksempelvis 165 mm, hadde gitt en større flate for knutepunktene og hadde blitt valgt dersom kravene til knutepunkt ikke var innafor.

## 11.3 Optimalisering av fagverk i stål

### 11.3.1 Valg av vinkel

I tabellene som er vedlagt kan en observere en sammenligning av volum, høyde og nedbøying for de ulike vinklene. Volumet er oppgitt som en totalverdi for overgurt, undergurt og diagonalstavene med deres respektive lengder og tverrsnitt.

Tilsvarende som for fagverk i limtre, er det etter anbefalinger ønskelig å få en total høyde mellom 3 – 6 meter. Dette utelukker allerede vinklene 40 og 45 grader, da høyden blir mindre enn 3 meter. Som et tiltak kunne en større tverrsnittshøyde i overgurten og undergurten blitt valgt. Det er ikke blitt gjort da det strider noe med målsetningen om lavest mulig materialforbruk, samt at det gir et mer ustabilt tverrsnitt.

Dersom en vinkel mindre enn 50 grader hadde blitt valgt ville heller ikke nedbøyingskravet på 75 mm vært overholdt. De større vinklene har akseptable verdier. Selv om kravet på 75 mm er strengt er det valgt å opprettholde kravene til Norsk Stål AS, i stedet for å benytte mindre vinkel i fagverksmodellen. Da bjelkene i fagverket er tiltenkt levert av Norsk Stål AS, er prioriteringen ansett som nødvendig.

Lavest mulig materialforbruk oppnås ved vinkel 50 grader. Større vinkler ville økt fagverkets totale høyde, gitt lengre diagonalstaver og derav et større totalt materialbehov. Grunnen til at materialbehovet også stiger ved mindre vinkler kommer av økningen til de indre kreftene i fagverket. Diagonalstavene ble satt til å ha en maksimal utnyttelsesgrad på 80 % og med mindre vinkler førte de økte belastningene til større tverrsnitt.

Vinkel 50 grader har akseptabel nedbøying, tilstrekkelig høyde og lavest materialbehov. Da materialforbruk er et gjennomgående fokus med tanke på miljøpåvirkninger er vinkel 50 grader mest optimal. Som en ringvirkning av det lave materialbehovet blir det også det alternativet med lavest materialkostnader.

### 11.3.2 Tverrsnitt

FEM-design optimaliserer tverrsnittene opp mot en valgt utnyttelsesgrad på 80%. Vedlagt finnes en tabell hvor de valgte profilene er ført opp.

For overgurt og undergurt samsvarer dimensjonene med FEM-design sine anbefalinger. Da er det tatt høyde for god utnyttelse og tilstrekkelig kapasitet for skjær-, aksial- og momentkrefter, i tillegg til ugunstige kombinasjoner av nevnte krefter.

Enkelte av tverrsnittene for strekkstavene, D3/D10 og D5/D8, avviker fra verdiene i FEM-design sin optimalisering. Dette kommer av at de nevnte profilene tilhører strekkstaver og stålets høye strekkfasthet ikke krever mer enn et minstetverrsnitt. De aktuelle stavene har fått større tverrsnitt slik at utnyttelsesgraden blir lavere og stavene da får tilstrekkelig kapasitet til å ta opp krefter fra uforutsette lastsituasjoner.



## 11.4 Knutepunkt

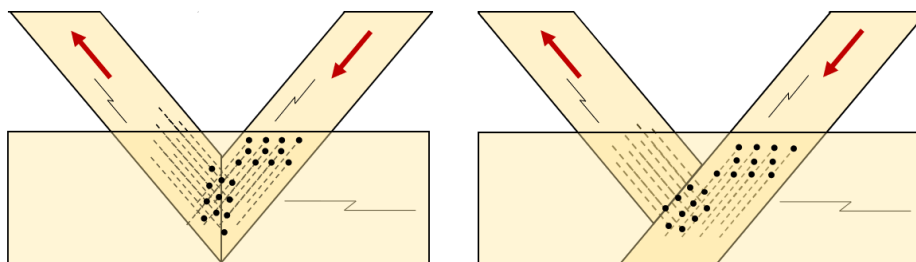
### Kapasitet

Resultatene fra beregningene av endeknutepunkt 1 og 13 (Tabell 10-4) viser at man vil få tilstrekkelig kapasitet med dimensjonene fra FEM-Design etter alternativ beregningsmetode i 6.2.4 og metoden etter Eurokode 5, 6.2.2.

For knutepunktene innover i konstruksjonen er situasjonen mer komplisert. Disse knutepunktene er dimensjonert etter regneark i vedlegg. Regnearket er utviklet spesifikt for endeknutepunkt, og tar ikke høyde for lavere areal. Dette medfører at kapasiteten blir overvurdert da lavere areal naturligvis gir færre forbindere.

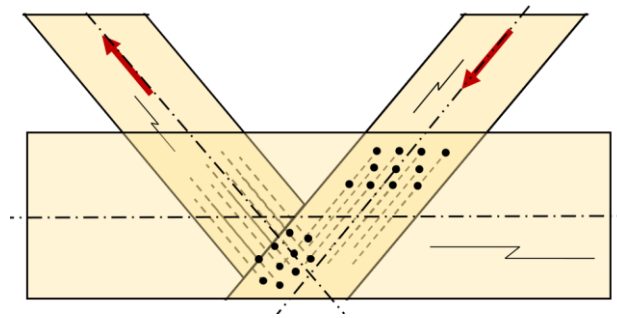
Det er avgjørende for fagverksmodellens suksess at knutepunktene innover er mulige å gjennomføre. Spesielt knutepunkt 2 og 12 er kritiske, da man ved dimensjonering av disse som endepunkter med overvurdert kapasitet ikke får tilstrekkelig kapasitet etter EK 5 (6.2.2.). Kapasiteten blir derimot oppnådd for både trykk- og strekkstaven etter alternativ metode 6.2.4.

En løsning på høyt utsatte knutepunkt kan være å utforme dem etter alternativ b) i Figur 11-1. Da vil man få tilsvarende resultater for trykkstav D2/D11 som i Tabell 10-6, og tilstrekkelig kapasitet etter alternativ metode. Problemet er at strekkstav D1/D12 som møter D2/D11 i knutepunktet har også høy aksialkraft. Dermed for å oppfylle kravet etter EK 5 i dette knutepunktet, kan løsningen være å øke høyden på undergurt B2 til 405 mm.



Figur 11-1 Illustrasjon av knutepunktløsninger a) og b)

En annen løsning kan være å tillate eksentrisiteter i knutepunktet, illustrert i Figur 5-2. Hvis man har et oversiktlig lastbilde med forutsigbare krefter, kan dette være en mulighet. Rett sammenføyning av knutepunktet kan resultere i en netto virkning av eksentrisiteter, hvor de bidrar til å redusere hverandre. Ved å utforme knutepunktet slikt, får alle inngående deler tilstrekkelig med areal for skruer, og kapasitet kan nås.



Figur 11-2 Illustrasjon eksentrisitet knutepunkt

### Stivhet

For stivheter/glidemoduler ser man at resultatene er meget sammenliknbare med resultatene oppnådd av studien i 6.2.4. Det må poengteres at med lavere vinkel vil man få plass til langt flere forbindere, noe som igjen vil kompensere for langt lavere stivhet per forbinder.

Stivhet for knutepunkt i fagverk er ikke noe det ofte dimensjoneres etter, men det kan være verdt å merke seg at skråstilte skruer har en langt høyere teoretisk stivhet etter beregningsmetodene presentert under teorikapitlet.

## **11.4 Klimagassutslipp**

Sluttresultatet viste tydelig at fagverk i limtre har et vesentlig lavere primærenergibehov ved produksjon enn fagverket av konstruksjonsstål. Det sentrale fokuset på materialforbruk som har vært tilstede gjennom hele optimaliseringsprosessen har sikret et sammenlignbart resultat for de to fagverkstypene. Som antatt tidligere i oppgaven kan man observere at et økende materialforbruk medfører et større CO<sub>2</sub>-utslipp i produksjonsfasen.

Det har ikke blitt tatt hensyn til at stål kan ha lengre levetid enn limtre, og at det er muligheter for omsmelting av gammelt stål for å produsere nye bjelker av samme materiale. Disse to faktorene burde blitt tatt i betraktning ved et mer detaljert klimagassregnskap.

## **11.5 Kostnader**

Det har verken for fagverket i limtre eller i stål blitt tatt hensyn til vedlikeholdskostnader eller monteringskostnader. Som forventet viser regnearket at produksjon av fagverk i limtre er betraktelig dyrere, nesten dobbelt så dyrt som konkurrenten stål. I store prosjekter vil prisforskjellen utgjøre store verdier, og kan medføre at byggherre heller ønsker å benytte seg av stål. Det burde derfor forskes på om det er mulig med flere tiltak som kan bidra til billigere fagverk i limtre.

Siden det ikke har blitt beregnet på dybler og innslissede stålplater, kan man ikke konkludere med at en kostnadsreduksjon på 40 % stemmer ved bruk av selvborende skruer. Ved å sammenligne prisene på dybler og skruer fra SFS kan man observere at prisen er omtrent den samme, og man kan konkludere med at det skjer en kostnadsreduksjon grunnet at knutepunktene med skruer ikke behøver innslissede stålplater som også koster. Omtrent hvor stor kostnadsreduksjon det faktisk blir er vanskelig å si uten å beregne på nødvendig antall dybler og plater, men man kan anta at man behøver likt eller et høyere antall av dybler som skruer.

## 11.6 Mulige feilkilder

Alle kontroller er utført av FEM-design og håndberegninger ved hjelp av Mathcad. Oppgaven kan inneholde feilkilder som feil bruk av program eller andre menneskelige feil.

På grunn av forenklet håndberegninger av opptredende krefter oppstår det en liten differanse på beregningene mellom FEM-design og Mathcad. Dette er fordi de to programmene har beregnet med to forskjellige stivheter i knutepunktene. FEM-design har tatt hensyn til at knutepunktene er av typen blandet modell det vil si leddede staver med en ramme rundt for overgurt og undergurt. Håndberegningene har blitt forenklet til leddede knutepunkt slik at det ikke oppstår momentoverføring fra gurtene til stavene.

Omgjøringer fra en bjelke i FEM-design til to bjelker i Mathcad kan gi en liten feilkilde, men alle verdiene er dobbeltsjekket med de to programmene og de valgte tverrsnittene er innafor kravene. Utnyttelsesgraden i overgurten og undergurten blir også noe feil da beregningene av kreftene er forenklet. I realiteten vil det ikke oppstå lik utnyttelsesgrad for overgurt og undergurt for alle vinklene, men det vil oppstå her ved forenklete beregninger.

En annen feilkilde kan være misforståelse eller feiltolkning av litteratur i forhold til problemstilling samt feil i beregningene fra forskningsartiklene. Det er ikke gjort egne undersøkelser og tester på kapasitet og stivhet for knutepunktene. Eurokoden tar heller ikke hensyn til skråstilte skruer, og vil derfor være en feilkilde.

Pris på stålet er basert på erfaringer fra bestillinger av tidligere fagverk som er gjort av ÅF Engineering. Prisen på limtre er basert på gjennomsnittverdien av ulike tverrsnitt i limtre som er mulig å bestille. I realiteten vil prisen variere med noen kroner for hver meter. Både CO<sub>2</sub>-utslippene og prisverdien for limtre er basert på forenklinger fra Norsk Prisbok år 2017 og kan være en feilkilde.

## 12. Konklusjon

Arbeidet som er utført for denne bacheloroppgaven hadde som hovedmål å vurdere og forbedre konkurransedyktighet for bruk av limtre kontra stål i fagverk. Det ble satt fokus på materialforbruk, klimagassutslipp og totale kostnader ved produksjon og transport. For å sikre bedre kostnadseffektivitet ved produksjon, har en alternativ metode for montasje av knutepunkt i limtre blitt vurdert. Den nye knutepunktsløsningen tar utgangspunkt i Martinsonskonsernet sin patent med bruk av skråstilte skruer. Dette medfører at tidligere kompliserte løsninger med slissplater og bolter kan erstattes.

Ved valg av variabler ble vinkelen mellom gurtene og diagonalstavene den mest avgjørende for begge fagverkene. Det ble observert at små variasjoner i vinkel ga store utslag i stavenes indre krefter som igjen påvirket tverrsnittsstørrelsene. På grunn av stålets vekt- og styrke forhold, ble materialbehovet mindre enn halvparten av det nødvendige volumet til limtre ved optimal vinkel. Den gunstige CO<sub>2</sub>-ekvivalenten til limtre fører til at limtre allikevel ender opp med lavest klimagassutslipp i produksjonsfasen. Undersøkelsen av kostnadene viser at stål fortsatt er rimeligere enn limtre, men den viser også at kostnaden vil mest sannsynlig reduseres ved bruk av selvborende skruer i stedet for slissplate og dybler. Kravene for knutepunkt, med selvborende skråstilte skruer, blir ikke oppfylt for alle knutepunkt etter Eurokode 5, vil bli oppfylt etter alternativ metode.

For videre forskning kunne levetiden for de to materialtypene blitt grundigere undersøkt, og da spesielt med tanke på gjenbruk av materialet. Dette kan være en reduserende faktor for både pris og miljøutslipp for stål. I arbeidet med oppgaven kunne det også vært utført praktiske forsøk av knutepunktene i et laboratorium for å få egne tallverdier på kapasitet og stivhet. Dersom limtre skal bli konkurransedyktig på alle områder må kostnadene i produksjonsfasen minskes. Dette kan oppnås ved at produksjonen av limtre gjøres rimeligere eller ved forskning på muligheten for et sterkere materiale med redusert tverrsnittstørrelse.

Det har vært vanskelig å bedømme om de beregnede verdiene samsvarer med virkeligheten. Det er ikke blitt undersøkt om knutepunktene og fagverkene holder den gitte lasten. Det er heller ikke blitt utført forsøk i forskning med tilsvarende knutepunkt.

### **13. Videre studier**

Det finnes flere forskningsprosjekter som innebærer trekonstruksjoner og undersøkelser om det er mulig for å få øke konkurransedyktigheten til limtre. Det er en økende interesse for bruk av tre i bærende konstruksjoner, og generelt for liten kunnskap innen materialet.

Optimaliseringen for både fagverkene i stål og limtre kunne ha blitt undersøkt ytterligere ved å ha flere varierende faktorer som varierende vinkler for diagonalene og andre avstander mellom knutepunktene. Det kunne også blitt sammenlignet med fagverk med andre utforminger enn det som har blitt valgt i denne oppgaven.

For knutepunktene kunne det ha blitt utført forsøk i et laboratorium for å undersøke og analysere oppførselen til skråstilte, selvborende skruer i et slikt fagverk. Videre kunne det blitt sammenlignet med andre knutepunktsmetoder, både nye og gamle. For å kunne ha konkludert med Martinsons sitt utsagn angående kostnadsreduksjonen i sin patenterte modell med nye innovative knutepunkt burde det blitt beregnet på nødvendig antall forbindere etter gammel metode, enten bolter eller dybler og innslissede stålplater. Det hadde dannet et bedre sammenligningsgrunnlag for en eventuell kostnadsreduksjon for fagverk i limtre.

## 14. Kilder

1. Bell K. Dimensjonering av trekonstruksjoner. Bergen: Fagbokforl.; 2017.
2. Lindgren G, inventorKnutpunkt mellan konstruktionselement av trä samt fackverk. Sweden2013.
3. Martinsons. Svenskt patent på kostnadseffektiva fackverk 2015 [Available from: <https://www.martinsons.se/svenskt-patent-pa-kostnadseffektiva-fackverk/?fbclid=IwAR3odGzVEOINlGd2tGsFFCp3ij0MX6LRMQ9I4WYRylEgugKczuXP5t5BIjM>].
4. Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner = Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General common rules and rules for buildings : Del 1-1 : Allmenne regler og regler for bygninger. Lysaker: Standard Norge; 2010.
5. Tomasi R, Crosatti A, Piazza M. Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws. Construction and Building Materials. 2010;24(9):1560-71.
6. Bejtka I, Blass H, editors. Joints with inclined screws. Proceedings of: meeting thirty-five of the international council for building research studies and documentation, CIB, Working Commission W18–Timber Structure; 2002.
7. BlaB HJ, Bejtka I. Screws with continuous threads in timber connections. Joints in Timber Structures: Stuttgart, Germany, 12-14 September 2001. 2001:193.
8. A. K, editor Joints with inclined screws. Proceedings from meeting thirty-five of the international council for building research studies and documentation, CIB, Working Commission W18 – Timber Structure; 2002; Kyoto, Japan.
9. Opazo A, Bustos C, editors. Study of the lateral strength of timber joints with inclined self-tapping screws.
10. Ringhofer A, Brandner R, Schickhofer G. Withdrawal resistance of self-tapping screws in unidirectional and orthogonal layered timber products. Materials and structures. 2015;48(5):1435-47.
11. Pirnbacher G, editor Base parameters of self-tapping screws. International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18-Timber Structures, Meeting; 2009: .
12. Frese M, Fellmoser P, Blass HJ. Models for the calculation of the withdrawal capacity of self-tapping screws. European Journal of Wood and Wood Products. 2010;68(4):373-84.
13. Aicher S, Reinhardt HW, Garrecht H, Jockwer R, Steiger R, Frangi A. Fully Threaded Self-tapping Screws Subjected to Combined Axial and Lateral Loading with Different Load to Grain Angles. Dordrecht : . 1560-272 p.

14. Jockwer R, Steiger R, Frangi A, editors. Design model for inclined screws under varying load to grain angles. International network on timber engineering research, INTER/47-7-5, 1st INTER Meeting, A September, Bath, United Kingdom; 2014.
15. Sandaker BN, Vik B, Sandvik M. Materialkunnskap. Nynorsk utg. ed. Lillestrøm: Byggenæringens forl.; 2003.
16. Norsk treteknisk i, TreFokus. Fokus på tre. Oslo: TreFokus Treteknisk.
17. Edvardsen KI, Ramstad TØ. Trehus. [10. utg.]. ed. Oslo: SINTEF akademisk forl.; 2014.
18. Bell K, Liven H, Norske limtreprodusenters f. Limtreboka. Moelv: Norske limtreprodusenters forening; 2018.
19. Christensen N A-NA. Stål: Store Norske Leksikon; [updated 11. april 2019. Available from: <https://snl.no/st%C3%A5l>.
20. Smith P. Structural design of buildings. West Sussex, England: Wiley Blackwell; 2016.
21. Dietsch P, Brandner R. Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements—A state-of-the-art report. Construction and Building Materials. 2015;97:78-89.
22. Trenytt. Verdens høyeste trehus holdes sammen av WT-T-skruer2017. Available from: <http://trenytt.no/verdens-høyeste-trehus-holdes-sammen-av-wt-t-skruer>.
23. Irgens F. Fasthetslære. 6. utg. ed. Trondheim: Tapir; 1999.
24. Johansen KW. Theory of timber connections. 1949;9.
25. European Technical Assessment, (2018).
26. Standard N. Eurokode 1 : laster på konstruksjoner = Eurocode 1 : actions on structures. Part 1-4: General actions. Wind actions : Del 1-4 : Allmenne laster. Vindlaster. Lysaker: Standard Norge; 2009.
27. Larsen PK, Aune P. Konstruksjonsteknikk : laster og bæresystemer. Trondheim: Tapir akademisk forl.; 2004.
28. Norske limtreprodusenters f. Limtreboka : beregningseksempler. Moelv: Norske limtreprodusenters forening; 2018.
29. Norges s. Trekonstruksjoner : limtre : fasthetsklasser og bestemmelse av karakteristiske verdier = Timber structures : glued laminated timber : strength classes and determination of characteristic values. 1 utg. ed. Oslo: NSF; 1999.
30. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet Institutt for k. Stålkonstruksjoner : profiler og formler. 3. utg. ed. Trondheim: Tapir akademisk forl.; 2003.
31. Rothoblaas. WT Double thread connector. In: intec S, editor. Technical Data.



32. Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde 2006.
33. Metode for klimagassberegninger for bygninger. Lysaker: Standard Norge; 2018.
34. Regjeringen. Klimastrategi for 2030 – norsk omstilling i europeisk samarbeid. In: miljødepartementet K-o, editor. 2016-2017.
35. Miljøstatus. Kyotoprotokollen. In: Miljødepartementet K-o, editor. Miljøstatus.no 2017.
36. Foundation TNE. Environmental Product Declaration: The Norwegian EPD Foundation; [Available from: [www.epd-norge.no](http://www.epd-norge.no)].
37. Norsk prisbok 2017. Sandvika: Norconsult informasjonssystemer; 2017.

## **15. Vedleggsliste**

### **Vedlegg A: Artikkel**

### **Vedlegg B: Plakat**

### **Vedlegg C: Beregning av krefter**

#### C.1 Beregning av opptredende krefter

### **Vedlegg D: Beregninger av limtrefagverk**

#### D.1 Verdier

#### D.2 Tverrsnitt

#### D.3 Materialelegenskaper

#### D.4 Bruddgrensetilstand

#### D.5 Brukgrensetilstand Brukgrensekontroll

#### D.6 Oppsummering av kontroller

### **Vedlegg E: Beregning av kapasitet – skråstilt skrue**

#### E.1 Egenskaper og variabler

#### E.2 Dimensjoneringsverdier etter EK 5 og ETA

#### E.3 Kapasitetsberegning etter EK 5

#### E.4 Kapasitetsberegning etter alternativ metode

#### E.5 Kontroll av splitting av gurtene

#### E.6 Stivhetsberegning

### **Vedlegg F: Beregning av kapasitet - vinkelrett skrue**

#### F.1 Egenskaper og variabler

#### F.2 Dimensjoneringsverdier etter EK 5 og ETA

#### F.3 Kapasitetsberegning etter EK 5

#### F.4 Kapasitetsberegning etter alternativ metode

#### F.5 Kontroll av splitting av gurtene

#### F.6 Stivhetsberegning

## **Vedlegg G: Beregning av stålfagverk**

G.1 Verdier

G.2 Tverrsnittsdata

G.3 Tverrsnittsklassifisering

G.4 Bruddgrensekontroll

G.5 Bruksgrensekontroll

## **Vedlegg H: Sammenligning stål og tre**

H.1 Sammenligning av opptredende krefter

H.2 Minste mulig tverrsnitt for limtrefagverk

H.3 Beregninger og sammenligning av volum for limtrefagverk

H.4 Sammenligninger av limtrefagverk

H.5 Sammenligning av valg av tverrsnitt FEM-Design/Mathcad for limtrefagverk

H.6 Minste mulig tverrsnitt for stålfagverk

H.7 Sammenligning av stålfagverk

H.8 Sammenligning av utslipp og pris i produktfasen for limtre og stål

## **Vedlegg I: Relevant korrespondanse**

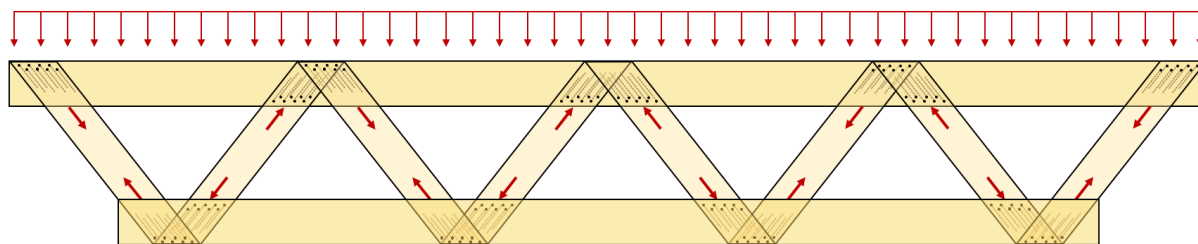
I.1 Mail fra Moelven



## **Vedlegg A: Artikkel**



# Nye knutepunkt i limtre utfordrer stål som byggematerialet



*Fagverk med innovative knutepunkt av selv borende skråstilte skruer*

En innovativ utnyttelse av skråstilte skruers gode kapasiteter forenkler bruken av limtre i fagverkskonstruksjoner. Ved hjelp av optimalisering av fagverket og ny metode for knutepunktene synker produksjonskostnadene for limtre og sikrer dermed bedre konkurransedyktighet mot stål.

## Limtre som byggematerialet

Med miljø i fokus har limtre klare fordeler. Det har blant annet lave utslipp av klimagasser under produksjon og skaper et godt inneklima. Trevirke har høy styrke i forhold til vekt, men massive tverrsnitt skaper allikevel et høyt materialbehov. Fremstillingen av limtre er i dag mer kostbar enn produksjonen av stål og resulterer i dyrere konstruksjoner. Fiberretningen i treet gir store variasjoner i styrke avhengig av belastning. I fagverk har dette medført kompliserte knutepunkt. Estetisk er limtre penere å se på enn stål og dermed et ettertraktet valg der den bærende konstruksjonen skal være synlig.

## Sammenligningsgrunnlag

Det er utviklet en felles fagverksmodell som skal gi et godt grunnlag for

sammenligning av de to materialene; stål og limtre. Faste verdier som spennvidde og antall diagonalstaver reduserer antall variabler. En vinkel på 50 grader viste seg å gi best utnyttelse av begge materialene med grense på 80 %. Ved optimalisering av hvert enkelt tverrsnitt er materialbehovet redusert til et minimum.

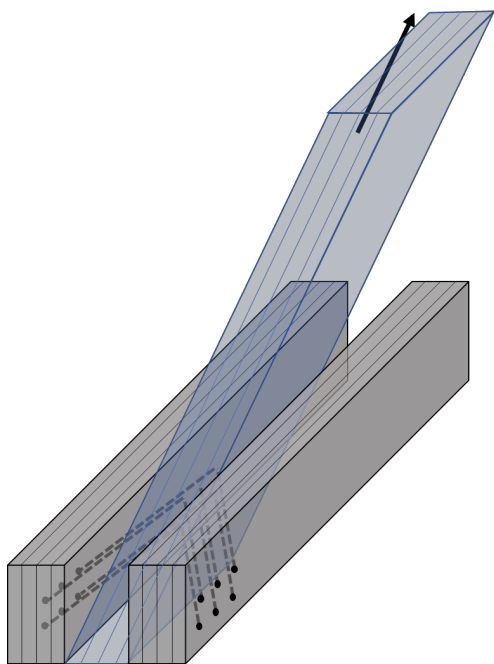
## Materialbehov

Tverrsnittene av limtre er massive og øker materialbehovet betraktelig sammenlignet med stål. Selv ved foretatt optimalisering vil limtre kreve en materialmengde omkring 18 ganger større enn den nødvendige mengden stål.

## Innovative knutepunkt

Martinsonskonsernet har utviklet en ny metode av sammenføring av

limtrebjelker. Metoden baserer seg på selvborende skruer, WT-T, som skal danne en vinkel på fiberretningen. De skråstilte skruene har høyere bøye- og torsjonskapasitet, motstand mot uttrekking og gjennomtrekking, stivhet og oppnår raskt god heft til trevirket. Utfordringene med WT-T skruer er at Eurokode 5 baserer seg på skruer som ikke er skråstilte.



*Utforming av knutepunktet*

### **Miljø eller kostnad?**

Stål har fortsatt mest gunstig pris ved produksjon. Tatt volumdifferansen i betraktning utgjør det store forskjeller i de materielle kostnadene. Miljøfokus i bransjen gir limtre en fordel da det uavhengig av materialbehovet vil ha vesentlig lavere utslipp ved fremstilling. Det blir derfor opp til byggherre om vedkommende ønsker å prioritere reduisering av utslipp eller kostnad. Den totale kostnaden vil reduseres ved bruk av skruer i stedet for slissplater og dybler. Dette bidrar til å styrke konkurransegrunnlaget og gjør det lettere å velge limtre.

### **Konkurranseedyktighet for fagverk i limtre**

Limtre stiller fortsatt svakere på flere områder og må utbedres for å komme på lik linje med stål. Det er spesielt kostnadene som gjør at limtrefagverk fortsatt blir utkonkurrert av stål, og det må til andre løsninger som kan bidra til å redusere kostnadene.



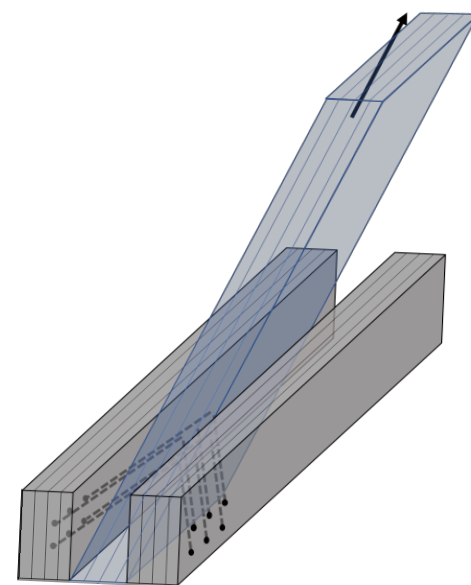
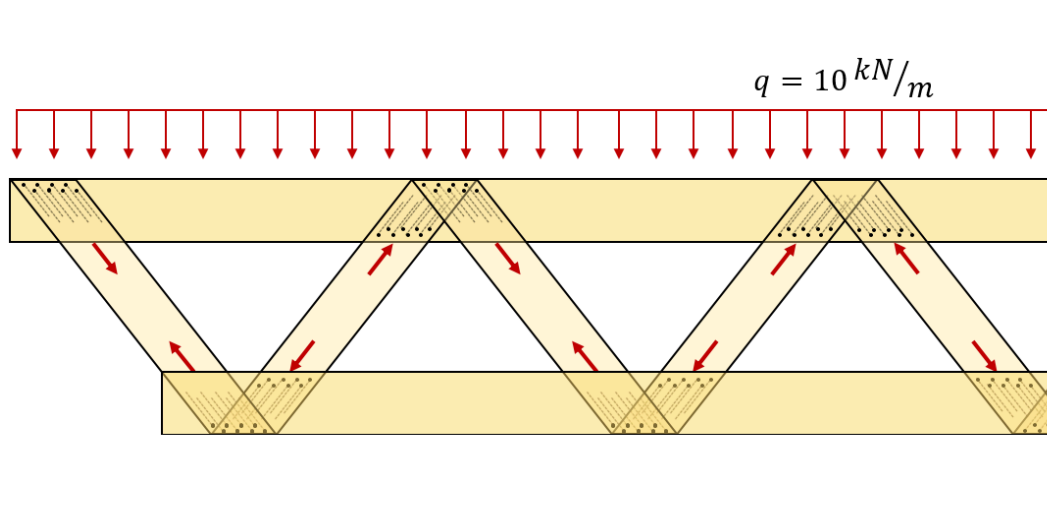
## **Vedlegg B: Plakat**



# Anvendelse av innovative knutepunkt i limtrefagverk for å øke konkurransedyktigheten mot fagverk i stål

Application of innovative connections in glulam truss to increase the competitiveness against trusses of steel

Prosjektnr 2019-09 | Studenter: Stine S. Rennan, Henriette S. H. Strehl, Guttorm K. Selnes  
Intern veileder: Per Otto Yttervoll | Ekstern kontakt: Øyvind Bones, ÅF Engineering



Målet med oppgaven er å øke konkurransedyktigheten til fagverk i limtre. Det økende fokuset på miljø har gjort det ønskelig å benytte seg av limtre i større grad, men materialbehovet og kostnadene gjør stål mer gunstig.

Nye innovative knutepunkt med selvborende skråstilte skruer, WT-T, skal gi et bedre konkurransegrunnlag for limtre. Det er blitt foretatt en vurdering av den nye løsningen med fokus på kapasitet, materialreduksjon og produksjonskostnader. WT-T skruer har generelt høyere bøy- og torsjonskapasitet, motstand mot uttrekking og gjennomtrekking og kan gi god stivhet.

Resultatene viser at limtre gir lavere klimagassutslipp. For at limtre skal kunne være konkurransedyktig på pris er man avhengige av at knutepunktene gir den antatte kostnadsreduksjonen på 40 %. Det store materialbehovet gir i tillegg et behov for mer kostnadseffektiv produksjon av limtre.

## Sammenligningsgrunnlag

- Materialforbruk
- Kostnader
- Miljøpåvirkning
- Produksjon

Sammenligning av faktorer for limtre og stål

	Limtre	Stål
Utslipp	0.2 CO <sub>2</sub> eq./kg	1.7 CO <sub>2</sub> eq./kg
Kostnad	40 kr/ kg	37 kr/ kg
Materialbehov	6.245 m <sup>3</sup>	0.242 m <sup>3</sup>



Selvboende skrue WT-T



## **Vedlegg C: Beregninger av krefter**



## C. Beregning av krefter

### C.1 Beregning av opptredende krefter

#### C.1.1 Generelt

$$EI := 1$$

$$n := 6$$

$$v := 50 \text{ deg}$$

$$q := 10 \frac{kN}{m}$$

$$L := 5 \text{ m}$$

#### C.1.2 Beregning av moment i overgurt

Fastholdningsvektor (Alle elementene får lik fastholdningsvektor)

$$S_0 := \begin{bmatrix} -\frac{q \cdot L^2}{12} \\ \frac{q \cdot L^2}{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20.833 \\ 20.833 \end{bmatrix} kN \cdot m$$

$$R := \begin{bmatrix} S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ -S_{0_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20.833 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -20.833 \end{bmatrix} kN \cdot m$$

$$k_e := \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}$$

$$K_1 := \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 4 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad K_2 := \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_3 := \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad K_4 := \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_5 := \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad K_6 := \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 4 \end{bmatrix}$$

$$K1 := K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6$$

$$r := K1^{-1} \cdot R = \begin{bmatrix} 3.005 \cdot 10^4 \\ -8.013 \cdot 10^3 \\ 2.003 \cdot 10^3 \\ -1.137 \cdot 10^{-13} \\ -2.003 \cdot 10^3 \\ 8.013 \cdot 10^3 \\ -3.005 \cdot 10^4 \end{bmatrix} \frac{\textcolor{blue}{kg} \cdot \textcolor{blue}{m}^3}{\textcolor{blue}{s}^2}$$

$$K := \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix} \quad \text{Gjelder for hvert element}$$



Elementkrefter [kNm]:

$$S1 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.638 \cdot 10^{-15} \\ 26.442 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$S2 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -26.442 \\ 19.231 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$S3 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -19.231 \\ 21.635 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$S4 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -21.635 \\ 19.231 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$S5 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_4 \\ r_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -19.231 \\ 26.442 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$S6 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_5 \\ r_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -26.442 \\ -3.638 \cdot 10^{-15} \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed,max} := \max(S1, S2, S3, S4, S5, S6) = 26.442 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed.B.1} := M_{Ed,max}$$

$$M_{Ed.B.1.2} := \max(S2) = 19.231 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed.B.1.3} := \max(S3) = 21.635 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Ed.B.2} := 1.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### C.1.3 Beregning av skjærkrefter

Benytter samme stivhetsmatrise som ved beregning av moment

Fastholdningsvektor (Alle er like)

$$S_0 := \begin{bmatrix} -\frac{q \cdot L}{2} \\ \frac{q \cdot L}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -25 \\ 25 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$R := \begin{bmatrix} S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ S_{0_1} - S_{0_1} \\ -S_{0_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -25 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$r := K1^{-1} \cdot R = \begin{bmatrix} 3.606 \cdot 10^4 \\ -9.615 \cdot 10^3 \\ 2.404 \cdot 10^3 \\ -1.137 \cdot 10^{-13} \\ -2.404 \cdot 10^3 \\ 9.615 \cdot 10^3 \\ -3.606 \cdot 10^4 \end{bmatrix} \text{ J}$$

$$K := \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix} \quad \text{Gjelder for hvert element}$$

Elementkrefter [kNm]:

$$S1 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.638 \cdot 10^{-15} \\ 31.731 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$S2 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -31.731 \\ 23.077 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$S3 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -23.077 \\ 25.962 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$S4 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -25.962 \\ 23.077 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$S5 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_4 \\ r_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -23.077 \\ 31.731 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$S6 := S_0 + K \cdot \begin{bmatrix} r_5 \\ r_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -31.731 \\ -3.638 \cdot 10^{-15} \end{bmatrix} \text{ kN}$$

$$V_{Ed.max} := \max(S1, S2, S3, S4, S5, S6) = 31.731 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.B.1} := V_{Ed.max} = 31.731 \text{ kN}$$

### C.1.4 Beregninger av aksialkrefter

Opplagerkrefter

$$L := 30000 \text{ mm}$$

$$R_1 := \frac{L}{2 \cdot n} \cdot q = 25 \text{ kN}$$

$$R_2 := \frac{L}{n} \cdot q = 50 \text{ kN}$$

$$A_z := \frac{q \cdot L}{2} = 150 \text{ kN}$$

B.1.1 og D.1

$$D_1 := \frac{A_z - R_1}{\sin(v)} = 163.176 \text{ kN}$$

$$B_{1.1} := -D_1 \cdot \cos(v) = -104.887 \text{ kN}$$

B.2.1 og D.2

$$D_2 := -D_1 = -163.176 \text{ kN}$$

$$B_{2.1} := D_1 \cdot \cos(v) - D_2 \cdot \cos(v) = 209.775 \text{ kN}$$

B.1.2 og D.3

$$D_3 := \frac{-(R_2 + D_2 \cdot \sin(v))}{\sin(v)} = 97.906 \text{ kN}$$

$$B_{1.2} := B_{1.1} - D_3 \cdot \cos(v) + D_2 \cdot \cos(v) = -272.707 \text{ kN}$$

B.2.2 og D4

$$D_4 := -D_3 = -97.906 \text{ kN}$$

$$B_{2.2} := -D_4 \cdot \cos(v) + D_3 \cdot \cos(v) + B_{2.1} = 335.64 \text{ kN}$$

B.1.3 og D.5

$$D_5 := \frac{-(R_2 + D_4 \cdot \sin(v))}{\sin(v)} = 32.635 \text{ kN}$$

$$B_{1.3} := B_{1.2} - D_5 \cdot \cos(v) + D_4 \cdot \cos(v) = -356.617 \text{ kN}$$

B.2.3 og D6

$$D_6 := -D_5 = -32.635 \text{ kN}$$

$$B_{2.3} := -D_6 \cdot \cos(v) + D_5 \cdot \cos(v) + B_{2.2} = 377.595 \text{ kN}$$

B.1.4 og D.7

$$D_7 := \frac{-(R_2 + D_6 \cdot \sin(v))}{\sin(v)} = -32.635 \text{ kN}$$

$$B_{1.4} := B_{1.3} - D_7 \cdot \cos(v) + D_6 \cdot \cos(v) = -356.617 \text{ kN}$$

Symmetri gir følgende:

$$B_{1.6} := B_{1.1} = -104.887 \text{ kN}$$

$$B_{1.5} := B_{1.2} = -272.707 \text{ kN}$$

$$B_{1.4} := B_{1.3} = -356.617 \text{ kN}$$

$$B_{2.6} := B_{2.1} = 209.775 \text{ kN}$$

$$B_{2.5} := B_{2.2} = 335.64 \text{ kN}$$

$$B_{2.4} := B_{2.3} = 377.595 \text{ kN}$$

$$T_7 := D_6 = -32.635 \text{ kN}$$

$$T_8 := D_5 = 32.635 \text{ kN}$$

$$T_9 := D_4 = -97.906 \text{ kN}$$

$$T_{10} := D_3 = 97.906 \text{ kN}$$

$$T_{11} := D_2 = -163.176 \text{ kN}$$

$$T_{12} := D_1 = 163.176 \text{ kN}$$

Dimensjonerende staver

$$N_{Ed.trykk} := \min(D_2, D_4, D_6) = -163.176 \text{ kN}$$

$$N_{Ed.strekk} := \max(D_1, D_1, D_1) = 163.176 \text{ kN}$$

$$N_{Ed.B.1} := \min(B_{1.1}, B_{1.2}, B_{1.3}) = -356.617 \text{ kN}$$

$$N_{Ed.B.2} := \max(B_{2.1}, B_{2.2}, B_{2.3}) = 377.595 \text{ kN}$$

$$N_{Ed.B.1.1} := B_{1.1} = -104.887 \text{ kN}$$

$$N_{Ed.B.1.2} := B_{1.2} = -272.707 \text{ kN}$$

$$N_{Ed.B.1.3} := B_{1.3} = -356.617 \text{ kN}$$

### C.1.5 Beregning av krefter med enhetslast

Enhetslast i midten

$$P := 1 \text{ kN}$$

$$A_z := \frac{P}{2} = 500 \text{ N}$$

B.1.1 og D.1

$$D.V_1 := \frac{A_z}{\sin(v)} = 0.653 \text{ kN}$$

$$B.V_{1,1} := -D.V_1 \cdot \cos(v) = -0.42 \text{ kN}$$

B.2.1 og D.2

$$D.V_2 := -D.V_1 = -0.653 \text{ kN}$$

$$B.V_{2,1} := D.V_1 \cdot \cos(v) - D.V_2 \cdot \cos(v) = 0.839 \text{ kN}$$

B.1.2 og D.3

$$D.V_3 := \frac{-(D.V_2 \cdot \sin(v))}{\sin(v)} = 0.653 \text{ kN}$$

$$B.V_{1,2} := B.V_{1,1} - D.V_3 \cdot \cos(v) + D.V_2 \cdot \cos(v) = -1.259 \text{ kN}$$

B.2.2 og D4

$$D.V_4 := -D.V_3 = -0.653 \text{ kN}$$

$$B.V_{2,2} := -D.V_4 \cdot \cos(v) + D.V_3 \cdot \cos(v) + B.V_{2,1} = 1.678 \text{ kN}$$

B.1.3 og D.5

$$D.V_5 := \frac{-(D.V_4 \cdot \sin(v))}{\sin(v)} = 0.653 \text{ kN}$$

$$B.V_{1.3} := B.V_{1.2} - D.V_5 \cdot \cos(v) + D.V_4 \cdot \cos(v) = -2.098 \text{ kN}$$

B.2.3 og D6

$$D.V_6 := -D.V_5 = -0.653 \text{ kN}$$

$$B.V_{2.3} := -D.V_6 \cdot \cos(v) + D.V_5 \cdot \cos(v) + B.V_{2.2} = 2.517 \text{ kN}$$

Symmetri gir følgende:

$$B.V_{1.6} := B.V_{1.1} = -0.42 \text{ kN}$$

$$B.V_{1.5} := B.V_{1.2} = -1.259 \text{ kN}$$

$$B.V_{1.4} := B.V_{1.3} = -2.098 \text{ kN}$$

$$B.V_{2.6} := B.V_{2.1} = 0.839 \text{ kN}$$

$$B.V_{2.5} := B.V_{2.2} = 1.678 \text{ kN}$$

$$B.V_{2.4} := B.V_{2.3} = 2.517 \text{ kN}$$

$$D.V_{12} := D.V_1 = 0.653 \text{ kN}$$

$$D.V_{11} := D.V_2 = -0.653 \text{ kN}$$

$$D.V_{10} := D.V_3 = 0.653 \text{ kN}$$

$$D.V_9 := D.V_4 = -0.653 \text{ kN}$$

$$D.V_8 := D.V_5 = 0.653 \text{ kN}$$

$$D.V_7 := D.V_6 = -0.653 \text{ kN}$$



### C.1.6 Dimensjonerende krefter

Overgurt:

$$M_{Ed.B.1} = 26.442 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{Ed.B.1} = 31.731 \text{ kN}$$

$$N_{Ed.B.1} = -356.617 \text{ kN}$$

Undergurt:

$$N_{Ed.B.2} = 377.595 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.B.2} := 0.344 \text{ kN}$$

$$M_{Ed.B.2} := 1.82 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Diagonalstaver:

$$N_{Ed.trykk} = -163.176 \text{ kN}$$

$$N_{Ed.strekk} = 163.176 \text{ kN}$$

Dimensjonerende krefter i forbindelsene (fra FEM-Design)

$$F_{Ed} := 170 \text{ kN}$$



## **Vedlegg D: Beregninger av limtrefagverk**



## D. Beregninger av limtrefagverk

### D.1 Verdier

#### D.1.1 Forutsetninger og antagelser

Limtrekvalitet: **GL30C**

Forbindelser: SFS Selvborende skruer WT-T

Klimaklasse: 1

Overslag last:  $q = 10 \text{ kN/m}$

#### Fagverkets geometri

$L := 30000 \text{ mm}$  Totalt spenn

$v := 50 \text{ deg}$  Vinkel mellom gurt og diagonalstaver

$n := 6$  Antall staver

$L_B := \frac{L}{n} = 5 \text{ m}$  Horisontal senteravstand mellom knutepunktene

$L_D := \frac{0.5 \cdot L_B}{\cos(v)} = 3.9 \text{ m}$  Lengde diagonalstaver

**Partialfaktor**  $\gamma_M := 1.15$

#### D.1.2 Dimensjoner

$b_{B,1} := 140 \text{ mm}$  Bredde tverrsnitt overgurt

$h_{B,1} := 315 \text{ mm}$  Høyde tverrsnitt overgurt

$b_{B,2} := 140 \text{ mm}$  Bredde tverrsnitt undergurt

$h_{B,2} := 405 \text{ mm}$  Høyde tverrsnitt undergurt

$b_D := 140 \text{ mm}$  Diagonaler (lik bredde)

$h_{D,1} := 135 \text{ mm}$  D1 og D12

$h_{D,4} := 225 \text{ mm}$  D4 og D9

$h_{D,2} := 315 \text{ mm}$  D2 og D11

$h_{D,5} := 90 \text{ mm}$  D5 og D8

$h_{D,3} := 90 \text{ mm}$  D3 og D10

$h_{D,6} := 135 \text{ mm}$  D6 og D7

## D.2 Tverrsnitt

### D.2.1 Tverrsnittsdata for overgurt

$$b_{B.1} = 140 \text{ mm}$$

$$h_{B.1} = 315 \text{ mm}$$

$$A_{B.1} := 2 \cdot b_{B.1} \cdot h_{B.1} = (8.82 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

Tverrsnittsverdier om y-akse

$$I_{y.B.1} := 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot b_{B.1} \cdot h_{B.1}^3 = (7.293 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$W_{y.B.1} := \frac{I_{y.B.1}}{h_{B.1} \cdot 0.5} = (4.631 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

$$i_{y.B.1} := \sqrt{\frac{I_{y.B.1}}{A_{B.1}}} = 90.933 \text{ mm}$$

$$\lambda_{y.B.1} := \frac{L_B}{i_{y.B.1}} = 54.986$$

Tverrsnittsverdier om z-akse

$$I_{z.B.1} := \left( \frac{1}{12} \cdot b_{B.1}^3 \cdot h_{B.1} + b_{B.1} \cdot h_{B.1} \cdot \left( \frac{b_{B.1}}{2} + \frac{b_{B.1}}{2} \right)^2 \right) \cdot 2 = 0.002 \text{ m}^4$$

$$W_{z.B.1} := \frac{I_{z.B.1}}{0.5 \cdot b_{B.1} + 0.5 \cdot b_{B.1}} = (1.691 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

$$i_{z.B.1} := \sqrt{\frac{I_{z.B.1}}{A_{B.1}}} = 0.164 \text{ m}$$

$$\lambda_{z.B.1} := \frac{L_B}{i_{z.B.1}} = 30.523$$

$$I_{T.B.1} := \left( \frac{1}{3} \cdot h_{B.1} \cdot b_{B.1}^3 \left( 1 - 0.63 \cdot \frac{b_{B.1}}{h_{B.1}} \right) \right) = (2.074 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

### D.2.2 Tverrsnittsdata for undergurt

$$b_{B.2} = 140 \text{ mm}$$

$$h_{B.2} = 405 \text{ mm}$$

$$A_{B.2} := 2 \cdot b_{B.2} \cdot h_{B.2} = (1.134 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

Tverrsnittsverdier om y-akse

$$I_{y.B.2} := 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot b_{B.2} \cdot h_{B.2}^3 = (1.55 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

$$W_{y.B.2} := \frac{I_{y.B.2}}{0.5 \cdot h_{B.2}} = (7.655 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

$$i_{y.B.2} := \sqrt{\frac{I_{y.B.2}}{A_{B.2}}} = 0.117 \text{ m}$$

$$\lambda_{y.B.2} := \frac{L_B}{i_{y.B.2}} = 42.767$$

Tverrsnittsverdier om z-akse

$$I_{z.B.2} := \left( \frac{1}{12} \cdot b_{B.2}^3 \cdot h_{B.2} + b_{B.2} \cdot h_{B.2} \cdot \left( \frac{b_{B.2}}{2} + \frac{b_{B.2}}{2} \right)^2 \right) \cdot 2 = (2.408 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

$$W_{z.B.2} := \frac{I_{z.B.2}}{0.5 \cdot b_{B.2} + 0.5 \cdot b_{B.2}} = (1.72 \cdot 10^7) \text{ mm}^3$$

$$i_{z.B.2} := \sqrt{\frac{I_{z.B.2}}{A_{B.2}}} = 145.717 \text{ mm}$$

$$\lambda_{z.B.2} := \frac{L_B}{i_{z.B.2}} = 34.313$$

$$I_{T.B.2} := \left( \frac{1}{3} \cdot h_{B.2} \cdot b_{B.2}^3 \left( 1 - 0.63 \cdot \frac{b_{B.2}}{h_{B.2}} \right) \right) = (2.898 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

### D.2.3 Areal av diagonalstaver

$$A_{D1} := b_D \cdot h_{D.1} = 0.019 \text{ m}^2$$

$$A_{D2} := b_D \cdot h_{D.2} = 0.044 \text{ m}^2$$

$$A_{D3} := b_D \cdot h_{D.3} = 0.013 \text{ m}^2$$

$$A_{D4} := b_D \cdot h_{D.4} = 0.032 \text{ m}^2$$

$$A_{D5} := b_D \cdot h_{D.5} = 0.013 \text{ m}^2$$

$$A_{D6} := b_D \cdot h_{D.6} = 0.019 \text{ m}^2$$



#### D.2.4 Tverrsnittsdata for ytterste trykkdiagonal

$$b_D = 140 \text{ mm}$$

$$h_{D.2} = 315 \text{ mm}$$

$$A_D := b_D \cdot h_{D.2} = (4.41 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

$$L_D := \frac{L}{2 \cdot n} \cdot \frac{1}{\cos(v)} = 3.889 \text{ m}$$

Tverrsnittsverdier om y-akse

$$W_{y.D.2} := \frac{1}{6} \cdot b_D \cdot h_{D.2}^2 = (2.315 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

$$I_{y.D.2} := \frac{1}{12} \cdot b_D \cdot h_{D.2}^3 = (3.647 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$i_{y.D.2} := \frac{h_{D.2}}{\sqrt{12}} = 90.933 \text{ mm}$$

$$\lambda_{y.D.2} := \frac{L_D}{i_{y.D.2}} = 42.771$$

Tverrsnittsverdier om z-akse

$$W_{z.D.2} := \frac{1}{6} \cdot b_D^2 \cdot h_{D.2} = (1.029 \cdot 10^6) \text{ mm}^3$$

$$I_{z.D.2} := \frac{1}{12} \cdot b_D^3 \cdot h_{D.2} = (7.203 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

$$i_{z.D.2} := \frac{b_D}{\sqrt{12}} = 40.415 \text{ mm}$$

$$\lambda_{z.D.2} := \frac{L_D}{i_{z.D.2}} = 96.235$$

$$I_{T.D.2} := \frac{1}{3} \cdot h_{D.2} \cdot b_D^3 \left( 1 - 0.63 \cdot \frac{b_D}{h_{D.2}} \right) = (2.074 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

## D.2.5 Tverrsnittsdata for trykkdiagonal i midten

$$b_D = 140 \text{ mm}$$

$$h_{D.6} = 135 \text{ mm}$$

$$A_{D6} = 0.019 \text{ m}^2$$

$$L_D = 3.889 \text{ m}$$

Tverrsnittsverdier om y-akse

$$W_{y.D6} := \frac{1}{6} \cdot b_D \cdot h_{D.6}^2 = (4.253 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

$$I_{y.D6} := \frac{1}{12} \cdot b_D \cdot h_{D.6}^3 = (2.87 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

$$i_{y.D.6} := \frac{h_{D.6}}{\sqrt{12}} = 38.971 \text{ mm}$$

$$\lambda_{y.D.6} := \frac{L_D}{i_{y.D.6}} = 99.8$$

Tverrsnittsverdier om z-akse

$$W_{z.D.6} := \frac{1}{6} \cdot b_D^2 \cdot h_{D.6} = (4.41 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

$$I_{z.D.6} := \frac{1}{12} \cdot b_D^3 \cdot h_{D.6} = (3.087 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

$$i_{z.D.6} := \frac{b_D}{\sqrt{12}} = 40.415 \text{ mm}$$

$$\lambda_{z.D.6} := \frac{L_D}{i_{z.D.6}} = 96.235$$

$$I_{T.D.6} := \frac{1}{3} \cdot h_{D.6} \cdot b_D^3 \left( 1 - 0.63 \cdot \frac{b_D}{h_{D.6}} \right) = (4.281 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

## D.3 Materialelegenskaper

### D.3.1 Karakteristiske verdier

Karakteristiske verdier NS 14080

$$f_{m.k} := 30 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Bøyning parallelt med fibre}$$

$$f_{c.0.k} := 24.5 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Trykk parallelt med fibre}$$

$$f_{c.90.k} := 2.5 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Trykk vinkelrett mot fibre}$$

$$f_{t.0.k} := 19.5 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Strekk parallelt}$$

$$f_{t.90.k} := 0.5 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Strekk vinkelrett}$$

$$E_{0.05} := 10800 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Elastitetsmodul}$$

$$G_{0.05} := 540 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Skjærsmodul}$$

$$\rho_k := 3.82 \frac{kN}{mm^3} \quad \text{Densitet}$$

$$f_{v.k} := 3.50 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Skjær}$$

### D.3.2 Dimensjonerende verdier

$$k_{mod} := 0.70 \quad \text{Langtidslast Tabell 3.1}$$

$$k_{h.y} := \min \left( \left( \frac{600 \text{ mm}}{h_{D.1}} \right)^{0.1}, 1.1 \right) = 1.1$$

$$k_{h.z} := \min \left( \left( \frac{600 \text{ mm}}{b_D} \right)^{0.1}, 1.1 \right) = 1.1$$

$$k_{h.y.B.1} := \min \left( \left( \frac{600 \text{ mm}}{h_{B.1}} \right)^{0.1}, 1.1 \right) = 1.067$$

$$k_{h.z.B.1} := \min \left( \left( \frac{600 \text{ mm}}{b_{B.1}} \right)^{0.1}, 1.1 \right) = 1.1$$

$$k_{h.y.B.2} := \min \left( \left( \frac{600 \text{ mm}}{h_{B.2}} \right)^{0.1}, 1.1 \right) = 1.04$$

$$k_{h.z.B.2} := \min \left( \left( \frac{600 \text{ mm}}{b_{B.2}} \right)^{0.1}, 1.1 \right) = 1.1$$

$$f_{m.y.d} := \frac{f_{m.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{h.y} = 20.087 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{m.y.d.B.1} := \frac{f_{m.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{h.y.B.1} = 19.476 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{m.y.d.B.2} := \frac{f_{m.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{h.y.B.2} = 18.993 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{m.z.d} := \frac{f_{m.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{h.z} = 20.087 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{m.z.d.B.1} := \frac{f_{m.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{h.z.B.1} = 20.087 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{m.z.d.B.2} := \frac{f_{m.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{h.z.B.2} = 20.087 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{t.0.d} := \frac{f_{t.0.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{h.y} = 13.057 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{c.0.d} := \frac{f_{c.0.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 14.913 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{c.90.d} := \frac{f_{c.90.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 1.522 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$f_{v.d} := \frac{f_{v.k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} = 2.13 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

## D.4 Bruddgrensetilstand

### D.4.1 Kontroll av fagverkets overgurt

#### 6.1.4 Aksialt trykk

$$\sigma_{c.0.d.B.1} := \frac{-N_{Ed.B.1}}{A_{B.1}} = 4.043 \frac{N}{mm^2}$$

$$(6.2) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.B.1}}{f_{c.0.d}} = 0.271 < 1.0 \text{ OK.}$$

#### 6.2.4 Kombinert bøyning og aksialt trykk

Verste kombinasjonen er på element 2. Dobbeltsjekk denne ved endring av vinkel

$$\sigma_{m.y.d.B.1.2} := \frac{M_{Ed.B.1}}{W_{y.B.1}} = 5.71 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{m.z.d} := 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c.0.d.B.1.2} := \frac{-N_{Ed.B.1.1}}{A_{B.1}} = 1.189 \frac{N}{mm^2}$$

$$(6.1.6) \quad k_M := 0.7$$

Kontroll:

$$(6.19) \quad \left( \frac{\sigma_{c.0.d.B.1.2}}{f_{c.0.d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.2}}{f_{m.y.d.B.1}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.1}} = 0.3 < 1.0 \text{ OK.}$$

$$(6.20) \quad \left( \frac{\sigma_{c.0.d.B.1.2}}{f_{c.0.d}} \right)^2 + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.2}}{f_{m.y.d.B.1}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.1}} = 0.212 < 1.0 \text{ OK.}$$

### 6.1.7 Skjærkontroll

$$k_{cr} := 0.67$$

$$\tau_{d.B.1} := \frac{3 \cdot V_{Ed.B.1}}{2 \cdot k_{cr} \cdot b_{B.1} \cdot h_{B.1}} = 1.611 \frac{N}{mm^2}$$

$$(6.13) \quad \frac{\tau_{d.B.1}}{f_{v.d}} = 0.756 \quad < 1.0 \text{ OK}$$

### 6.3.2 Knekking av overgurt utsatt for trykk

Verste kombinasjon ligger på element 3. Dobbeltsjekk denne ved endring av vinkel.

$$\sigma_{m.y.d.B.1.3} := \frac{M_{Ed.B.1.3}}{W_{y.B.1}} = 4.672 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{m.z.d} := 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{c.0.d.B.1.3} := \frac{-N_{Ed.B.1.2}}{A_{B.1}} = 3.092 \frac{N}{mm^2}$$

For knekking om y-aksen antas  $L_{ky} := L_B = 5 \text{ m}$

$$(6.21) \quad \lambda_{rel.y} := \frac{\lambda_{y.B.1}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.0.k}}{E_{0.05}}} = 0.834$$

$$(6.29) \quad \beta_c := 0.1 \quad (\text{Limtre})$$

$$(6.27) \quad k_y := 0.5 \left[ 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.y} - 0.3) + (\lambda_{rel.y})^2 \right] = [0.874]$$

$$(6.25) \quad k_{c.y.B.1} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel.y}^2}} = [0.879]$$

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.B.1.3}}{k_{c.y.B.1} \cdot f_{c.0.d}} + \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.3}}{f_{m.y.d.B.1}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.1}} = [0.476] \quad < 1.0 \text{ OK.}$$

Knekking om z-aksen

$$(6.22) \quad \lambda_{rel.z} := \frac{\lambda_{z.B.1}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.0.k}}{E_{0.05}}} = 0.463$$

$$(6.29) \quad \beta_c := 0.1 \quad (\text{Limtre})$$

$$(6.28) \quad k_z := 0.5 \left[ 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.z} - 0.3) + (\lambda_{rel.z})^2 \right] = [0.615]$$

$$(6.26) \quad k_{c.z.B.1} := \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel.z}^2}} = [0.98]$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.B.1.3}}{k_{c.z.B.1} \cdot f_{c.0.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.3}}{f_{m.y.d.B.1}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.1}} = [0.38] \quad < 1.0 \text{ OK.}$$

### 6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

$$L_B = 5 \text{ m} \quad (\text{Tabell 6.1})$$

$$L_{ef} := \sqrt{\frac{8 \cdot L_B^2}{24}} + 2 \cdot h_{B.1} = 3.517 \text{ m}$$

$$(6.31) \quad \sigma_{m.crit} := \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_{z.B.1} \cdot G_{0.05} \cdot I_{T.B.1}}}{L_{ef} \cdot W_{y.B.1}} = 326.448 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$(6.30) \quad \lambda_{rel.m} := \sqrt{\frac{f_{m.k}}{\sigma_{m.crit}}} = 0.303$$

$$(6.34) \quad k_{crit1} := 1$$

$$k_{crit2} := 1.56 - 0.75 \cdot \lambda_{rel.m} = 1.333$$

$$k_{crit3} := \frac{1.0}{\lambda_{rel.m}^2} = 10.882$$

$$k_{crit.B.1} := \min(k_{crit1}, k_{crit2}, k_{crit3}) = 1$$

$$(6.33) \quad \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.3}}{k_{crit.B.1} \cdot f_{m.y.d.B.1}} = 0.24 \quad < 1.0 \text{ OK}$$

$$(6.35) \quad \left( \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.3}}{k_{crit.B.1} \cdot f_{m.y.d.B.1}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c.0.d.B.1}}{k_{c.z.B.1} \cdot f_{c.0.d}} = [0.334] \quad < 1.0 \text{ OK}$$



## D.4.2 Kontroll av fagverkets undergurt

### 6.1.2 Strekk i fiberretningen

Reduserer tverrsnitt pga. skruer. Antar at tverrsnittet reduseres med 30%.

$$\sigma_{t.0.d.B.2} := \frac{N_{Ed.B.2}}{0.7 \cdot b_{B.2} \cdot h_{B.2}} = 9.514 \frac{N}{mm^2}$$

Kontroll:

$$(6.1) \quad \frac{\sigma_{t.0.d.B.2}}{f_{t.0.d}} = 0.729 < 1.0 \text{ OK}$$

### 6.2.3 Kombinert bøyning og aksialt strekk

$$\sigma_{m.y.d.B.2} := \frac{M_{Ed.B.2}}{W_{y.B.2}} = 0.238 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{m.z.d} := 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$(6.1.6) \quad k_M := 0.7$$

Kontroll

$$(6.17) \quad \frac{\sigma_{t.0.d.B.2}}{f_{t.0.d}} + \frac{\sigma_{m.y.d.B.2}}{f_{m.y.d.B.2}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.2}} = 0.741 < 1.0 \text{ OK.}$$

$$(6.18) \quad \frac{\sigma_{t.0.d.B.2}}{f_{t.0.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d.B.2}}{f_{m.y.d.B.2}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.2}} = 0.737 < 1.0 \text{ OK.}$$

Vipping er her ikke aktuelt

### 6.1.7 Skjærkontroll

$$k_{cr} := 0.67$$

$$\tau_{d.B.2} := \frac{3 \cdot V_{Ed.B.2}}{2 \cdot k_{cr} \cdot b_{B.2} \cdot h_{B.2}} = 0.014 \frac{N}{mm^2}$$

$$(6.13) \quad \frac{\tau_{d.B.2}}{f_{v.d}} = 0.006 < 1.0 \text{ OK}$$

### 6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning og trykk

$$L_{ef} := 1 \cdot L_B + 2 \cdot h_{B.2} = 5.81 \text{ m} \quad (\text{Tabell 6.1})$$

$$(6.31) \quad \sigma_{m.crit} := \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0.05} \cdot I_{z.B.2} \cdot G_{0.05} \cdot I_{T.B.2}}}{L_{ef} \cdot W_{y.B.2}} = 142.497 \frac{N}{mm^2}$$

$$(6.30) \quad \lambda_{rel.m} := \sqrt{\frac{f_{m.k}}{\sigma_{m.crit}}} = 0.459$$

$$(6.34) \quad k_{crit1} := 1$$

$$k_{crit2} := 1.56 - 0.75 \cdot \lambda_{rel.m} = 1.216$$

$$k_{crit3} := \frac{1.0}{\lambda_{rel.m}^2} = 4.75$$

$$(6.33) \quad k_{crit.B.2} := \min(k_{crit1}, k_{crit2}, k_{crit3}) = 1$$

$$(6.35) \quad \frac{\sigma_{m.y.d.B.2}}{k_{crit.B.2} \cdot f_{m.y.d.B.2}} = 0.013 < 1.0 \text{ OK}$$

### D.4.3 Kontroll av strekkdiagonal

Største strekkraft i en diagonal er (Se figur)

$$N_{Ed.strekk} = 163.176 \text{ kN}$$

### 6.1.2 Ren strekkontroll med effektiv tverrsnitt

(6.1) (Ta bort andel skruer)

$$\sigma_{t.0.d} := \frac{N_{Ed.strekk}}{0.7 \cdot b_D \cdot h_{D.1}} = 12.334 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{t.0.d} := \frac{N_{Ed.strekk}}{A_D} = 3.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Kontroll:

$$\frac{\sigma_{t.0.d}}{f_{t.0.d}} = 0.283 < 1.0 \text{ OK}$$

#### D.4.4 Kontroll av ytterste trykkdiagonal

##### 6.1.4 Askialt trykk

$$N_{Ed.trykk} = -163.176 \text{ kN}$$

$$\sigma_{c.0.d.D.2} := \frac{-N_{Ed.trykk}}{b_D \cdot h_{D.2}} = 3.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$(6.2) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.2}}{f_{c.0.d}} = 0.248 < 1.0 \text{ OK}$$

Skjærkraften er neglisjerbar

##### 6.3.2 Knekking av diagonal utsatt for trykk

$$\sigma_{m.y.d} := 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{m.z.d} := 0 \text{ Pa}$$

Systemlengden til den (ytterste og) mest påkjente trykkdiagonal er:

$$L_D := \frac{L}{2 \cdot n} \cdot \frac{1}{\cos(v)} = 3.889 \text{ m}$$

For knekking om y-aksen antas  $L_{ky} := L_D = 3.889 \text{ m}$

$$(6.21) \quad \lambda_{rel.y} := \frac{\lambda_{y.D.2}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.0.k}}{E_{0.05}}} = 0.648$$

$$(6.29) \quad \beta_c := 0.1 \quad (\text{Limtre})$$

$$(6.27) \quad k_y := 0.5 \left[ 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.y} - 0.3) + (\lambda_{rel.y})^2 \right] = [0.728]$$

$$(6.25) \quad k_{c.y.D.2} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel.y}^2}} = [0.945]$$

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.2}}{k_{c.y.D.2} \cdot f_{c.0.d}} + \frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d}} = [0.262] \quad < 1.0 \text{ OK.}$$

Knekking om z-aksen

$$(6.22) \quad \lambda_{rel.z} := \frac{\lambda_{z.D.2}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.0.k}}{E_{0.05}}} = 1.459$$

$$(6.29) \quad \beta_c := 0.1 \quad (\text{Limtre})$$

$$(6.28) \quad k_z := 0.5 \left[ 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.z} - 0.3) + (\lambda_{rel.z})^2 \right] = [1.622]$$

$$(6.26) \quad k_{c.z.D.2} := \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel.z}^2}} = [0.429]$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.2}}{k_{c.z.D.2} \cdot f_{c.0.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.d}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d}} = [0.579] \quad < 1.0 \text{ OK.}$$

## D.4.5 Kontroll av midterste trykkdiagonal

### 6.1.4 Askialt trykk

$$N_{Ed.D.6} := D_6 = -32.635 \text{ kN}$$

$$\sigma_{c.0.d.D.6} := \frac{-N_{Ed.D.6}}{b_D \cdot h_{D.6}} = 1.727 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$(6.2) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.6}}{f_{c.0.d}} = 0.116 < 1.0 \text{ OK}$$

Skjærkraften er neglisjerbar

### 6.3.2 Knekking av diagonal utsatt for trykk

$$\sigma_{m.y.d} := 0 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{m.z.d} := 0 \text{ Pa}$$

For knekking om y-aksen antas  $L_{ky} := L_D = 3.889 \text{ m}$

$$(6.21) \quad \lambda_{rel.y.D} := \frac{\lambda_{y.D.6}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.0.k}}{E_{0.05}}} = 1.513$$

$$(6.29) \quad \beta_c := 0.1 \quad (\text{Limtre})$$

$$(6.27) \quad k_y := 0.5 \left[ 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.y} - 0.3) + (\lambda_{rel.y})^2 \right] = [0.728]$$

$$(6.25) \quad k_{c.y.D.6} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel.y}^2}} = [0.945]$$

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.6}}{k_{c.y.D.6} \cdot f_{c.0.d}} + \frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d}} = [0.122] < 1.0 \text{ OK.}$$

Knekking om z-aksen

$$(6.22) \quad \lambda_{rel.z} := \frac{\lambda_{z.D.6}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.0.k}}{E_{0.05}}} = 1.459$$

$$(6.29) \quad \beta_c := 0.1 \quad (\text{Limtre})$$

$$(6.28) \quad k_z := 0.5 \left[ 1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel.z} - 0.3) + (\lambda_{rel.z})^2 \right] = [1.622]$$

$$(6.26) \quad k_{c.z.D.6} := \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel.z}^2}} = [0.429]$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.6}}{k_{c.z.D.6} \cdot f_{c.0.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.d}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d}} = [0.27] \quad < 1.0 \text{ OK.}$$

## D.4.5 Svilletrykk

### 6.1.5 Trykk vinkelrett på fiberretningen

$$k_{c.90} := 1.5$$

$$(6.3) \quad l_{ef} := \frac{A_z}{b_{B.1} \cdot f_{c.90.d} \cdot k_{c.90}} = 469.388 \text{ mm}$$

På endene A og B velges en anleggs lengde minst lik

$$l_{ef} = 469.388 \text{ mm}$$



## D.5 Bruksgrensekontroll

### 5.1 Nedbøyning

Symmetri

$$\begin{array}{ll} \text{B.1.1} & w_1 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{1.1} \cdot B_{1.1} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.1} \cdot kN} = 0.462 \text{ mm} \\ \text{B.1.6} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{B.1.2} & w_2 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{1.2} \cdot B_{1.2} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.1} \cdot kN} = 3.603 \text{ mm} \\ \text{B.1.5} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{B.1.3} & w_3 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{1.3} \cdot B_{1.3} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.1} \cdot kN} = 7.854 \text{ mm} \\ \text{B.1.4} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{B.2.1} & w_4 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{2.1} \cdot B_{2.1} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.2} \cdot kN} = 1.437 \text{ mm} \\ \text{B.2.5} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{B.2.2} & w_5 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{2.2} \cdot B_{2.2} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.2} \cdot kN} = 4.599 \text{ mm} \\ \text{B.2.4} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{B.2.3} & w_6 := \frac{B \cdot V_{2.3} \cdot B_{2.3} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.2} \cdot kN} = 3.881 \text{ mm} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{T1} & w_7 := \frac{2 \cdot D \cdot V_1 \cdot D_1 \cdot L_D}{E \cdot A_{D1} \cdot kN} = 4.059 \text{ mm} \\ \text{T12} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{T2} & w_8 := \frac{2 \cdot D \cdot V_2 \cdot D_2 \cdot L_D}{E \cdot A_{D2} \cdot kN} = 1.739 \text{ mm} \\ \text{T11} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{T3} & w_9 := \frac{2 \cdot D \cdot V_3 \cdot D_3 \cdot L_D}{E \cdot A_{D3} \cdot kN} = 3.653 \text{ mm} \\ \text{T10} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{T4} & w_{10} := \frac{2 \cdot D \cdot V_4 \cdot D_4 \cdot L_D}{E \cdot A_{D4} \cdot kN} = 1.461 \text{ mm} \\ \text{T9} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{T5} & w_{11} := \frac{2 \cdot D \cdot V_5 \cdot D_5 \cdot L_D}{E \cdot A_{D5} \cdot kN} = 1.218 \text{ mm} \\ \text{T8} & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{T6} & w_{12} := \frac{2 \cdot D \cdot V_6 \cdot D_6 \cdot L_D}{E \cdot A_{D6} \cdot kN} = 0.812 \text{ mm} \\ \text{T7} & \end{array}$$

Den totale nedbøyningen blir

$$w := w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{12} = 34.777 \text{ mm}$$

## D.6 Kontroller kort oppsummert

### 6.1 Overgurt

#### 6.1.4 Aksialt trykk

$$(6.2) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.B.1}}{f_{c.0.d}} = 0.271 < 1.0 \text{ OK.}$$

#### 6.2.4 Kombinert bøyning og aksialt trykk

$$(6.19) \quad \left( \frac{\sigma_{c.0.d.B.1.2}}{f_{c.0.d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.2}}{f_{m.y.d.B.1}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.1}} = 0.3 < 1.0 \text{ OK.}$$

$$(6.20) \quad \left( \frac{\sigma_{c.0.d.B.1.2}}{f_{c.0.d}} \right)^2 + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.2}}{f_{m.y.d.B.1}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.1}} = 0.212 < 1.0 \text{ OK.}$$

#### 6.1.7 Skjærkontroll

$$(6.13) \quad \frac{\tau_{d.B.1}}{f_{v.d}} = 0.756 < 1.0 \text{ OK}$$

### 6.3.2 Kneking av overgurt utsatt for trykk

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.B.1.3}}{k_{c.y.B.1} \cdot f_{c.0.d}} + \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.3}}{f_{m.y.d.B.1}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.1}} = [0.476] < 1.0 \text{ OK.}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.B.1.3}}{k_{c.z.B.1} \cdot f_{c.0.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.3}}{f_{m.y.d.B.1}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.1}} = [0.38] < 1.0 \text{ OK.}$$

### 6.3.3 Vipping

$$(6.33) \quad \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.3}}{k_{crit.B.1} \cdot f_{m.y.d.B.1}} = 0.24 < 1.0 \text{ OK}$$

$$(6.35) \quad \left( \frac{\sigma_{m.y.d.B.1.3}}{k_{crit.B.1} \cdot f_{m.y.d.B.1}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c.0.d.B.1}}{k_{c.z.B.1} \cdot f_{c.0.d}} = [0.334] < 1.0 \text{ OK}$$

## 6.2 Undergurt

### 6.1.2 Strekk i fiberretningen

$$(6.1) \quad \frac{\sigma_{t.0.d.B.2}}{f_{t.0.d}} = 0.729 \quad < 1.0 \text{ OK}$$

### 6.2.3 Kombinert bøyning og aksialt strekk

$$(6.17) \quad \frac{\sigma_{t.0.d.B.2}}{f_{t.0.d}} + \frac{\sigma_{m.y.d.B.2}}{f_{m.y.d.B.2}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.2}} = 0.741 \quad < 1, \text{ OK.}$$

$$(6.18) \quad \frac{\sigma_{t.0.d.B.2}}{f_{t.0.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d.B.2}}{f_{m.y.d.B.2}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d.B.2}} = 0.737 \quad < 1, \text{ OK.}$$

### 6.1.7 Skjærkontroll

$$(6.13) \quad \frac{\tau_{d.B.2}}{f_{v.d}} = 0.006 \quad < 1.0 \text{ OK}$$

### 6.3.3 Bjelker utsatt for bøyning eller en kombinasjon av bøyning

$$(6.35) \quad \frac{\sigma_{m.y.d.B.2}}{k_{crit.B.2} \cdot f_{m.y.d.B.2}} = 0.013 \quad > 1.0 \text{ OK}$$

## 6.3 Kontroll av diagonaler

### Ytterste diagonaler

#### 6.1.2 Aksialt strekk

$$(6.1) \quad \frac{\sigma_{t.0.d}}{f_{t.0.d}} = 0.283 \quad < 1.0 \text{ OK}$$

#### 6.1.4 Aksialt trykk

$$(6.2) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.2}}{f_{c.0.d}} = 0.248 \quad < 1.0 \text{ OK}$$

#### 6.3.2 Knekking av diagonal utsatt for trykk

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.2}}{k_{c.y.D.2} \cdot f_{c.0.d}} + \frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d}} = [0.262] \quad < 1.0 \text{ OK}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.2}}{k_{c.z.D.2} \cdot f_{c.0.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.d}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d}} = [0.579] \quad < 1.0 \text{ OK}$$

### Midterste diagonaler

#### 6.1.4 Aksialt trykk

$$(6.2) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.6}}{f_{c.0.d}} = 0.116 \quad < 1.0 \text{ OK}$$

#### 6.3.2 Knekking av diagonal utsatt for trykk

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.6}}{k_{c.y.D.6} \cdot f_{c.0.d}} + \frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d}} = [0.122] \quad < 1.0 \text{ OK.}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c.0.d.D.6}}{k_{c.z.D.6} \cdot f_{c.0.d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.d}} + \frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.z.d}} = [0.27] \quad < 1.0 \text{ OK.}$$

## 6.4 Kontroll av nedbøyning

$$w = 34.777 \text{ mm}$$

## **Vedlegg E: Beregning av kapasitet - skråstilt skrue**



## **E      Beregning av kapasitet skråstilt skrue**

### **Fargeforklaring**

Variabler

Resultater for én forbinder

Resultater trykkstav

Resultater strekkstav

Forhold mellom verdier

### **E.1    Egenskaper og variabler**

#### **E.1.1   Dimensjoner fagverk**

Variabler tverrsnitt:

$v := 50 \text{ deg}$

Vinkel mellom diagonal og gurt

$b_D := 140 \text{ mm}$

Bredde tverrsnitt diagonalstaver

$h_D := 135 \text{ mm}$

Høyde tverrsnitt diagonalstaver

$b_{B.1} := 140 \text{ mm}$

Bredde tverrsnitt overgurt

$h_{B.1} := 405 \text{ mm}$

Høyde tverrsnitt overgurt

$b_{B.2} := 140 \text{ mm}$

Bredde tverrsnitt undergurt

$h_{B.2} := 315 \text{ mm}$

Høyde tverrsnitt undergurt

$n_{snitt} := 2$

Antall snitt av forbindere

### E.1.2 Materialegenskaper skrue

Karakteristiske fastheter og stivheter for GL30c:

$$\rho_k := 390 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densitet}$$

$$\rho_{g,mean} := 430 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Midlere densitet}$$

Dimensjoner og karakteristiske kapasiteter for selvborende WT-T 8.2 L skrue fra SFS

Ytre gjengediameter	$d_1 := 8.2 \text{ mm}$
Indre gjengediameter	$d_n := 5.4 \text{ mm}$
Største ytre gjengediameter	$d_3 := 8.9 \text{ mm}$
Skruehodets diameter	$d_h := 10 \text{ mm}$
Det glatte skaftets diameter	$d_2 := 6.3 \text{ mm}$

Skruen kommer i følgende lengder:

$l_s$	$s_1$	$s_2$
(mm)	(mm)	(mm)
220	95	30
245	107	31
275	122	31
300	135	30
330	135	60



### Karakteristiske kapasiteter:

Karakteristisk flytemoment

$$M_{y.Rk} := 25 \text{ } N \cdot m$$

Karakteristisk strekkkapasitet

$$f_{tens.k} := 22 \text{ } kN$$

Karakteristisk flytespenning

$$f_{y.k} := 870 \frac{N}{mm^2}$$

Karakteristisk torosjonsstyrke

$$f_{tor.k} := 25 \text{ } N \cdot m$$

Karakteristisk gjennomtrekkingsparameter

$$f_{head.k} := 10 \frac{N}{mm^2}$$

Karakteristisk uttrekksparameter

$$f_{ax.k} := 12.8 \frac{N}{mm^2}$$

### E.1.3 Variabler for knutepunkt med skråstilte skruer

Konfigurasjon av skruer:

Innskruvningsvinkel i xz-planet i forhold til vinkelrett på fiberretning:

$$\alpha := 45 \text{ deg}$$

Innskruvningsvinkel i xy-planet i forhold til fiberretning:

$$v = 50 \text{ deg}$$

Lengde på best egnet skrue:

$$l_s := l_{s_4} = 330 \text{ mm}$$

Lengde gjenget del på hver side:

$$s_1 := s_{1_4} = 135 \text{ mm}$$

Dimensjonerende gurt høyde:

$$h_B := h_{B.1}$$

Skruens lengde og vinkel i de forskjellige planene:

$$x_s := \sqrt{\frac{l_s^2}{\left(1 + (\tan(v))^2 + \frac{1}{(\tan(\alpha))^2}\right)}} = 178.436 \text{ mm}$$

$$y_s := \tan(v) \cdot x_s = 212.652 \text{ mm}$$

$$z_s := \frac{x_s}{\tan(\alpha)} = 178.436 \text{ mm}$$

$$l_{s.xy} := \sqrt{x_s^2 + y_s^2} = 277.598 \text{ mm}$$

Lengde i xy-planet

$$l_{s.xz} := \sqrt{x_s^2 + z_s^2} = 252.347 \text{ mm}$$

Lengde i xz-planet

$$l_{s.yz} := \sqrt{y_s^2 + z_s^2} = 277.598 \text{ mm}$$

Lengde i yz-planet

$$l_s := \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2} = 330 \text{ mm}$$

Total lengde

$$\alpha = 45 \text{ deg}$$

Vinkel i xz-planet

$$v = 50 \text{ deg}$$

Vinkel i xy-planet

$$\theta := \left( \text{atan} \left( \frac{y_s}{z_s} \right) \right) = 50 \text{ deg}$$

Vinkel i yz-planet

Maks lengde i z-retn.:

$$z_{max} := 2 \cdot \min(b_{B.1}, b_{B.2}, b_D) = 280 \text{ mm}$$

$$\frac{z_{max}}{z_s} = 1.569 > 1 \text{ ok}$$

## E.2 Dimensjoneringsverdier etter EK 5 og ETA

### E.2.1 Kant- og innbyrdes avstander

## 8 Mekaniske forbindelser

### 8.7 Skrueforbindelser

#### 8.7.1 Tverrbelastede skruer

(1) Må ta hensyn til en effektiv diameter.

Føringer for effektiv diameter fra skruens Europeisk teknisk evaluering:

#### A.2.2 Laterally loaded screws

Ytre gjengediameter skal brukes som effektiv diameter:

$$d_{ef} := d_1 = 8.2 \text{ mm}$$

(4)  $d_n > 6 \text{ mm}$  gjelder reglene i **8.5.1**.

#### 8.5.1 Tverrbelastede bolter

Beregning av kantavstander:

(3) Minste avstander mellom forbindere innbyrdes og fra forbindere til kant og ende:

Vinkler i utregningen:

$$v_s := 180 \text{ deg} + v = 230 \text{ deg}$$

Kraft på gurt fra strekkstav:

$$v_t := v = 50 \text{ deg}$$

Kraft på gurt fra trykkstav:

$$v_d := 0 \text{ deg} \quad d := d_1 = 8.2 \text{ mm}$$

Kraft i diagonal:

#### Tabell 8.4:

##### Innbyrdes avstander:

Langs fiberretningen:

$$a_{1.1} := (4 + |\cos(v_s)|) \cdot d = 38.071 \text{ mm}$$

$$a_{1.1} := (4 + |\cos(v_t)|) \cdot d = 38.071 \text{ mm}$$

Gurt(strekkestav)

$$a_{1.2} := (4 + |\cos(v_d)|) \cdot d = 41 \text{ mm}$$

Gurt(trykkstav)

$$a_{1.2x} := a_{1.2} \cdot \cos(v) = 26.354 \text{ mm}$$

Diagonal(trykk og strekk)

$$a_{1.2y} := a_{1.2} \cdot \sin(v) = 31.408 \text{ mm}$$

Vinkelrett på fiberretningen:

$$a_{2.1} := 4 \cdot d = 32.8 \text{ mm}$$

$$a_{2.2} := 4 \cdot d = 32.8 \text{ mm}$$

Gurt(trykk og strekk)

$$a_{2.2x} := \frac{a_{2.2}}{\sin(v)} = 42.817 \text{ mm}$$

Diagonal(trykk og strekk)

$$a_{2.2y} := a_{2.2} \cdot \sin(90 - v) = 30.107 \text{ mm}$$

Gjeldende verdier for innbyrdes avstander etter 8.4:

$$x_{innb} := \max(a_{1.1}, a_{1.2x}, a_{2.2x}) = 42.817 \text{ mm}$$

$$y_{innb} := \max(a_{2.1}, a_{1.2y}, a_{2.2y}) = 32.8 \text{ mm}$$

Kant- og endeavstander:

Belastet ende:

$$a_{3t.1} := \max(7 \cdot d, 80 \text{ mm}) = 80 \text{ mm}$$

$$a_{3t.2} := \max(7 \cdot d, 80 \text{ mm}) = 80 \text{ mm}$$

Gurt(trykkstav)

$$a_{3t.2y} := a_{3t.2} \cdot \sin(v) = 61.284 \text{ mm}$$

Diagonal(strekkestav)

$$a_{3t.2x} := a_{3t.2} \cdot \cos(v) = 51.423 \text{ mm}$$

Ubelastet ende:

$$a_{3c.1} := \left(1 + 6 \cdot \left|\sin(v_s)\right|\right) \cdot d = 45.889 \text{ mm}$$

Gurt(strekkstav)

$$a_{3c.2} := \left(1 + 6 \cdot \sin(v_d)\right) \cdot d = 8.2 \text{ mm}$$

Diagonal(trykkstav)

$$a_{3c.2y} := a_{3c.2} \cdot \sin(v) = 6.282 \text{ mm}$$

$$a_{3c.2x} := a_{3c.2} \cdot \cos(v) = 5.271 \text{ mm}$$

Belastet kant:

$$a_{4t.1} := \max\left(\left(2 + 2 \cdot \sin(v_t)\right) \cdot d, 3 \cdot d\right) = 28.963 \text{ mm}$$

Gurt(trykk og strekk)

$$a_{4t.2} := \max\left(\left(2 + 2 \cdot \sin(v_d)\right) \cdot d, 3 \cdot d\right) = 24.6 \text{ mm}$$

Diagonal(trykk og strekk)

Ubelastet kant:

$$a_{4c.1} := 3 \cdot d = 24.6 \text{ mm}$$

Gurt(trykk og strekk)

$$a_{4c.2} := 3 \cdot d = 24.6 \text{ mm}$$

Diagonal(trykk og strekk)

$$a_{4c.2x} := \frac{a_{4c.2}}{\sin(v)} = 32.113 \text{ mm}$$

$$a_{4c.2y} := a_{4c.2} \cdot \sin(90 - v) = 22.58 \text{ mm}$$

## Kant- og innbyrdes avstander etter 8.7.2 for aksialbelastede skruer:

### 8.7.2 Aksialbelastede skruer

(2) Innbyrdes- og kantavstander

Krav om tykkelse på trevirke:

$$d := d_1 = 8.2 \text{ mm}$$

$$t := \min(b_D, b_{B.1}, b_{B.2}) = 140 \text{ mm}$$

$$\frac{t}{12 \cdot d} = 1.423 > 1 \text{ ok.}$$

#### Tabell 8.6:

Minste innbyrdes skruavstand i et plan:

I fiberretningen

$$a_1 := 7 \cdot d = 57.4 \text{ mm}$$

$$a_{1.yd} := \frac{a_1}{\cos(\alpha)} = 81.176 \text{ mm}$$

$$a_{1.y} := \sin(v) \cdot a_{1.yd} = 62.184 \text{ mm}$$

Vinkelrett på fiberretningen

$$a_2 := 5 \cdot d = 41 \text{ mm}$$

$$a_{2.x} := \frac{a_2}{\sin(v)} = 53.522 \text{ mm}$$

Sammenlikner verdier med innbyrdes avstander fra 8.5.1(3):

$$x_{innb.a} := \max(x_{innb}, a_{2.x}) = 53.522 \text{ mm}$$

$$y_{innb.a} := \max(y_{innb}, a_{1.y}) = 62.184 \text{ mm}$$

$$\frac{x_{innb.a}}{x_{innb}} = 1.25$$

$$\frac{y_{innb.a}}{y_{innb}} = 1.896$$

forhold mellom innbyrdes avstander  
etter tabeller 8.4 og 8.6

## Minimumsavstander aksialbelastet skrue, teknisk brosjyre:

I fiberretningen

$$a_1 := 40 \text{ mm}$$

$$a_{1.yd} := \frac{a_1}{\cos(\alpha)} = 56.569 \text{ mm}$$

$$a_{1.y} := \sin(v) \cdot a_{1.yd} = 43.334 \text{ mm}$$

Vinkelrett på fiberretningen

$$a_2 := 40 \text{ mm}$$

$$a_{2.x} := \frac{a_2}{\sin(v)} = 52.216 \text{ mm}$$

$$x_{innb.b} := \max(x_{innb}, a_{2.x}) = 52.216 \text{ mm}$$

$$y_{innb.b} := \max(y_{innb}, a_{1.y}) = 43.334 \text{ mm}$$

$$\frac{x_{innb.b}}{x_{innb}} = 1.22$$

$$\frac{y_{innb.b}}{y_{innb}} = 1.321$$

forhold mellom innbyrdes avstander  
etter 8.4 og teknisk brosjyre

## Gjeldende verdi for innbyrdes avstander:

Største verdi av tabell 8.4 og minste verdi av tabell 8.6 og teknisk brosjyre

$$x_{innb} := \max(x_{innb}, \min(x_{innb.a}, x_{innb.b})) = 52.216 \text{ mm}$$

$$y_{innb} := \max(y_{innb}, \min(y_{innb.a}, y_{innb.b})) = 43.334 \text{ mm}$$

### E.2.2 Beregning av antall forbindere

Krefter

$F$

Aksialkraft i staven

$$\mathbf{F} \cdot \cos(v) = 0.643 \mathbf{F}$$

Kraft i gurtens fiberretning

Forbindere i trykkstav:

Tilgjengelig avstand i x- og y-retning for forbindere

$$x_{tilgj} := \frac{h_D}{\sin(v)} - 2 \cdot a_{4c.2x} = 112.004 \text{ mm}$$

$$y_{tilgj} := h_B - a_{4c.1} - l_{s.yz} \cdot \sin(\theta) - a_{3c.2y} = 161.466 \text{ mm}$$

Totalt antall forbindere tverrsnittene har plass til:

$$x_{trykk} := \frac{x_{tilgj}}{x_{innb}} + 1 = 3.145$$

$$y_{trykk} := \frac{y_{tilgj}}{y_{innb}} + 1 = 4.726$$

$$n_{x.t} := \text{floor}(x_{trykk}) = 3$$

Antall forbindere x-retning trykkstav

$$n_{y.t} := \text{floor}(y_{trykk}) = 4$$

Antall forbindere y-retning trykkstav

$$n_{tot.t} := n_{x.t} \cdot n_{y.t} = 12$$

Totalt antall forbindere i et snitt



Forbindere langs tredelenes respektive fiberretninger:

$$n_{1,t} := n_{x,t} = 3$$

Forbindere langs fiberretning element 1

$$n_{2,t} := n_{y,t} = 4$$

Forbindere langs fiberretning element 2

Forbindere i strekkstav:

Tilgjengelig avstand i x- og y-retning for forbindere

$$x_{tilgj} := \frac{h_D}{\sin(v)} - 2 \cdot a_{4c.2x} = 112.004 \text{ mm}$$

$$y_{tilgj} := h_B - a_{4t.1} - \max\left(a_{3t.2y}, a_{4c.1} + \sin(\theta) \cdot \frac{l_{s.yz}}{2}\right) = 245.111 \text{ mm}$$

Totalt antall forbindere tverrsnittene har plass til:

$$x_{strek} := \frac{x_{tilgj}}{x_{innb}} + 1 = 3.145$$

$$y_{strek} := \frac{y_{tilgj}}{y_{innb}} + 1 = 6.656$$

$$n_{x,s} := \text{floor}(x_{strek}) = 3$$

Forbindere x-retning strekkstav

$$n_{y,s} := \text{floor}(y_{strek}) = 6$$

Forbindere y-retning strekkstav

$$n_{tot.s} := n_{x,s} \cdot n_{y,s} = 18$$

Totalt antall forbindere i et snitt

Forbindere langs tredelenes respektive fiberretninger:

$$n_{1,s} := n_{x,s} = 3$$

Forbindere langs fiberretning element 1

$$n_{2,s} := n_{y,s} = 6$$

Forbindere langs fiberretning element 2

### E.2.3 Dimensjonerende verdier for n:

#### Trykkstav:

$$n_{1.t} = 3$$

Antall forbindere i fiberretningen gurt (x-retn.)

$$n_{2.t} = 4$$

Antall forbindere i fiberretningen diagonal

$$n_{rad1.t} := n_{2.t} = 4$$

Rader av forbindere langs fiberretningen i gurten

$$n_{rad2.t} := n_{1.t} = 3$$

Rader av forbindere langs fiberretningen i diagonalen

$$n_{tot.t} = 12$$

Totalt antall forbindere i forbindelsen(et snitt) med trykkstav

#### Strekstav:

$$n_{1.s} = 3$$

Antall forbindere i fiberretningen gurt

$$n_{2.s} = 6$$

Antall forbindere i fiberretningen diagonal

$$n_{rad1.s} := n_{2.s} = 6$$

Rader av forbindere langs fiberretningen i gurten

$$n_{rad2.s} := n_{1.t} = 3$$

Rader av forbindere langs fiberretningen i diagonalen

$$n_{tot.s} = 18$$

Totalt antall forbindere i forbindelsen(et snitt) med strekkstav

## E.2.4 Hullkantfasthet etter Eurokode 5

### 8.5.1 Tverrbelastede bolter

#### (2) Hullkantfasthet

$$(8.33) \quad k_{90} := 1.35 + 0.015 \cdot d = 1.473$$

$$(8.31) \quad f_{h.0.k} := 0.082 (1 - 0.01 \cdot d) \rho_k \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} = 29.358 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$(8.32) \quad f_{h.v.k} := \frac{f_{h.0.k}}{k_{90} \cdot (\sin(v))^2 + (\cos(v))^2} = 22.979 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

## E.2.5 Effektive forbindere etter Eurokode 5

#### (4) Effektive forbindere

##### Trykkstav:

Antallet effektive forbindere i **diagonalen**:

Last i fiberretning

$$(8.34) \quad n_{ef.2.t} := \min \left( n_{2.t}, n_{2.t}^{0.9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_{1.2}}{13 \cdot d}} \right) = 2.742$$

Antallet effektive forbindere i **gurt**:

Vinkel mellom last og fiberretning gurt:  $v = 50 \text{ deg}$

$$(8.34) \quad n_{ef.0.1.t} := \min \left( n_{1.t}, n_{1.t}^{0.9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_{1.1}}{13 \cdot d}} \right) = 2.078$$

$$(8.35) \quad n_{ef.90.1.t} := n_{1.t} = 3$$

Lineær interpolasjon mellom verdiene:

$$n_{ef.1.t} := n_{ef.0.1.t} + (n_{ef.90.1.t} - n_{ef.0.1.t}) \cdot \frac{v - 0 \text{ deg}}{(90 - 0) \text{ deg}} = 2.59$$

**Strekkestav:**

Antallet effektive forbindere i **diagonalen**:

Last i fiberretning

$$(8.34) \quad n_{ef.2.s} := \min \left( n_{2.s}, n_{2.s}^{0.9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_{1.2}}{13 d}} \right) = 3.95$$

Antallet effektive forbindere i **gurt**:

Vinkel mellom last og fiberretning gurt:  $v = 50 \text{ deg}$

$$(8.34) \quad n_{ef.0.1.s} := \min \left( n_{1.s}, n_{1.s}^{0.9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_{1.1}}{13 d}} \right) = 2.078$$

$$(8.35) \quad n_{ef.90.1.s} := n_{1.s} = 3$$

Lineær interpolasjon mellom verdiene:

$$n_{ef.1.s} := n_{ef.0.1.s} + (n_{ef.90.1.s} - n_{ef.0.1.s}) \cdot \frac{v - 0 \text{ deg}}{(90 - 0) \text{ deg}} = 2.59$$

## E.2.6 Aksialkapasitet

### 8.7.2 Aksialbelastede skruer

(3) Krav inntrengningsdybde gjenget del

$$l_{ef} := s_1 \qquad \frac{l_{ef}}{6 \cdot d} = 2.744 \qquad >1 \text{ ok}$$

(4) Krav diameter

$$6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm} \qquad d = 8.2 \text{ mm} \qquad \text{ok}$$

$$\frac{d_n}{d} = 0.659 \qquad 0.6 \leq \frac{d_n}{d} \leq 0.75 \qquad \text{ok}$$

(8) Effektivt antall skruer(aksial)

$$(8.41) \quad n_{ef} := n^{0.9}$$

$$n_{ef} := 1^{0.9} = 1 \qquad \text{Det beregnes kapasiteter for én forbinder.}$$

## E.2.6 Uttrekkskapasitet etter Europeisk Teknisk Godkjenning

### A.2.3.2 Axial withdrawal capacity

$$\rho_a := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \qquad \text{Tilhørende densitet for gitte parametere}$$

$$(2.4) \quad k_{ax} := 0.3 + \frac{0.7 \cdot \alpha}{45 \text{ deg}} \qquad \text{For } 15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$$

$$k_{ax} := 1 \qquad \text{For } 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

Formelen fra den tekniske evalueringen tar høyde for høyere densitet:

$$(2.3) \quad F_{ax.\alpha.Rk} := n_{ef} \cdot k_{ax} \cdot f_{ax.k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left( \frac{\rho_k}{350} \right)^{0.8} = 15.451 \text{ kN}$$

Siden denne uttrekkskapasiteten er konstant for alle vinkler vi benytter kan denne benyttes for både diagonal og gurt.

(6) Karakteristisk gjennomtrekkingsmotstand

$$(8.40b) \quad F_{g.ax.\alpha.Rk} := F_{ax.\alpha.Rk} + n_{ef} \cdot f_{head.k} \cdot d_h^2 \cdot \left( \frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0.8} = 16.541 \text{ kN}$$

**Dimensjonerende karakteristisk aksielle-motstand:**

$$F_{ax.Rk} := \min(F_{ax.\alpha.Rk}, F_{g.ax.\alpha.Rk}) = 15.451 \text{ kN}$$

(7) Karakteristisk strekkmotstand

$$(8.40c) \quad F_{t.Rk} := n_{ef} \cdot f_{tens.k} = 22 \text{ kN}$$

## E.3 Kapasitetsberegning etter EK5

### E.3.1 Kapasitet for én forbinder

### 8.2 Tverrbelastede stavformede forbindere

Innfører følgende endring, da skruens kapasitet parallelt med skjærplanet ikke er den samme som skruens kapasitet for tverrlast (pga. innskrivningsvinkelen):

$$F_{v.Rd} := F_{l.Rd} \quad F_{v.Ed} := F_{l.Ed}$$

#### 8.2.2 Tre mot tre

$$d := d_{ef} = 8.2 \text{ mm} \quad t_1 := \frac{l_s}{2} = 165 \text{ mm} \quad t_2 := t_1$$

Kapasitetskontroll forbindere **diagonal**:

Kraften går i fiberretningen langs diagonalen, 50 grader på gurtten.

$$f_{h.1.k} := f_{h.v.k} = 22.979 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{h.2.k} := f_{h.o.k} = 29.358 \frac{N}{mm^2}$$

$$\beta := \frac{f_{h.2.k}}{f_{h.1.k}} = 1.278$$

$$F_{l.Rk.a} := f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d = 31.091 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.b} := f_{h.2.k} \cdot t_2 \cdot d = 39.721 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.c} := \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left( \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right)} + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4}$$

$$F_{l.Rk.c} = 18.496 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.d} := 1.05 \cdot \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left( \sqrt{2 \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4}$$

$$F_{l.Rk.d} = 15.334 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.e} := 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y.Rk} \cdot f_{h.1.k} \cdot d} + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 7.602 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk2} := \min(F_{l.Rk.a}, F_{l.Rk.b}, F_{l.Rk.c}, F_{l.Rk.d}, F_{l.Rk.e}) = 7.602 \text{ kN} \quad (8.6)$$

Omskrivning av likning (8.28) gir et uttrykk for den karakteristiske kapasiteten parallelt med skjærplanet:

$$F_{ax.Ek} := F_{v.Rk} \cdot \sin(\alpha) \quad F_{l.Ek} := F_{v.Rk} \cdot \cos(\alpha)$$

$$F_{v.Rk2} := \frac{1}{\left( \left( \frac{\sin(\alpha)}{F_{ax.Rk}} \right)^2 + \left( \frac{\cos(\alpha)}{F_{l.Rk2}} \right)^2 \right)^{0.5}} = 9.646 \text{ kN}$$

Kapasitetskontroll forbindere **gurten**:

Må også sjekke for den horisontale kraftkomponenten i gurtene. Nå går kraften i fiberretningen langs gurtene, og 50 grader på diagonalen.

$$f_{h.1.k} := f_{h.0.k} = 29.358 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{h.2.k} := f_{h.v.k} = 22.979 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\beta := \frac{f_{h.2.k}}{f_{h.1.k}} = 0.783$$

$$F_{l.Rk.a} := f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d = 39.721 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.b} := f_{h.2.k} \cdot t_2 \cdot d = 31.091 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.c} := \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{1+\beta} \cdot \left( \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right)} + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4}$$

$$F_{l.Rk.c} = 18.496 \text{ kN}$$



$$F_{l.Rk.d} := 1.05 \cdot \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left( \sqrt{2 \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4}$$

$$F_{l.Rk.d} = 17.318 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.e} := 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2 \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y.Rk} \cdot f_{h.1.k} \cdot d} + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 7.602 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk1} := \min(F_{l.Rk.a}, F_{l.Rk.b}, F_{l.Rk.c}, F_{l.Rk.d}, F_{l.Rk.e}) = 7.602 \text{ kN} \quad (8.6)$$

$$F_{v.Rk1} := \frac{1}{\left( \left( \frac{\sin(\alpha)}{F_{ax.Rk}} \right)^2 + \left( \frac{\cos(\alpha)}{F_{l.Rk1}} \right)^2 \right)^{0.5}} = 9.646 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for én forbinder:

$$F_{v.Rk.} := \min(F_{v.Rk1}, F_{v.Rk2}) = 9.646 \text{ kN}$$

## E.3.2 Kapasitet for flere forbindere

### 8.1.2 Forbindelser med flere forbindere

#### (4) Kapasitet én rad forbindere

$$F_{v.ef.Rk} := n_{ef} \cdot F_{v.Rk} \quad (8.1)$$

#### **Beregninger trykkstav:**

##### **Diagonal:**

$$F_{v.ef.Rk2.t} := n_{ef.2.t} \cdot F_{v.Rk2} = 26.452 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i diagonalen:

$$F_{Rk2.t} := F_{v.ef.Rk2.t} \cdot n_{rad2.t} \cdot n_{snitt} = 158.712 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i diagonalen:

$$F_{Rd2.t} := k_{mod} \frac{F_{Rk2.t}}{\gamma_M} = 96.607 \text{ kN}$$

##### **Gurt:**

(5) Kraft parallelt med raden i gurten:

$$F_{ed} \cdot \cos(v) \quad \cos(v) = 0.643$$

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurten:

$$F_{v.ef.Rk1.t} := n_{ef.1.t} \cdot \frac{F_{v.Rk1}}{\cos(v)} = 38.869 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i gurten:

$$F_{Rk1.t} := F_{v.ef.Rk1.t} \cdot n_{rad1.t} \cdot n_{snitt} = 310.954 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i gurten:

$$F_{Rd1.t} := k_{mod} \frac{F_{Rk1.t}}{\gamma_M} = 189.277 \text{ kN}$$

**Dimensjonerende kapasitet for alle forbindere:**

$$F_{v.Rd.EK5.t} := \min(F_{Rd1.t}, F_{Rd2.t}) = 96.607 \text{ kN}$$

Sammenligner kapasitetene i forbinde i henholdsvis gurt og diagonal:

$$\frac{F_{Rd1.t}}{F_{Rd2.t}} = 1.959$$

**Beregninger strekkstav:**

**Diagonal:**

$$F_{v.ef.Rk2.s} := n_{ef.2.s} \cdot F_{v.Rk2} = 38.101 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i diagonalen:

$$F_{Rk2.s} := F_{v.ef.Rk2.s} \cdot n_{rad2.s} \cdot n_{snitt} = 228.608 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinde i diagonalen:

$$F_{Rd2.s} := k_{mod} \frac{F_{Rk2.s}}{\gamma_M} = 139.153 \text{ kN}$$

**Gurt:**

(5) Kraft parallelt med raden i gurt:

$$F_{ed} \cdot \cos(v) \quad \cos(v) = 0.643$$

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurt:

$$F_{v.ef.Rk1.s} := n_{ef.1.s} \cdot \frac{F_{v.Rk1}}{\cos(v)} = 38.869 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i gurten:

$$F_{Rk1.s} := F_{v.ef.Rk1.s} \cdot n_{rad1.s} \cdot n_{snitt} = 466.431 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i gurten:

$$F_{Rd1.s} := k_{mod} \frac{F_{Rk1.s}}{\gamma_M} = 283.915 \text{ kN}$$

**Dimensjonerende kapasitet for alle forbindere:**

$$F_{v.Rd.EK5.s} := \min(F_{Rd1.s}, F_{Rd2.s}) = 139.153 \text{ kN}$$

Sammenligner kapasitetene i forbinderne i henholdsvis gurt og diagonal:

$$\frac{F_{Rd1.s}}{F_{Rd2.s}} = 2.04$$

Sammenlikner trykkstav med strekkstav:

$$\frac{F_{v.Rd.EK5.s}}{F_{v.Rd.EK5.t}} = 1.44$$

## E.4 Kapasitetsberegning etter alternativ metode:

Våre verdier:

$R_i$	Karakteristisk kapasitet parallelt med skjærplanet, hvor $i := a - f$
$M_{y.Rk} = 25 \text{ N} \cdot \text{m}$	Karakteristisk flytemoment til skruen
$d := d_{ef} = 8.2 \text{ mm}$	Effektiv diameter til skruen/forbinderen
$S_1 := \frac{1}{2} \cdot l_{s.xz} \cdot \sin(\alpha) = 89.218 \text{ mm}$	Skruens forankringslengde i det første treelementet, målt ortogonalt til skjærplanet
$S_2 := S_1$	Skruens forankringslengde i det andre treelementet, målt ortogonalt til skjærplanet
$f_{h.1.k} := f_{h.v.k} = 22.979 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Karakteristisk hullkantfasthet i den første tredelen
$f_{h.2.k} := f_{h.0.k} = 29.358 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Karakteristisk hullkantfasthet i den andre tredelen
$\beta := \frac{f_{h.2.k}}{f_{h.1.k}} = 1.278$	Forholdet mellom komponentenes hullkantfasthet
$R_{ax.k} := F_{ax.Rk} = 15.451 \text{ kN}$	Minste karakteristisk uttrekkskapasitet til forbinderen fra den første eller andre tredelen
$\alpha = 45 \text{ deg}$	Innskruvningsvinkel i forhold til perpendikulært på fiberretningen
$\mu := 0.25$	Friksjonskoeffisienten mellom overflaten til tredelene

$$R_a := R_{ax.k} \cdot \sin(\alpha) + f_{h.1.k} \cdot S_1 \cdot d \cdot \cos(\alpha) = 22.813 \text{ kN} \quad (\text{a})$$

$$R_b := R_{ax.k} \cdot \sin(\alpha) + f_{h.2.k} \cdot S_2 \cdot d \cdot \cos(\alpha) = 26.113 \text{ kN} \quad (\text{b})$$

$$R_{c1} := \left( \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left( 1 + \frac{S_2}{S_1} + \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right)} + \beta^3 \cdot \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 - \beta \cdot \left( 1 + \frac{S_2}{S_1} \right) \right) \quad (\text{c})$$

$$R_c := R_{ax.k} \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{f_{h.1.k} \cdot S_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) \cdot R_{c1} = 19.591 \text{ kN}$$

$$R_{d1} := (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \left( \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot S_1^2} \right)} - \beta \right) \cdot \beta \quad (\text{d})$$

$$R_d := R_{ax.k} \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{f_{h.1.k} \cdot S_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot R_{d1} = 19.515 \text{ kN}$$

$$R_{e1} := (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \left( \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot S_2^2} \right)} - \beta \right) \quad (\text{e})$$

$$R_e := R_{ax.k} \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{f_{h.1.k} \cdot S_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot R_{e1} = 18.991 \text{ kN}$$

$$R_{f1} := \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y.Rk} \cdot f_{h.1.k} \cdot d \cdot (\cos(\alpha))^2} \quad (\text{f})$$

$$R_f := R_{ax.k} \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) \cdot R_{f1} = 15.381 \text{ kN}$$

(5)

Kapasitet parallelt med skjærplanet per snitt per forbinder:

$$F_{v.Rk} := \min(R_a, R_b, R_c, R_d, R_e, R_f) = 15.381 \text{ kN}$$

### E.4.1 Kapasitet for én forbinder

#### 8.1.2 Forbindelser med flere forbindere

(4) Kapasitet én rad forbindere

$$(8.1) F_{v.ef.Rk} := n_{ef} \cdot F_{v.Rk}$$

#### Beregninger trykkstav:

##### Diagonal:

$$F_{v.ef.Rk2.t} := n_{ef.2.t} \cdot F_{v.Rk} = 42.179 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i diagonalen:

$$F_{Rk2.t} := F_{v.ef.Rk2.t} \cdot n_{rad2.t} \cdot n_{snitt} = 253.073 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i diagonalen:

$$F_{Rd2.t} := k_{mod} \frac{F_{Rk2.t}}{\gamma_M} = 154.045 \text{ kN}$$

##### Gurt:

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurten:

(5) Kraft parallelt med raden i gurten:

$$F_{ed} \cdot \cos(v) \quad \cos(v) = 0.643$$

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurten:

$$F_{v.ef.Rk1.t} := n_{ef.1.t} \cdot \frac{F_{v.Rk}}{\cos(v)} = 61.979 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i gurten:

$$F_{Rk1.t} := F_{v.ef.Rk1.t} \cdot n_{rad1.t} \cdot n_{snitt} = 495.831 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i gurten:

$$F_{Rd1.t} := k_{mod} \frac{F_{Rk1.t}}{\gamma_M} = 301.81 \text{ kN}$$

### Bestemmende kapasitet:

$$F_{v.Rd.t} := \min(F_{Rd1.t}, F_{Rd2.t}) = 154.045 \text{ kN}$$

Sammenligner kapasitetene i forbinderne i henholdsvis gurt og diagonal:

$$\frac{F_{Rd1.t}}{F_{Rd2.t}} = 1.959$$

Differanse mellom metode 1 og 2:

$$\frac{F_{v.Rd.t}}{F_{v.Rd.EK5.t}} = 1.595$$

### Beregninger strekkstav:

#### Diagonal:

$$F_{v.ef.Rk2.s} := n_{ef.2.s} \cdot F_{v.Rk} = 60.754 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i diagonalen:

$$F_{Rk2.s} := F_{v.ef.Rk2.s} \cdot n_{rad2.s} \cdot n_{snitt} = 364.526 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i diagonalen:

$$F_{Rd2.s} := k_{mod} \frac{F_{Rk2.s}}{\gamma_M} = 221.885 \text{ kN}$$

#### Gurt:

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurten:

(5) Kraft parallelt med raden i gurten:

$$F_{ed} \cdot \cos(v) \quad \cos(v) = 0.643$$



Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurten:

$$F_{v.ef.Rk1.s} := n_{ef.1.s} \cdot \frac{F_{v.Rk}}{\cos(v)} = 61.979 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i gurten:

$$F_{Rk1.s} := F_{v.ef.Rk1.s} \cdot n_{rad1.s} \cdot n_{snitt} = 743.747 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i gurten:

$$F_{Rd1.s} := k_{mod} \frac{F_{Rk1.s}}{\gamma_M} = 452.716 \text{ kN}$$

**Bestemmende kapasitet:**

$$F_{v.Rd.s} := \min(F_{Rd1.s}, F_{Rd2.s}) = 221.885 \text{ kN}$$

Sammenligner kapasitetene i forbinderne i henholdsvis gurt og diagonal:

$$\frac{F_{Rd1.s}}{F_{Rd2.s}} = 2.04$$

Differanse mellom metode 1 og 2:

$$\frac{F_{v.Rd.s}}{F_{v.Rd.EK5.s}} = 1.595$$

## E.5 Kontroll av splitting av gurtene:

### 8.1.4 Forbindelseskrefter som danner en vinkel med fiberretningen

(1) Kontroll av mulig oppspalting pga. strekkraftkomponenten:

$$F_{v.Ed} := F_{Ed} \cdot \sin(v) \quad \text{strekkraftkomponenten}$$

(2) Beregning skjærkraftkomponent

$$F_{v.Ed} := F_{Ed} \cdot \sin(v) \quad \text{antar at skjærkreftene på begge sider av diagonalen er like store.}$$

(3) Beregning splittingskapasitet

$$w := 1.0 \quad (8.5)$$

$$d := d_1 = 8.2 \text{ mm}$$

Avstand fra belastet kant til senter av forbinderen lengst vekk:

$$h := h_B = 405 \text{ mm}$$

$$h_e := h - a_{4c.1} - \frac{d}{2} = 376.3 \text{ mm}$$

$$b := 2 \cdot \min(b_{B.1}, b_{B.2}) = 280 \text{ mm}$$

### Karakteristisk splittingskapasitet

$$F_{90.Rk} := 14 \cdot b \cdot w \cdot \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} = 285.654 \text{ kN} \quad (8.4)$$

Dimensjonerende splittingskapasitet

$$F_{90.Rd} := k_{mod} \cdot \frac{F_{90.Rk}}{\gamma_M} = 173.876 \text{ kN}$$

Kapasitet for stavkraft:

$$F_{Rd} := \frac{F_{90.Rd}}{\sin(v)} = 226.979 \text{ kN}$$

Største tillatte kraft i diagonal for å unngå splitting

$$h_e := h - a_{4c.1} - \sin(\theta) \cdot \frac{l_{s.yz}}{2} = 274.074 \text{ mm}$$

$$\frac{\left( \sin(\theta) \cdot \frac{l_{s.yz}}{2} \right)}{a_{3t.2y}} = 1.735$$

>1 ok. Hvis mindre må  $h_e$  reduseres for **strekkstav**.

$$h_e := h - \max(a_{4c.1}, a_{3t.2y}) - \frac{d}{2} = 339.616 \text{ mm}$$

Karakteristisk splittingskapasitet for strekkstav hvis krav over ikke er godkjent:

$$F_{90.Rk} := 14 \cdot b \cdot w \cdot \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} = 179.793 \text{ kN} \quad (8.4)$$

Dimensjonerende splittingskapasitet

$$F_{90.Rd} := k_{mod} \cdot \frac{F_{90.Rk}}{\gamma_M} = 109.439 \text{ kN}$$

Kapasitet for kraft i **strekkstav**:

$$F_{Rd} := \frac{F_{90.Rd}}{\sin(v)} = 142.863 \text{ kN}$$

Største tillatte kraft i diagonal for å unngå splitting

## E.6 Stivhetsberegning

### E.6.1 Stivhetsberegning etter Eurokode 5

Tabell 7.1

$$d := d_n = 5.4 \text{ mm}$$

$$K_{ser.EK5} := \rho_m^{1.5} \cdot \frac{d}{23} \frac{N}{mm} = 2.093 \frac{kN}{mm}$$

stivhet per  
skjærflate per  
forbinder etter EK5

**Trykkstav:**

$$K_{ser.EK5.tot.t} := K_{ser.EK5} \cdot n_{tot.t} \cdot n_{snitt} = 50.243 \frac{kN}{mm}$$

stivhet for  
knutepunkt  
trykkstav etter EK5

**Strekstav:**

$$K_{ser.EK5.tot.s} := K_{ser.EK5} \cdot n_{tot.s} \cdot n_{snitt} = 75.365 \frac{kN}{mm}$$

stivhet for  
knutepunkt  
strekstav etter EK5

## E.6.2 Stivhetsberegning etter alternativ metode

### 7.1 Glidning i forbindelsene (stivhet for forbinderen etter standard)

Tabell 7.1

$$K_{90} := \rho_m^{1.5} \cdot \frac{d}{23} \frac{N}{mm} = (2.093 \cdot 10^3) \frac{N}{mm}$$

To alternativer for hvordan forbindelsen oppfører seg:

1) Samtidig uttrekking av gjengede deler fra begge treelementene:

$$K_{0.1} := \frac{1}{\frac{1}{K_{ser.ax.1}} + \frac{1}{K_{ser.ax.2}}}$$

hvor:

$K_o$  er den aksielle glidemodulen til skruen

$K_{ser.ax.i}$  er den aksielle glidemodulen for den gjengede delen forankret med en lengde  $l_i$  i det i-ende treelement.

2) Uttrekking av bare én av de to gjengede delene:

$$K_{0.2} := K_{ser.ax.i}$$

### A.2.4 Slip modulus for mainly axially loaded screws:

Den aksielle glidemodulen  $K_{ser}$  for bruksgrensetilstanden per side skal tas uavhengig av vinkelen  $\alpha$  mot fiberretningen:

$$K_{ser.ax.1} := 25 \cdot l_{ef} \cdot d \cdot \frac{N}{mm} = (1.823 \cdot 10^4) \frac{N}{mm}$$

Har tilsvarende  $l_{ef}$  i begge elementene, dermed:

$$K_{ser.ax.2} := K_{ser.ax.1}$$

1)

$$K_{0.1} := \frac{1}{\frac{1}{K_{ser.ax.1}} + \frac{1}{K_{ser.ax.2}}} = (9.113 \cdot 10^3) \frac{N}{mm}$$

Setter dette inn i uttrykket for stivhet:

$$K_{ser.1} := K_{90} \cdot \cos(\alpha) \cdot (\cos(\alpha) - \mu \cdot \sin(\alpha)) + K_{0.1} \cdot \sin(\alpha) \cdot (\sin(\alpha) + \mu \cdot \cos(\alpha))$$

$$K_{ser.1} = 6.48 \frac{kN}{mm}$$

stivhet per skjærflate per  
forbinder alt. 1)

$$\frac{K_{ser.1}}{K_{90}} = 3.096$$

forhold mellom EK5 og alt 1)

2)

$$K_{0.2} := K_{ser.ax.1} = (1.823 \cdot 10^4) \frac{N}{mm}$$

Setter dette inn i uttrykket for stivhet:

$$K_{ser.2} := K_{90} \cdot \cos(\alpha) \cdot (\cos(\alpha) - \mu \cdot \sin(\alpha)) + K_{0.2} \cdot \sin(\alpha) \cdot (\sin(\alpha) + \mu \cdot \cos(\alpha))$$

$$K_{ser.2} = 12.176 \frac{kN}{mm}$$

stivhet per skjærflate per  
forbinder alt. 2)

$$\frac{K_{ser.2}}{K_{90}} = 5.816$$

forhold mellom EK5 og alt 2)

$$\frac{K_{ser.2}}{K_{ser.1}} = 1.879$$

forhold mellom alt. 1) og 2)

### Trykkstav:

Alt. 1)

$$K_{ser.1.t} := K_{ser.1} \cdot n_{tot.t} \cdot n_{snitt} = 155.529 \frac{kN}{mm}$$

stivhet for  
knutepunkt  
trykkstav etter EK5

Alt. 2)

$$K_{ser.2.t} := K_{ser.2} \cdot n_{tot.t} \cdot n_{snitt} = 292.216 \frac{kN}{mm}$$

stivhet for  
knutepunkt  
trykkstav etter EK5

### Strekkestav:

Alt. 1)

$$K_{ser.1.s} := K_{ser.1} \cdot n_{tot.s} \cdot n_{snitt} = 233.293 \frac{kN}{mm}$$

stivhet for  
knutepunkt  
strekkestav etter EK5

Alt. 2)

$$K_{ser.2.s} := K_{ser.2} \cdot n_{tot.s} \cdot n_{snitt} = 438.324 \frac{kN}{mm}$$

stivhet for  
knutepunkt  
strekkestav etter EK5





## **Vedlegg F: Beregning av kapasitet - vinkelrett skrue**



## **F      Beregning av kapasitet vinkelrett skrue**

### **F.1    Egenskaper og variabler**

#### **F.1.1    Dimensjoner fagverk**

Variabler tverrsnitt:

$v := 50 \text{ } \textit{deg}$	Vinkel mellom diagonal og gurt
$b_D := 140 \text{ } \textit{mm}$	Bredde tverrsnitt diagonalstaver
$h_D := 135 \text{ } \textit{mm}$	Høyde tverrsnitt diagonalstaver
$b_{B.1} := 140 \text{ } \textit{mm}$	Bredde tverrsnitt overgurt
$h_{B.1} := 405 \text{ } \textit{mm}$	Høyde tverrsnitt overgurt
$b_{B.2} := 140 \text{ } \textit{mm}$	Bredde tverrsnitt undergurt
$h_{B.2} := 315 \text{ } \textit{mm}$	Høyde tverrsnitt undergurt
$n_{snitt} := 2$	Antall snitt av forbindere

### F.1.2 Materialegenskaper skrue

Karakteristiske fastheter og stivheter for GL30c:

$$\rho_k := 390 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{densitet}$$

$$\rho_{g,mean} := 430 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{midlere densitet}$$

### Materialegenskaper forbinder

Dimensjoner og karakteristiske kapasiteter for selvborende WT-T skrue fra SFS

Skrue:  $WT-T-8.2 \cdot L$

#### Dimensjoner:

Ytre gjengediameter  $d_1 := 8.2 \text{ mm}$

Indre gjengediameter  $d_n := 5.4 \text{ mm}$

Største ytre gjengediameter  $d_3 := 8.9 \text{ mm}$

Skruehodets diameter  $d_h := 10 \text{ mm}$

Det glatte skaftets diameter  $d_2 := 6.3 \text{ mm}$

Skruen kommer i følgende lengder:

$l_s$	$s_1$	$s_2$
(mm)	(mm)	(mm)
220	95	30
245	107	31
275	122	31
300	135	30
330	135	60

### Karakteristiske kapasiteter:

Karakteristisk flytemoment

$$M_{y.Rk} := 25 \text{ } N \cdot m$$

Karakteristisk strekkkapasitet

$$f_{tens.k} := 22 \text{ } kN$$

Karakteristisk flytespenning

$$f_{y.k} := 870 \frac{N}{mm^2}$$

Karakteristisk torosjonsstyrke

$$f_{tor.k} := 25 \text{ } N \cdot m$$

Karakteristisk  
gjennomtrekkingsparameter

$$f_{head.k} := 10 \frac{N}{mm^2}$$

Karakteristisk  
uttrekkparameter

$$f_{ax.k} := 12.8 \frac{N}{mm^2}$$

### F.1.3 Variabler for knutepunkt med skruer vinkelrett på fiberretningen

Konfigurasjon av skruer:

Innskruvningsvinkel i xy-planet i forhold til fiberretning:

$$v = 50 \text{ deg}$$

Innskruvningsvinkel i xz-planet vinkelrett på fiberretningen:

$$\alpha := 0 \text{ deg}$$

Lengde på best egnet skrue:

$$l_s := l_{s_2} = 275 \text{ mm}$$

Lengde gjenget del på hver side:

$$s_1 := s_{1_4} = 135 \text{ mm}$$

Dimensjonerende gurt høyde:

$$h_B := h_{B.2}$$

## F.2 Dimensjoneringsverdier etter EK 5 og ETA

### F.2.1 Kant- og innbyrdes avstander

#### 8 Mekaniske forbindelser

#### 8.7 Skrueforbindelser

##### 8.7.1 Tverrbelastede skruer

(1) Må ta hensyn til en effektiv diameter.

Føringer for effektiv diameter fra skruens Europeisk teknisk evaluering:

##### A.2.2 Laterally loaded screws

Ytre gjengediameter skal brukes som effektiv diameter:

$$d_{ef} := d_1 = 8.2 \text{ mm}$$

(4)  $d_n > 6 \text{ mm}$  gjelder reglene i **8.5.1**.

##### 8.5.1 Tverrbelastede bolter

Beregning av kantavstander:

(3) Minste avstander mellom forbindere innbyrdes og fra forbindere til kant og ende:

Vinkler i utregningen:

$$v_s := 180 \text{ deg} + v = 230 \text{ deg} \quad \text{Kraft på gurt fra strekkstav}$$

$$v_t := v = 50 \text{ deg} \quad \text{Kraft på gurt fra trykkstav}$$

$$v_d := 0 \text{ deg} \quad d := d_1 = 8.2 \text{ mm} \quad \text{Kraft i diagonal}$$

#### Tabell 8.4:

Langs fiberretningen:

$a_{1.1} := (4 +  \cos(v_s) ) \cdot d = 38.071 \text{ mm}$	Gurt(strekkstav)
$a_{1.1} := (4 +  \cos(v_t) ) \cdot d = 38.071 \text{ mm}$	Gurt(trykkstav)
$a_{1.2} := (4 +  \cos(v_d) ) \cdot d = 41 \text{ mm}$	Diagonal(trykk og strekk)
$a_{1.2x} := a_{1.2} \cdot \cos(v) = 26.354 \text{ mm}$	
$a_{1.2y} := a_{1.2} \cdot \sin(v) = 31.408 \text{ mm}$	

Vinkelrett på fiberretningen:

$a_{2.1} := 4 \cdot d = 32.8 \text{ mm}$	Gurt(trykk og strekk)
$a_{2.2} := 4 \cdot d = 32.8 \text{ mm}$	Diagonal(trykk og strekk)
$a_{2.2x} := \frac{a_{2.2}}{\sin(v)} = 42.817 \text{ mm}$	
$a_{2.2y} := a_{2.2} \cdot \sin(90 - v) = 30.107 \text{ mm}$	

Gjeldende verdier for innbyrdes avstander

$$x_{innb} := \max(a_{1.1}, a_{1.2x}, a_{2.2x}) = 42.817 \text{ mm}$$
$$y_{innb} := \max(a_{2.1}, a_{1.2y}, a_{2.2y}) = 32.8 \text{ mm}$$

Kant- og endeavstander:

Belastet ende:

$a_{3t.1} := \max(7 \cdot d, 80 \text{ mm}) = 80 \text{ mm}$	Gurt(trykkstav)
$a_{3t.2} := \max(7 \cdot d, 80 \text{ mm}) = 80 \text{ mm}$	Diagonal(strekkstav)
$a_{3t.2y} := a_{3t.2} \cdot \sin(v) = 61.284 \text{ mm}$	
$a_{3t.2x} := a_{3t.2} \cdot \cos(v) = 51.423 \text{ mm}$	



Ubelastet ende:

$$a_{3c.1} := \left(1 + 6 \cdot \left|\sin(v_s)\right|\right) \cdot d = 45.889 \text{ mm}$$

Gurt(strekkstav)

$$a_{3c.2} := \left(1 + 6 \cdot \sin(v_d)\right) \cdot d = 8.2 \text{ mm}$$

Diagonal(trykkstav)

$$a_{3c.2y} := a_{3c.2} \cdot \sin(v) = 6.282 \text{ mm}$$

$$a_{3c.2x} := a_{3c.2} \cdot \cos(v) = 5.271 \text{ mm}$$

Belastet kant:

$$a_{4t.1} := \max\left(\left(2 + 2 \cdot \sin(v_t)\right) \cdot d, 3 \cdot d\right) = 28.963 \text{ mm}$$

Gurt(trykk og strekk)

$$a_{4t.2} := \max\left(\left(2 + 2 \cdot \sin(v_d)\right) \cdot d, 3 \cdot d\right) = 24.6 \text{ mm}$$

Diagonal(trykk og strekk)

Ubelastet kant:

$$a_{4c.1} := 3 \cdot d = 24.6 \text{ mm}$$

Gurt(trykk og strekk)

$$a_{4c.2} := 3 \cdot d = 24.6 \text{ mm}$$

Diagonal(trykk og strekk)

$$a_{4c.2x} := \frac{a_{4c.2}}{\sin(v)} = 32.113 \text{ mm}$$

$$a_{4c.2y} := a_{4c.2} \cdot \sin(90 - v) = 22.58 \text{ mm}$$

## F.2.2 Beregning av antall forbindere

Krefter

$F$  Aksialkraft i staven

$F \cdot \cos(v) = 0.643 F$  Kraft i gurtens fiberretning

### Forbindere i trykkstav:

Tilgjengelig avstand i x- og y-retning for forbindere

$$x_{tilgj} := \frac{h_D}{\sin(v)} - 2 \cdot a_{4c.2x} = 112.004 \text{ mm}$$

$$y_{tilgj} := h_B - \max(a_{4c.1}, a_{4c.2y}) - \max(a_{4t.1}, a_{3c.2y}) = 261.437 \text{ mm}$$

Totalt antall forbindere tverrsnittene har plass til:

$$x_{trykk} := \frac{x_{tilgj}}{x_{innb}} + 1 = 3.616$$

$$y_{trykk} := \frac{y_{tilgj}}{y_{innb}} + 1 = 8.971$$

$n_{x.t} := \text{floor}(x_{trykk}) = 3$  Antall forbindere x-retning trykkstav

$n_{y.t} := \text{floor}(y_{trykk}) = 8$  Antall forbindere y-retning trykkstav

$n_{tot.t} := n_{x.t} \cdot n_{y.t} = 24$  Totalt antall forbindere i et snitt

Forbindere langs tredelenes respektive fiberretninger:

$n_{1.t} := n_{x.t} = 3$  Forbindere langs fiberretning element 1

$n_{2.t} := n_{y.t} = 8$  Forbindere langs fiberretning element 2

### Forbindere i strekkstav:

Tilgjengelig avstand i x- og y-retning for forbindere

$$x_{tilgj} := \frac{h_D}{\sin(v)} - 2 \cdot a_{4c.2x} = 112.004 \text{ mm}$$

$$y_{tilgj} := h_B - \max(a_{4c.1}, a_{4c.2y}) - \max(a_{4t.1}, a_{3t.2y}) = 229.116 \text{ mm}$$

Totalt antall forbindere tverrsnittene har plass til:

$$x_{strekk} := \frac{x_{tilgj}}{x_{innb}} + 1 = 3.616$$

$$y_{strekk} := \frac{y_{tilgj}}{y_{innb}} + 1 = 7.985$$

$$n_{x.s} := \text{floor}(x_{strekk}) = 3$$

Forbindere x-retning strekkstav

$$n_{y.s} := \text{floor}(y_{strekk}) = 7$$

Forbindere y-retning strekkstav

$$n_{tot.s} := n_{x.s} \cdot n_{y.s} = 21$$

Totalt antall forbindere i et snitt

Forbindere langs tredelenes respektive fiberretninger:

$$n_{1.s} := n_{x.s} = 3$$

Forbindere langs fiberretning element 1

$$n_{2.s} := n_{y.s} = 7$$

Forbindere langs fiberretning element 2

### F.2.3 Dimensjonerende verdier for n:

#### Trykkstav:

$$n_{1.t} = 3$$

Antall forbindere i fiberretningen gurt (x-retn.)

$$n_{2.t} = 8$$

Antall forbindere i fiberretningen diagonal

$$n_{rad1.t} := n_{2.t} = 8$$

Rader av forbindere langs fiberretningen i gurten

$$n_{rad2.t} := n_{1.t} = 3$$

Rader av forbindere langs fiberretningen i diagonalen

$$n_{tot.t} = 24$$

Totalt antall forbindere i forbindelsen(et snitt) med trykkstav

#### Strekstav:

$$n_{1.s} = 3$$

Antall forbindere i fiberretningen gurt

$$n_{2.s} = 7$$

Antall forbindere i fiberretningen diagonal

$$n_{rad1.s} := n_{2.s} = 7$$

Rader av forbindere langs fiberretningen i gurten

$$n_{rad2.s} := n_{1.t} = 3$$

Rader av forbindere langs fiberretningen i diagonalen

$$n_{tot.s} = 21$$

Totalt antall forbindere i forbindelsen(et snitt) med strekkstav

### 8.5.1 Tverrbelastede bolter

#### (2) Hullkantfasthet

$$(8.33) \quad k_{90} := 1.35 + 0.015 \cdot d = 1.473$$

$$(8.31) \quad f_{h.0.k} := 0.082 \cdot (1 - 0.01 \cdot d) \cdot \rho_k \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} = 29.358 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$(8.32) \quad f_{h.v.k} := \frac{f_{h.0.k}}{k_{90} \cdot (\sin(v))^2 + (\cos(v))^2} = 22.979 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

## F.2.4 Hullkantfasthet etter Eurokode 5

### Verdier tilsvarende E.2.4

## F.2.5 Effektive forbindere etter Eurokode 5

### (4) Effektive forbindere

#### Trykkstav:

Antallet effektive forbindere i **diagonalen**:

Last i fiberretning

$$(8.34) \quad n_{ef.2.t} := \min \left( n_{2.t}, n_{2.t}^{0.9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_{1.2}}{13 d}} \right) = 5.117$$

Antallet effektive forbindere i **gurt**:

Vinkel mellom last og fiberretning gurt:  $v = 50 \text{ deg}$

$$(8.34) \quad n_{ef.0.1.t} := \min \left( n_{1.t}, n_{1.t}^{0.9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_{1.1}}{13 d}} \right) = 2.078$$

$$(8.35) \quad n_{ef.90.1.t} := n_{1.t} = 3$$

Lineær interpolasjon mellom verdiene:

$$n_{ef.1.t} := n_{ef.0.1.t} + (n_{ef.90.1.t} - n_{ef.0.1.t}) \cdot \frac{v - 0 \text{ deg}}{(90 - 0) \text{ deg}} = 2.59$$

### Strekkestav:

Antallet effektive forbindere i **diagonalen**:

Last i fiberretning

$$(8.34) \quad n_{ef.2.s} := \min \left( n_{2.s}, n_{2.s}^{0.9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_{1.2}}{13 d}} \right) = 4.538$$

Antallet effektive forbindere i **gurt**:

Vinkel mellom last og fiberretning gurt:  $v = 50 \text{ deg}$

$$(8.34) \quad n_{ef.0.1.s} := \min \left( n_{1.s}, n_{1.s}^{0.9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_{1.1}}{13 d}} \right) = 2.078$$

$$(8.35) \quad n_{ef.90.1.s} := n_{1.s} = 3$$

Lineær interpolasjon mellom verdiene:

$$n_{ef.1.s} := n_{ef.0.1.s} + (n_{ef.90.1.s} - n_{ef.0.1.s}) \cdot \frac{v - 0 \text{ deg}}{(90 - 0) \text{ deg}} = 2.59$$

## F.2.6 Aksialkapasitet

**Verdier og krav tilsvarende E.2.6**

### 8.7.2 Aksialbelastede skruer

(3) Krav inntrengningsdybde gjenget del

$$l_{ef} := s_1 \qquad \frac{l_{ef}}{6 \cdot d} = 2.744 \qquad >1 \text{ ok}$$

(4) Krav diameter

$$6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm} \qquad d = 8.2 \text{ mm} \qquad \text{ok}$$

$$\frac{d_n}{d} = 0.659 \qquad 0.6 \leq \frac{d_n}{d} \leq 0.75 \qquad \text{ok}$$

(8) Effektivt antall skruer(aksial)

$$(8.41) \quad n_{ef} := n^{0.9}$$

$$n_{ef} := 1^{0.9} = 1 \qquad \text{for én forbinder}$$

## F.2.6 Uttrekkskapasitet etter Europeisk Teknisk Godkjenning

### A.2.3.2 Axial withdrawal capacity

$$\rho_a := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Tilhørende densitet for gitte parametere}$$

$$(2.4) \quad k_{ax} := 0.3 + \frac{0.7 \cdot \alpha}{45 \text{ deg}} \qquad \text{for } 15^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$$

$$k_{ax} := 1 \qquad \text{for } 45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

Formelen fra den tekniske evalueringen tar høyde for høyere densitet:

$$(2.3) \quad F_{ax.\alpha.Rk} := n_{ef} \cdot k_{ax} \cdot f_{ax.k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left( \frac{\rho_k}{350} \right)^{0.8} = 15.451 \text{ kN}$$

Siden denne uttrekkskapasiteten er konstant for alle vinkler vi benytter kan denne benyttes for både diagonal og gurt.



(6) Karakteristisk gjennomtrekkingsmotstand

$$(8.40b) \quad F_{g.ax.\alpha.Rk} := F_{ax.\alpha.Rk} + n_{ef} \cdot f_{head.k} \cdot d_h^2 \cdot \left( \frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0.8} = 16.541 \text{ kN}$$

**Dimensjonerende karakteristisk aksielle-motstand:**

$$F_{ax.Rk} := \min(F_{ax.\alpha.Rk}, F_{g.ax.\alpha.Rk}) = 15.451 \text{ kN}$$

(7) Karakteristisk strekkmotstand

$$(8.40c) \quad F_{t.Rk} := n_{ef} \cdot f_{tens.k} = 22 \text{ kN}$$

## F.3 Kapasitetsberegning etter EK5

### F.3.1 Kapasitet for én forbinder

## 8.2 Tverrbelastede stavformede forbindere

### 8.2.2 Tre mot tre

$$d := d_{ef} = 8.2 \text{ mm} \quad t_1 := \frac{l_s}{2} = 137.5 \text{ mm} \quad t_2 := t_1$$

Kapasitetskontroll forbindere **diagonal**:

Kraften går i fiberretningen langs diagonalen, 50 grader på gurten.

$$f_{h.1.k} := f_{h.v.k} = 22.979 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{h.2.k} := f_{h.0.k} = 29.358 \frac{N}{mm^2}$$

$$\beta := \frac{f_{h.2.k}}{f_{h.1.k}} = 1.278$$

$$F_{v.Rk.a} := f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d = 25.909 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.b} := f_{h.2.k} \cdot t_2 \cdot d = 33.101 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.c} := \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left( \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right) + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4}$$

$$F_{v.Rk.c} = 16.057 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.d} := 1.05 \cdot \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left( \sqrt{2 \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4}$$

$$F_{v.Rk.d} = 13.483 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk.e} := 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2 \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y.Rk} \cdot f_{h.1.k} \cdot d} + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 7.602 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk2} := \min(F_{v.Rk.a}, F_{v.Rk.b}, F_{v.Rk.c}, F_{v.Rk.d}, F_{v.Rk.e}) = 7.602 \text{ kN} \quad (8.6)$$

Kapasitetskontroll forbindere **gurten**:

Må også sjekke for den horisontale kraftkomponenten i gurten. Nå går kraften i fiberretningen langs gurtene, og 50 grader på diagonalen.

$$f_{h.1.k} := f_{h.0.k} = 29.358 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{h.2.k} := f_{h.v.k} = 22.979 \frac{N}{mm^2}$$

$$\beta := \frac{f_{h.2.k}}{f_{h.1.k}} = 0.783$$

$$F_{l.Rk.a} := f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d = 33.101 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.b} := f_{h.2.k} \cdot t_2 \cdot d = 25.909 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.c} := \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left( \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right)} + \beta^3 \cdot \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \cdot \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4}$$

$$F_{l.Rk.c} = 16.057 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.d} := 1.05 \cdot \frac{f_{h.1.k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left( \sqrt{2 \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right) + \frac{F_{ax.Rk}}{4}$$

$$F_{l.Rk.d} = 15.13 \text{ kN}$$

$$F_{l.Rk.e} := 1.15 \cdot \sqrt{\frac{2 \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y.Rk} \cdot f_{h.1.k} \cdot d} + \frac{F_{ax.Rk}}{4} = 7.602 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk1} := \min(F_{v.Rk.a}, F_{v.Rk.b}, F_{v.Rk.c}, F_{v.Rk.d}, F_{v.Rk.e}) = 7.602 \text{ kN} \quad (8.6)$$

Dimensjonerende kapasitet for én forbinder:

$$F_{v.Rk.} := \min(F_{v.Rk1}, F_{v.Rk2}) = 7.602 \text{ kN}$$

## F.3.2 Kapasitet for flere forbindere

### 8.1.2 Forbindelser med flere forbindere

#### (4) Kapasitet én rad forbindere

$$F_{v.ef.Rk} := n_{ef} \cdot F_{v.Rk} \quad (8.1)$$

#### **Beregninger trykkstav:**

##### **Diagonal:**

$$F_{v.ef.Rk2.t} := n_{ef.2.t} \cdot F_{v.Rk2} = 38.899 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i diagonalen:

$$F_{Rk2.t} := F_{v.ef.Rk2.t} \cdot n_{rad2.t} \cdot n_{snitt} = 233.394 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i diagonalen:

$$F_{Rd2.t} := k_{mod} \frac{F_{Rk2.t}}{\gamma_M} = 142.066 \text{ kN}$$

##### **Gurt:**

(5) Kraft parallelt med raden i gurten:

$$F_{ed} \cdot \cos(v) \quad \cos(v) = 0.643$$

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurten:

$$F_{v.ef.Rk1.t} := n_{ef.1.t} \cdot \frac{F_{v.Rk1}}{\cos(v)} = 30.631 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i gurten:

$$F_{Rk1.t} := F_{v.ef.Rk1.t} \cdot n_{rad1.t} \cdot n_{snitt} = 490.094 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i gurten:

$$F_{Rd1.t} := k_{mod} \frac{F_{Rk1.t}}{\gamma_M} = 298.318 \text{ kN}$$

**Dimensjonerende kapasitet for alle forbindere:**

$$F_{v.Rd.EK5.t} := \min(F_{Rd1.t}, F_{Rd2.t}) = 142.066 \text{ kN}$$

Sammenligner kapasitetene i forbinde i henholdsvis gurt og diagonal:

$$\frac{F_{Rd1.t}}{F_{Rd2.t}} = 2.1$$

**Beregninger strekkstav:**

**Diagonal:**

$$F_{v.ef.Rk2.s} := n_{ef.2.s} \cdot F_{v.Rk2} = 34.494 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i diagonalen:

$$F_{Rk2.s} := F_{v.ef.Rk2.s} \cdot n_{rad2.s} \cdot n_{snitt} = 206.965 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinde i diagonalen:

$$F_{Rd2.s} := k_{mod} \frac{F_{Rk2.s}}{\gamma_M} = 125.978 \text{ kN}$$

**Gurt:**

(5) Kraft parallelt med raden i gurt:

$$F_{ed} \cdot \cos(v) \quad \cos(v) = 0.643$$

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurt:

$$F_{v.ef.Rk1.s} := n_{ef.1.s} \cdot \frac{F_{v.Rk1}}{\cos(v)} = 30.631 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i gurten:

$$F_{Rk1.s} := F_{v.ef.Rk1.s} \cdot n_{rad1.s} \cdot n_{snitt} = 428.833 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinde i gurten:

$$F_{Rd1.s} := k_{mod} \frac{F_{Rk1.s}}{\gamma_M} = 261.029 \text{ kN}$$

**Dimensjonerende kapasitet for alle forbindere:**

$$F_{v.Rd.EK5.s} := \min(F_{Rd1.s}, F_{Rd2.s}) = 125.978 \text{ kN}$$

Sammenligner kapasitetene i forbinde i henholdsvis gurt og diagonal:

$$\frac{F_{Rd1.s}}{F_{Rd2.s}} = 2.072$$

Sammenlikner trykkstav med strekkstav:

$$\frac{F_{v.Rd.EK5.s}}{F_{v.Rd.EK5.t}} = 0.887$$

## F.4 Kapasitetsberegning etter alternativ metode:

Våre verdier:

$R_i$	Karakteristisk kapasitet parallelt med skjærplanet, hvor $i := a - f$
$M_{y.Rk} = 25 \text{ N} \cdot \text{m}$	Karakteristisk flytemoment til skruen
$d := d_{ef} = 8.2 \text{ mm}$	Effektiv diameter til skruen/forbinderen
$S_1 := \frac{l_s}{2} = 137.5 \text{ mm}$	Skruens forankringslengde i det første treelementet, målt ortogonalt til skjærplanet
$S_2 := S_1$	Skruens forankringslengde i det andre treelementet, målt ortogonalt til skjærplanet
$f_{h.1.k} := f_{h.v.k} = 22.979 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Karakteristisk hullkantfasthet i den første tredelen
$f_{h.2.k} := f_{h.o.k} = 29.358 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Karakteristisk hullkantfasthet i den andre tredelen
$\beta := \frac{f_{h.2.k}}{f_{h.1.k}} = 1.278$	Forholdet mellom komponentenes hullkantfasthet
$R_{ax.k} := F_{ax.Rk} = 15.451 \text{ kN}$	Minste karakteristisk uttrekkskapasitet til forbinderen fra den første eller andre tredelen
$\alpha = 0 \text{ deg}$	Innskruvningsvinkel i forhold til perpendikulært på fiberretningen
$\mu := 0.25$	Friksjonskoeffisienten mellom overflaten til tredelene

$$R_a := R_{ax.k} \cdot \sin(\alpha) + f_{h.1.k} \cdot S_1 \cdot d \cdot \cos(\alpha) = 25.909 \text{ kN} \quad (a)$$

$$R_b := R_{ax.k} \cdot \sin(\alpha) + f_{h.2.k} \cdot S_2 \cdot d \cdot \cos(\alpha) = 33.101 \text{ kN} \quad (b)$$

$$R_{c1} := \left( \sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left( 1 + \frac{S_2}{S_1} + \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right)} + \beta^3 \cdot \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 - \beta \cdot \left( 1 + \frac{S_2}{S_1} \right) \right) \quad (c)$$

$$R_c := R_{ax.k} \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{f_{h.1.k} \cdot S_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) \cdot R_{c1} = 16.057 \text{ kN}$$

$$R_{d1} := (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \left( \frac{4 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot S_1^2} \right)} - \beta \right) \cdot \beta \quad (d)$$

$$R_d := R_{ax.k} \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{f_{h.1.k} \cdot S_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot R_{d1} = 15.568 \text{ kN}$$

$$R_{e1} := (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \left( \frac{4 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y.Rk}}{f_{h.1.k} \cdot d \cdot S_2^2} \right)} - \beta \right) \quad (e)$$

$$R_e := R_{ax.k} \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{f_{h.1.k} \cdot S_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot R_{e1} = 14.593 \text{ kN}$$

$$R_{f1} := \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y.Rk} \cdot f_{h.1.k} \cdot d \cdot (\cos(\alpha))^2} \quad (f)$$

$$R_f := R_{ax.k} \cdot (\mu \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + (1 - \mu \cdot \tan(\alpha)) \cdot R_{f1} = 7.114 \text{ kN}$$

(5)

Kapasitet parallelt med skjærplanet per snitt per forbinder:

$$F_{v.Rk} := \min(R_a, R_b, R_c, R_d, R_e, R_f) = 7.114 \text{ kN}$$



## F.4.1 Kapasitet for én forbinder

### 8.1.2 Forbindelser med flere forbindere

(4) Kapasitet én rad forbindere

$$(8.1) \quad F_{v.ef.Rk} := n_{ef} \cdot F_{v.Rk}$$

#### **Beregninger trykkstav:**

**Diagonal:**

$$F_{v.ef.Rk2.t} := n_{ef.2.t} \cdot F_{v.Rk} = 36.403 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i diagonalen:

$$F_{Rk2.t} := F_{v.ef.Rk2.t} \cdot n_{rad2.t} \cdot n_{snitt} = 218.42 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i diagonalen:

$$F_{Rd2.t} := k_{mod} \frac{F_{Rk2.t}}{\gamma_M} = 132.952 \text{ kN}$$

**Gurt:**

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurten:

(5) Kraft parallelt med raden i gurten:

$$F_{ed} \cdot \cos(v) \quad \cos(v) = 0.643$$

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurten:

$$F_{v.ef.Rk1.t} := n_{ef.1.t} \cdot \frac{F_{v.Rk}}{\cos(v)} = 28.666 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i gurten:

$$F_{Rk1.t} := F_{v.ef.Rk1.t} \cdot n_{rad1.t} \cdot n_{snitt} = 458.653 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i gurten:

$$F_{Rd1.t} := k_{mod} \frac{F_{Rk1.t}}{\gamma_M} = 279.18 \text{ kN}$$

**Bestemmende kapasitet:**

$$F_{v.Rd.t} := \min(F_{Rd1.t}, F_{Rd2.t}) = 132.952 \text{ kN}$$

Sammenligner kapasitetene i forbinderne i henholdsvis gurt og diagonal:

$$\frac{F_{Rd1.t}}{F_{Rd2.t}} = 2.1$$

Differanse mellom metode 1 og 2:

$$\frac{F_{v.Rd.t}}{F_{v.Rd.EK5.t}} = 0.936$$

**Beregninger strekkstav:**

**Diagonal:**

$$F_{v.ef.Rk2.s} := n_{ef.2.s} \cdot F_{v.Rk} = 32.281 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbinderne i diagonalen:

$$F_{Rk2.s} := F_{v.ef.Rk2.s} \cdot n_{rad2.s} \cdot n_{snitt} = 193.687 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i diagonalen:

$$F_{Rd2.s} := k_{mod} \frac{F_{Rk2.s}}{\gamma_M} = 117.896 \text{ kN}$$

**Gurt:**

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbinderne i gurten:

(5) Kraft parallelt med raden i gurten:

$$F_{ed} \cdot \cos(v) \quad \cos(v) = 0.643$$

Karakteristisk kapasitet for én rad med forbindere i gurten:

$$F_{v.ef.Rk1.s} := n_{ef.1.s} \cdot \frac{F_{v.Rk}}{\cos(v)} = 28.666 \text{ kN}$$

Karakteristisk kapasitet for alle radene med forbindere i gurten:

$$F_{Rk1.s} := F_{v.ef.Rk1.s} \cdot n_{rad1.s} \cdot n_{snitt} = 401.321 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet for forbinderne i gurten:

$$F_{Rd1.s} := k_{mod} \frac{F_{Rk1.s}}{\gamma_M} = 244.283 \text{ kN}$$

**Bestemmende kapasitet:**

$$F_{v.Rd.s} := \min(F_{Rd1.s}, F_{Rd2.s}) = 117.896 \text{ kN}$$

Sammenligner kapasitetene i forbinderne i henholdsvis gurt og diagonal:

$$\frac{F_{Rd1.s}}{F_{Rd2.s}} = 2.072$$

Differanse mellom metode 1 og 2:

$$\frac{F_{v.Rd.s}}{F_{v.Rd.EK5.s}} = 0.936$$

## F.5 Kontroll av splitting av gurtene:

### 8.1.4 Forbindelseskrefter som danner en vinkel med fiberretningen

(1) Kontroll av mulig oppspalting pga. strekkraftkomponenten:

$$F_{v.Ed} := F_{Ed} \cdot \sin(v) = 0 \cdot \frac{1}{N} \cdot \textcolor{blue}{kN} \quad \text{Strekraftkomponenten}$$

(2) Beregning skjærkraftkomponent

$$F_{v.Ed} := F_{Ed} \cdot \sin(v)$$

antar at skjærkreftene på begge sider av diagonalen er like store.

(3) Beregning splittingskapasitet

$$w := 1.0 \quad (8.5)$$

$$d := d_1 = 8.2 \text{ mm}$$

Kontroll **trykkstav**:

Avstand fra belastet kant til senter av forbinderen lengst vekk:

$$h := h_B = 315 \text{ mm}$$

$$h_e := h - a_{4c.1} - \frac{d}{2} = 286.3 \text{ mm}$$

$$b := 2 \cdot \min(b_{B.1}, b_{B.2}) = 280 \text{ mm}$$

Karakteristisk splittingskapasitet

$$F_{90.Rk} := 14 \cdot b \cdot w \cdot \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} = 219.741 \text{ kN} \quad (8.4)$$

Dimensjonerende splittingskapasitet

$$F_{90.Rd} := k_{mod} \cdot \frac{F_{90.Rk}}{\gamma_M} = 133.755 \text{ kN}$$

Kapasitet for stavkraft:

$$F_{Rd} := \frac{F_{90.Rd}}{\sin(v)} = 174.605 \text{ kN}$$

Største tillatte kraft i trykkstav for å unngå splitting

Kontroll **strekkstav**:

Avstand fra belastet kant til senter av forbinderen lengst vekk:

$$h := h_B = 315 \text{ mm}$$

$$h_e := h - \max(a_{4c.1}, a_{3t.2y}) - \frac{d}{2} = 249.616 \text{ mm}$$

$$b := 2 \cdot \min(b_{B.1}, b_{B.2}) = 280 \text{ mm}$$

Karakteristisk splittingskapasitet

$$F_{90.Rk} := 14 \cdot b \cdot w \cdot \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} = 135.939 \text{ kN} \quad (8.4)$$

Dimensjonerende splittingskapasitet

$$F_{90.Rd} := k_{mod} \cdot \frac{F_{90.Rk}}{\gamma_M} = 82.745 \text{ kN}$$

Kapasitet for stavkraft:

$$F_{Rd} := \frac{F_{90.Rd}}{\sin(v)} = 108.016 \text{ kN}$$

Største tillatte kraft i strekkstav for å unngå splitting

## F.6 Stivhetsberegning etter Eurokode 5

### 7.1 Glidning i forbindelsene

Tabell 7.1

$$d := d_n = 5.4 \text{ mm}$$

$$K_{ser} := \rho_m^{1.5} \cdot \frac{d}{23} \cdot \frac{N}{mm} = (2.093 \cdot 10^3) \frac{N}{mm}$$

**Trykkstav:**

$$K_{ser.tot.t} := K_{ser} \cdot n_{tot.t} \cdot n_{snitt} = 100.487 \frac{kN}{mm}$$

stivhet for  
knutepunkt  
trykkstav etter EK5

**Strekstav:**

$$K_{ser.tot.s} := K_{ser} \cdot n_{tot.s} \cdot n_{snitt} = 87.926 \frac{kN}{mm}$$

stivhet for  
knutepunkt  
strekstav etter EK5

## **Vedlegg G: Beregninger av stålfagverk**





## G. Beregninger av stålfagverk

### G. 1 Verdier

#### G.1.1 Forutsetninger og antagelser

Stålkvalitet: **S355**

Forbindelser: Sveis

Klimaklasse: 1

Overslag last:  $q = 10 \text{ kN/m}$

#### Fagverkets geometri

$L := 30000 \text{ mm}$  Totalt spenn

$v := 50 \text{ deg}$  Vinkel mellom gurt og diagonalstaver

$n := 6$  Antall staver

$L_B := \frac{L}{n} = 5 \text{ m}$  Horisontal senteravstand mellom knutepunktene

$L_D := \frac{0.5 \cdot L_B}{\cos(v)} = 3889.3 \text{ mm}$  Lengde diagonalstaver

#### Partialfaktorer

$\gamma_{M0} := 1.05$        $\gamma_{M1} := \gamma_{M0}$        $\gamma_{M2} := 1.25$

#### G.1.2 Materialelegenskaper

$E := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  Elastisitetsmodul for stål

$G := 81000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  Skjærmodul

$\nu := 0.3$  Poissons-tall i elastisk området

$f_y := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$f_u := 490 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

## G.2 Tverrsnittsdata

### G.2.1 Tverrsnittsdata overgurt

Valgt profil: **HE 200 A** Verdier hentet fra tabell 1.2 i *Stålkonstruksjoner*

Verdier fra tabell:

$$h_{B.1} := 190 \text{ mm}$$

$$b_{B.1} := 200 \text{ mm}$$

$$t_{f.B.1} := 10 \text{ mm} \quad \text{Flenstykkelse}$$

$$t_{w.B.1} := 6.5 \text{ mm} \quad \text{Stegtykkelse}$$

$$r_{B.1} := 18 \text{ mm} \quad \text{Radius mellom steg og flens}$$

$$A_{B.1} := 5.38 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$h_{w.B.1} := h_{B.1} - 2 \cdot t_{f.B.1} - 2 \cdot r_{B.1} = 134 \text{ mm} \quad \text{Høyde steg}$$

$$b_{f.B.1} := \frac{b_{B.1} - t_{w.B.1} - 2 \cdot r_{B.1}}{2} = 78.75 \text{ mm} \quad \text{Bredde flens}$$

y-y:

z-z:

$$I_{y.B.1} := 36.9 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{z.B.1} := 13.4 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{y.B.1} := 389 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{z.B.1} := 13.4 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_{y.B.1} := 82.8 \text{ mm}$$

$$i_{z.B.1} := 49.8 \text{ mm}$$

$$I_{T.B.1} := 211 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$S_{y.B.1} := 215 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$C_{w.B.1} := 108 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

$$W_{y.pl.B.1} := 2 \cdot S_{y.B.1} = (4.3 \cdot 10^5) \text{ mm}^3$$

$$W_{z.pl.B.1} := 2.038 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

### G.2.1 Tverrsnittsdata undergurt

Valgt profil: **HE 100 A**

Verdier fra tabell:

Verdier hentet fra tabell 1.2 i *Stålkonstruksjoner*

$$h_{B.2} := 96 \text{ mm}$$

$$b_{B.2} := 100 \text{ mm}$$

$$t_{f.B.2} := 8 \text{ mm}$$

$$t_{w.B.2} := 5 \text{ mm}$$

$$r_{B.2} := 12 \text{ mm}$$

$$A_{B.2} := 2.124 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$h_{w.B.2} := h_{B.2} - 2 \cdot t_{f.B.2} - 2 \cdot r_{B.2} = 56 \text{ mm}$$

$$b_{f.B.2} := \frac{b_{B.2} - t_{w.B.2} - 2 \cdot r_{B.2}}{2} = 35.5 \text{ mm}$$

y-y:

z-z:

$$I_{y.B.2} := 3.49 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{z.B.2} := 1.34 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{y.B.2} := 72.8 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{z.B.2} := 26.8 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_{y.B.2} := 40.6 \text{ mm}$$

$$i_{z.B.2} := 25.1 \text{ mm}$$

$$I_{T.B.2} := 52.6 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$S_{y.B.2} := 41.5 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y.pl.B.2} := 2 \cdot S_{y.B.2} = (8.3 \cdot 10^4) \text{ mm}^3$$

$$W_{z.pl.B.2} := 4.115 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$C_{w.B.2} := 2.581 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

### G.2.3 Tverrsnittsdata diagonalstaver

**D.1 og D.12** Verdier hentet fra tabell 1.4 i *Stålkonstruksjoner*

Valgt profil: **HFRHS 60x40x4**

$$h_{D.1} := 60 \text{ mm}$$

$$t_{D.1} := 4 \text{ mm}$$

$$b_{D.1} := 40 \text{ mm}$$

$$h_{w.D.1} := h_{D.1} - 2 \cdot t_{D.1} = 52 \text{ mm}$$

$$A_{D.1} := 0.728 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$b_{f.D.1} := b_{D.1} - 2 \cdot t_{D.1}$$

y-y:

z-z:

$$I_{y.D.1} := 0.366 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{z.D.1} := 0.173 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{y.D.1} := 11.2 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{z.D.1} := 8.67 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_{y.D.1} := 21.5 \text{ mm}$$

$$i_{z.D.1} := 15.4 \text{ mm}$$

$$W_{y.pl.D.1} := 14.1 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{z.pl.D.1} := 10.5 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_{T.D.1} := 0.366 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

### D.2 og D.11

Valgt profil: **HFRHS 90x90x4**

Verdier hentet fra FEM !

$$h_{D.2} := 90 \text{ mm}$$

$$t_{D.2} := 4 \text{ mm}$$

$$b_{D.2} := 90 \text{ mm}$$

$$h_{w.D.2} := h_{D.2} - 2 \cdot t_{D.2} = 82 \text{ mm}$$

$$A_{D.2} := 1.359 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$b_{f.D.2} := h_{w.D.2} = 82 \text{ mm}$$

$$I_{D.2} := 1.663 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{T.D.2} := 2.640 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

$$W_{el.D.2} := 3.696 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl.D.2} := 4.361 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i_{D.2} := 35 \text{ mm}$$

### D.3 og D.10

Valgt profil: **HFRHS 40x40x3.2**

Verdier hentet fra FEM !

$$h_{D.3} := 40 \text{ mm}$$

$$t_{D.3} := 3.2 \text{ mm}$$

$$b_{D.3} := 40 \text{ mm}$$

$$h_{w.D.3} := h_{D.3} - 2 \cdot t_{D.3} = 33.6 \text{ mm}$$

$$A_{D.3} := 466 \text{ mm}^2$$

$$b_{f.D.3} := b_{D.3} - 2 \cdot t_{D.3} = 33.6 \text{ mm}$$

y-y:

$$I_{D.3} := 1.04 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{T.D.3} := 1.65 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$W_{D.3} := 5.22 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl.D.3} := 6.4 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_{D.3} := 15 \text{ mm}$$

### D.4 og D.9

Valgt profil: **HFRHS 80x80x3**

Verdier hentet fra FEM !

$$h_{D.4} := 80 \text{ mm}$$

$$t_{D.4} := 3 \text{ mm}$$

$$b_{D.4} := 80 \text{ mm}$$

$$h_{w.D.4} := h_{D.4} - 2 \cdot t_{D.4} = 74 \text{ mm}$$

$$A_{D.4} := 914 \text{ mm}^2$$

$$b_{f.D.4} := h_{w.D.4} = 74 \text{ mm}$$

$$I_{D.4} := 8.982 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{T.D.4} := 1.414 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{D.4} := 2.246 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl.D.4} := 2.63 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i_{D.4} := 31 \text{ mm}$$

## D.5 og D.8

Valgt profil: **HFRHS 40x40x3.2**

Verdier hentet fra blåboka !

$$h_{D.5} := 40 \text{ mm}$$

$$t_{D.5} := 3.2 \text{ mm}$$

$$b_{D.5} := 40 \text{ mm}$$

$$h_{w.D.5} := h_{D.5} - 2 \cdot t_{D.5} = 33.6 \text{ mm}$$

$$A_{D.5} := 466 \text{ mm}^2$$

$$b_{f.D.5} := h_{w.D.5} = 33.6 \text{ mm}$$

$$I_{D.5} := 1.04 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{T.D.5} := 1.65 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$W_{D.5} := 5.22 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl.D.5} := 6.4 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_{D.5} := 15 \text{ mm}$$

## D.6 og D.7

Valgt profil: **HFRHS 60x60x3**

Verdier hentet fra FEM !

$$h_{D.6} := 60 \text{ mm}$$

$$t_{D.6} := 3 \text{ mm}$$

$$b_{D.6} := 60 \text{ mm}$$

$$h_{w.D.6} := h_{D.6} - 2 \cdot t_{D.6} = 54 \text{ mm}$$

$$A_{D.6} := 674 \text{ mm}^2$$

$$b_{f.D.6} := h_{w.D.6} = 54 \text{ mm}$$

$$I_{D.6} := 3.621 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{T.D.6} := 5.790 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$W_{D.6} := 1.207 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl.D.6} := 1.433 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i_{D.6} := 23 \text{ mm}$$

## G.3 Tverrsnittsklassifisering

Vi ønsker å dimensjonere innenfor tverrsnittsklasse 1 og 2.

### 5.5.2 Klassifisering av tverrsnitt

Bredde/tykkelse forhold for trykkpåkjente tverrsnittsdeler:

Tabell 5.2 - 5.3

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235}{355}}$$

#### G.3.1 Tverrsnittsklassifisering av overgurt

Steg:

Flens:

$$c := h_{w.B.1} = 134 \text{ mm}$$

$$c_2 := b_{f.B.1} = 78.75 \text{ mm}$$

$$t := t_{w.B.1} = 6.5 \text{ mm}$$

$$t := t_{f.B.1} = 10 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t \cdot \varepsilon} = 16.47 \quad \begin{array}{l} < 72 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 83 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

$$\frac{c_2}{t \cdot \varepsilon} = 9.68 \quad \begin{array}{l} < 9 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 10 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

Tverrsnittsklasse: 2

#### G.3.2 Tverrsnittsklassifisering av undergurt

Steg:

Flens:

$$c := h_{w.B.2} = 56 \text{ mm}$$

$$c_2 := b_{f.B.2} = 35.5 \text{ mm}$$

$$t := t_{w.B.2} = 5 \text{ mm}$$

$$t := t_{f.B.2} = 8 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t \cdot \varepsilon} = 8.6 \quad \begin{array}{l} < 72 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 83 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

$$\frac{c_2}{t \cdot \varepsilon} = 5.45 \quad \begin{array}{l} < 9 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 10 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

Tverrsnittsklasse: 1

### G.3.3 Tverrsnittsklassifisering av trykkstaver

#### T.2 og T.11

Steg:

$$c := h_{w.D.2} = 82 \text{ mm}$$

$$t := t_{D.2} = 4 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t \cdot \varepsilon} = 25.2 \quad \begin{array}{l} < 33 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 38 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

Flens:

$$c_2 := b_{f.D.2} = 82 \text{ mm}$$

$$t := t_{D.2} = 4 \text{ mm}$$

$$\frac{c_2}{t \cdot \varepsilon} = 25.2 \quad \begin{array}{l} < 72 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 83 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

Tverrsnittsklasse: 1

#### T.4

Steg:

$$c := h_{w.D.4} = 74 \text{ mm}$$

$$t := t_{D.4} = 3 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t \cdot \varepsilon} = 30.32 \quad \begin{array}{l} < 33 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 38 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

Flens:

$$c_2 := b_{f.D.4} = 74 \text{ mm}$$

$$t := t_{D.4} = 3 \text{ mm}$$

$$\frac{c_2}{t \cdot \varepsilon} = 30.32 \quad \begin{array}{l} < 72 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 83 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

Tverrsnittsklasse: 1

#### T.6

Steg:

$$c := h_{w.D.6} = 54 \text{ mm}$$

$$t := t_{D.6} = 3 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t \cdot \varepsilon} = 22.12 \quad \begin{array}{l} < 33 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 38 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

Flens:

$$c_2 := b_{f.D.6} = 54 \text{ mm}$$

$$t := t_{D.6} = 3 \text{ mm}$$

$$\frac{c_2}{t \cdot \varepsilon} = 22.12 \quad \begin{array}{l} < 72 \text{ (tv.klasse 1)} \\ < 83 \text{ (tv.klasse 2)} \end{array}$$

Tverrsnittsklasse: 1



$$M_{Ed.B.1} = 26.442 \text{ } \mathbf{kN \cdot m}$$

$$V_{Ed.B.1} = 31.731 \text{ } \mathbf{kN}$$

$$N_{Ed.B.1} := |N_{Ed.B.1}| = 356.617 \text{ } \mathbf{kN}$$

*Dim.laster:*

$$M_{Ed} := M_{Ed.B.1} = 26.442 \text{ } \mathbf{kN \cdot m}$$

$$A := A_{B.1}$$

$$V_{Ed} := V_{Ed.B.1} = 31.731 \text{ } \mathbf{kN}$$

$$W_{y.pl} := W_{y.pl.B.1}$$

$$N_{Ed} := N_{Ed.B.1} = 356.617 \text{ } \mathbf{kN}$$

$$t_{f.B.1} := 12 \text{ } \mathbf{mm}$$

## G.4 Bruddgrensekontroll

### G.4.1 Kontroll av fagverkets overgurt

#### 6.2.4 Trykk

$$N_{c.Rd.B.1} := A_{B.1} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1818.95 \text{ kN}$$

$$(6.10) \quad \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{c.Rd.B.1}} = 0.2 \quad < 1, \text{ OK.}$$

$$N_{pl.Rd.B.1} := N_{c.Rd.B.1}$$

#### 6.2.5 Bøyningsmoment

$$(6.13) \quad M_{y.pl.Rd.B.1} := \frac{W_{y.pl.B.1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 145.38 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{c.Rd.B.1} := M_{y.pl.Rd.B.1}$$

$$(6.12) \quad \frac{M_{Ed.B.1}}{M_{c.Rd.B.1}} = 0.18 \quad < 1, \text{ OK.}$$

#### 6.2.9.1 Bøying og aksialkraft: Tverrsnittsklasse 1 og 2

y-y:

$$(6.33) \quad N_{Ed.B.1} = 356.62 \text{ kN} \quad < \quad 0.25 \cdot N_{pl.Rd.B.1} = 454.74 \text{ kN}$$

$$(6.34) \quad N_{Ed.B.1} = 356.62 \text{ kN} \quad < \quad \frac{0.5 \cdot h_{w.B.1} \cdot t_{f.B.1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 271.83 \text{ kN}$$

Ikke OK, ny redusert momentkap. må beregnes.

z-z:

$$(6.35) \quad N_{Ed.B.1} = 356.62 \text{ kN} \quad < \quad \frac{h_{w.B.1} \cdot t_{f.B.1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 543.66 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

### Reduserer momentkapasiteten:

$$n := \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{pl.Rd.B.1}} = 0.196$$

$$a := \min\left(\frac{A_{B.1} - 2 \cdot b_{B.1} \cdot t_{f.B.1}}{A_{B.1}}, 0.5\right) = 0.108$$

y-y:

$$(6.36) \quad M_{y.N.Rd.B.1} := M_{y.pl.Rd.B.1} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0.5 \cdot a)} = 123.537 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{y.N.Rd.B.1} < M_{y.pl.Rd.B.1} = 145.381 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

z-z:

$$M_{z.pl.Rd.B.1} := W_{z.pl.B.1} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 68.904 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$(6.38) \quad n > a: \quad M_{z.N.Rd.B.1} := M_{z.pl.Rd.B.1} \cdot \left(1 - \left(\frac{n-a}{1-a}\right)^2\right) = 68.23 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### 6.2.6 Skjær

$$(6.20) \quad \tau_{Ed} := \frac{V_{Ed.B.1} \cdot S_{y.B.1}}{I_{y.B.1} \cdot t_{w.B.1}} = 28.443 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$(6.19) \quad \frac{\tau_{Ed}}{\frac{f_y}{(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})}} = 0.146 < 1, \text{ OK.}$$

$$A_{w.B.1} := t_{w.B.1} \cdot h_{w.B.1}$$

Areal av steget

$$A_{f.B.1} := b_{f.B.1} \cdot t_{f.B.1}$$

Areal av én flens

$$\frac{A_{f.B.1}}{A_{w.B.1}} = 1.085$$

>0.6, formel nedenfor kan benyttes.

$$\tau_{Ed.B.1} := \frac{V_{Ed.B.1}}{A_{w.B.1}} = 36.43 \frac{N}{mm^2}$$

$$(6.19) \quad \frac{\tau_{Ed.B.1}}{f_y} \cdot \sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} = 0.187 < 1, \text{ OK.}$$

### 6.2.1 Elastisitetsteoriens flytekriterium

$$\sigma_{x.Ed.B.1} := \frac{V_{Ed.B.1}}{A_{B.1}} = 5.898 \frac{N}{mm^2}$$

$$(6.22) \quad \left( \frac{\frac{\sigma_{x.Ed.B.1}}{f_y}}{\gamma_{M0}} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{\frac{\tau_{Ed}}{f_y}}{\gamma_{M0}} \right)^2 = 0.022 < 1, \text{ OK.}$$

### 6.2.8 Bøying og skjær

$$A_{v.B.1} := b_{f.B.1} \cdot t_{f.B.1} \cdot 4 = 3780 \text{ mm}^2$$

$$(6.18) \quad V_{pl.Rd.B.1} := \frac{A_{v.B.1}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 737.854 \text{ kN}$$

$$(2) \quad V_{Ed.B.1} \cdot 2 = 63.462 \text{ kN} < V_{pl.Rd.B.1} = 737.854 \text{ kN}$$

OK, påvirkning fra skjærkraft på momentkap. kan neglisjeres.

### 6.3.1.1 Bøyeknekking

For knekking om begge akser antas  $L_{k.B.1} := L_B = 5 \text{ m}$

#### Om sterk akse

$$N_{y.cr.B.1} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{y.B.1}}{L_{k.B.1}^2} = 3059.18 \text{ kN}$$

$$\alpha_y := 0.34 \quad (\text{Knekkurve: b})$$

$$\lambda_{rel.y} := \sqrt{\frac{A_{B.1} \cdot f_y}{N_{y.cr.B.1}}} = 0.79$$

$$\phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha_y \cdot (\lambda_{rel.y} - 0.2) + \lambda_{rel.y}^2) = 0.91$$

$$(6.49) \quad \chi_y := \min \left( \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{rel.y}^2}}, 1 \right) = 0.73$$

$$(6.47) \quad N_{y.b.Rd.B.1} := \frac{\chi_y \cdot A_{B.1} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 1328.78 \text{ kN}$$

$$(6.46) \quad \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{y.b.Rd.B.1}} = 0.27 < 1, \text{ OK.}$$

#### Om svak akse

$$N_{z.cr.B.1} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{z.B.1}}{L_{k.B.1}^2} = 1110.92 \text{ kN}$$

$$\alpha_z := 0.49 \quad (\text{Knekkurve: c})$$

$$\lambda_{rel.z} := \sqrt{\frac{A_{B.1} \cdot f_y}{N_{z.cr.B.1}}} = 1.31$$

$$\phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha_z \cdot (\lambda_{rel.z} - 0.2) + \lambda_{rel.z}^2) = 1.63$$

$$(6.49) \quad \chi_z := \min \left( \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{rel.z}^2}}, 1 \right) = 0.38$$

$$(6.47) \quad N_{z.b.Rd.B.1} := \frac{\chi_z \cdot A_{B.1} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 698.71 \text{ kN}$$

$$(6.46) \quad \frac{N_{Ed}}{N_{z.b.Rd.B.1}} = 0.51 \quad < 1, \text{ OK.}$$

### 6.3.1.4 Bøyetorsjonsknekking

$$i_0 := \sqrt{i_{y.B.1}^2 + i_{z.B.1}^2} = 96.622 \text{ mm}$$

$$N_{cr.T.B.1} := \frac{1}{i_0^2} \cdot \left( G \cdot I_{T.B.1} + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_{w.B.1}}{L_B^2} \right) = 2789.74 \text{ kN}$$

$$N_{cr.TF} := N_{cr.T.B.1}$$

$$\alpha_T := 0.49 \quad (\text{Knekkurve: c})$$

$$\lambda_{rel.T} := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr.TF}}} = 0.83$$

$$\phi_T := 0.5 \cdot (1 + \alpha_T \cdot (\lambda_{rel.T} - 0.2) + \lambda_{rel.T}^2) = 1$$

$$(6.49) \quad \chi_T := \min \left( \frac{1}{\phi_T + \sqrt{\phi_T^2 - \lambda_{rel.T}^2}}, 1 \right) = 0.64$$

$$(6.47) \quad N_{Rd.T.B.1} := \frac{\chi_T \cdot A_{B.1} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 1173.14 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd.T.B.1}} = 0.3 \quad < 1, \text{ OK.}$$

### 6.3.2 Knekking av overgurt utsatt for vipping

Stållkonstruksjoner, Tab.5.1:

$$M_{cr.B.1} := \frac{\pi}{L_{k.B.1}} \cdot \sqrt{E \cdot I_{z.B.1} \cdot G \cdot I_{T.B.1}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{L_{k.B.1}^2} \cdot \frac{E \cdot C_{w.B.1}}{G \cdot I_{T.B.1}}} = 170.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_{rel.LT} := \sqrt{\frac{W_{y.B.1} \cdot f_y}{M_{cr.B.1}}} = 0.901$$

$$\alpha_{LT} := 0.21 \quad (\text{Knekkurve: a})$$

$$\phi_{LT} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{rel.LT} - 0.2) + \lambda_{rel.LT}^2) = 0.98$$

$$(6.57) \quad \chi_{LT} := \min \left( \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{rel.LT}^2}}, 1 \right) = 0.73$$

$$(6.55) \quad M_{y.b.Rd.B.1} := \chi_{LT} \cdot W_{y.pl.B.1} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 106.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$(6.54) \quad \frac{M_{Ed.B.1}}{M_{y.b.Rd.B.1}} = 0.248 \quad < 1, \text{ OK.}$$

### 6.3.3 Staver utsatt for bøy og trykk

Beregner  $[k_{ij}]$  etter metode 1 (Tillegg A) for torsjonsstive staver.

$$\begin{aligned} N_{cr.y} &:= N_{y.b.Rd.B.1} & N_{cr.z} &:= N_{z.b.Rd.B.1} & W_{pl.y} &:= W_{y.pl.B.1} & W_{pl.z} &:= W_{z.pl.B.1} \\ M_{y.Ed} &:= M_{Ed.B.1} & M_{z.Ed} &:= 0 \text{ kN} \cdot \text{m} & W_{el.y} &:= W_{y.B.1} & W_{el.z} &:= W_{z.B.1} \\ \lambda_{LT.0} &:= 0.4 & \lambda_0 &:= \lambda_{LT.0} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_y &:= \frac{1 - \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.y}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.y}}} & \mu_z &:= \frac{1 - \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.z}}} \\ w_y &:= \min\left(\frac{W_{pl.y}}{W_{el.y}}, 1.5\right) & w_z &:= \min\left(\frac{W_{pl.z}}{W_{el.z}}, 1.5\right) \\ n_{pl} &:= \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{c.Rd.B.1}} & a_{LT} &:= 1 - \frac{I_{T.B.1}}{I_{y.B.1}} \\ \lambda_{max} &:= \max(\lambda_{rel.y}, \lambda_{rel.z}) & \lambda_{rel.LT} &:= 0.9 \end{aligned}$$

Tab.A.2

$$\delta_x := 5 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} C_{my.0} &:= 1 + \left( \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{y.B.1} \cdot |\delta_x|}{L_{k.B.1}^2 \cdot |M_{y.Ed}|} - 1 \right) \cdot \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.y}} \\ C_{mz.0} &:= \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.z}} \quad (M_z=0) \end{aligned}$$

Tab.6.6

$$k_c := 0.90$$

$$C_1 := k_c^{-2} = 1.235$$

$$N_{cr.TF} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{y.B.1}}{L_{k.B.1}^2} = 3059.18 \text{ kN}$$

$$\lambda_0 = 0.4 < 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.TF}}\right)} = 0.18$$



$$\varepsilon_y := \frac{M_{y.Ed}}{N_{Ed.B.1}} \cdot \frac{A_{B.1}}{W_{el.y}} = 1.03$$

$$C_{my} := C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}} = 0.94$$

$$C_{mz} := C_{mz,0} = 0.51$$

$$C_{mLT} := C_{my}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr.z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr.T.B.1}}\right)}} = 1.35$$

$$b_{LT} := 0.5 \cdot a_{LT} \cdot \lambda_0^2 \cdot \frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y.pl.Rd.B.1}} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.pl.Rd.B.1}}$$

$$c_{LT} := 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\lambda_0^2}{5 + \lambda_{rel.z}^4} \cdot \frac{M_{y.Ed}}{C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{y.pl.Rd.B.1}}$$

$$d_{LT} := 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\lambda_0}{0.1 + \lambda_{rel.z}^4} \cdot \frac{M_{y.Ed}}{C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{y.pl.Rd.B.1}} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{C_{mz} \cdot M_{z.pl.Rd.B.1}}$$

$$e_{LT} := 1.7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\lambda_0}{0.1 + \lambda_{rel.z}^4} \cdot \frac{M_{y.Ed}}{C_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{z.pl.Rd.B.1}}$$

$$C_{yy} := 1 + (w_y - 1) \cdot \left( \left( 2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \lambda_{max} - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{my}^2 \cdot \lambda_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right) = 0.96$$

$$C_{yz} := 1 + (w_z - 1) \cdot \left( \left( 2 - 14 \cdot \frac{C_{mz}^2 \cdot \lambda_{max}^2}{w_z^5} \right) \cdot n_{pl} - c_{LT} \right) = 1.09$$

$$C_{zy} := 1 + (w_y - 1) \cdot \left( \left( 2 - 14 \cdot \frac{C_{my}^2 \cdot \lambda_{max}^2}{w_y^5} \right) \cdot n_{pl} - d_{LT} \right) = 0.77$$

$$C_{zz} := 1 + (w_z - 1) \cdot \left( 2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \lambda_{max} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{mz}^2 \cdot \lambda_{max}^2 - e_{LT} \right) n_{pl} = 1.1$$

$$k_{yy} := C_{my} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.y}}} \cdot \frac{1}{C_{yy}} = 1.66$$

$$k_{zz} := C_{mz} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.z}}} \cdot \frac{1}{C_{zz}} = 0.58$$

$$k_{yz} := C_{mz} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.z}}} \cdot \frac{1}{C_{yz}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 0.61$$

$$k_{zy} := C_{my} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{cr.y}}} \cdot \frac{1}{C_{zy}} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 0.71$$

$$(6.61) \quad \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{y.b.Rd.B.1}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.N.Rd.B.1}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.N.Rd.B.1}} = 0.62 < 1, \text{ OK.}$$

$$(6.62) \quad \frac{N_{Ed.B.1}}{N_{z.b.Rd.B.1}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.N.Rd.B.1}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.N.Rd.B.1}} = 0.66 < 1, \text{ OK.}$$

$[\chi_{ij}]$  er allerede medregnet i de ulike kapasitetene.

## NS-EN 1993-1-5

### 5.1 Skjærkapasitet for steget

S355:  $\eta := 1.20$

$$\frac{h_{w.B.1}}{t_{w.B.1}} = 20.615 < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon = 48.817 \quad \text{OK.}$$

## G.4.2 Kontroll av fagverkets undergurt

*Dim.laster:*

$$M_{Ed} := M_{Ed.B.2} = 1.82 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$A := A_{B.2}$$

$$V_{Ed} := V_{Ed.B.2} = 0.344 \text{ kN}$$

$$W_{y.pl} := W_{y.pl.B.2}$$

$$N_{Ed} := N_{Ed.B.2} = 377.595 \text{ kN}$$

$$t_{f.B.2} := 8 \text{ mm}$$

$$L_{k.B.2} := L_{k.B.1}$$

### 6.2.3 Strekk

$$(6.6) \quad N_{pl.Rd.B.2} := A_{B.2} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 718.11 \text{ kN}$$

$$N_{t.Rd.B.2} := N_{pl.Rd.B.2}$$

$$(6.5) \quad \frac{N_{Ed.B.2}}{N_{t.Rd.B.2}} = 0.526 < 1, \text{ OK.}$$

### 6.2.5 Bøyningsmoment

$$(6.13) \quad M_{y.pl.Rd.B.2} := \frac{W_{y.pl.B.2} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 28.062 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{c.Rd} := M_{y.pl.Rd.B.2}$$

$$(6.12) \quad \frac{M_{Ed.B.2}}{M_{c.Rd}} = 0.065 < 1, \text{ OK.}$$

### 6.2.6 Skjær

$$\eta := 1$$

**y-y:**

$$3) \text{ m) } A_{y.v.B.2} := A_{B.2} - \eta \cdot h_{w.B.2} \cdot t_{w.B.2} = 1844 \text{ mm}^2$$

$$(6.18) \quad V_{y.pl.Rd.B.2} := \frac{A_{y.v.B.2}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 359.95 \text{ kN} \quad \text{Her er skjærkraften tilnærmet lik 0.}$$

$$(6.17) \quad \frac{V_{Ed.B.2}}{V_{y.pl.Rd.B.2}} = 0.001 \quad <1, \text{ OK.}$$

**z-z:**

$$3) \text{ j) } A_{z.v.B.2} := A - 2 \cdot b_{B.2} \cdot t_{f.B.2} + (t_{w.B.2} + 2 \cdot r_{B.2}) \cdot t_{f.B.2} = 756 \text{ mm}^2$$

$$(6.18) \quad V_{z.pl.Rd.B.2} := \frac{A_{z.v.B.2}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 147.57 \text{ kN}$$

$$(6.17) \quad \frac{V_{Ed.B.2}}{V_{z.pl.Rd.B.2}} = 0.002 \quad <1, \text{ OK.}$$

### (4) Elastisk dimensjonering

$$(6.20) \quad \tau_{Ed.B.2} := \frac{V_{Ed.B.2} \cdot S_{y.B.2}}{I_{y.B.2} \cdot t_{w.B.2}} = 0.818 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$(6.19) \quad \frac{\tau_{Ed.B.2}}{\frac{f_y}{(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})}} = 0.004 \quad <1, \text{ OK.}$$

- - - - .

### 6.2.7 Torsjon

$$T_{T.Ed} := 0 \quad \rightarrow \quad V_{y.pl.T.Rd} := \sqrt{1} \cdot V_{y.pl.Rd.B.2} = 359.948 \text{ kN}$$

$$V_{z.pl.T.Rd} := \sqrt{1} \cdot V_{z.pl.Rd.B.2} = 147.571 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{y.pl.T.Rd}} = 0 \quad < 1, \text{ OK.}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{z.pl.T.Rd}} = 0.002 \quad < 1, \text{ OK.}$$

### 6.2.8 Kombinasjon bøyning og skjær

$$A_v := A - 2 \cdot b_{B.2} \cdot t_{f.B.2} + (t_{w.B.2} + 2 \cdot r_{B.2}) \cdot t_{f.B.2}$$

$$(6.18) \quad V_{pl.Rd} := \frac{A_v}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 147.571 \text{ kN}$$

$$(2) \quad V_{Ed} \cdot 2 = 0.688 \text{ kN} \quad < \quad V_{pl.Rd} = 147.571 \text{ kN} \quad \text{OK.}$$

#### 6.2.9.1 Bøyning og aksialkraft

**y-y:**

$$(6.33) \quad N_{Ed.B.2} = 377.595 \text{ kN} \quad < \quad 0.25 \cdot N_{pl.Rd.B.2} = 179.529 \text{ kN}$$

$$(6.34) \quad N_{Ed.B.2} = 377.595 \text{ kN} \quad < \quad \frac{0.5 \cdot h_{w.B.2} \cdot t_{w.B.2} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 47.333 \text{ kN}$$

**z-z:**

$$(6.35) \quad N_{Ed.B.2} = 377.595 \text{ kN} \quad < \quad \frac{h_{w.B.2} \cdot t_{w.B.2} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 94.667 \text{ kN}$$

Ikke OK , ny redusert mom.kap kreves om begge akser.

$$n := \frac{N_{Ed.B.2}}{N_{pl.Rd.B.2}} = 0.526$$

$$a := \min\left(\frac{A_{B.2} - 2 \cdot b_{B.2} \cdot t_{f.B.2}}{A_{B.2}}, 0.5\right) = 0.247$$

**y-y:**

$$(6.36) \quad M_{y.N.Rd.B.2} := M_{y.pl.Rd.B.2} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0.5 \cdot a)} = 15.18 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{y.N.Rd.B.2} = 15.18 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad < \quad M_{y.pl.Rd.B.2} = 28.06 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

**z-z:**

$$M_{z.pl.Rd.B.2} := W_{z.pl.B.2} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 13.91 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$(6.38) \quad M_{z.N.Rd.B.2} := M_{z.pl.Rd.B.2} \cdot \left(1 - \left(\frac{n-a}{1-a}\right)^2\right) = 12 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{For I- og H-profiler:} \quad \alpha := 2 \quad \beta := 5 \cdot n = 2.63$$

$$(6.41) \quad \left(\frac{M_{Ed.B.2}}{M_{y.N.Rd.B.2}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{z.Ed}}{M_{z.N.Rd.B.2}}\right)^\beta = 0.014 \quad < 1, \text{ OK.}$$

## 6.2 Tverrsnittskapasitet

$$M_{y.Rd.B.2} := \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{y.B.2} = 24.613 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{z.Rd.B.2} := \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{z.B.2} = 9.061 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd.B.2}} + \frac{M_{Ed}}{M_{y.Rd.B.2}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{z.Rd.B.2}} = 0.6 \quad < 1, \text{ OK.}$$

### 6.3.2.2 Knekkurver for vipping

Tab.5.1, *Stålkonstruksjoner:*

$$M_{cr.B.2} := \frac{\pi}{L_{k.B.2}} \cdot \sqrt{E \cdot I_{z.B.2} \cdot G \cdot I_{T.B.2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{L_{k.B.2}^2} \cdot \frac{E \cdot C_{w.B.2}}{G \cdot I_{T.B.2}}} = 22.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_{rel.LT} := \sqrt{\frac{W_{y.B.2} \cdot f_y}{M_{cr.B.2}}} = 1.08$$

$$\alpha_{LT} := 0.21 \quad (\text{Knekkurve: a})$$

$$\phi_{LT} := 0.5 \cdot \left( 1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{rel.LT} - 0.2) + \lambda_{rel.LT}^2 \right) = 1.17$$

$$(6.57) \quad \chi_{LT} := \min \left( \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{rel.LT}^2}}, \frac{1}{\lambda_{rel.LT}^2}, 1 \right) = 0.61$$

$$(6.55) \quad M_{y.b.Rd.B.2} := \chi_{LT} \cdot W_{y.B.2} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 15.07 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$(6.54) \quad \frac{M_{Ed.B.2}}{M_{y.b.Rd.B.2}} = 0.121 \quad < 1, \text{ OK.}$$

### G.4.3 Kontroll av trykkstavene

$$L_k := 0.75 \cdot L_D = 2916.98 \text{ mm}$$

### D.2

$$N_{Ed.D.2} := -163.176 \text{ kN} \qquad N_{Ed} := |N_{Ed.D.2}|$$

### 6.2.4 Trykk

$$(6.10) \quad N_{Rd.D.2} := A_{D.2} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 459.47 \text{ kN}$$

$$(6.9) \quad \frac{N_{Ed}}{N_{Rd.D.2}} = 0.355 \quad < 1, \text{ OK.}$$

### 6.2.6 Skjær

$$\eta := 1$$

$$3) \text{ o) } A_{v.D.2} := \frac{A_{D.2} \cdot h_{D.2}}{b_{D.2} + h_{D.2}} = 679.5 \text{ mm}^2$$

$$(6.18) \quad V_{pl.Rd} := \frac{A_{v.D.2}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 132.638 \text{ kN}$$

$$(6.17) \quad \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} = 0 \quad < 1, \text{ OK.}$$

### 6.2.8 Kombinasjon bøyning og skjær

$$(2) \quad V_{Ed} \cdot 2 = 0.688 \text{ kN} \quad < \quad V_{pl.Rd} = 132.638 \text{ kN} \quad \text{OK.}$$



### 6.3.1 Sentrisk trykk og tilnærmet sentrisk trykk

$$N_{cr.D.2} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{D.2}}{L_k^2} = 405.083 \text{ kN}$$

$$\lambda_{rel} := \sqrt{\frac{A_{D.2} \cdot f_y}{N_{cr.D.2}}} = 1.091$$

$$L_k = 2916.982 \text{ mm}$$

(Tab.6.2)  $\alpha_{D.2} := 0.21$  (Knekkurve: a)

$$\phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha_{D.2} \cdot (\lambda_{rel} - 0.2) + \lambda_{rel}^2) = 1.189$$

$$(6.49) \quad \chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{rel}^2}} = 0.602 \quad <1, \text{ OK.}$$

$$(6.47) \quad N_{Rd.D.2} := \chi \cdot \frac{A_{D.2} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 276.585 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd.D.2}} = 0.59 \quad <1, \text{ OK.}$$

## NS-EN 1993-1-5

### 5.1 Skjærkapasitet

$$\text{S355:} \quad \eta := 1.20 \quad \varepsilon := \sqrt{\frac{235}{355}} = 0.814$$

$$\frac{h_{D.2}}{t_{D.2}} = 22.5 \quad < \quad \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon = 48.817 \quad \text{OK.}$$

## D.4

$$N_{Ed.D.4} := -97.906 \text{ kN} \qquad N_{Ed} := |N_{Ed.D.4}|$$

### 6.2.4 Trykk

$$(6.10) \quad N_{D.4.Rd} := A_{D.4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 309.02 \text{ kN}$$

$$(6.9) \quad \frac{N_{Ed}}{N_{D.4.Rd}} = 0.317 \quad <1, \text{ OK.}$$

### 6.3.1 Sentrisk trykk og tilnærmet sentrisk trykk

$$N_{cr.D.4} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{D.4}}{L_k^2} = 218.789 \text{ kN}$$

$$\lambda_{rel} := \sqrt{\frac{A_{D.4} \cdot f_y}{N_{cr.D.4}}} = 1.218$$

$$(\text{Tab.6.2}) \quad \alpha_{D.4} := 0.21 \quad (\text{Knekkurve: a})$$

$$\phi := 0.5 \cdot \left( 1 + \alpha_{D.4} \cdot (\lambda_{rel} - 0.2) + \lambda_{rel}^2 \right) = 1.348$$

$$(6.49) \quad \chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{rel}^2}} = 0.519 \quad <1, \text{ OK.}$$

$$(6.47) \quad N_{b.Rd} := \chi \cdot \frac{A_{D.4} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 160.34 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}} = 0.611 \quad <1, \text{ OK.}$$

### 6.2.6 Skjær

$$\eta := 1$$

$$3) \text{ o) } A_{v.D.4} := \frac{A_{D.4} \cdot h_{D.4}}{b_{D.4} + h_{D.4}} = 457 \text{ mm}^2$$

$$(6.18) \quad V_{pl.Rd} := \frac{A_{v.D.4}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 89.206 \text{ kN}$$

$$(6.17) \quad \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} = 0 \quad < 1, \text{ OK.}$$

## NS-EN 1993-1-5

### 5.1 Skjærkapasitet

$$\text{S355:} \quad \eta := 1.20 \quad \varepsilon := \sqrt{\frac{235}{355}} = 0.814$$

$$\frac{h_{D.4}}{t_{D.4}} = 26.667 < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon = 48.817 \quad \text{OK.}$$

## D.6

$$N_{Ed.D.6} := -32.635 \text{ kN} \qquad N_{Ed} := |N_{Ed.D.6}|$$

### 6.2.4 Trykk

$$(6.10) \quad N_{D.6.Rd} := A_{D.6} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 227.88 \text{ kN}$$

$$(6.9) \quad \frac{N_{Ed}}{N_{D.6.Rd}} = 0.143 \quad <1, \text{ OK.}$$

### 6.3.1 Sentrisk trykk og tilnærmet sentrisk trykk

$$N_{cr.D.6} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{D.6}}{L_k^2} = 88.202 \text{ kN}$$

$$\lambda_{rel} := \sqrt{\frac{A_{D.6} \cdot f_y}{N_{cr.D.6}}} = 1.647$$

$$(\text{Tab.6.2}) \quad \text{Knekkurve a:} \quad \alpha_{D.6} := 0.21$$

$$\phi := 0.5 \cdot \left( 1 + \alpha_{D.6} \cdot (\lambda_{rel} - 0.2) + \lambda_{rel}^2 \right) = 2.008$$

$$(6.49) \quad \chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{rel}^2}} = 0.317 \quad <1, \text{ OK.}$$

$$(6.47) \quad N_{b.Rd} := \chi \cdot \frac{A_{D.6} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 72.171 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}} = 0.452 \quad <1, \text{ OK.}$$

### 6.2.6 Skjær

$$\eta := 1$$

$$3) \text{ o) } A_{v.D.6} := \frac{A_{D.6} \cdot h_{D.6}}{b_{D.6} + h_{D.6}} = 337 \text{ mm}^2$$

$$(6.18) \quad V_{pl.Rd} := \frac{A_{v.D.6}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 65.782 \text{ kN}$$

$$(6.17) \quad \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} = 0.01 < 1, \text{ OK.}$$

## NS-EN 1993-1-5

### 5.1 Skjærkapasitet

$$\text{S355:} \quad \eta := 1.20 \quad \varepsilon := \sqrt{\frac{235}{355}} = 0.814$$

$$\frac{h_{D.6}}{t_{D.6}} = 20 < \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon = 48.817 \quad \text{OK.}$$

## G.4.4 Kontroll av strekkdiagonal

### D.1

$$N_{Ed.D.1} := 163.176 \text{ kN}$$

### 6.2.3 Strekk

$$N_{t.Rd.D.1} := \frac{A_{D.1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 246.133 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed.D.1}}{N_{t.Rd.D.1}} = 0.663 < 1, \text{ OK.}$$

### D.3

$$N_{Ed.D.3} := 97.9 \text{ kN}$$

### 6.2.3 Strekk

$$N_{t.Rd.D.3} := \frac{A_{D.3} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 157.552 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed.D.3}}{N_{t.Rd.D.3}} = 0.621 < 1, \text{ OK.}$$

### D.3

$$N_{Ed.D.5} := 32.6 \text{ kN}$$

### 6.2.3 Strekk

$$N_{t.Rd.D.5} := \frac{A_{D.5} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 157.552 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed.D.5}}{N_{t.Rd.D.5}} = 0.207 < 1, \text{ OK.}$$

## G.5 Bruksgrensekontroll

### G.5.1 Nedbøyning

Symmetri

$$\begin{array}{l} \text{B.1.1} \\ \text{B.1.6} \end{array} \quad w_1 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{1.1} \cdot B_{1.1} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.1} \cdot \text{kN}} = 0.389 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{B.1.2} \\ \text{B.1.5} \end{array} \quad w_2 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{1.2} \cdot B_{1.2} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.1} \cdot \text{kN}} = 3.038 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{B.1.3} \\ \text{B.1.4} \end{array} \quad w_3 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{1.3} \cdot B_{1.3} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.1} \cdot \text{kN}} = 6.621 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{B.2.1} \\ \text{B.2.5} \end{array} \quad w_4 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{2.1} \cdot B_{2.1} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.2} \cdot \text{kN}} = 3.946 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{B.2.2} \\ \text{B.2.4} \end{array} \quad w_5 := \frac{2 \cdot B \cdot V_{2.2} \cdot B_{2.2} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.2} \cdot \text{kN}} = 12.628 \text{ mm}$$

$$\text{B.2.3} \quad w_6 := \frac{B \cdot V_{2.3} \cdot B_{2.3} \cdot L_B}{E \cdot A_{B.2} \cdot \text{kN}} = 10.655 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{T1} \\ \text{T12} \end{array} \quad w_7 := \frac{2 \cdot D \cdot V_1 \cdot D_1 \cdot L_D}{E \cdot A_{D.1} \cdot \text{kN}} = 5.419 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{T2} \\ \text{T11} \end{array} \quad w_8 := \frac{2 \cdot D \cdot V_2 \cdot D_2 \cdot L_D}{E \cdot A_{D.2} \cdot \text{kN}} = 2.903 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{T3} \\ \text{T10} \end{array} \quad w_9 := \frac{2 \cdot D \cdot V_3 \cdot D_3 \cdot L_D}{E \cdot A_{D.3} \cdot \text{kN}} = 5.079 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{T4} \\ \text{T9} \end{array} \quad w_{10} := \frac{2 \cdot D \cdot V_4 \cdot D_4 \cdot L_D}{E \cdot A_{D.4} \cdot \text{kN}} = 2.59 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{T5} \\ \text{T8} \end{array} \quad w_{11} := \frac{2 \cdot D \cdot V_5 \cdot D_5 \cdot L_D}{E \cdot A_{D.5} \cdot \text{kN}} = 1.693 \text{ mm}$$

$$\begin{array}{l} \text{T6} \\ \text{T7} \end{array} \quad w_{12} := \frac{2 \cdot D \cdot V_6 \cdot D_6 \cdot L_D}{E \cdot A_{D.6} \cdot \text{kN}} = 1.171 \text{ mm}$$

Den totale nedbøyningen blir

$$w := w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 + w_9 + w_{10} + w_{11} + w_{12} = 56.134 \text{ mm}$$





## **Vedlegg H: Sammenligning stål og tre**



## H.1 Sammenligning av opptredende krefter ved ulike vinkler

FEM-Design / Mathcad / Differanse

### FEM-design

Vinkler	Ned.B.1	Ned.B.2	Ned.D	Med.B.1	Ved.B.1
Grader	kN	kN	kN	kNm	kN
40	508,6	538,4	198,6	22,9	28,6
45	428,1	453,94	183,4	23	29,3
50	361,2	382,4	168,6	23,2	29,6
52	336,9	356,7	164,2	22,9	29,6
55	301,1	319,2	159	24,6	30,2
60	249,6	264,3	149,9	24,4	29,8

### Mathcad

Vinkler	Ned.B.1	Ned.B.2	Ned.D	Med.B.1	Ved.B.1
Grader	kN	kN	kN	kNm	kN
40	506,5	536,3	194,67	26,442	31,731
45	425	450	176,77	26,442	31,731
50	356,617	377,6	163,176	26,442	31,731
52	332	351,6	158,6	26,442	31,731
55	297,588	315,1	152,597	26,442	31,731
60	245,374	259,8	144,338	26,442	31,731

### Differanse

Vinkler	Ned.B.1	Ned.B.2	Ned.D	Med.B.1	Ved.B.1
Grader	kN	kN	kN	kNm	kN
40	-2,1	-2,1	-3,93	3,542	3,131
45	-3,1	-3,94	-6,63	3,442	2,431
50	-4,583	-4,8	-5,424	3,242	2,131
52	-4,9	-5,1	-5,6	3,542	2,131
55	-3,512	-4,1	-6,403	1,842	1,531
60	-4,226	-4,5	-5,562	2,042	1,931

## H.2 Minste mulige tverrsnitt (maks utnyttelse 80 %)

Limtrefagverk (uten omgjøringer fra FEM-Design)

### Vinkel 40

	Tverrsnitt			Utnyttelse
	Bredde	Høyde	Areal	
	m	m	m <sup>2</sup>	
B1	0,215	0,495	0,106425	72 %
B2	0,115	0,360	0,0414	77 %
D1	0,140	0,225	0,0315	57 %
D2	0,140	0,27	0,0378	69 %
D3	0,140	0,09	0,0126	80 %
D4	0,140	0,225	0,0315	47 %
D5	0,140	0,09	0,0126	28 %
D6	0,140	0,135	0,0189	29 %
Areal av diagonalene 1-12				0,2898

### Vinkel 45

	Tverrsnitt			Utnyttelse
	Bredde	Høyde	Areal	
	m	m	m <sup>2</sup>	
B1	0,215	0,405	0,087075	79 %
B2	0,165	0,36	0,0594	79 %
D1	0,140	0,225	0,0315	52 %
D2	0,14	0,270	0,0378	74 %
D3	0,14	0,09	0,0126	72 %
D4	0,14	0,225	0,0315	47 %
D5	0,14	0,09	0,0126	26 %
D6	0,14	0,135	0,0189	31 %
Areal av diagonalene 1-12				0,2898

### Vinkel 52

	Tverrsnitt			Utnyttelse
	Bredde	Høyde	Areal	
	m	m	m <sup>2</sup>	
B1	0,215	0,36	0,0774	74 %
B2	0,19	0,225	0,04275	78 %
D1	0,14	0,135	0,0189	78 %
D2	0,140	0,315	0,0441	74 %
D3	0,140	0,09	0,0126	66 %
D4	0,140	0,225	0,0315	59 %
D5	0,140	0,09	0,0126	23 %
D6	0,140	0,135	0,0189	36 %
Areal av diagonalene 1-12				0,2772

### Vinkel 55

	Tverrsnitt			Utnyttelse
	Bredde	Høyde	Areal	
	m	m	m <sup>2</sup>	
B1	0,215	0,315	0,067725	78 %
B2	0,09	0,45	0,0405	80 %
D1	0,14	0,135	0,0189	75 %
D2	0,14	0,315	0,0441	80 %
D3	0,14	0,09	0,0126	62 %
D4	0,14	0,225	0,0315	59 %
D5	0,14	0,09	0,0126	23 %
D6	0,14	0,135	0,0189	39 %
Areal av diagonalene 1-12				0,2772

### Vinkel 50

	Tverrsnitt			Utnyttelse
	Bredde	Høyde	Areal	
	m	m	m <sup>2</sup>	
B1	0,215	0,36	0,0774	78 %
B2	0,215	0,225	0,048375	80 %
D1	0,140	0,135	0,0189	80 %
D2	0,140	0,27	0,0378	80 %
D3	0,140	0,09	0,0126	67 %
D4	0,140	0,225	0,0315	55 %
D5	0,140	0,09	0,0126	23 %
D6	0,140	0,135	0,0189	34 %
Areal av diagonalene 1-12				0,2646

### Vinkel 60

	Tverrsnitt			Utnyttelse
	Bredde	Høyde	Areal	
	m	m	m <sup>2</sup>	
B1	0,215	0,315	0,067725	73 %
B2	0,115	0,27	0,03105	79 %
D1	0,140	0,135	0,0189	71 %
D2	0,140	0,405	0,0567	77 %
D3	0,140	0,09	0,0126	60 %
D4	0,140	0,225	0,0315	79 %
D5	0,140	0,09	0,0126	21 %
D6	0,14	0,135	0,0189	42 %
Areal av diagonalene 1-12				0,1512

### H.3 Beregning og sammenligning av volum

Limtrefagverk (uten omgjøringer fra FEM-Design)

#### Volumberegninger

VINKE	Diagonaler		Overgurt	Volum	m3	Undergurt	Volum	m3	Totalt	Volum	m3
	Lengde	Volum									
	m	m3									
40	3,2635	0,9457623	3,19275	1,035	5,1735123						
45	3,5356	1,02461688	2,61225	1,485	5,12186688						
50	3,889	1,0290294	2,322	1,209375	4,5604044						
52	4,061	1,1257092	2,322	1,06875	4,5164592						
55	4,3586	1,20820392	2,03175	1,0125	4,25245392						
60	5	0,756	2,03175	0,77625	3,564						

H.4 Sammenligninger ved ulike vinkler

Limtrefagverk (uten omgjøringer fra FEM)

Lengde overgurt [m]	30
Lengde undergurt [m]	25

Densitet [kg/m3]	400
Utslipp [CO2-eg/kg]	0,2
Pris [kr/kg]	40

Vinkel grader	Totalt volum m3	Høyde m	Nedbøyning mm	Utslipp kg CO2-eg	Pris kr
40	5,1735	2,8177	46,3	413,88	82776
45	5,1219	3,175	38,6	409,752	81950,4
50	4,5604	3,564	31,3	364,832	72966,4
52	4,516452	3,83	31,4	361,31616	72263,232
55	4,2625	4,155	27,7	341	68200
60	3,564	4,825	23,7	285,12	57024

Merknad

1. Beregning av volum er gjort under fane: "Tverrsnitt"
2. For enkel sammenligning er det benyttet anbefalt tverrsnitt for gurtene i FEM-design
3. Ikke tatt hensyn til skruer, montasje og transport i utslipp og pris

H.5 Sammenligning av valg av tverrsnitt FEM-Design/Mathcad

Limtrefagverk 50 grader

	FEM-design	Omgjøring	Kontroll Mathcad	Utnyttelse
	mm x mm	mm x mm		
OVERGURT	215 x 360	215 x 225	OK	59,80 %
		190 x 225	OK	78,00 %
		165 x 270	OK	74,80 %
		140 x 315	OK	75,60 %
		115 x 360	OK	80,00 %
UNDERGURT	140 x 360	215 x 270	OK	72,90 %
		190 x 315	OK	70,50 %
		165 x 360	OK	70,90 %
		140 x 315	IKKE OK	95,70 %
		140 x 360	IKKE OK	83,50 %
		140 x 405	OK	74,10 %
		115 x 315	IKKE OK	116,00 %
DIAGONALSTAVER	165 x 225 140 x 315	115 x 360	IKKE OK	101,00 %
		90 x 450	IKKE OK	103,00 %
			OK OK	

## H.6 Minste mulige tverrsnitt (maks utnyttelse 80 %)

Verdiene her kommer fra FEM-design. Symmetri om diagonalstaver 6-7

VINKEL 40

	Tverrsnitt		Utnyttelse
	Profil	Areal [mm2]	
B1	HEA 220	6434	69 %
B2	HEA 100	2124	78 %
T1	VKR 100x50x3	854	75 %
T2	VKR 100x100x4	1519	66 %
T3	VKR 50x30x3	434	79 %
T4	VKR 80x80x3.6	1086	75 %
T5	VKR 20x20x2	134	78 %
T6	VKR 60x60x3	674	62 %
Areal diagonaler		9402	

VINKEL 45

	Tverrsnitt		Utnyttelse
	Profil	Areal [mm2]	
B1	HEA 220	6434	57 %
B2	HEA 100	2124	66 %
T1	VKR 70x70x3	794	76 %
T2	VKR 100x100x4	1519	68 %
T3	VKR 50x30x3	434	71 %
T4	VKR 80x80x3.6	1086	78 %
T5	VKR 20x20x2	134	76 %
T6	VKR 60x60x3	674	70 %
Areal diagonaler		9282	

VINKEL 50

	Tverrsnitt		Utnyttelse
	Profil	Areal [mm2]	
B1	HEA 200	5384	66 %
B2	HEA 100	2124	68 %
T1	VKR 60x40x4	719	77 %
T2	VKR 90x90x4	1359	76 %
T3	VKR 50x30x3	454	69 %
T4	VKR 80x80x3	1086	68 %
T5	VKR 25x25x2	174	73 %
T6	VKR 60x60x3	674	57 %
Areal diagonaler		8932	

VINKEL 55

	Tverrsnitt		Utnyttelse
	Profil	Areal	
B1	HEA-200	5384	59 %
B2	HEA-100	2124	46 %
T1	VKR 60x60x3	674	76 %
T2	VKR 100x100x4	1519	80 %
T3	VKR 50x30x2.5	368	73 %
T4	VKR 90x90x3.6	1230	67 %
T5	VKR 20x20x2	134	67 %
T6	VKR 70x70x3	794	54 %
Areal diagonaler		9438	

VINKEL 60

	Tverrsnitt		Utnyttelse
	Profil	Areal	
B1	HEA-180	4525	70 %
B2	HEA-100	2124	38 %
T1	VKR 60x60x3	674	72 %
T2	VKR 100x100x5	1873	79 %
T3	VKR 50x30x2.5	368	69 %
T4	VKR 90x90x4	1359	75 %
T5	VKR 20x20x2	134	61 %
T6	VKR 70x70x3	794	66 %
Areal diagonaler		10404	

Volum

Vinkel	Gurter [m3]	Diagonaler [m3]	Totalt [m3]
40	0,24612	0,03068343	0,27680343
45	0,24612	0,03272462	0,27884462
50	0,21462	0,00262119	0,21724119
55	0,21462	0,04113647	0,25575647
60	0,18885	0,05202	0,24087



H.7 Sammenligning ved ulike vinkler

Stålfagverk

LENGDE OGURT [m]	30
LENGDE UGURT [m]	25

Stål-verdier

Densitet [kg/m3]	7800
Utslipp CO2-eq/kg	1,7
Pris [kr/kg]	37

VINKEL Grader	Totalt volum m3	Høyde Fagverk m	Nedbøyning mm	Utslipp CO2-eq	Pris kr
40	0,2768	2,4037	102,8	3670,368	79884,48
45	0,2788	2,806	78,1	3696,888	80461,68
50	0,2172	3,265	61,9	2880,072	62683,92
55	0,2557	3,856	51,2	3390,582	73795,02
60	0,2409	4,597	43,8	3194,334	69523,74

Merknad

- 1. Ikke tatt hensyn til transport og sveis i utslipp og pris
- 2. Forenklet utslippsverdi for stål for enkel sammenligning

### H.8 Sammenligning av utslipp og pris i produktfasen A1-A3

Limtre- og stålfagverk med vinkel 50 grader

Konstruksjonsdel	Tverrsnitt	Enhet	Utslipp	Pris/kg	Antall	Areal	Lengde	Volum	Densitet	Utslipp	Pris
Stål		m <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub> -eq/kg		stk	m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq	kr
Gurter HEA											
Overgurt	HEA-200	kg	1,24	37	1	5,38E-03	30	1,62E-01	7800	1556,9	46614,7
Undergurt	HEA-100	kg	1,24	37	1	2,12E-03	25	5,31E-02	7800	511,8	15324,7
Diagonaler HFRHS											
D1/D12	60 x 40 x 4	kg	2,18	37	2	7,19E-04	2,89	4,15E-03	7800	70,5	1199,0
D2/D11	90 x 90 x 4	kg	2,18	37	2	1,36E-03	2,89	7,85E-03	7800	133,3	2266,2
D3/D10/D5/D8	40 x 40 x 3,2	kg	2,18	37	4	4,66E-04	2,89	5,39E-03	7800	91,4	1554,1
D4/D9	80 x 80 x 3	kg	2,18	37	2	1,09E-03	2,89	6,27E-03	7800	106,5	1810,9
D6/D7	60 x 60 x 3	kg	2,18	37	2	6,74E-04	2,89	3,89E-03	7800	66,1	1123,9
TOTALT											
								0,24		2536,5	69893,5

Bredde	Høyde	Enhet	Utslipp	Pris/enhet	Antall	Areal	Lengde	Volum	Densitet	Utslipp	Pris
Limtre	m	m	CO <sub>2</sub> -eq/kg		stk	m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq	kr
Gurter											
Overgurt	0,14	0,315	m <sup>3</sup>	40	2	4,41E-02	30	2,65	400	209,0	42336,0
Undergurt	0,14	0,405	m <sup>3</sup>	40	2	5,67E-02	25	2,84	400	224,0	45360,0
Diagonaler											
D1/D6/D7/D12	0,14	0,135	m <sup>3</sup>	40	4	1,89E-02	2,89	0,22	400	17,3	3494,5
D2/D11	0,14	0,27	m <sup>3</sup>	40	2	3,78E-02	2,89	0,22	400	17,3	3494,5
D3/D5/D10/D8	0,14	0,09	m <sup>3</sup>	40	4	1,26E-02	2,89	0,15	400	11,5	2329,7
D4/D9	0,14	0,225	m <sup>3</sup>	40	2	3,15E-02	2,89	0,18	400	14,4	2912,1
Skruer WT-T 8,2 330			stk	65	200	5,28E-05	0,33	0,00	7800	46,2	13000,0
TOTALT											
								6,25		539,6	112926,9

## **Vedlegg I: Relevant korrespondanse**



**Fra:** Nyløkken, Trond Egil Trond-Egil.Nyløkken@moelven.no   
**Emne:** SV: Problemstilling dimensjonering tre  
**Dato:** 31. januar 2019 kl. 13:59  
**Til:** Guttorm Kollbotn Selnes gkselnes@outlook.com  
**Kopi:** Stine Rennan stineer@gmail.com Henriette Strehl h.h.strehl@gmail.com

---

TN

Hei.

Mitt forslag, dersom dere vil ha en litt annerledes oppgave, er å skrive en oppgave om fagverk laget av standard dimensjoner og sammenføyd med skruer.

Over og undergurt er doble mens stavene er enkle, se vedlagte bilder.

Med standard mener jeg bredder 90,115,140,165,190 og 215

Standard høyder for gran er 225,270,315,360,405 450 etc

Dette kan gjøre fagverk i limtre meget konkurransedyktige mot massive bjelker i limtre og fagverk i stål.

Ta gjerne kontakt dersom dere har noe mer dere lurte på.

Med vennlig hilsen

**Trond Egil Nyløkken**

Konstruksjonssjef

**Moelven Limtre AS**

Telefon: +4799693849

[moelven.no/Limtre](http://moelven.no/Limtre)

[Twitter](#) | [Linkedin](#) | [Facebook](#) | [Youtube](#)

**MOELVEN** Gode rom

